

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

RODOLFO DE FREITAS VALLE DRESCH

PROJETO DE DIPLOMAÇÃO

**MÉTODO DE ANÁLISE DO ESTADO DE CARGA
REstante DE BATERIAS DE CELULAR**

Porto Alegre

2010

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**MÉTODO DE ANÁLISE DO ESTADO DE CARGA
RESTANTE DE BATERIAS DE CELULAR**

Projeto de Diplomação apresentado ao
Departamento de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
como parte dos requisitos para Graduação em
Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro

Porto Alegre

2010

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

RODOLFO DE FREITAS VALLE DRESCH

MÉTODO DE ANÁLISE DO ESTADO DE CARGA RESTANTE DE BATERIAS DE CELULAR

Este projeto foi julgado adequado para fazer jus aos créditos da Disciplina de “Projeto de Diplomação”, do Departamento de Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____

Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro- UFRGS

Doutor pela UFRGS-Porto Alegre, Brasil

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Renato Machado de Brito, UFRGS

Doutor pela UFRGS-Porto Alegre, Brasil

Prof. Dr. Eduardo Luis Schneider, FEEVALE

Doutor pela UFRGS/PPGEM – Porto Alegre, Brasil

Porto Alegre, Dezembro de 2010

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, pela dedicação e apoio dado em todas as etapas da minha vida, a eles devo tudo que sou e tudo que conquistei até hoje.

AGRADECIMENTOS

Aos pais Renato e Neiva, pelo apoio incondicional a tudo que fiz até hoje.

À minha avó Noeli, por sempre estar orando por mim e ajudando-me, quando precisei.

Aos colegas Caetano Lazzari, Jean Winter, André Lange, pelo auxílio nos estudos e pela amizade durante dentro e fora do curso.

Aos meus irmãos Rafael e Renata e à minha namorada Jocelene, que me incentivam e torcem por mim.

Aos Profs. Drs. Eduardo Schneider e Renato Machado de Brito, pelo auxílio durante o desenvolvimento do trabalho.

Ao meu orientador Prof. Dr. Luiz Tiarajú do Reis Loureiro, pela amizade e ensinamentos.

RESUMO

Nos anos 1980 se falava em uma verdadeira possibilidade que era o escritório sem papel, com base no uso dos computadores. Mas nunca se usou tanto recurso naturais como hoje. Atualmente, tem-se a preocupação cada vez maior de dar-se um tratamento melhor e qualificado para o crescente lixo eletrônico, atualmente denominado e-lixo. O Brasil não dispõe de uma legislação federal para o descarte correto de lixo eletrônico, por isso uma montanha imensurável de baterias de celular, televisões, computadores, pilhas, aparelhos de celular e outros eletrônicos obsoletos, cuja vida útil é cada vez menor, ronda a população, trazendo prejuízos para o meio ambiente e para a saúde pública. O telefone celular está entre os eletrônicos que conquistaram de forma mais rápida consumidores em todo o planeta. Em 2009, foram 45,5 milhões de vendas de uma mercadoria com tempo de uso médio de um ano e meio. Com o presente trabalho, utilizando ensaio de descarga por corrente constante CC, foi possível obter, de um modo rápido e eficiente, a quantidade de energia restante, o estado de carga, das baterias de celular descartadas pela população. E com isto mostrar que muitas das baterias descartadas ainda poderiam ser reutilizadas como fonte de energia.

Palavras-chaves: Baterias de telefones celulares de íon lítio, Energia restante, Estado de carga (SoC),

ABSTRACT

In the 1980s there was a true possibility about the paperless office, based on the use of computers. However, there have never been so many natural resources in use as today. Nowadays, there is a growing concern to give a better and more qualified treatment to the increasing electronic waste, the so-called e-waste. Brazil does not have a federal law for the proper disposal of electronic waste. Therefore, an immeasurable amount of cell phone batteries, televisions, computers, batteries, cell phone devices and other obsolete electronic goods, whose shelf life is constantly decreasing, threatens the population, bringing harm to the environment and to the public health. The cell phone is among the electronics which have quickly attracted consumers throughout the world. In 2009, there was a 45,5-million sale of a specific product with an average usage time of a year and a half. In this study, through the unloading constant current CC test, it was possible to obtain, in a fast and efficient way, the amount of energy remaining and the state of the charge from the mobile batteries discarded by the population, showing that many of the discarded batteries could still be reused as an energy source.

Keywords: Rechargeable lithium-ion cell phone batteries, Remaining energy, State of Charge (SoC)

Sumário

| | |
|---|-----------|
| INTRODUÇÃO | 11 |
| 1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 15 |
| 1.1. BATERIAS | 15 |
| 1.2. COMPONENTES DAS BATERIAS..... | 19 |
| 1.3. PRINCÍPIOS TEÓRICOS..... | 21 |
| 1.3.1. Energia Livre..... | 21 |
| 1.3.2. Tensão Teórica..... | 21 |
| 1.3.3. Capacidade Teórica..... | 22 |
| 1.4. FATORES IMPORTANTES NO DESEMPENHO DAS BATERIAS..... | 23 |
| 1.4.1. Perdas por polarização..... | 23 |
| 1.4.2. Impedância interna da bateria..... | 24 |
| 1.4.3. Auto-descarga e envelhecimento das baterias..... | 25 |
| 1.5. TIPO DE BATERIAS UTILIZADAS EM CELULARES [5]..... | 26 |
| 1.5.1. Baterias de NiMH..... | 27 |
| 1.5.2. Baterias de Li-Íon..... | 29 |
| 1.6. DETERMINAÇÃO DO ESTADO DE CARGA E DO ESTADO DE SAÚDE..... | 31 |
| 1.6.1. História do desenvolvimento da indicação do SoC e SoH..... | 32 |
| 2. metodologia de Trabalho | 41 |
| 2.1. MÉTODO DE ANÁLISE DAS BATERIAS..... | 41 |
| 2.2. BANCADA UTILIZADA PARA O ENSAIO DAS BATERIAS..... | 44 |
| 3. RESULTADOS OBTIDOS..... | 47 |
| 3.1. ANÁLISE DOS RESULTADOS..... | 51 |
| CONCLUSÃO: | 54 |
| Referências | 56 |

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura-1 Pilha de Volta [7]..... | 16 |
| Figura-2-Pilha de Daniell [6]..... | 17 |
| Figura-3- Pilha Seca [adaptado de 9]. | 18 |
| Figura-4 Pilha Alcalina [adaptado de 10]..... | 19 |
| Figura-5 Polarização em uma célula em função da corrente de polarização [adaptado de 5].. | 25 |
| Figura-6 Processos eletroquímicos numa bateria NiMH [5]..... | 29 |
| Figura-7 Processo eletroquímico numa bateria Li-Íon [5]. | 30 |
| Figura-8 Medidor do SoC "Nível de Combustível". | 32 |
| Figura-9 Baterias obtidas para este projeto, da marca LGIP-411A..... | 44 |
| Figura-10 Bancada de teste utilizada para os ensaios..... | 45 |
| Figura-11 Esquemático do circuito elétrico da bancada de teste [5]..... | 46 |
| Figura-12 a) Bateria sem os terminais, b) terminais retirado das baterias. | 47 |
| Figura-13 a) Dois conjuntos de baterias ligadas em série. b) Baterias conectadas na bancada de teste para os ensaios..... | 48 |
| Figura-14 Gráfico da potência da bateria ao longo do tempo. | 49 |
| Figura-15 Energia fornecida pela bateria durante a descarga..... | 50 |
| Figura-16 Comparação do desempenho da bateria considerada nova (2_1), bateria em boas condições (1_4) e da bateria com pior desempenho (1_2). | 53 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 Principais características do desenvolvimento de algoritmos para determinar o SOC e SOH. | 40 |
| Tabela 2 Energia retirada das baterias em relação á bateria considerada nova. | 51 |

INTRODUÇÃO

Nos dias de hoje, tem-se a preocupação cada vez maior de dar-se um tratamento melhor e qualificado para o crescente lixo eletrônico, atualmente denominado *e-lixo*. O desenvolvimento tecnológico da sociedade traz com ela também o descarte das tecnologias obsoletas e defeituosas.

Um dos grandes entraves à questão do *e-lixo* remonta à década de 1980, quando se estabeleceu o consenso da desmaterialização da economia. Em um mundo moderno, seria cada vez mais desnecessário extrair recursos da natureza. Isto seria possível em um mundo informatizado, que consumiria menos papel e menos tinta, por exemplo, dando lugar a atividades realizadas no plano virtual.

Nos anos 80 se falava em uma verdadeira possibilidade que era o escritório sem papel, com base no uso dos computadores. No entanto, nunca se usou tanto recurso natural como hoje. Durante o século XX a população mundial cresceu quatro vezes, enquanto a extração de cobre, 25 vezes. A produção de plástico cresceu 41 vezes em 40 anos. O planeta não suportará essa extração de recursos indefinidamente [1].

A sociedade atual vive diante de um paradoxo que deve ser resolvido em curto prazo: como compatibilizar a produção crescente e um mercado que oferece equipamentos *high-tech* cada vez mais acessíveis – computadores mais velozes, telefones celulares com diversas utilidades, aparelhos de som, DVDs (Digital Video Disc), televisores etc., com o grande desperdício de recursos naturais e a contaminação do meio-ambiente causada pelo próprio processo de produção destes equipamentos e pelo rápido e crescente descarte dos mesmos. Seja por causa da sua rápida obsolescência ou por estarem danificados, os mesmos estão

sendo despejados em aterros sanitários ou outros locais inapropriados onde as formas de reaproveitamento dos mesmos são as mais rudimentares e precárias. Associa-se a isso a inexistência de uma política de regularização destes detritos ou, no máximo, um tímido conjunto de dispositivos legais que não atendem minimamente as reais necessidades de preservação ambiental, causando danos já devidamente constatados à própria saúde humana, inclusive nos países considerados desenvolvidos [2].

O telefone celular está entre os eletrônicos que conquistaram de forma mais rápida consumidores em todo o planeta. O aparelho chegou à marca de 50 milhões de usuários em cinco anos. A televisão demorou treze anos para atingir um público semelhante. Hoje, existem mais de 2,5 bilhões de celulares no mundo – o equivalente a mais de 40% da população global. Em 2010, serão mais de cinco bilhões. De acordo com o relatório anual de 2008 da Anatel (Agência Nacional de Telecomunicações) em 2008, no Brasil, foram habilitados 29,7 milhões de acessos e, ao final do exercício, dos 150,6 milhões de acessos habilitados, 81,5% eram de pré-pagos e 18,5% de pós-pagos. A teledensidade (número de acessos por grupo de 100 habitantes) correspondente ao número total de celulares habilitados avançou de 63,6%, em 2007, para 78,1%, no final de 2008. Com essa quantidade de aparelhos celulares em uso no Brasil, segundo a UIT (União Internacional de Telecomunicações), o país foi o terceiro entre os países que mais atraíram novos assinantes do serviço, ficando atrás apenas da China e da Índia [2].

O Brasil não dispõe de uma legislação federal que discipline o descarte correto de lixo eletrônico, por isso uma montanha imensurável de baterias de celular, televisões, computadores, pilhas, aparelhos de celular e outros eletrônicos obsoletos, cuja vida útil é cada vez menor, ronda a população, trazendo prejuízos para o meio ambiente e para a saúde

pública. O troca-troca não se dá apenas pelas deficiências do equipamento que surgem em função do tempo de uso, mas muitas vezes, por pura vaidade, ou seja, para que o consumidor possa exibir um aparelho com design mais moderno. E isso é, especialmente, verdade quando o produto em questão são os celulares. Em 2009, foram 45,5 milhões de vendas de uma mercadoria com tempo de uso médio, atualmente, de um ano e meio.

Os telefones celulares são alimentados por diversos tipos de baterias recarregáveis e, muitas dessas, contêm substâncias tóxicas e metais pesados, tais como cádmio, níquel, zinco e cobre, capazes de contaminar o meio ambiente quando incineradas ou dispostas em aterros. O impacto das baterias no lixo comum depende da quantidade gerada e da toxicidade das mesmas. A quantidade de resíduos gerada é uma função da vida útil da bateria e de seu tamanho. Já a toxicidade dos resíduos depende da composição do material da bateria. Além disso, os carregadores (também chamados de fontes de alimentação ou adaptadores) utilizados para carregar as baterias possuem componentes tóxicos e são um dos principais contribuintes ao desperdício e a geração de resíduos de celulares [2]

Muitos dos celulares que deixam de ser utilizados são descartados por terem tecnologias obsoletas ou por apresentarem algum defeito que o deixe de funcionar. Nestes casos as baterias desses celulares ainda teriam condições de serem reutilizadas, por estarem funcionando, ou por apresentarem defeitos na parte eletrônica.

Outro ponto importante é que a reciclagem e a fabricação de novas baterias recarregáveis, em geral, tem associado a ela emissão de gases e consumo enorme de energia, em torno de 1,9 milhões de kWh para 2 milhões de dólares produzidos. Apesar de a utilização e recarga de baterias também terem associados a emissão de gases e consumo de energia, o custo energético para recarregar 200 vezes a mesma quantidade de baterias é de 0,17 milhões

de kWh [3]. Ou seja, o fim mais correto ambientalmente para as baterias descartadas pela população é a reutilização para outros fins e não a remanufatura.

O objetivo é realizar um estudo sobre algum método rápido e eficaz de testar o estado de carga dessas baterias. Realizando ensaios com o método estipulado, definir quais baterias poderiam ou não ser reutilizadas. Assim, amenizar o problema resolvido há pouco tempo pela cidade de Dois Irmãos no RS que lutou na justiça por seis anos para que os fabricantes recolhessem 12 toneladas de pilhas e baterias arrecadadas pela população desde 1990, conforme veiculado pela Zero Hora [4].

1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1. BATERIAS

Bateria é um dispositivo que transforma a energia química armazenada nos materiais ativos em energia elétrica, através de uma reação eletroquímica de oxidação-redução (redox). No caso dos sistemas recarregáveis, a baterias é recarregada pelo processo reverso. Esse tipo de reação envolve a transferência de elétrons de um tipo de material para outro através de um circuito elétrico [5].

Em 1800 Alessandro Volta, professor de Física, compreendeu que a eletricidade não havia sido gerada pelo animal, mas pelos metais diferentes mergulhados no mesmo meio líquido (o corpo animal contém líquido). Em 1795, conseguiu obter eletricidade, mergulhando um pedaço de cobre e um de zinco em uma solução de ácido sulfúrico, construindo o primeiro gerador elétrico. Para aumentar o efeito do seu gerador, Volta empilhou laminas de cobre e zinco, separados por panos úmidos em solução de ácido. Esse dispositivo ficou conhecido como pilha de Volta ou simplesmente pilha, fig.1 [6].



Figura-1 Pilha de Volta [7].

Em 1836 John Daniell, teve a percepção de que poderia arranjar a reação para realizar trabalho, fazendo a separação das semi-reações de oxidação e de redução em sua célula. A reação química é a mesma, mas os reagentes estão separados por uma vasilha porosa. A passagem dos átomos de zinco para os íons de Cu^{2+} ocorre em um circuito externo, que liga um eletrodo ao outro.

Na célula de Daniel, as soluções de sulfato de zinco e de sulfato de cobre (II) se encontram dentro da barreira porosa para completar o circuito. Contudo, quando íons diferentes misturam-se, isto afeta a tensão medida de variadas maneiras, que são difíceis de medir. Para prevenir a mistura das soluções, os químicos usam ponte salina, mostrado na fig. 2, para unir os dois compartimentos de eletrodo e completam assim o circuito elétrico. Uma ponte salina típica consiste de um gel contendo uma solução salina aquosa concentrada em tubo em forma de ponte. A ponte permite o fluxo de íons, e assim completa o circuito elétrico, mas são íons que não afetam a reação da célula [6]. Com isto foi possível conseguir correntes elétricas confiáveis e estáveis.

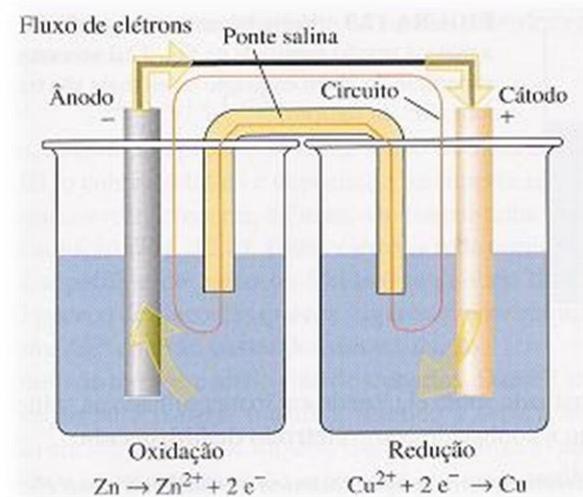


Figura-2-Pilha de Daniell [6].

Em 1859, Gaston Planté desenvolve o primeiro modelo de bateria recarregável, constituído por duas lâminas de chumbo, separadas por tiras de borracha e enroladas como um cilindro que se imergia numa solução aquosa ácida a 10% de ácido sulfúrico. O estudo das reações ocorridas na bateria de Planté pode ser resumido a duas equações:



Este tipo de bateria é usado em carros até hoje.

Em 1865, George Leclanché, desenvolveu a pilha seca, que são as precursoras das atuais pilhas utilizadas largamente em equipamentos eletrônicos. A pilha de Leclanché é formada por um cilindro de zinco metálico, que funciona como ânodo, separado das demais espécies químicas presentes na pilha por um papel poroso. O cátodo é o eletrodo central. Este consiste de grafite coberto por uma camada de dióxido de magnésio, carvão em pó e uma pasta úmida contendo cloreto de amônio e cloreto de zinco. Esta pilha tem caráter ácido,

devido a presença de cloreto de amônio. A expressão pilha seca é apenas uma designação comercial que foi criada há muitos anos para diferenciar este tipo de pilha (revolucionário na época) das pilhas até então conhecidas, que utilizavam recipientes com soluções aquosas, como a pilha de Daniell [8].

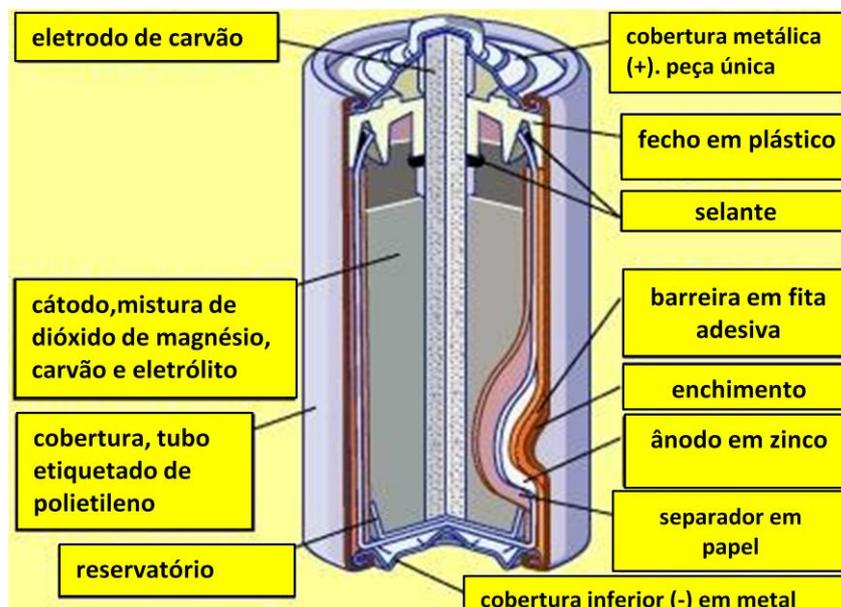


Figura-3- Pilha Seca [adaptado de 9].

Entre os anos 1940-50, o cientista Samuel Rubens com a empresa americana Mallaroy (atualmente Duracell) desenvolveram a pilha alcalina [10]. Esta bateria é composta de um ânodo de zinco poroso imerso em uma solução (mistura eletrolítica) alcalina de hidróxido de potássio ou de hidróxido de sódio (bases), e de um cátodo de dióxido de manganês compactado, envoltos por uma capa de aço niquelado, além de um separador feito de papel e de um isolante de nylon.



Figura-4 Pilha Alcalina [adaptado de 10].

1.2. COMPONENTES DAS BATERIAS.

A unidade eletroquímica básica, a célula, é composta por cátodo, ânodo e o eletrólito. A bateria consiste de uma ou mais células associadas em série ou paralelo, dependendo da tensão e da capacidade desejadas. Quando liga-se células em série, deseja-se tensões maiores, a ligação em paralelo visa obter maiores capacidades. Em paralelo, é importante que a corrente seja homogênea em cada célula, apesar de que, se houver diferença de tensão inicial, depois de um tempo de uso, as tensões se equalizam [5].

A célula consiste em três principais componentes:

1. Ânodo ou eletrodo negativo: sofre a reação de oxidação durante o processo de descarga (uso) da bateria.
2. Cátodo ou eletrodo positivo: sofre a reação de redução durante o processo de descarga (uso) da bateria.

3. Eletrólito (condutor iônico): serve como meio para transferência de carga (íons) entre o ânodo e o cátodo e deve ser um bom condutor iônico.

A combinação ideal dos materiais do ânodo e do cátodo é aquela que torne o produto mais leve e com alta capacidade. Fisicamente, o ânodo e o cátodo são isolados na célula para prevenir curtos-circuitos internos, mas são rodeados pelo eletrólito. No design da célula, um material é usado para separar mecanicamente o ânodo e o cátodo. No entanto, para manter a condutividade iônica desejada, o separador é permeável para eletrólito. A célula pode ser fabricada de várias formas e configurações: cilíndricas, achatadas, prismática. As células são seladas de diversas maneiras para prevenir vazamentos e ressecamentos. Algumas células possuem dispositivos de ventilação ou outras maneiras para controlar o escapamento de gases acumulados.

Em um sistema usual, deseja-se o ânodo com as seguintes propriedades: eficiência como um agente redutor, alta saída de carga específica (Ah/g), boa condutividade, estabilidade, fácil fabricação, e baixo custo. O Lítio, metal mais leve, tornou-se um ânodo muito atrativo e conveniente, de modo que eletrólitos compatíveis e design de células têm sido desenvolvidos para controlar sua atividade.

O cátodo precisa ser um eficiente agente oxidante, ser estável quando entrar em contato com o eletrólito. Os materiais normalmente utilizados como cátodos são os óxidos metálicos. Outros materiais de cátodos, tal como elementos da série dos halogênios, enxofre e seus óxidos, são usados como cátodos em sistemas especiais de baterias.

O eletrólito precisa ter uma boa condutividade iônica, mas não pode ser um condutor elétrico, pois neste caso causaria um curto circuito. Outras propriedades importantes são: não

ter reatividade com o material dos eletrodos, ter pequena variação nas propriedades com a variação de temperatura, ser de fácil manuseio, e de baixo custo.

1.3. PRINCÍPIOS TEÓRICOS.

1.3.1. Energia Livre.

Nas células das baterias, sempre que ocorre uma reação, há uma diminuição na energia livre do sistema, que é expressa como [11]:

$$\Delta G_0 = -nFE_0 \quad \text{Equação 3}$$

Onde ΔG_0 = Energia livre de Gibbs padrão;

F = Constante de Faraday (96500 C/mol ou 26,8Ah)

n = Números de elétrons envolvidos na reação estequiométrica;

E_0 = Tensão padrão, V;

1.3.2. Tensão Teórica.

O potencial padrão da célula é determinado pelo tipo de material contido na mesma e pode ser calculado a partir de dados de energia livre ou obtido experimentalmente. O potencial padrão de uma célula pode ser calculado a partir dos potenciais dos eletrodos padrões, considerando a temperatura ambiente de 25°C, pela soma do potencial de oxidação do ânodo com o potencial de redução do cátodo.

$$\hat{\text{Ânodo}} (\text{Potencial de Oxidação}) + \hat{\text{Cátodo}} (\text{Potencial de Redução}) = \text{Potencial padrão da célula.}$$

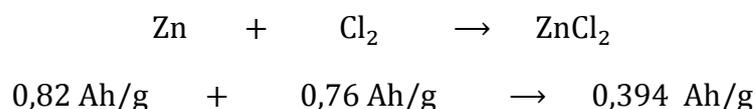
Quando a temperatura da reação for diferente da padrão, a tensão E de uma célula é dada pela equação de Nernst,

$$E = E^0 - \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_C^c a_D^d}{a_A^a a_B^b} \quad \text{Equação 4}$$

Onde E^0 é o potencial padrão; R é a constante universal dos gases ($8,315 \text{ J K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$); T é a temperatura em escala absoluta; F é a carga elétrica de um mol de elétrons; n é o número de elétrons transferidos; a_i é a atividade das espécies relevantes (que pode ser aproximado pelo produto das concentrações dos produtos, elevadas a seus respectivos coeficientes estequiométricos, dividido pelo produto análogo das concentrações dos reagentes da reação redox) [5].

1.3.3. Capacidade Teórica.

A capacidade teórica de uma célula é determinado pela quantidade de materiais ativos na célula. É expressa como a quantidade total de elétrons envolvidos na reação eletroquímica e é definida em termos de coulombs (C) ou ampéres hora (Ah). A capacidade teórica de uma célula eletroquímica, com base apenas nos materiais ativos que participam da reação eletroquímica, é calculado a partir do equivalente ao peso dos reagentes. Assim, a capacidade teórica da célula de Zn/Cl₂ é 0,394Ah/g que é,



A capacidade de uma célula pode também considerada em relação a energia (watt hora), considerando a tensão e a quantidade de elétrons envolvidos na reação. Esse valor teórico de energia é o valor máximo que pode ser entregue por um sistema eletroquímico específico:

$$\text{Watt hora (Wh)} = \text{tensão (V)} \times \text{Ampéres hora (Ah)} \quad \text{Equação 5}$$

1.4. FATORES IMPORTANTES NO DESEMPENHO DAS BATERIAS.

1.4.1. Perdas por polarização.

Durante a descarga é desejável que toda a energia seja convertida em energia elétrica. No entanto, perdas devido à polarização ocorrem quando a corrente passa através dos eletrodos acompanhando as reações eletroquímicas. Essas perdas incluem:

(1) A polarização por ativação que está relacionada com o controle da velocidade das reações eletroquímicas na superfície do eletrodo e é dependente da transferência de carga na interface [4];

(2) A polarização por concentração, que decorre da diferença de concentração dos reagentes e produtos na superfície do eletrodo e na maior parte como resultado da transferência de massa.

Estes efeitos de polarização consomem parte da energia fornecida na forma de calor, e, portanto, nem toda a energia teoricamente disponível, armazenada nos eletrodos, é convertida em energia elétrica. Em princípio, a polarização por ativação e polarização por concentração pode ser calculada a partir de várias equações teóricas, se alguns parâmetros eletroquímicos e as condições de transferência de massa estiverem disponíveis. No entanto, na prática, é difícil determinar os valores de ambas por causa da complicada estrutura física dos eletrodos. A maioria das baterias são compostas de materiais ativos, ligantes, aditivos para melhoria de desempenho do condutor e geralmente possuem uma estrutura porosa de espessura finita. Para determinar os componentes de polarização são exigidos modelagem matemática complexa com auxílio do computador.

1.4.2. Impedância interna da bateria.

Há outro fator importante que afeta fortemente o desempenho ou a capacidade da célula, a impedância interna da célula. Ela provoca uma queda de tensão durante a operação, que também consome parte da energia na forma de calor. A queda de tensão devido a impedância interna é normalmente referido como polarização ôhmica ou “queda” IR e é proporcional à corrente do sistema. A impedância interna total de uma célula é a soma: da resistência do eletrólito (dentro do separador e os eletrodos porosos), as resistências eletrônica da massa ativa, os coletores de corrente elétrica e dos contatos elétricos de ambos os eletrodos e da resistência de contato entre a massa ativa e corrente de coletor.

A tensão útil fornecida pela célula é reduzida pela polarização e pela queda IR. Somente em correntes muito baixa, onde a polarização e a queda IR são pequenas, que a célula pode operar perto da tensão de circuito aberto e entregar maior parte da energia teoricamente disponível. A fig.5 mostra a relação entre a polarização da célula e corrente de descarga.

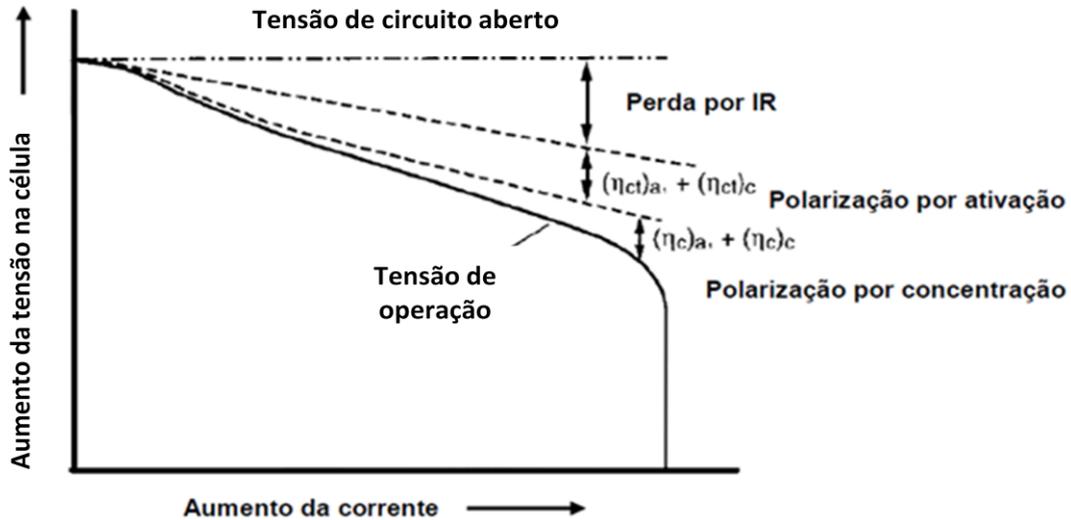


Figura-5 Polarização em uma célula em função da corrente de polarização [adaptado de 5].

A resistência interna é um forte indicativo do estado de desgaste de uma bateria. A comparação dos valores atuais com os anteriores é bastante relevante para avaliação do estado de desgaste de uma bateria. Fonseca [12] cita estudos que criticam o uso da medida de impedância da bateria para sua avaliação. Pois, desaprova o procedimento de utilizar a impedância para avaliar o estado de carga da bateria e como critério de aceitação de baterias novas. Segundo o autor, a impedância interna de baterias novas, totalmente carregadas, possui uma tolerância de $\pm 10\%$ entre elas. Mas conclusões citadas pelo autor reconhecem o mérito do uso da medida de impedância para detectar falhas físicas na bateria.

1.4.3. Auto-descarga e envelhecimento das baterias.

Em relação às baterias, o sistema eletroquímico, a temperatura e o tempo de armazenamento são fatores que afetam sua vida útil. Todas as baterias apresentam certa quantidade de auto-descarga, principalmente aquelas à base de níquel. Como regra geral, uma bateria a base de níquel se auto-descarrega cerca de 10 % da sua capacidade nas primeiras 24

horas de uso e cerca de 10 % a cada mês subsequente. A auto-descarga das baterias de lítio é menor, sendo cerca de 5 % nas primeiras 24 horas e de 1 a 2 % a cada mês subsequente.

A auto-descarga em uma bateria aumenta gradualmente com: a alta temperatura, o aumento do ciclo, a idade e presença de um circuito de proteção. Em baterias com alta ciclagem, a energia armazenada é perdida ao longo do dia, mais através da auto-descarga do que da utilização real e, nestes casos, este efeito é irreversível e a bateria deveria ser descartada.

1.5. TIPO DE BATERIAS UTILIZADAS EM CELULARES [5].

As baterias recarregáveis geram menos resíduos que as baterias descartáveis porque podem ser recarregadas mais de centenas de vezes. Porém, essas baterias possuem materiais tóxicos tais como cádmio, níquel, zinco e cobre, que podem gerar problemas ambientais.

A velocidade de evolução das baterias é baixa quando comparada com a do desenvolvimento do setor de tecnologia da informação. Os telefones celulares e outros aparelhos eletrônicos sem fio vêm adquirindo novas funções, maiores velocidades de processamento e diminuindo seus consumos de energia. Enquanto em sete anos a capacidade de processamento dos semicondutores aumentou em 2600%, as tecnologias das baterias aumentaram somente em 65% [2].

Ao mesmo tempo, o esforço em direção à portabilidade está aumentando a pressão em fazer estes dispositivos menores e mais leves. Isto teve um grande impacto nas indústrias de baterias, o que conduziu ao desenvolvimento de baterias com maior capacidade de energia e com menor peso.

Em uso comum desde 1950, as baterias de Níquel Cádmio (NiCd) são as mais baratas entre as baterias recarregáveis. Até metade de 1990, elas foram as mais utilizadas na maioria dos telefones celulares, em outros aparelhos sem fio e num grande número de produtos eletrônicos, mas agora estão perdendo lugar no mercado para tecnologias mais novas e eficientes. A evolução tecnológica trouxe a necessidade de que as baterias recarregáveis utilizadas em aparelhos eletroeletrônicos fossem mais leves, compactas e tivessem maior autonomia. As preocupações sobre os efeitos do cádmio no meio ambiente e na saúde e a possibilidade de proibição da disposição das NiCd em aterros também contribuiu para a utilização de outros tipos de baterias [13].

Em particular, as NiCd têm sido substituídas nos últimos anos por baterias Níquel Metal Hidreto (NiMH) e Íon Lítio (Li-Íon), que possuem uma maior densidade energética. Isto significa que elas podem fornecer a mesma quantidade de energia com menos peso, ou mais energia com o mesmo peso.

1.5.1. Baterias de NiMH.

As baterias de NiMH foram desenvolvidas em 1989 e comercializadas primeiramente no Japão, em 1990. Elas apresentam maior capacidade do que as de NiCd, porém não operam a altas temperaturas pois são mais sensíveis aos danos ocasionados pelo calor.

A bateria de NiMH é composta por um eletrodo de NiOOH (óxi-hidróxi de níquel) e por outro eletrodo composto por uma liga metálica armazenadora de hidrogênio (M). O material ativo do anodo é o hidrogênio absorvido na forma de hidreto metálico, em vez de cádmio. O metal costuma ser um dos elementos químicos pertencentes ao grupo dos terras

raras. O eletrólito é uma solução aquosa de hidróxido de potássio (KOH/H₂O), misturada com pequenas quantidades de aditivos cuja função é melhorar o desempenho dos eletrodos.

A bateria de NiMH, assim como a de NiCd, apresenta o efeito memória, porém de forma moderada. O efeito de memória é causado pela recarga da bateria antes da mesma ser completamente descarregada. Isto causa na bateria a “perda” da energia restante, armazenada, que se torna indisponível. Ele encurta a vida das baterias, principalmente das de NiCd. Este efeito ocorre devido ao crescimento de cristais de Cádmio dentro das células, o que reduz a superfície das placas das mesmas ocasionando uma redução na tensão que é proporcional à área superficial.

O eletrodo de MH é sensível a processos de sobrecarga, uma vez que intercalando íons H⁺ em excesso, a sua estrutura expande, ocasionando aumento de volume e trincas no eletrodo. Este tipo de bateria apresenta um relativamente alto grau de auto-descarga, ou seja, a bateria se descarrega espontaneamente. Isto equivale a dizer que os íons H⁺ desintercalam do eletrodo MH e migram para o eletrodo de níquel sem a necessidade de curto-circuitar seus pólos. Na fig.6 são mostradas as etapas de carga e descarga de uma bateria de NiMH.

As baterias de NiMH têm sido substituídas pelas de Li-Íon que possuem energia livre e densidade de energia ainda maiores, o que as tornam mais atraentes para aplicações sensíveis a peso ou volume.

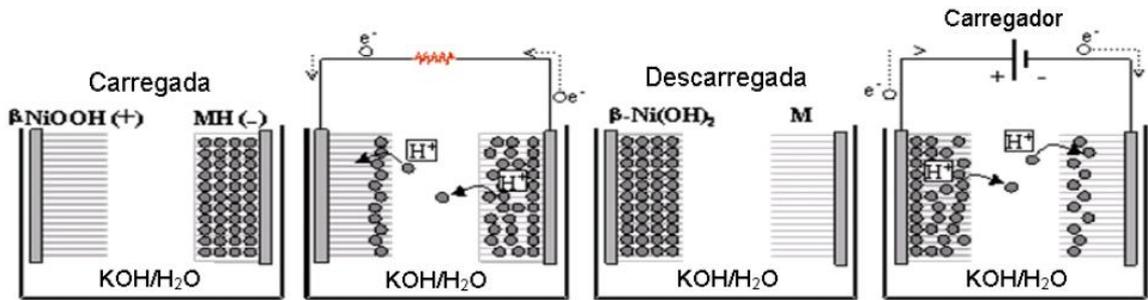


Figura-6 Processos eletroquímicos numa bateria NiMH [5].

1.5.2. Baterias de Li-Íon.

As baterias de Li-Íon foram introduzidas comercialmente durante o início da década de 90 graças à melhorias de falhas de segurança das primeiras baterias recarregáveis que utilizaram ânodo de lítio metálico [11]. As primeiras baterias possuíam alta densidade de energia, e baixa taxa de auto-descarga, normalmente menos de 1% ao mês. Para obter tempo de vida satisfatório utilizava-se uma grande quantidade de lítio. Durante a carga ocorria formação de dendritos, devido a reação do lítio e a superfície porosa, que poderiam causar curto-circuitos internos.

A bateria de íon-lítio é um dispositivo de interpolação iônica, com a diferença que o íon intercalante é o de lítio (Li^+). Este tipo de bateria compõem-se de:

Cátodo (+): Ligas litiadas, exemplos: LiCoO_2 e LiMn_2O_4 ;

Ânodo (-): Carbono grafite (C);

Eletrólito: Sais de lítio (LiClO_4) dissolvidos em solventes orgânicos.

Esta bateria leva o nome de Íon-Lítio porque o agente responsável pela oxidação (doação de elétrons) e redução (recebimento de elétrons) dos eletrodos é o íon de lítio (Li^+).

Uma bateria de Li-Íon fornece corrente elétrica para um sistema quando íons de lítio são interpolados entre os eletrodos. O grafite é o material mais comumente usado porque, além de apresentar estrutura lamelar, é capaz de interpolar reversivelmente os íons lítio entre suas camadas de carbono sem alterar significativamente sua estrutura. A fig. 7 mostra um esquema onde é apresentado o princípio de funcionamento desta bateria.

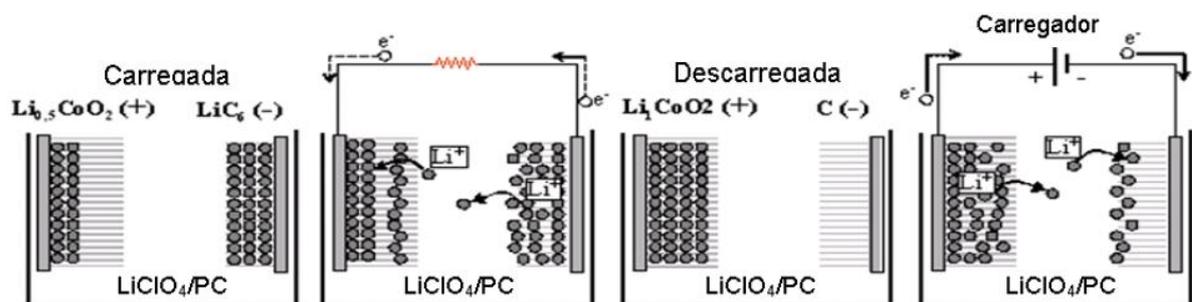


Figura-7 Processo eletroquímico numa bateria Li-Íon [5].

Quando uma bateria de Íon-lítio está carregada, significa que 50 % dos íons de lítio foram retirados do eletrodo positivo, tornando-se $\text{Li}_{0.5}\text{CoO}_2$. Se uma sobrecarga for imposta à bateria mais do que 50% de íons de lítio deixarão o eletrodo, e este sofrerá uma transformação irreversível que danifica a bateria. Outro problema ocorre quando se aplica uma sobredescarga, ou seja, procede-se uma descarga profunda. Isto ocasiona uma corrosão no eletrodo de grafite, o qual perde massa, perdendo capacidade de carga [14].

Devido ao fato de que as células de Li-Íon são irreversivelmente degradadas quando sobrecarregadas ou sobredescarregadas, podendo até vazar, essas baterias tipicamente empregam um circuito de proteção para garantir uma operação segura e prevenir uma eventual deterioração. Esses circuitos podem prover outros recursos tais como medidor de estado de carga e monitoramento da temperatura.

Um outro tipo de bateria recarregável, a Polímero Lítio (Li-Polymer), foi introduzido em 1999. Esta é similar à Li-Íon, mas contém polímero ao invés de líquido eletrolítico. As baterias Li-Polymer são finas, leves e flexíveis e têm conquistado uma significativa fatia de mercado para os telefones celulares.

1.6. DETERMINAÇÃO DO ESTADO DE CARGA E DO ESTADO DE SAÚDE.

Com o surgimento das baterias recarregáveis, surgiu a necessidade de desenvolver métodos e sistemas de prever o estado de carga (“state-of-charge”, SoC) e o estado de saúde (“state-of-health”, SoH) das baterias. A busca pela determinação das condições reais das baterias ocorre devido ao fato delas serem utilizadas varias vezes.

A importância de um métodos de determinação precisa do SoC deve-se ao fato do aumento do desempenho e confiabilidade, podendo aumentar a vida útil do sistema. Existem muitos exemplos de métodos imprecisos e de baixa confiabilidade com objetivo de determinar o SoC.

A vantagem de desenvolver tais métodos consiste numa forma de qualificar as condições reais das baterias. Sendo muito importante tanto para os usuários, que saberão em que condições as baterias se encontram, como para os fabricantes, que saberão em que condições suas baterias estão saindo da fábrica.

No próximo item, descrever-se-á um breve resumo dos métodos já utilizados para determinar o SoC e SoH. Com isso busca-se um método simples e eficaz de caracterizar as baterias descartadas.

1.6.1. História do desenvolvimento da indicação do SoC e SoH.

Desde a invenção das baterias, sistemas que determinam seu estado de carga SoC têm sido desenvolvidos de formas diversas. Em 1963, a empresa Curtis Instruments desenvolveu o primeiro medidor do SoC, denominado “Nível de Combustível”, para baterias veiculares. O método utilizado previa a capacidade remanescente da bateria através do tempo transcorrido até atingir uma determinada tensão nos terminais da bateria, após descarga com corrente constante, conforme fig. 8, [15].

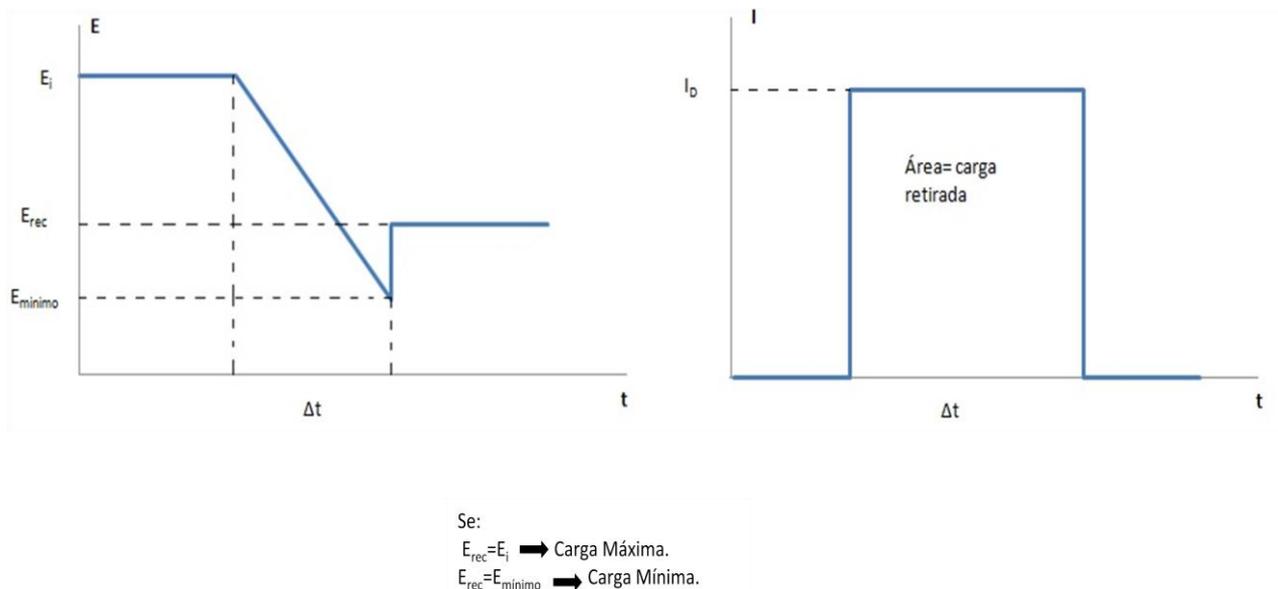


Figura-8 Medidor do SoC "Nível de Combustível".

Em 1975, a empresa Curtis Instruments, apresentou outro sistema de determinação do estado de carga das baterias. A medida da corrente fornecida era enviada a um módulo integrador que calculava a carga fornecida e tirada da bateria. Nesta mesma época vários sistemas pra determinar o SoC foram apresentados, o da empresa Curtis se mostrou o mais sofisticado.

Outras tentativas de desenvolver sistemas para determinar o SoC de baterias levaram ao método denominado *Current-sharing method* [16]. Este método se fundamenta na comparação entre duas correntes. A primeira é a corrente fornecida pela bateria com um SoC conhecido (para um determinado consumidor de energia *load*). A segunda é a corrente fornecida pela bateria (para a mesma *load*) quando não é conhecido seu SoC. Da comparação entre as duas correntes pode ser deduzido o SoC desconhecido [17].

York et al. [18] desenvolveram um indicador de SoC no qual a tensão da bateria é comparada com duas tensões armazenadas no sistema de medição. Este sistema identifica três estados da bateria. O primeiro estado corresponde a tensões da bateria superior a primeira tensão armazenada. O segundo estado da bateria corresponde a tensões inferiores a primeira tensão e superior a segunda tensão armazenada no sistema de controle. Por último, terceiro estado, tem-se tensões inferiores a segunda tensão armazenada no sistema. Neste estado ocorre o corte da carga na bateria, para evitar a descarga profunda. Durante a descarga da bateria, a amplitude da tensão e a duração dos pulsos são monitorados por um circuito limitador. Este circuito emite pulsos para um dispositivo contador, que efetua a contagem dos pulsos. Este contador, integrador, gera sinal que proporcional ao tempo total que a bateria permaneceu em descarga. Este número armazenado no contador é proporcional ao estado da carga [17]. A principal vantagem deste método é que o SoC pode ser indicado independente de qualquer desligamento ou religamento repentino da bateria, que muda consideravelmente sua tensão entre os bornes [18].

York et al. [19] apresentam as tensões da bateria medidas durante as cargas e descargas e comparam com valores predeterminados, armazenados previamente (para cada temperatura particular). As curvas de carga e descarga (tensão versus tempo) são divididas em

segmentos definidos pelos valores das tensões medidas e pela velocidade da variação da tensão. Cada segmento da curva define um SoC da bateria. Assim, para uma bateria desconhecida, a tensão medida e sua velocidade de variação são associadas com um segmento predeterminado da curva de carga ou descarga armazenada, que corresponde a um SoC [17].

Muitos sistemas e estudos, além de considerar as medidas de tensão, incorporam medidas de corrente fornecida e recebida pela bateria e a temperatura de funcionamento [19,20]. Eles apresentam um diagrama de um circuito equivalente, que utiliza parâmetros para determinar o SoC, como a corrente, a tensão e a temperatura. Os valores reais destas grandezas, medidos em uma bateria em carga e descarga, são comparados com os valores calculados com o circuito equivalente e assim é determinado o SoC.

Em 1975 foi desenvolvido um método para determinar o SoC em função da tensão de circuito aberto da bateria. Neste modelo, a tensão de circuito aberto seria diretamente proporcional ao SoC da bateria e seria calculado utilizando a equação de Thevenin:

$$OCV = V_{term} + IR \qquad \text{Equação 6}$$

Onde:

OCV – é a tensão em circuito aberto nos bornes da bateria, tensão de Thevenin.

Vterm – é a tensão nos bornes da bateria.

I – corrente que flui pela bateria, considerando $I > 0$ na descarga e $I < 0$ na carga.

R – resistência interna da bateria.

Segundo a equação acima, $OCV = V_{term}$ quando $I=0$, mas, após interrupção da corrente é necessário esperar um tempo para que os processos de relaxação finalizem.

Em 1978 foi apresentado um método que, além da tensão de circuito aberto, utiliza a tensão durante a descarga para determinar o SoC de um banco de baterias chumbo-ácido estacionárias [19]. O método utiliza a tensão de circuito aberto inicial da bateria, que é guardada numa memória específica do sistema de controle. Este método se fundamenta na existência de uma correlação linear entre a tensão de circuito aberto e o SoC da bateria, em condições definidas. A cada instante de tempo, a capacidade remanescente pode ser determinada através de uma função da tensão de circuito aberto e da tensão da bateria nesse momento da descarga [19].

As primeiras medidas de impedância em baterias parecem ter sido feitas em 1941 [20]. Na ocasião a medida consistia em aplicar uma excitação à célula eletroquímica com um sinal alternado de tensão de baixa amplitude (aproximadamente 5 mV) e a análise da resposta do sistema (componentes reativos, resistivos, módulo da impedância, ângulo de fase, etc.). Este tipo de medida é feito utilizando excitações em várias frequências, o que permite avaliar uma série de parâmetros característicos do sistema eletroquímico associado à cinética das reações envolvidas [21]. Esta metodologia permite monitorar continuamente o ângulo de fase entre a perturbação de tensão alternada e a resposta em corrente (medida como uma tensão através de uma resistência padrão).

Em 1984 foi desenvolvido um método para determinar o SoC de baterias de íon lítio [22]. Este método é uma adaptação dos métodos já desenvolvidos na época para outros sistemas de baterias. O método consiste em montar tabelas de tensões e temperaturas relacionados com conhecidos SoC da bateria e gravar estas informações na memória do

sistema de controle para comparações com valores de tensão e temperatura fornecidos por uma bateria num SoC desconhecido. Especificamente, neste caso, é aplicado um pulso de corrente e, após um breve intervalo de tempo em circuito aberto, é medida a tensão de circuito aberto da bateria, como função da temperatura. O valor medido é comparado com as tabelas armazenadas na memória. Baseado nesta comparação o sistema de controle determina o SoC. No sistema desenvolvido por Kopmann em 1987 [23], tensão, corrente e tempo são medidos durante cada ciclo de carga e descarga da bateria. Estas informações são utilizadas para comparar com os dados armazenados na memória do sistema de controle. Este método utiliza características das curvas de carga e descarga para determinar o SoC da bateria, diminuindo os erros relacionados com medidas pontuais de tensão [17].

Basicamente, muitos destes métodos apresentados acima são aplicáveis a distintos tipos de sistemas de baterias (chumbo-ácido, NiMH, íon lítio, etc.) através de modificações das tabelas armazenadas na memória do sistema de controle [17].

A Curtis Instruments [24] e Urbano A. [25], desenvolveram um método para determinar o SoC de baterias chumbo-ácido utilizando um breve tempo de repouso, sem passagem de corrente. O método consiste em aplicar um pulso de corrente e medir a evolução da tensão da bateria. A combinação da variação de tensão e do tempo consumido são utilizados para determinar as características da evolução da tensão em direção à tensão de circuito aberto. Esta evolução da tensão da bateria, após aplicação de um curto pulso de corrente, seria característica de um determinado SoC e independente do valor de tensão nos terminais da bateria no momento de aplicar o pulso.

Um outro conjunto de métodos para determinar o SoC e SoH de baterias utiliza os integradores de corrente, ou seja, a carga retirada ou fornecida à bateria. O método

desenvolvido por Aylor em 1992 é uma combinação do método da tensão de circuito aberto (OCV- Open Circuit Voltage) com medidas de carga [26]. O autor deste método ressalta que a combinação destas duas técnicas de medidas, elimina as deficiências de cada método em separado, melhorando a confiabilidade e a precisão da medida de SoC. As determinações da carga fornecida ou retirada de uma bateria, utilizadas na técnica desenvolvida por Aylor, são medidas de curta duração para tornar o erro acumulativo, inerente às medidas de carga, desprezível. O erro acumulado durante medidas de integração de corrente (determinação da carga) pode ser corrigido, quando leituras da OCV são tomadas cada vez que a bateria é deixada em repouso por tempo suficiente para estabilizar sua tensão. Para diminuir o tempo de repouso necessário para estabilizar a tensão antes de registrar a OCV, um método foi desenvolvido para prever este valor de OCV sem necessidade de esperar a tensão se estabilizar. Deve-se ressaltar que este método é um dos poucos métodos restritos exclusivamente a um tipo de baterias, as chumbo-ácido. Esta restrição é devida ao fato de que as baterias chumbo-ácido são as únicas que apresentam uma relação linear entre OCV e densidade do eletrólito. Este método aparentemente apresenta uma precisão de 99% na determinação do SoC, mas a um custo elevado para sua realização [27].

Em adição à integração da corrente, os sistemas desenvolvidos por Kikuoka et al. [28] e Seyfang [29], levam em consideração a temperatura, a eficiência da carga, a autodescarga e o envelhecimento das baterias. No caso do método desenvolvido por Seyfang [29], a capacidade atual da bateria é monitorada e comparada com sua capacidade inicial. Desta forma é obtida uma medida do SoH da bateria. Em adição à integração da corrente e às leituras de tensão, corrente e temperatura, Richter et al. apresentaram em 2000 um modelo matemático para simular o comportamento das baterias [30].

Outro conjunto de métodos para determinar o SoC e o SoH de baterias utiliza redes neurais, lógica fuzzy e outros métodos adaptativos, ou seja, métodos baseados na comparação de valores estimados com valores observados. Em 1997, Gerard et al. desenvolveram um método utilizando redes neurais para estimar o tempo restante de descarga de uma bateria [31]. Especificamente, duas redes neurais artificiais são utilizadas para adaptar as previsões do modelo utilizado ao comportamento real da bateria. Erros inferiores a 3% foram encontrados utilizando este método.

Garche e Jossen [32] desenvolveram um método adaptativo, utilizando filtros Kalman para complementar o método de estimação de parâmetros na determinação do SoC. O fundamento do filtro Kalman é a descrição da bateria através de um modelo numérico. Neste caso, a tensão da bateria é estimada utilizando dados de corrente e temperatura. O valor calculado é então comparado com o valor medido. A adaptatividade do método se baseia na comparação dos valores estimados e os valores medidos.

No mesmo ano, foi desenvolvido um novo método de calcular o SoC das bateria recarregáveis de íon lítio [33]. A base deste algoritmo são as medidas de corrente, durante a carga e descarga, junto com medidas do potencial de equilíbrio (sem passagem de corrente e com a bateria estabilizada). Nos estados de carga e descarga, a determinação do SoC é feita em função da carga fornecida ou retirada da bateria. Esta carga é medida utilizando um integrador de corrente e o valor é somado ou subtraído do SoC determinado anteriormente. Em outras palavras, nos estados de carga e descarga a bateria é vista como um capacitor linear. Durante a descarga, além da integração de corrente, é considerado o efeito do sobrepotencial. Devido ao sobrepotencial, a tensão da bateria durante a descarga é menor que a força eletromotriz (que é igual à soma dos potenciais de equilíbrio dos eletrodos da bateria),

que em equilíbrio é igual à OCV. O valor do sobrepotencial depende da corrente de descarga, do SoC, do nível de envelhecimento da bateria e da temperatura. Especialmente, a baixas temperaturas e a baixos SoC, devido ao elevado sobrepotencial causado principalmente pela limitação imposta pela difusão das espécies envolvidas nas reações eletroquímicas, a carga remanescente da bateria não pode ser retirada porque sua tensão cai abaixo da tensão de corte definida no sistema de controle. Isto leva a uma aparente perda de capacidade que, para temperaturas de 0°C, pode chegar a 5%. Isto leva à necessidade de diferenciar a carga que pode ser retirada de uma bateria em determinadas condições e a carga disponível na bateria. Como os sobrepotenciais dependem da temperatura, medidas de temperatura são necessárias durante as descargas. Por outro lado, no estado de equilíbrio, o SoC é determinado por meio de medidas de tensão. Como neste estado o fluxo de corrente é pequeno, a tensão medida aproxima bem o valor da força eletromotriz da bateria. O algoritmo utiliza uma relação tensão/SoC armazenada na memória do sistema de controle para traduzir as leituras de tensão em SoC, expressados como uma porcentagem da capacidade máxima. No caso das baterias de Li-íon, os autores afirmam que a relação entre a força eletromotriz e a tensão se mantém a mesma com o envelhecimento da bateria e que a dependência da temperatura é relativamente baixa [34]. O método da medida da força eletromotriz foi proposta também como método de calibrar o sistema que determina o SoC, pois a cada valor da força eletromotriz medida, corresponde o mesmo SoC, independentemente do envelhecimento e temperatura da bateria. A calibração é importante porque nos estados de carga e descarga, o SoC calculado pode, eventualmente, estar deslocado do valor real devido aos erros na medida da corrente (próprios do equipamento utilizado) e à integração destes erros ao determinar a carga [17].

Na tabela 1 é apresentado um resumo com os pontos mais importantes da história do desenvolvimento do SoC e do SoH.

Tabela 1 Principais características do desenvolvimento de algoritmos para determinar o SOC e SOH.

| Ano | Pesquisador/Empresa | Método |
|------|---------------------|---|
| 1963 | Curtis Instruments | Medidas de tensão. |
| 1970 | Lerner | Comparação entre duas baterias (uma com SoC conhecido). |
| 1974 | York | Tensões limites. |
| 1974 | Brandwein | Medidas de tensão, corrente e temperatura. |
| 1975 | Christianson | OCV. |
| 1975 | Dowgiallo | Medidas de impedância. |
| 1975 | Finger | Carga. |
| 1978 | Eby | OCV e tensão durante descarga. |
| 1980 | Kikuoka | Histórico de medidas. |
| 1981 | Finger | Transiente de relaxação da tensão após pulso de corrente. |
| 1984 | Peled | Tabelas de OCV e temperatura. |
| 1985 | Muramatsu | Espectroscopia de impedância. |
| 1986 | Kopmann | Tabelas baseadas em medidas de tensão, corrente e temperatura. |
| 1988 | Seyfang | Histórico de medidas e sistema adaptativo. |
| 1992 | Aylor | OCV medida e prevista e medidas de carga. |
| 1997 | Gerard | Medidas de tensão e corrente, uso de redes neurais artificiais. |
| 1999 | Salking | Medidas de carga, espectroscopia de impedância e lógica fuzzy. |
| 2000 | Garche | Medidas de tensão e corrente. Utilização de filtros Kalman. |
| 2000 | Bergveld | Histórico, sobrepotencial, força eletromotriz. |

2. METODOLOGIA DE TRABALHO

2.1. MÉTODO DE ANÁLISE DAS BATERIAS.

Realizado o estudo bibliográfico, entra-se na etapa de definir o método de avaliação das baterias usadas. Partindo dos estudos efetuados, percebe-se a gama de métodos já estudados e realizados que são encontrados na literatura. O objetivo deste projeto é avaliar o SoC das baterias de uma forma rápida e segura.

Pesquisa realizada por Schneider [5], que serviu de base para este projeto, utiliza tensões residuais das baterias ao final de quatro ensaios carga e descarga rápida e lenta. Em especial, após as etapas de descarga lenta e rápida as tensões de cada célula era medida, e conforme a tensão que a célula possuía, ela era classificada com uma letra. Essa classificação definia o SoH das baterias avaliadas.

Segundo Handbook of Batteries [11] e Urbano A. [17], o carregamento das baterias de íon-lítio pode ser feito de duas formas: corrente constante (CC) e corrente constante com tensão constante (CC-CV). No caso de CC-CV a bateria é carregada com corrente constante a 70% de sua capacidade nominal ($0,7C$) até atingir tensão de 4,2V. Após atingir esta tensão, a bateria é carregada com tensão constante de mesmo valor. A etapa de tensão constante ocorre até a corrente de carregamento atingir 2% de sua capacidade nominal.

A tensão máxima de uma bateria de Íon-lítio é limitada em 4,2V, para preservar a química do eletrólito. Também pode-se carregar a bateria somente com corrente constante, fazendo com que ao atingir 4V, a bateria seja carregada com 20% de sua capacidade nominal, ou seja, $0,2C$. O carregamento se dará por terminado quando a célula atingir 4,2V.

Dentre as possibilidades acima mencionadas, optou-se por realizar carga de modo CC por ser de fácil implementação. Os modos CC e CC-CV se aproximam, ao serem realizados dentro dos limites anteriormente mencionados.

Com relação ao processo de descargas, também foi utilizado o modo CC. Neste processo, a bateria de íon-lítio é descarregada com corrente a 70% de sua capacidade nominal, ou seja 0,7C, até atingir a tensão limite de 3,6V. Ao atingir esta tensão a corrente é diminuída para 0,2C até que a tensão atinja 3V. Com isto chega-se a plena descarga da bateria. Segundo a Resolução nº 481 da ANATEL [36], o ensaio de descarga para medir a capacidade das baterias, deve ser feito até a tensão mínima de 2,5V. Por isto neste trabalho será utilizado a tensão limite mínima do ensaio em aproximadamente 2,5V.

Com o processo de descarga das baterias de íon-lítio, tem-se a quantidade de energia que cada bateria pode fornecer. Utilizando a equação 7 tem-se a potência fornecida pela bateria. Integrando a potência no intervalo de tempo do processo tem-se a energia fornecida, conforme a equação 8.

$$P = VI \qquad \text{Equação 7}$$

Onde:

P= potência fornecida;

V= Tensão nos terminais da bateria;

I= Corrente do processo;

$$E = \int_{t_0}^t P dt \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

E= Energia fornecida;

t_0 = Tempo inicial do processo;

t= Tempo final do processo;

O estado de carga, que corresponde a quantidade de carga, ou energia, que pode ser fornecida pelas baterias, é calculado comparando-se a energia fornecida pela bateria a qual se quer descobrir (E_A) com a energia fornecida por uma bateria nova (E_N). O SoC pode ser calculado utilizando a seguinte equação:

$$SOC = \frac{E_A}{E_N} \times 100(\%) \quad \text{Equação 9}$$

Percentualmente o SOC é de 100% quando a bateria é nova ($Q_A=Q_N$).

As baterias que serão analisadas neste trabalho foram obtidas durante o doutorado do Eduardo Schneider [5]. O modelo utilizado foi o LGIP 411A da empresa LG, que tem capacidade de 750 mAh. Foram obtidas 88 baterias, do tipo mencionado acima, conforme podemos ver na fig.9.



Figura-9 Baterias obtidas para este projeto, da marca LGIP-411A.

2.2. BANCADA UTILIZADA PARA O ENSAIO DAS BATERIAS.

Para a realização dos ensaios com as baterias de íon-lítio, foi utilizada bancada desenvolvida por Schneider [5] em sua tese de doutorado. Esta bancada foi desenvolvida para de modo simples testar diversas baterias simultaneamente. Nela pode-se controlar a corrente durante a carga e descarga, de qualquer tipo de bateria recarregável de pequeno porte. A fig.10 mostra uma foto da bancada utilizada.



Figura-10 Bancada de teste utilizada para os ensaios.

A fig.11 mostra o esquemático elétrico da bancada de testes. O circuito principal da bancada é alimentado por uma fonte projetada com tensão de saída de 35V, e um disjuntor bipolar de 6A para proteger o circuito de sobrecorrente. Esta fonte também possui um transformador 110/220 e uma ponte retificadora de até 10A para transformar a corrente em contínua.

Para ajuste mais fino de corrente foi utilizado um circuito com transistor de potência e um potenciômetro. Para ajuste mais grosso este mesmo circuito possui três resistores, R1,R2 e R3 de 68 Ω , 33 Ω e 10 Ω , respectivamente. A bancada possui três saídas idênticas, cada uma com seu circuito. Cada um tem ligado em paralelo uma chave de “liga/desliga”. A posição “liga” deixa a chave aberta e, a posição “desliga“, a deixa fechada curto-circuitando a mesma.

Um fusível individual de 2 A fornece a proteção contra curtos-circuitos em cada saída. Um voltímetro de 0/30 V e um miliamperímetro de 0/1 A em cada saída permitem visualizar

as condições de operação. Cada saída também possui uma chave seletora de “carga” (LED vermelho) e, “descarga” (LED amarelo) para possibilitar a escolha de operação [5].

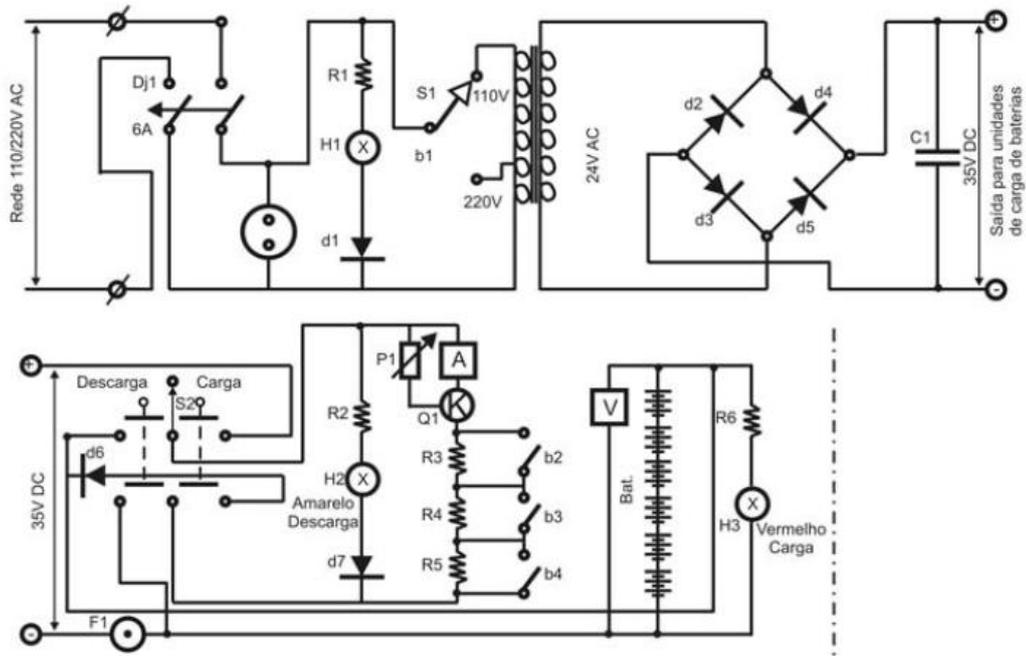


Figura-11 Esquemático do circuito elétrico da bancada de teste [5].

3. RESULTADOS OBTIDOS.

Antes de começar os ensaios, primeiro foram retiradas as placas de circuito impresso, que protegem as baterias e assim ter seus terminais expostos para fácil acesso. A remoção das placas eram realizadas com, utilizando alicate de corte, todo cuidado para não colocar os terminais em curto. A fig.12 abaixo mostra a bateria já com seus terminais expostos e, também, os terminais retirados. Todas as baterias do modelo LGIP-411A estão em boas condições visuais, ou seja não apresentavam vasamento, estufamento e deterioramento.

Em seguida foram selecionadas sete baterias, que tivessem com tensões parecidas, para serem analisadas pelo método proposto por este trabalho. Para efeito de comparação foi adquirido um bateria nova de mesma capacidade, mas produzida pela empresa Griffin, para ser analisada junto com as baterias obtidas por descarte.



Figura-12 a) Bateria sem os terminais, b) terminais retirado das baterias.

As baterias foram dispostas em dois conjuntos, cada um com 4 baterias ligadas em série. Para carregar e descarregar as baterias foi utilizada a bancada de testes descrita no item 2.2. Os ensaios foram realizados com temperatura ambiente de aproximadamente 26°C,

estando dentro da resolução da ANATEL, sobre Certificação e Homologação de Baterias de Lítio [36], que diz que a temperatura ambiente do local de ensaio deverá estar entre $25 \pm 5^\circ\text{C}$.

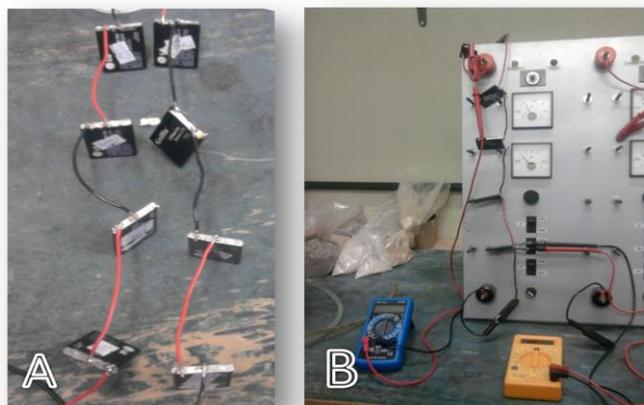


Figura-13 a) Dois conjuntos de baterias ligadas em série. b) Baterias conectadas na bancada de teste para os ensaios.

O próximo passo foi carregar as baterias até atingirem $\pm 4,2\text{V}$, com a qual eram consideradas carregadas. O método utilizado para carregá-las foi de corrente constante CC, conforme mencionado no item 2.1 deste trabalho. Neste caso, a corrente utilizada desde o início foi de $0,2\text{C}$, pois todas as células apresentavam tensões superiores a 4V quando aplicava correntes de $0,7\text{C}$.

Após carregar as baterias, foi esperado um intervalo de no mínimo 1h para realizar o ensaio de descarga, conforme tempo estipulado na resolução nº481 da ANATEL [36]. Então realizou-se a descarga das baterias para obter a energia fornecida por elas. Durante a descarga foram realizadas as medidas da corrente de descarga e as tensões de cada bateria, durante intervalos de 5 ou 10 minutos. O fim da descarga ocorria quando as baterias atingiam aproximadamente $2,5\text{V}$.

Com os ensaios realizados para todas as baterias foi possível obter a energia fornecida ao longo do tempo. Primeiramente pela equação 7 foi calculado a potência obtida em cada bateria, ao longo do tempo. Com isto foi possível obter o gráfico da Potência ao longo do tempo, na fig. 14, para bateria com melhor desempenho.

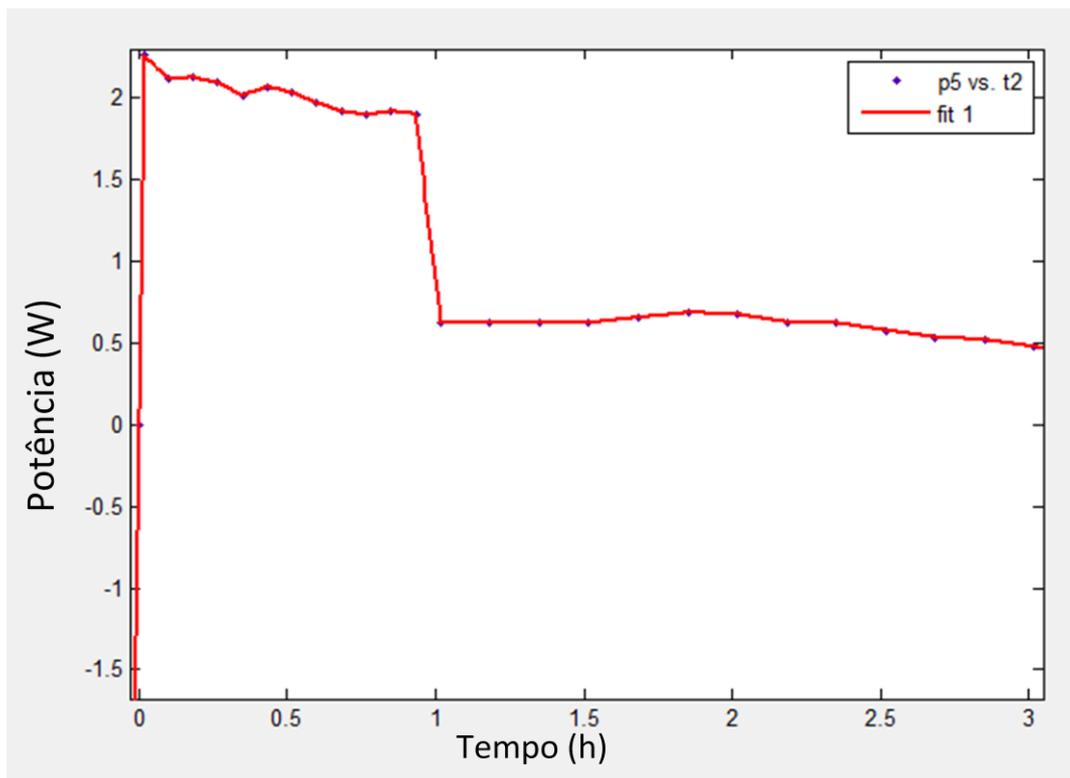


Figura-14 Gráfico da potência da bateria ao longo do tempo.

Utilizando o programa computacional MATLAB, a função da potência foi integrada em relação ao tempo, equação 8, para obter a energia fornecida pela bateria durante o ensaio de descarga. O gráfico da energia fornecida pela bateria, com melhor desempenho, ao longo do tempo pode ser visto na fig.15.

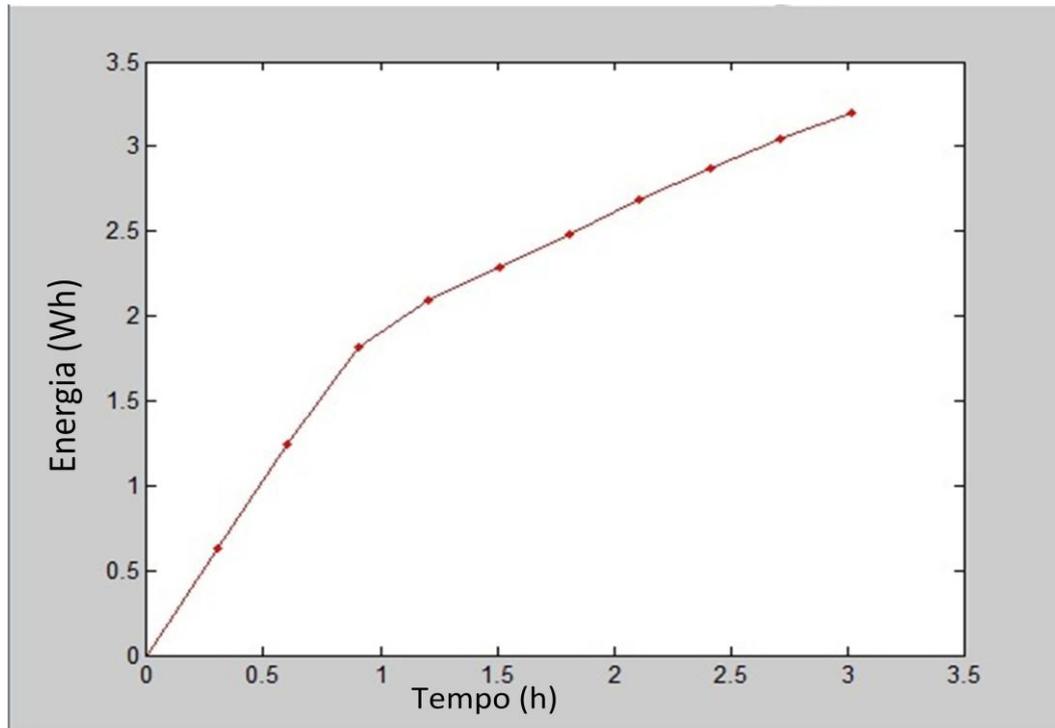


Figura-15 Energia fornecida pela bateria durante a descarga.

Estes cálculos foram realizados para todas as baterias testadas, para se ter uma idéia das condições reais das mesmas. Com isto foi possível calcular o SoC, pela equação 9, das baterias. A tabela 2 mostras a quantidade de carga que há em cada bateria e a relação com a quantidade de carga da bateria considerada nova. Como entre as baterias testadas, não havia uma bateria nova, a relação do estado de carga foi feito em relação a bateria com desempenho muito próximo a de uma nova.

Tabela 2 Energia retirada das baterias em relação á bateria considerada nova.

| Bateria: | E_{forn} (Wh) | Relação (%) |
|---|--|------------------------|
| 1_1 | 2,44 | 76,10 |
| 1_2 | 2,01 | 62,69 |
| Bateria Griffin | | |
| 1_3 | 2,51 | 78,53 |
| 1_4 | 2,58 | 80,56 |
| Bateria Considerada Nova | | |
| 2_1 | 3,20 | 100,00 |
| 2_2 | 2,83 | 88,30 |
| 2_3 | 2,78 | 86,75 |
| 2_4 | 2,07 | 64,73 |

3.1. ANÁLISE DOS RESULTADOS.

Os ensaios foram realizados de acordo com Urbano [17], pois utilizava método de carga e descarga de um modo rápido, e de acordo com o Handbook das Baterias [11]. A diferença utilizada foi a realização do ensaio somente por CC, em vez de CC-CV, pois conforme dito anteriormente, quando a bateria está perto de sua tensão limite, a parte CV pode ser substituída por CC com corrente de $0,2C$.

Os ensaios tiveram duração de menos de 3h para cada etapa, ou seja, carga e descarga das baterias. Este intervalo depende da quantidade de carga, fornecida e retirada em cada bateria, no caso da bateria nova, que forneceu mais energia, a descarga durou 3h. Na bateria com menor quantidade de energia fornecida, a descarga durou 1,5h.

De acordo com a quantidade de carga obtida com as baterias, foram consideradas baterias boas para serem reutilizadas como unidades de armazenamento para outros

equipamentos, baterias com SoC maior ou igual a 70% da carga fornecida por uma bateria considerada nova. Por este critério 5 baterias, entre 7 testadas junto com a bateria nova, foram consideradas aptas a continuarem como fonte de energia de aparelhos eletrônicos ou ainda serem utilizadas em celular, como no caso da bateria que obteve 86,75% de energia fornecida. Conforme os dados que constam na tabela 2.

Segundo a ANATEL [36], ensaios de descarga com alta corrente, a capacidade obtida para cada bateria não pode ser inferior a 60% da capacidade nominal especificada. Neste trabalho foi utilizado 70%, pois a descarga não é realizada com alta corrente todo o tempo e sim uma parte dela.

Como forma de comparação entre uma bateria considerada nova, uma bateria descartada em boas condições e uma em péssimas condições foi posto em um mesmo gráfico, fig.16, o comportamento das três baterias ao longo do tempo, durante a descarga. Como resultado tem-se a diferença de duração do ensaio da bateria em péssimas condições, praticamente a metade, em relação a bateria nova. O interessante, que a bateria de pior desempenho foi a bateria, de mesma capacidade, produzido pela Griffin. Ou seja, todas as baterias testadas tiveram melhor desempenho que uma bateria vendida no mercado, como se tivesse mesma capacidade que o modelo da LG.

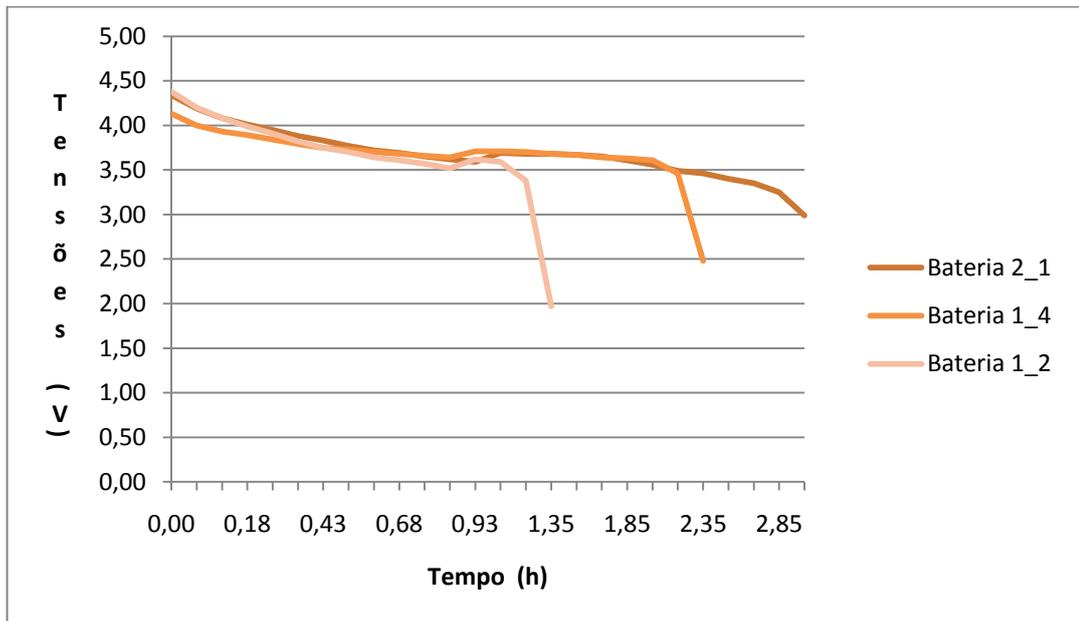


Figura-16 Comparação do desempenho da bateria considerada nova (2_1), bateria em boas condições (1_4) e da bateria com pior desempenho (1_2).

CONCLUSÃO:

A idéia inicial para este projeto de diplomação era a de, apartir de estudo já desenvolvido por Schneider [5], desenvolver um método que fosse possível medir o estado de carga das baterias de celular descartadas pela população, de um modo rápido e eficaz. Dentro deste objetivo foi desenvolvido ao longo do trabalho: um breve resumo da evolução das pilhas e baterias, análise mais focada nos princípios das baterias e fatores de desempenho, evolução dos métodos de definição do SoC e SoH e metodologia escolhida para análise das baterias.

Após esta parte inicial de desenvolvimento teórico do assunto abordado e da metodologia de trabalho foi possível analisar os dados obtidos em ensaios reais, aonde foi possível concluir que:

Os resultados obtidos com a metodologia de análise do estado de carga (SoC) das baterias foram satisfatórios. E foi possível obter de um modo rápido e eficiente, a real quantidade de energia fornecida pela bateria, que até o momento era considerada resíduo. O método é considerado rápido, pois com um único ensaio é possível obter o estado da bateria. E eficiente, pois o trabalho foi realizado respeitando normas estabelecidas pela ANATEL, para certificar as baterias.

Os ensaios não foram realizados com todas as baterias disponíveis, da marca LGIP 711 A. Apesar disto, foi possível ter uma idéia inicial, e concreta, de que baterias descartadas como resíduo poderiam ser reaplicadas em outros eletrônicos ou até mesmo em celulares de outras pessoas.

Um ponto importante obtido com os resultados foi que todas as baterias testadas, obtiveram desempenho melhor que uma bateria de mesma capacidade da empresa Griffin. Isto mostra que a população está descartando baterias que poderiam ser utilizadas por outras pessoas em seus celulares, em vez de comprar baterias mais baratas que as originais.

Muitos dos métodos encontrados na literatura para analisar o estado de carga das baterias são desenvolvidos para, a partir de parâmetros medidos na célula, obter de forma matemática o atual estado da bateria. Em contraste, a metodologia proposta fornece a quantidade real de carga que a bateria ainda pode fornecer.

Este trabalho demonstra a viabilidade de implementação de um centro de triagem para baterias recarregáveis, para classificação em utilizáveis ou não. A partir disto, as baterias poderiam ser reutilizadas de forma correta, diminuindo o problema ambiental.

REFERÊNCIAS

- [1] FOLHA ONLINE <http://www1.folha.uol.com.br/folha/informatica/ult124u500308.html>- acessado em 3 de outubro 2010.
- [2] FISHBEIN, B. **Waste in the Wireless World: The challenge of Cell Phones**. New York: INFORM, Inc., (2002).
- [3] LANKEY, R. L.; MCMICHAEL, F. C. **Life-Cycle Methods for Comparing Primary and Rechargeable Batteries**. ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOG, Vol. 34, NO. 11, (2000).
- [4] Barbieri, L. **Doze Toneladas de Pilha são Recolhidas**. Reportagem ZERO HORA, 18 de Novembro de 2010, p.44.
- [5] SCHNEIDER, E.L. **Contribuição à Engenharia e ao Ecodesign na Avaliação do Potencial de Reuso de Células de Baterias Descartadas de NIMH e Li-íon de Telefonia Celular**. Tese de Doutorado, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, UFRGS, (2009).
- [6] EDUCAR. http://educar.sc.usp.br/licenciatura/2006/Pilha_de_Daniel/pilha_de_Daniell.html- acessado em 6 de outubro 2010.
- [7] WIKIPÉDIA http://pt.wikipedia.org/wiki/Pilha_de_Volta -acessado em 6 de outubro 2010.
- [8] WIKIPÉDIA http://pt.wikipedia.org/wiki/Pilha_de_Leclanch%C3%A9 - acessado em 6 de outubro 2010.
- [9] PROFELECTRO <http://www.profelectro.info/?tag=pilha-seca> - acessado em 6 de outubro 2010.
- [10] ELETROQUÍMICA <http://eletroquimica223.blogspot.com/2007/11/pilha-alcalina.html> acessado em 6 de outubro 2010.
- [11] LINDEN, D.; REDDY, T.B. **Handbook of Batteries** 3rd Edition - McGraw-Hill, 1995.
- [12] FONSECA, F.M. **Sistema de Monitoração e Avaliação de Bancos de Baterias para UPS (“ NO BREAKS”)**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, UFRGS, (2002).
- [13] AMBROSIO, R.C.; TICIANELLI, E.A. **Baterias de Níquel-Hidreto, uma Alternativa para as Baterias de Níquel-Cádmio**. Quím. Nova, v24, (2001).

- [14] Sercomtel - Introdução as baterias recarregáveis modernas.
http://www.fisica.uel.br/filmat/baterias_principios.html Acessado em 12 de Outubro de 2008.
- [15] Dreer H., **Curtis wheelchair battery fuel gauge**. Product test report marketing services depto. Curtis Instruments Inc (1984).
- [16] Lerner S., Lennon H; Seiger H.N. **Development of an alkaline battery state of charge indicator**. Journal of Power Sources 3 (1975) p.135-137.
- [17] Chagas M. W. P., **Novas tecnologias para avaliação de baterias**. Dissertação de Mestrado, Curso de Mestrado Profissionalizante em Desenvolvimento de Tecnologia, IEP/LACTEC, (2007).
- [18] York R.A., **Self testing battery discharge indicator**. U.S. Patent 3.932.797, (1974).
- [19] Eby R.L. Method, **Apparatus for determining the capacity of lead acid storage battery**. U.S.Patent 4.180.770. (1978).
- [20] Willihnganz E. **Trans. Am. Electrochem. Soc.** 79 (1941), p. 253.
- [21] Rodrigues S., Munichandraiah N., Shukla A. K. **Journal of Power Sources** 87, (2000) p. 12-20.
- [22] Peled E; Yamin H., Reshef I., Keldrich D., Rozen S. **Method and apparatus for determining the state-of-charge of batteries, particularly lithium batteries**. U.S.Patent 4.725.784. (1984).
- [23] Kopmann U. **Method of and apparatus for monitoring the state of charge of a rechargeable battery**. U.S.Patent 4.677.363. (1987).
- [24] Finger E.P. **Quiescent voltage sampling battery state of charge meter**. U.S.Patent 4.460.870. (1981).
- [25] Urbano A., Schiaber Z. S., Toscano D., Floriano R., Catarini P. R., Scarminio J., **Método rápido de análise do estado de saúde (SOH) de baterias de íon lítio de telefones celulares descartados empregando os conceitos da técnica de titulação galvanostática interminente (GITT)**. Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas, V.30,n.2,p. 137-144,Paraná, Brazil, (2009).
- [26] Aylor J.H., Thieme A., Johnson B.W. **A battery state of charge indicator for electric wheelchairs**. IEEE Trans. Indust. Electron. 39 (1992) p.398-409.
- [27] Stolzka D., Dawson W.S. **When is it intelligent to use a smart battery?** Nº 94 TH0617-1 (1994) IEEE.
- [28] Kikuoka T., Yamamoto H., Sasaki N., Wakui K., Murakami K., Ohnishi K.,

Kawamura G., Noguchi H., Ukigaya F. **System for measuring state of charge of storage battery.** U.S.Patent 4.377.787. (1980).

[29] Seyfang G.R. **Battery state of charge indicator.** U.S.Patent 4.949.046. (1988).

[30] Richter G. and Meissner E. **Method for determinig the state of charge of storage batteries.** U.S.Patent 6.388.450. (2000).

[31] Gerard O., Patillon J.N. d'Alche-Buc F. **Neural network adaptative modelling of battery discharge behaviour.** Lect. Notes Comput. Sci. 1327 (1997) p.10951100.

[32] Garche J. and Jossen A. **Battery management systems (BMS) for increasing battery life time.** Telecommunications Energy Special. TELESCOM, 3 (2000) p. 8184.

[33] Bergveld H.J., Feil H., Van Beek J.R. **Method of predicting the state of charge as well as the use time left of a rechargeable battery.** U.S.Patent 6.515.453. (Nov. 30, 2000).

[34] Schoofs F.A.C.M., Kruijt W.S., Einerhand R.E.F.,Hanneman S.A.C.;and Bergveld H.J. **Method of and device for determining the charge condition of a battery.** U.S.Patent 6.420.851. (2000).

[35] HOWELL, D.; DUONG, T.; DEPPE, J.B.; WEINSTOCK, I. **U.S. Department of Energy's Materials Research for Advanced Lithium Ion Batteries. Material Matters** Vol. 3 No. 4, p. 100-102, (2008).

[36] ANATEL- Agencia Nacional de Telecomunicações **Resolução nº 481**, de 10 de Setembro de 2007.