

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROMECÂNICA
CURSO DE TECNOLOGIA EM MANUTENÇÃO INDUSTRIAL

EDUARDO HENRIQUE COSTA REGO

**FORNECIMENTO DE ENERGIA PARA BATERIA ATRAVÉS DE
SUPERCAPACITORES A PARTIR DE DIFERENTES NÍVEIS DE
CARGA**

MEDIANEIRA/PR
2011

EDUARDO HENRIQUE COSTA REGO

**FORNECIMENTO DE ENERGIA PARA BATERIA ATRAVÉS DE
SUPERCAPACITORES A PARTIR DE DIFERENTES NÍVEIS DE
CARGA**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Diplomação, do Curso Superior de Tecnologia em Manutenção Industrial do Departamento Acadêmico de Eletromecânica – COELM – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Tecnólogo.

Orientador: Prof. Msc. Yuri Ferruzzi.

Co-Orientador: Prof. Msc. Neron Berghauser

MEDIANEIRA/PR
2011



TERMO DE APROVAÇÃO

Fornecimento de energia para bateria através de supercapacitores a partir de diferentes níveis de carga

Por

EDUARDO HENRIQUE COSTA REGO

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi apresentado às 19:30 h do dia 28 de Novembro de 2011 como requisito parcial para a obtenção do título de Tecnólogo no Curso Superior de Tecnologia em Manutenção Industrial, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Medianeira. O acadêmico foi argüido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Msc. Yuri Ferruzzi
UTFPR – Câmpus Medianeira
(Orientador)

Prof. Msc. Neron A. C. Berghauser
UTFPR – Câmpus Medianeira
(Co-orientador)

Prof. Dr. Renato Cesar Pompeu
UTFPR – Câmpus Medianeira
(Convidado)

Prof. Giovano Mayer
UTFPR – Câmpus Medianeira
(Responsável pelas atividades de TCC)

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na coordenação do Curso de Tecnologia em Manutenção Industrial.

AGRADECIMENTOS

Para realização deste trabalho foi de fundamental importância o apoio de toda minha família, namorada e amigos, sempre me incentivando e ajudando do jeito que foi possível.

Durante esse período surgiram muitas dúvidas e sempre pude contar com o conhecimento do orientador Prof. Msc. Yuri Ferruzzi que foi fundamental nesses momentos.

Agradeço também ao Co-orientador Prof. Msc. Neron Berghauser pela paciência e dedicação colocada neste trabalho.

RESUMO

Costa Rego, Eduardo H.. Fornecimento de energia para bateria através de supercapacitores a partir de diferentes níveis de carga. 2011. 61 f.Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Manutenção Industrial) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2011.

A proposta deste trabalho é entender o comportamento elétrico apresentado por supercapacitores para a carga de uma bateria do tipo chumbo-ácido. Os supercapacitores são componentes modernos comercialmente e que apresentam grande aplicabilidade para carregamento de acumuladores de uma forma geral pelo processo de carga rápida. Este trabalho apresenta os testes realizados em supercapacitores e baterias do tipo chumbo-ácido, bem como os resultados destes testes. Trata-se de uma pesquisa aplicada, do tipo exploratória e tratamento quantitativo dos dados por utilizar a simulação de circuitos elétricos e levantar as variáveis tensão e corrente resultantes de variadas condições previamente estabelecidas. Foram realizados testes preliminares na bateria e nos supercapacitores por meio dos quais foram definidos valores limites para a realização do experimento. Em seguida foram executados cinco testes variando o carregamento da bateria chumbo/ácido de 0 a 80% da sua capacidade útil. Os resultados apontam para uma condição na qual se sugere que as cargas para esta configuração devam acontecer quanto menor estiver o nível de tensão da bateria, respeitados os seus limites internos.

Palavras chave: Supercapacitores. Carregamento, Bateria chumbo-ácido.

ABSTRACT

Costa Rego, Eduardo H.. Power supply to battery with different load levels by supercapacitors. 2011. 61 f.Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Manutenção Industrial) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2011.

The propose of this project is understand the supercapacitor's electric behavior as source of energy to lead-acid battery. The supercacitor's are commercially and modern components that have wide applicability for charging batteries in general by process of fast charge. This project introduces supercapacitor's and lead-acid battery's tests and results. It is an applied research and exploratory-type quantitative treatment of data by using the simulation of electrical circuits and raise the voltage and current variables resulting from different conditions previously established. Preliminary tests were performed on the battery and supercapacitors by which limits were defined for the experiment. Then five tests were performed varying the lead-acid battery's charging lead 0% to 80% of its useful capacity. The results point to a condition in which it is suggested that the charges must occur for this configuration is the lower the level of battery voltage, respecting their internal boundaries.

Keywords: Supercapacitors. Charging. Lead-acid batteries

FIGURAS

Figura 1: Configuração de uma bateria ligada a uma carga elétrica.	15
Figura 2: Diagrama de descarga de uma bateria elétrica.....	15
Figura 3: Diagrama de carga de uma bateria elétrica.	16
Figura 4: Associação de baterias em série.....	19
Figura 5: Associação de baterias em paralelo.....	19
Figura 6: Gráfico de ragone – classificação de dispositivos de carga elétrica.	23
Figura 7: Princípio de carga e descarga de um supercapacitor.	23
Figura 8: Foto da bateria utilizada nos experimentos práticos.	27
Figura 9: Detalhe dos supercapacitores usado nos testes.	29
Figura 10: Detalhe da fonte variável usada para os experimentos.....	32
Figura 11: Multímetros usados para monitoração da tensão e corrente no circuito. .	32
Figura 12: Lâmpada usada para a descarga da bateria após carregamento com supercapacitores.	33
Figura 13: Circuito equivalente a 333F.....	36
Figura 14: Circuito equivalente a 1000F.....	37
Figura 15: Circuito equivalente a 3000F.....	37
Figura 16: Gráfico resultante dos testes 1,2 e 3 de descarga dos supercapacitores.	40
Figura 17: Curva de descarga da bateria chumbo/ácido até 5,4v	41
Figura 18: Fluxograma dos testes realizados no experimento.	42
Figura 19: Curva de descarga da bateria para até 80% para início dos testes.	45
Figura 20: Curva de recarga da bateria a partir da tensão inicial de 6v.	45
Figura 21: Curva de descarga da bateria após seu carregamento usando supercapacitores.	46
Figura 22: Primeira curva de carga dos supercapacitores usando a fonte de tensão.	46
Figura 23: Curva de descarga da bateria para até 60% para segunda fase dos testes.....	47
Figura 24: Curva de recarga da bateria a partir da tensão inicial de 5,9v.	48

Figura 25: Curva de descarga da bateria após seu carregamento usando supercapacitores.	48
Figura 26: Segunda curva de carga dos supercapacitores usando a fonte de tensão.	49
Figura 27: Curva de descarga da bateria para até 40% para terceira fase dos testes.	50
Figura 28: Curva de recarga da bateria a partir da tensão inicial de 5,78v.	50
Figura 29: Curva de descarga da bateria após seu carregamento usando supercapacitores.	51
Figura 30: Terceira curva de carga dos supercapacitores usando a fonte de tensão.	51
Figura 31: Curva de descarga da bateria para até 20% para quarta fase dos testes....	52
Figura 32: Curva de recarga da bateria a partir da tensão inicial de 5,64v.	53
Figura 33: Curva de descarga da bateria após seu carregamento usando supercapacitores.	53
Figura 34: Quarta curva de carga dos supercapacitores usando a fonte de tensão.	54
Figura 35: Curva de descarga da bateria para a quinta fase dos testes.	55
Figura 36: Curva de recarga da bateria a partir da tensão inicial de 5,5v.	55
Figura 37: Curva de descarga da bateria após seu carregamento usando supercapacitores.	56
Figura 38: Quinta curva de carga dos supercapacitores usando a fonte de tensão.	56
Figura 39: Curvas de recarga da bateria pelo supercapacitor.....	57
Figura 40: Curva exemplo da recarga da bateria pelo supercapacitor.....	58
Figura 41: Curvas do tempo para a bateria retornar ao valor antes da recarga.....	58
Figura 42: Gráfico de tempo de descarga, recarga pelo supercapacitor e carga até o estado inicial.....	59

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 OBJETIVOS.....	12
1.1.1 Objetivo Geral.....	12
1.1.2 Objetivos Específicos	12
1.2 JUSTIFICATIVA.....	12
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1 BATERIA.....	14
2.1.1 Princípio da Descarga de Uma Bateria.....	15
2.1.2 Princípio da Carga de uma Bateria.....	16
2.1.3 Classificação das Baterias.....	17
2.1.3.1 Baterias Primárias	17
2.1.3.2 Baterias Secundárias.....	17
2.1.4 Parâmetros para Carga e Descarga de Baterias	18
2.1.4.1 Tensão das Pilhas e Baterias	19
2.1.4.2 Capacidade de Carga	20
2.1.4.3 Energia Armazenada	20
2.1.4.4 Energia Específica	21
2.1.4.5 Eficiência Energética	21
2.1.4.6 Autodescarga	21
2.2 SUPERCAPACITOR.....	22
2.2.1 Princípio de Funcionamento do Supercapacitor	23
2.2.2 Eletrodo	24
2.2.3 Eletrólito.....	25
2.2.4 Parâmetros Elétricos de Supercapacitores	25
2.2.4.1 Capacitância.....	25
3 MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1 DEFINIÇÃO DA BATERIA PARA O EXPERIMENTO.....	27
3.2 DEFINIÇÃO DO SUPERCAPACITOR	28
3.3 DEFINIÇÃO DA FONTE PARA CARGA DOS SUPERCAPACITORES.....	31
3.4 DEFINIÇÃO DOS MULTÍMETROS	32
3.1 RESISTOR PARA DESCARGA DO SUPERCAPACITOR	33
3.2 COMPONENTE PARA DESCARGA DA BATERIA	33
3.3 CUSTOS PARA AQUISIÇÃO DOS COMPONENTES.....	33
4 REALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO	35
4.1 TESTES DOS COMPONENTES.....	35
4.1.1 Teste Preliminar dos Supercapacitores	35
4.1.1.1 Teste 1: Teste com Capacitância Equivalente de 333F.....	37
4.1.1.2 Teste 2: Teste com Capacitância Equivalente de 1000F.....	38
4.1.1.3 Teste 3: Teste com Capacitância Equivalente de 3000F.....	39
4.1.1.4 Resultados dos Testes Preliminares	39
4.1.2 Teste Preliminar da Bateria	40
4.2 DEFINIÇÃO DAS ETAPAS PARA A REALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO	41
4.2.1 Teste 1 – Bateria com 80% da Carga Útil	44
4.2.2 Teste 2 – Bateria com 60% da Carga Útil	46

4.2.3 Teste 3 – Bateria com 40% da Carga Útil	49
4.2.4 Teste 4 – Bateria com 20% da Carga Útil	51
4.2.5 Teste 5 - Bateria com 0% da sua Carga Útil.....	54
4.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS	57
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	60
REFERÊNCIAS.....	61

1 INTRODUÇÃO

Nestas últimas décadas, os empresários de todo o mundo perceberam a importância em investir na pesquisa e desenvolvimento de novos produtos com forma de se manter no mercado. Os avanços que a tecnologia tem proporcionado ao ser humano fornecem-lhe grandes benefícios, mas ao mesmo tempo impõem a uma atenção cada dia maior no que se refere ao acompanhamento das inovações e a consequente participação contínua deste processo, não apenas como espectador, mas como protagonista neste momento. As indústrias modernas têm sido alvo de todo o tipo de ações da concorrência na busca pela sobrevivência, e somente ficarão no mercado as empresas que ousarem inovar constantemente. Para isto é fundamental a pesquisa voltada para novos equipamentos e componentes, e entre os principais dispositivos usados atualmente, os supercapacitores se destacam com grandes vantagens técnicas e comerciais.

Os supercapacitores são componentes que passaram a representar uma oportunidade ímpar para os equipamentos elétricos a partir do início do século XXI. Apesar de existirem estudos anteriores, este componente passou a ser usado comercialmente há não mais de 15 anos e tem especial aplicação em circuitos alternativos para carga complementar de baterias. Com o crescimento vertiginoso das pesquisas sobre veículos elétricos, refletindo uma preocupação mundial sobre o uso racional de energia, todo e qualquer estudo que comprove a aplicação de supercapacitores na carga de baterias poderá contribuir para a melhoria do desempenho destes equipamentos.

Este trabalho monográfico se propõe a apresentar um estudo sobre o comportamento de supercapacitores no processo de carga de baterias do tipo chumbo/ácido em condições específicas similares ao funcionamento de um veículo elétrico.

1.1 OBJETIVOS

A seguir são declarados os objetivos (geral e específicos) relacionados com a realização deste projeto de pesquisa.

1.1.1 Objetivo Geral

Estudar o comportamento de carga de uma bateria chumbo-acido em diferentes níveis de energia utilizando propriedades de supercapacitores.

1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Pesquisar características e selecionar as baterias, supercapacitores e demais componentes necessários para a experimentação.
- b) Efetuar testes nos componentes para definir parâmetros para o experimento.
- c) Elaborar um planejamento para a realização do experimento considerando os componentes selecionados.
- d) Realizar o experimento em bancada carregando as baterias a partir de diferentes níveis de energia armazenada.
- e) Registrar os valores encontrados identificando o comportamento das baterias ao serem carregadas e apresentar os resultados levantados.

1.2 JUSTIFICATIVA

Pesquisar componentes que representam o estado da arte da tecnologia sempre representa uma oportunidade de aprendizado e de crescimento para o

ambiente científico sob determinados aspectos, os veículos elétricos possuem algumas vantagens sobre os movidos à combustão, entretanto as desvantagens levantadas afetam diretamente o consumidor. Por exemplo, atualmente a duração de uma recarga completa da bateria de um veículo elétrico é de aproximadamente 8 horas com uma autonomia de 120 km; em contrapartida para completar um tanque de combustível necessita-se apenas de poucos minutos proporcionando aproximadamente 400 km de autonomia. Em relação aos custos, os veículos elétricos têm o seu valor elevado devido a necessidade de baterias especiais. Justifica-se, portanto a realização deste estudo como forma de entender o comportamento dos supercapacitores para uma possível aplicação prática na carga de baterias para veículos elétricos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Faz-se neste capítulo uma descrição de conceitos envolvidos com o tema do trabalho. São descritos os dois principais itens, a saber: bateria e suas classificações, e supercapacitores e suas derivações para carga e descarga.

2.1 BATERIA

Resultado de um fenômeno eletroquímico bastante elementar e identificado há quase três séculos, a bateria química tornou-se um dos componentes elétricos mais utilizados atualmente. No mundo moderno, as baterias estão instaladas em um grande número de equipamentos, cada uma com a sua aplicabilidade e conveniência.

A bateria é um conjunto de pilhas responsável por transformar energia química em energia elétrica, através de duas placas de composição diferente, chamadas eletrodos, sendo sempre um positivo e outro negativo. A reação química inicia quando ambos são mergulhados em uma composição denominada eletrólito, que pode ser líquido, sólido, ou pastoso, porém sempre um condutor iônico. Em seguida o eletrodo negativo acumula carga negativa, pois se dissolve no eletrólito, expelindo os átomos carregados positivamente. Estes por sua vez são atraídos pelos íons negativos do eletrólito e repelem os íons positivos do eletrólito em direção ao eletrodo positivo. Isso acarreta um excesso de carga positiva no eletrodo positivo.

De acordo com Gussow (2004, p. 119), quando uma carga for conectada, as forças de atração e repulsão farão com que os elétrons livres do eletrodo negativo, se desloquem em direção ao eletrodo positivo e a diferença de potencial resultante gera uma tensão.

A Figura 1 representa o funcionamento de uma bateria hipotética ligada a uma carga elétrica.

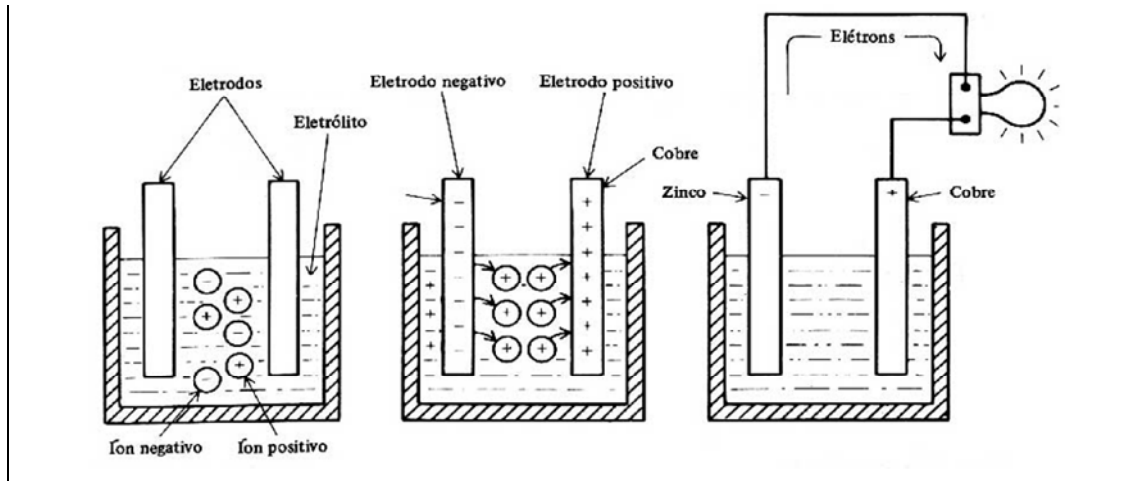


Figura 1: Configuração de uma bateria ligada a uma carga elétrica.
Fonte: GUSSOW, 2004.

2.1.1 Princípio da Descarga de Uma Bateria

Para descrever o processo de descarregamento de uma bateria por meio de uma carga resistiva, utiliza-se o diagrama representado na Figura 2.

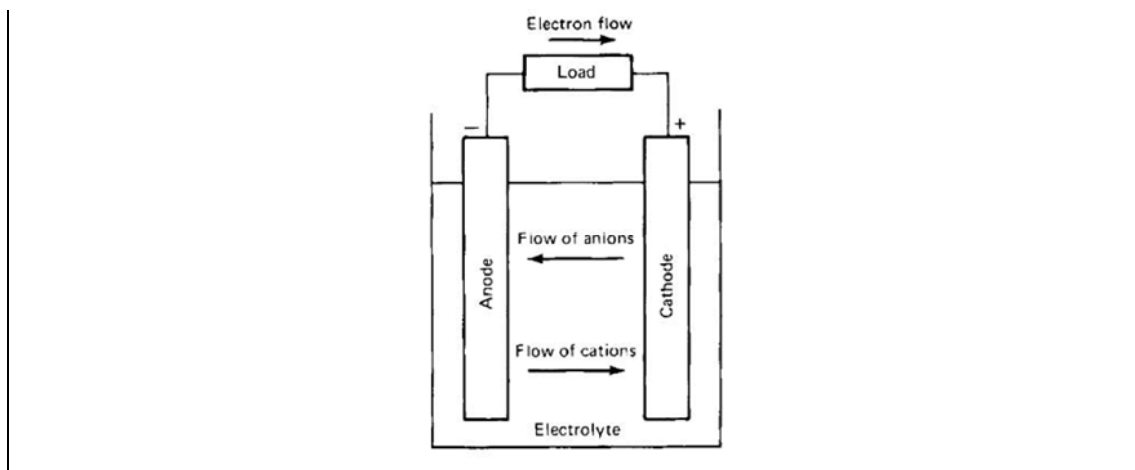


Figura 2: Diagrama de descarga de uma bateria elétrica.
Fonte: Adaptado de Linden e Reddy, 2001, p. 54.

A partir da conexão da bateria em uma carga externa, os elétrons do anodo sofrem uma reação de oxidação direcionando os elétrons para o catodo, onde os elétrons são aceitos e o material do catodo é reduzido. Durante o processo de

descarga o circuito elétrico é completo quando os ânions (íons negativos) se movimentam em direção ao anodo e os cátions (íons positivos) em direção do catodo.

Segundo Moran (2004 Pg. 456), “De forma geral uma bateria pode ser descarregada sem perigo, com qualquer valor de corrente, desde que a tensão não caia além do valor estipulado como limite de utilização”.

2.1.2 Princípio da Carga de uma Bateria

Durante a recarga o movimento da corrente é invertido, fazendo com que a oxidação ocorra no eletrodo positivo e a redução no eletrodo negativo, ou seja, o oposto do que ocorre no processo de descarga. Em razão da troca da posição em que ocorre a oxidação e a redução, o eletrodo positivo se torna o anodo e o negativo o catodo. Este processo pode ser melhor visualizado na Figura 3.

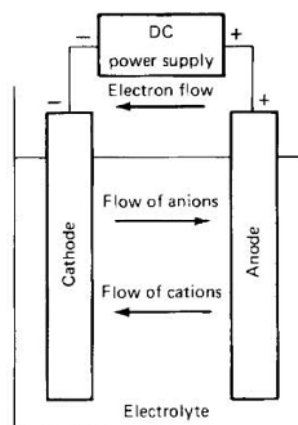


Figura 3: Diagrama de carga de uma bateria elétrica.
Fonte: Adaptado de Linden e Reddy, 2001, p. 56.

Segundo Moran (2004 Pg. 456), Uma bateria pode ser carregada com qualquer taxa de corrente, desde que não produza excessiva quantidade de gases e elevação de temperatura do equipamento acima de 45°C.

2.1.3 Classificação das Baterias

De acordo com Linden e Reddy (2001, p. 21), as baterias e pilhas eletroquímicas são identificadas como primárias (com características não recarregáveis) e secundárias (grupo das recarregáveis). Para o caso das secundárias ainda são aplicadas outras subclassificações para identificar estruturas particulares ou projetos/diferenças ou outras classes. Em seguida são apresentadas as classificações com mais detalhes.

2.1.3.1 Baterias Primárias

As baterias ditas Primárias são aquelas sem capacidade própria para receber recarga, uma vez utilizada pode ser descartada. Este tipo de dispositivo tem utilidade em alguns equipamentos eletrônicos tais como brinquedos entre outros, devido seu baixo preço e praticidade no uso. Segundo Linden e Reddy (2001, p. 168): “As principais vantagens das baterias primárias são uma boa duração, alta densidade de energia em uma taxa de descarga de baixa para moderada, sem manutenção e facilidade de uso”. Como exemplo de baterias primárias, a literatura aponta as fabricadas com zinco/dióxido de manganês (*Leclanché*); zinco/dióxido de manganês (alcalina); zinco/óxido de prata; zinco/dióxido de enxofre; lítio/dióxido de manganês; e outras combinações.

2.1.3.2 Baterias Secundárias

São denominadas baterias secundárias os dispositivos que, segundo Bochi, Ferracin e Biaggio (2000, p. 7), “[...] podem ser reutilizadas muitas vezes pelos usuários (centenas e até milhares de vezes pra o caso de baterias especialmente projetadas)”. O autor aponta também que como regra para classificação de uma

bateria (sistema eletroquímico) do tipo secundária quando são capazes de suportar “[...] 300 ou mais ciclos completos de carga e descarga com 80% da sua capacidade.” Como exemplos deste tipo de bateria pode-se citar as fabricadas com cádmio/óxido de níquel (níquel/cádmio); chumbo/óxido de chumbo (chumbo/ácido); hidreto metálico/óxido de níquel e outras.

As baterias secundárias podem ser classificadas em duas categorias de acordo com as suas aplicações:

A primeira categoria se dá quando a bateria é usada como dispositivo de armazenagem de energia, ou seja, ela é conectada à outra fonte de energia, denominada como principal; essa fonte monitora a carga e recarrega a bateria de acordo com as necessidades. Pode-se citar como exemplos de uso de baterias secundárias de armazenamento, os sistemas de emergência (Uninterruptible Power Supply - UPS) e veículos híbridos.

A segunda categoria se dá quando a bateria secundária é utilizada como bateria primária, mas após sua descarga basta apenas recarregá-la e não adquirir outra como as primárias, os exemplos mais conhecidos são baterias de celulares e notebook, e veículos totalmente elétricos.

Linden e Reddy (2001, p. 28) apontam as vantagens das baterias secundárias em relação às primárias são: alta densidade de potência, alta taxa de descarga, curva de descarga plana e boa performance com baixa temperatura.

2.1.4 Parâmetros para Carga e Descarga de Baterias

Serão apresentados nos itens seguintes os parâmetros relevantes para este projeto que explicam as características de cada bateria.

2.1.4.1 Tensão das Pilhas e Baterias

Com o resultado da soma do anodo e do catodo, encontra-se a tensão de uma pilha, como anteriormente mostrado, a bateria é o conjunto de pilhas, então se uma bateria possui quatro pilhas, sendo cada uma com tensão de 1,5V, ligadas em serie (Figura 4) a tensão resultante desta bateria será 6 V, ou seja, o número de pilhas vezes a tensão de cada uma.

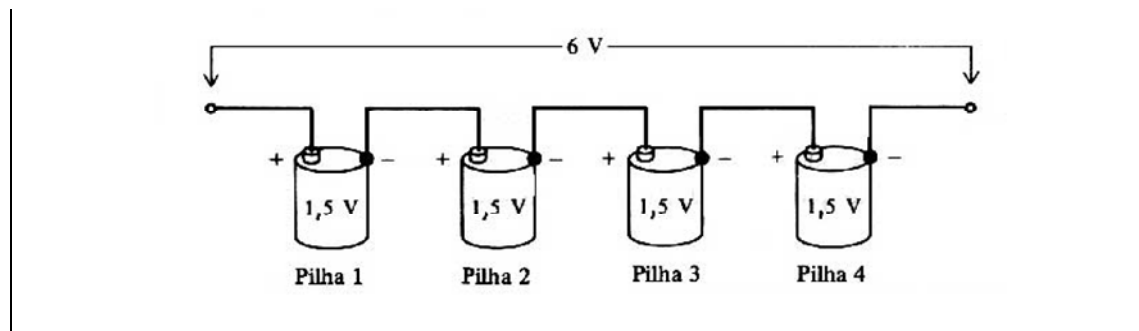


Figura 4: Associação de baterias em série.
Fonte: GUSSOW, 2004.

Já em uma associação em paralelo (Figura 5), a tensão na saída terá o mesmo valor da tensão de uma das pilhas associadas, porém, para esta configuração, a corrente será o produto entre a corrente aplicada e o número de componentes associados.

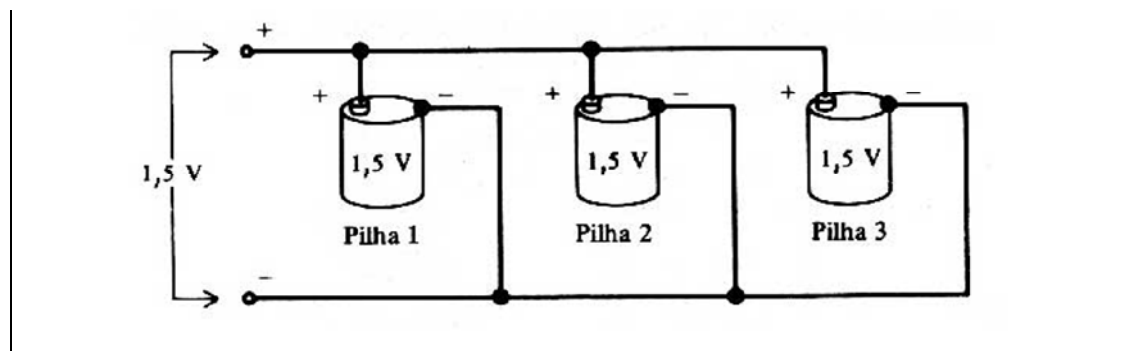


Figura 5: Associação de baterias em paralelo.
Fonte: GUSSOW, 2004.

2.1.4.2 Capacidade de Carga

Segundo Linden e Reddy (2001, p. 27) a capacidade de carga é: “[...] determinada pela soma dos materiais ativos da pilha descrita como a quantidade total de energia envolvida na reação eletroquímica”. Para os referidos autores, a capacidade de carga de uma pilha eletroquímica pode ser calculada como a soma dos pesos equivalentes dos reatantes (Fórmula 1), expressos em Ampére.hora/grama.

$$\text{Capacidade} = P_a + P_c \text{ (Ah/g)} \quad (\text{Fórmula 1})$$

P_a = Peso equivalente do anodo

P_c = Peso equivalente do catodo

Gussow (2004, p. 72) explica que: “A capacidade de uma bateria é o tempo que ela funcionará com uma dada taxa de carga”.

Essa grandeza pode ser influenciada de acordo com Moran (2004, p. 452): “por diversos fatores tais como taxa de descarga, temperatura, densidade e tensão final.

A unidade de carga elétrica no SI (Sistema Internacional de Unidades) é o Coulomb (C), quantidade de carga elétrica carregada pela corrente de 1A durante 1 segundo, porém, na prática a unidade Ampére.hora acaba sendo mais utilizada em razão da pequena dimensão do Coulomb.

2.1.4.3 Energia Armazenada

O conceito de energia armazenada em uma bateria, de acordo com Larminie e Leroy (2003, p. 39) representa um parâmetro elétrico que “[...] depende da tensão

e da carga armazenada, a unidade no SI é o Joule e a usual é o Watt-hora”. Pode ser calculada por meio da Fórmula 2.

$$\text{Energia (Whr)} = \text{Tensão (V)} \times \text{Capacidade de carga (Ah ou C)} \quad (\text{Fórmula 2})$$

2.1.4.4 Energia Especifica

Segundo Larminie e Leroy (2003, p. 40): “Energia especifica é a quantia de energia elétrica armazenada para cada quilograma da massa da bateria.” A unidade utilizada para esta grandeza é o Wh/Kg.

2.1.4.5 Eficiência Energética

A Eficiência energética, de acordo com Larminie e Leroy (2003, p.41) é definida como a relação de energia elétrica fornecida pela bateria pela quantia necessária para retornar ao estado em que estava antes de ser descarregado. Este valor pode variar de acordo com o jeito que a bateria é usada.

2.1.4.6 Autodescarga

Larminie e Leroy (2003, p. 41) denomina de autodescarga ao fenômeno que ocorre quando a bateria fica sem ser utilizada ou recarregada durante um determinado período de tempo. Este processo tem inúmeras variáveis que podem interferir, sendo o tempo e o tipo da bateria os principais responsáveis. A autodescarga é um efeito indesejável para os dispositivos armazenadores de energia, visto que ocorre sem a intenção humana, o dispositivo perde sua carga elétrica simplesmente estando desconectado de qualquer outro componente.

A autodescarga de uma bateria é causada pelo processo eletroquímico interno e assemelha-se ao efeito causado por uma pequena carga ligada à bateria e pode ser reduzido armazenando-se o componente sob baixas temperaturas.

2.2 SUPERCAPACITOR

Supercapacitor é a denominação dada ao componente elétrico formado por duas camadas separadas por um componente de características dielétricas. Trata-se de uma versão moderna de capacitores, porém com valores bem acima dos oferecidos até há pouco tempo. São divididos basicamente em dois tipos: Elétricos e eletroquímicos.

Os capacitores comuns apresentam alta densidade de potência (carga e descarga rápida) e baixa densidade de energia (pouca energia acumulada); uma bateria por sua vez possui exatamente o oposto, baixa densidade de potência e alta densidade de energia. Já o supercapacitor apresenta alta densidade de energia quando comparado com o capacitor comum e alta densidade de potência em relação à bateria, o Gráfico de Ragone, demonstrado na Figura 6, apresenta a posição dos supercapacitores tomando-se por base potência específica e energia específica acumulada. De acordo com suas características o supercapacitor pode ser usado para diversas aplicações de armazenamento de energia.

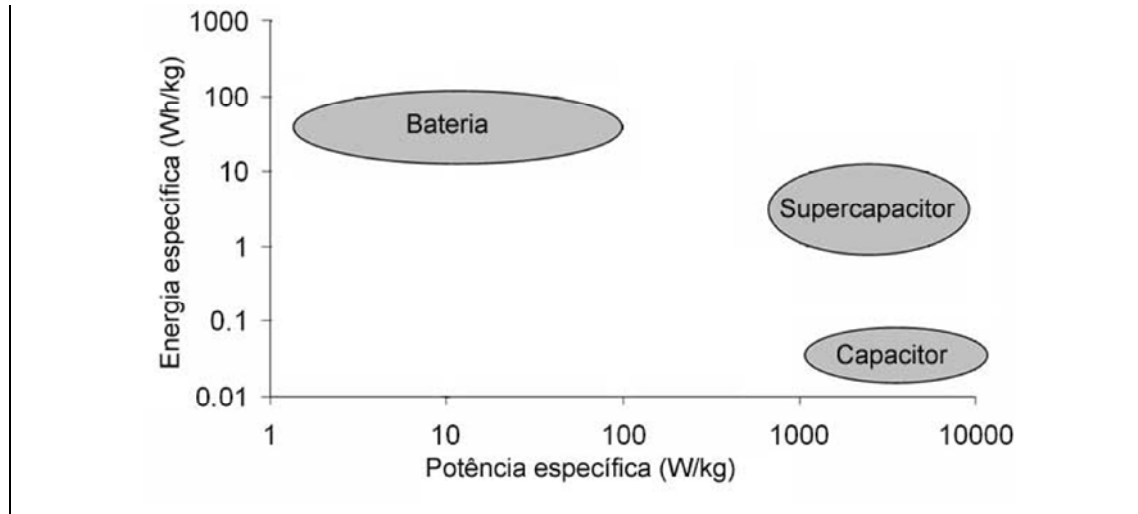


Figura 6: Gráfico de Ragone – Classificação de dispositivos de carga elétrica.
 Fonte: Adaptado de Johansson e Andersson, 2008, p.3.

2.2.1 Princípio de Funcionamento do Supercapacitor

Segundo Béguin, Frackowiak e Piñero (2010, p. 333) o princípio de carga e descarga de um supercapacitor pode ser visualizado pela Figura 7.

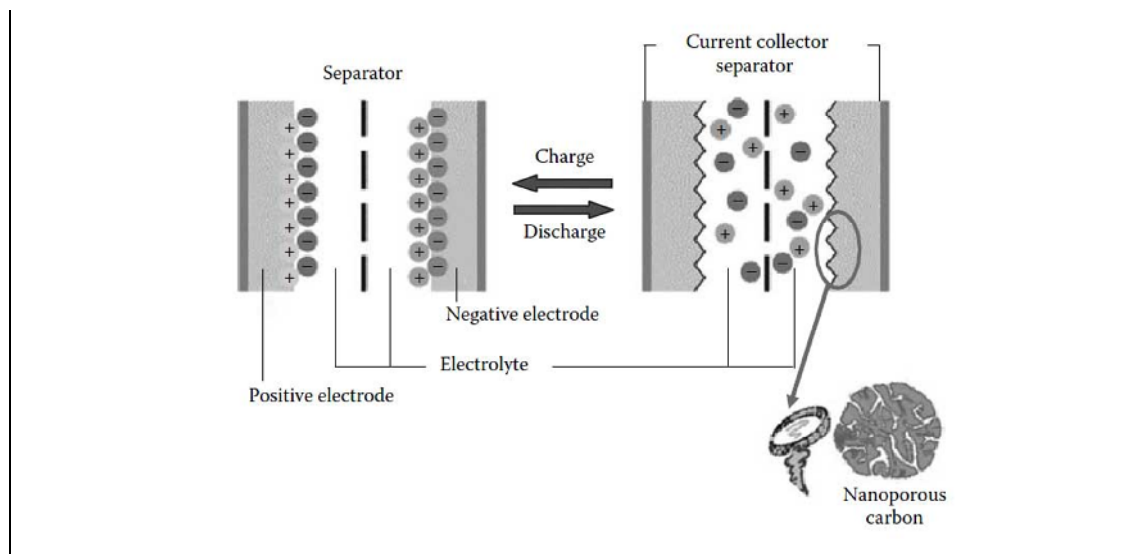


Figura 7: Princípio de carga e descarga de um supercapacitor.
 Fonte: Béguin, Frackowiak e Piñero, (2010, p.333).

Um supercapacitor é composto por dois eletrodos idênticos imersos em um eletrólito (orgânico ou aquoso) e separados por uma membrana porosa (papel, fibra de vidro ou polímero) chamado separador. No momento de carga do supercapacitor os elétrons do catodo atraem os íons positivos e no anodo as lacunas de elétrons atraem os íons negativos. Isso resulta na capacitância entre os íons e a superfície do eletrodo. A definição dupla-camada significa que cada eletrodo possui duas camadas de íons, sendo que a camada mais próxima do eletrodo atua como dielétrico e a mais distante contem as cargas. Isso ocorre nos dois eletrodos e a capacitância total é dada pela associação em série.

A composição de um capacitor de dupla-camada é similar a de uma bateria, mas como não envolve processo químico para realizar o ciclo de carga e descarga, não há deterioração dos eletrodos, conseqüentemente os capacitores de dupla-camada são capazes de efetuar, 100000 ciclos de carga e descarga (MAXWELL 2011)

Para análise de desempenho de um capacitor, existe um elemento fundamental, representado pela sigla ESR (*Equivalent Series Resistance*), ou seja uma resistência equivalente em série. Composta basicamente pelas resistências do dielétrico, do material das placas, da solução eletrolítica, e dos terminais sob uma determinada frequência, a ESR representa uma resistência em série com o capacitor, por isso o seu nome. Apesar de ser de pequeno valor, esta resistência pode causar acúmulo de calor por todo o corpo do dispositivo, podendo prejudicar seu desempenho e interferindo na capacitância e no processo de autodescarga.

O supercapacitor é um componente composto por determinadas partes que serão mais bem detalhadas na sequência.

2.2.2 Eletrodo

De acordo com Roland e Gualous (2010 p. 444), um eletrodo consiste em uma estrutura microporosa, normalmente confeccionada com carbono ativo. Através dessa estrutura consegue-se uma área de superfície específica maior que a dos capacitores comuns, e com isso é possível alcançar valores elevados de

capacitância. Para o referido autor “[...] o eletrodo de um supercapacitor é fator que interfere na determinação da capacitância, da ESR (Resistência Equivalente em Série) e das características da autodescarga do componente”.

2.2.3 Eletrólito

O eletrólito em um supercapacitor tem como principal função fornecer os íons, que são responsáveis, segundo Roland e Gualous (2010, p. 446), por transportar as cargas elétricas entre os eletrodos. De acordo com o referido autor existem três tipos disponíveis de eletrólitos: de sais fundidos, de sais em solvente orgânicos e de sais em solventes aquosos, e essas características definem a tensão nominal do componente.

2.2.4 Parâmetros Elétricos de Supercapacitores

2.2.4.1 Capacitância

Capacitância (C) refere-se a quantidade de carga por Volt de potencial que um capacitor consegue manter, e tem o Farad, como unidade básica de representação, entretanto na maioria das vezes a medida de capacitores ocorre com submúltiplos de Farads, como Micro e Pico. Ultimamente, com o desenvolvimento dos supercapacitores esta realidade mudou sensivelmente existindo inclusive componentes com capacitância de alguns Farads.

A capacitância é definida de acordo com Boylestad (2006 p. 272) como: “Uma medida da quantidade de carga que o capacitor pode armazenar em suas placas”

O cálculo para descobrir o valor da capacitância de um capacitor segundo Gussow (2004, p. 346) “[...] depende da área das placas condutoras, da separação

entre as placas, e da constante dielétrica do material isolante” e é representado pela Fórmula 3.

$$C = k \frac{A}{d} (8,85 \times 10^{-12}) \quad (\text{Fórmula 3})$$

C = Capacitância

k = Constante dielétrica

A = Área da placa

d = Distância entre as placas

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritas as etapas para a realização do experimento de carga da bateria com o uso dos supercapacitores e demais partes do processo. Decidiu-se, para tal procedimento, selecionar os componentes e equipamentos a serem usados e, em seguida, realizar testes preliminares nestes componentes. A partir desta etapa, foi elaborado um planejamento para a realização do experimento propriamente dito com os devidos registros de tais testes.

3.1 DEFINIÇÃO DA BATERIA PARA O EXPERIMENTO

A bateria utilizada para a realização do experimento (Figura 8) foi do tipo chumbo-ácido regulada por válvula (VRLA - *Valve-regulated lead-acid battery*) da marca UNIPOWER modelo UP613, com tensão nominal de 6V e capacidade de 1,3Ah, utilizada para aplicações estacionárias (nobreaks, alarmes, bancos de baterias em geral).



Figura 8: Foto da bateria utilizada nos experimentos práticos.

A intenção inicial era utilizar uma bateria chumbo-ácido de tração utilizada em veículos elétricos de baixo consumo, porém, a tensão nominal deste tipo de bateria é de 18V, o que inviabilizaria a realização dos teste devido aos altos custos a necessidade de um maior número de supercapacitores

3.2 DEFINIÇÃO DO SUPERCAPACITOR

A escolha desses componentes teve base na relação entre tensão total, preço e prazo de entrega. A necessidade para o projeto era atingir a tensão da bateria, tornando assim possível a recarga, para isso foi levado em consideração o principio de associação em série de capacitores, no qual segundo Gussow (2004, p. 348) “A tensão total que pode ser aplicada a um grupo de capacitores em série é igual à soma das tensões de trabalho dos capacitores isolados”, ou seja, a tensão de cada supercapacitor é de 2,5V, então para conseguir chegar a tensão da bateria (6V) são necessários no mínimo três capacitores ligados em série.

$$\begin{aligned}
 Tensão_{total} &= Tensão_{C_1} + Tensão_{C_2} + Tensão_{C_3} + \dots + Tensão_{C_n} && \text{(Fórmula 4)} \\
 Tensão_{total} &= 2,5 + 2,5 + 2,5 \\
 Tensão_{total} &= 7,5V
 \end{aligned}$$

Com a definição do número mínimo de supercapacitores necessários para realizar a carga da bateria, foi pesquisado a relação capacitância/preço. Entre os modelos disponíveis fez-se uma comparação entre o modelo elétrico de dupla camada (EDC) da marca NICHICON de 1000F com tensão de 2,5 V e o modelo eletroquímico de dupla camada (EQDC) da marca MAXWELL de 1200F com tensão de 2,7V. O modelo eletroquímico apresentava menor preço e maior capacitância por unidade, mas possuía duas particularidades que impossibilitou sua compra, a primeira foi que no componente contem cianeto de metila, substância altamente inflamável e tóxica. Devido a sua composição o valor do frete aumentaria em 250% em relação ao outro modelo, o outro problema encontrado seria o longo período de regularização junto com a Receita Federal, ocasionando aumento do prazo de entrega, de uma semana para 90 dias de acordo com a empresa responsável.

Após levantar realizar essas relações foram adquiridos três supercapacitores do tipo elétrico de dupla-camada da Marca NICHICON EVERCAP modelo JJD0E108MSED, cada um com tensão nominal de 2,5V e capacitância de 1000F, representados na Figura 9.



Figura 9: Detalhe dos supercapacitores usado nos testes.

As associações possíveis com os componentes adquiridos são em série e em paralelo. Na associação em paralelo o valor da capacitância total de acordo com Gussow (2004, p.348): “É a soma das capacitâncias individuais”.

$$C_t = C_1 + C_2 + \dots + C_n \quad (\text{Fórmula 5})$$

C_t = Capacitância total

C_n = Número total de capacitores

A tensão será a mesma aplicada pela fonte.

$$Tensão_{fonte} = Tensão_{capacitores} \quad (\text{Fórmula 6})$$

E na associação em série o valor da tensão será a soma das de cada componente.

$$Tensão_{total} = Tensão_{C_1} + Tensão_{C_2} + Tensão_{C_3} + \dots + Tensão_{C_n} \quad (\text{Fórmula 4})$$

O valor da capacitância se comportará como um resistor, para um número indefinido de capacitores a fórmula será:

$$\frac{1}{C_t} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n} \quad (\text{Fórmula 7})$$

Ct = Capacitância total

Cn = Número de total de capacitores

E no caso de apenas dois capacitores, o valor será encontrado através de:

$$C_t = \frac{C_1 \times C_2}{C_1 + C_2} \quad (\text{Fórmula 8})$$

Ct = Capacitância total

Quando houver um número indefinido com a mesma capacitância o valor será:

$$C_t = \frac{C}{n} \quad (\text{Fórmula 9})$$

Ct = Capacitância total

C = Capacitância de cada capacitor

n = Número de capacitores

Então os valores dos capacitores em paralelo serão:

Capacitância:

$$\begin{aligned} C_t &= C_1 + C_2 + \dots + C_n \\ C_t &= 1000F + 1000F + 1000F \\ C_t &= 3000F \end{aligned} \quad (\text{Fórmula 5})$$

Tensão:

$$\begin{aligned} Tensão_{fonte} &= Tensão_{capacitores} \\ Tensão_{Total} &= 2,5V \end{aligned} \quad (\text{Fórmula 6})$$

E em série:

Capacitância:

$$\begin{aligned} C_t &= \frac{C}{n} \\ C_t &= \frac{1000F}{3} \\ C_t &= 333,33F \end{aligned} \quad (\text{Fórmula 9})$$

Tensão:

$$\begin{aligned} Tensão_{total} &= Tensão_{C_1} + Tensão_{C_2} + Tensão_{C_3} + \dots + Tensão_{C_n} \\ Tensão_{total} &= 2,5 + 2,5 + 2,5 \\ Tensão_{total} &= 7,5V \end{aligned} \quad (\text{Fórmula 4})$$

3.3 DEFINIÇÃO DA FONTE PARA CARGA DOS SUPERCAPACITORES

Para efetuar a carga dos capacitores foi utilizada uma fonte de tensão e corrente ajustáveis da marca Oltronix, modelo B60-5R, a tensão para este equipamento pode chegar a 60 V, com ajuste de mV, sendo que a corrente máxima é de 5 A. A Figura 10 demonstra a fonte usada para os testes.



Figura 10: Detalhe da fonte variável usada para os experimentos.

3.4 DEFINIÇÃO DOS MULTÍMETROS

As medidas das variáveis necessárias para os testes foram realizadas por meio de três multímetros. Para monitorar a tensão da bateria utilizou-se um equipamento da marca YOKOGAWA modelo 73301, a tensão sobre os supercapacitores foi monitorada com um multímetro FLUKE modelo 177 e a corrente do circuito por meio de equipamento da marca MINIPA, modelo APPA ET 2400, os três instrumentos ilustrados na Figura 11.



Figura 11: Multímetros usados para monitoração da tensão e corrente no circuito.

3.1 RESISTOR PARA DESCARGA DO SUPERCAPACITOR

Para a realização de testes preliminares nos supercapacitores foi utilizado um circuito simplificado da fonte Oltronix, ligada aos capacitores configurados de formas distintas descritas posteriormente. Para a descarga dos referidos componentes neste teste preliminar foi utilizado um resistor de 1,5 Ohms por 15W.

3.2 COMPONENTE PARA DESCARGA DA BATERIA

Para melhor acompanhamento da curva de descarga da bateria Chumbo/ácido após seu carregamento por meio de supercapacitores, foi utilizada uma lâmpada do tipo automotiva com tensão de 12V e 21W de potência (Figura 12), largamente disponível no mercado.



Figura 12: Lâmpada usada para a descarga da bateria após carregamento com supercapacitores.

3.3 CUSTOS PARA AQUISIÇÃO DOS COMPONENTES

Os componentes e demais acessórios adquiridos para a realização dos testes implicaram em um custo total que é demonstrado na Tabela 1. Os instrumentos selecionados para medições foram emprestados.

Tabela 1: Custos de aquisição de componentes e acessórios para os experimentos.

N°	Produto	Unid.	Frete	Imposto	Valor Unid.	Total
1	Supercapacitor NICHICON EVERCAP JJD0E108MSED	3	73,60	556,00	187,68	1.192,64
2	Bateria UNIPOWER modelo UP613 6V-1,3Ah	1	----	----	19,00	19,00
3	Cabo 2mm	5	----	----	1,50	7,50
4	Conector tipo Jacaré	12	----	----	1,50	18,00
5	Lâmpada 12V - 21W	1	----	----	2,00	2,00
6	Resistores	3	----	----	1,25	3,75
					TOTAL:	1.242,89
Valores em Reais (R\$).						

4 REALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO

Este capítulo descreve o experimento realizado iniciando pelos testes nos componentes, e posterior acompanhamento da carga e descarga dos componentes e registro dos dados para análise do comportamento dos supercapacitores.

4.1 TESTES DOS COMPONENTES

Os testes foram realizados no Laboratório de Instrumentação de Furnas, onde foram disponibilizados os equipamentos como a fonte ajustável, os multímetros, as bancadas e ferramentais para montagem dos circuitos. O componente testado possui alta densidade de potência, ou seja, pode ser carregado rapidamente se for fornecido energia com alta corrente. Mas para a proteção do equipamento cedido a corrente máxima utilizada foi de 2A limitada por meio de um resistor inserido em série no circuito.

4.1.1 Teste Preliminar dos Supercapacitores

Para obter um melhor desempenho e garantir a segurança do componente foram realizados os seguintes testes para levantar a curva de descarga dos supercapacitores, seguiu-se, portanto as seguintes etapas:

- a) Levantamento da curva de descarga de três supercapacitores ligados em série, com tensão total de 7,5 V e capacitância de 333 F.
- b) Levantamento da curva de descarga de um supercapacitor, com tensão de 2,5 V e capacitância de 1000 F.
- c) Levantamento da curva de descarga de três supercapacitores ligados em paralelo, com tensão de 2,5V e capacitância de 3000 F.

Os materiais utilizados nestes testes estão descritos na Tabela 2:

Tabela 2: Materiais usados para testes preliminares nos supercapacitores

MATERIAIS	QUANTIDADE
Fonte ajustável Oltronix, - B60-5R	1
Multímetro para medir tensão	1
Multímetro para medir corrente	1
Resistor limitador de corrente (*)	1
Supercapacitor Evercap JJD0E108MSED	3

(*) Para o teste 1 foi usado um resistor de 3,75 Ohms/15W.

Para os testes 2 e 3 foi usado um resistor de 1,5 Ohm/20W.

O circuito equivalente para a realização dos testes 1,2 e 3 pode ser visualizado na Figura 13, 14 e 15.

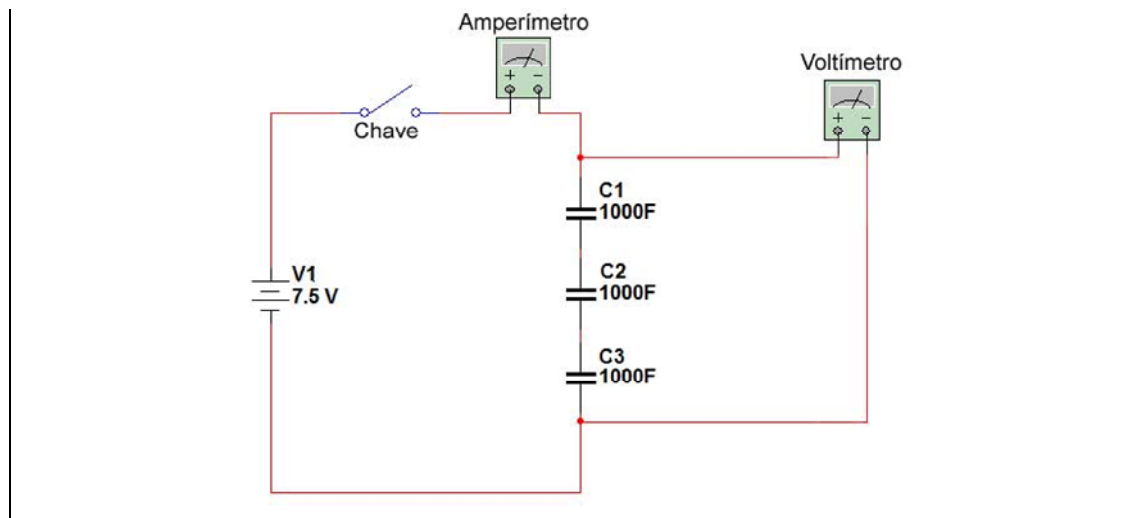


Figura 13: Circuito equivalente a 333F

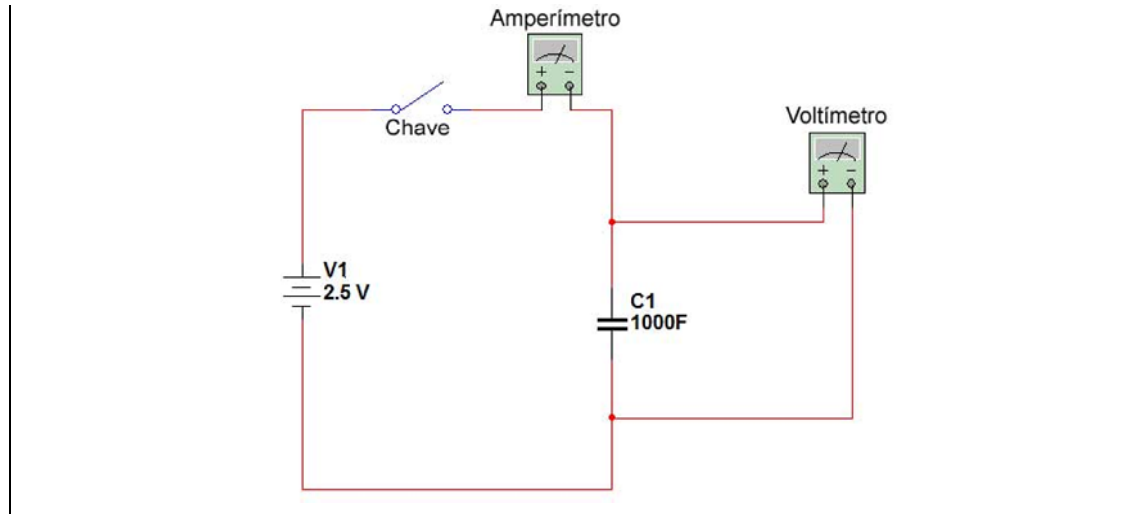


Figura 14: Circuito equivalente a 1000F

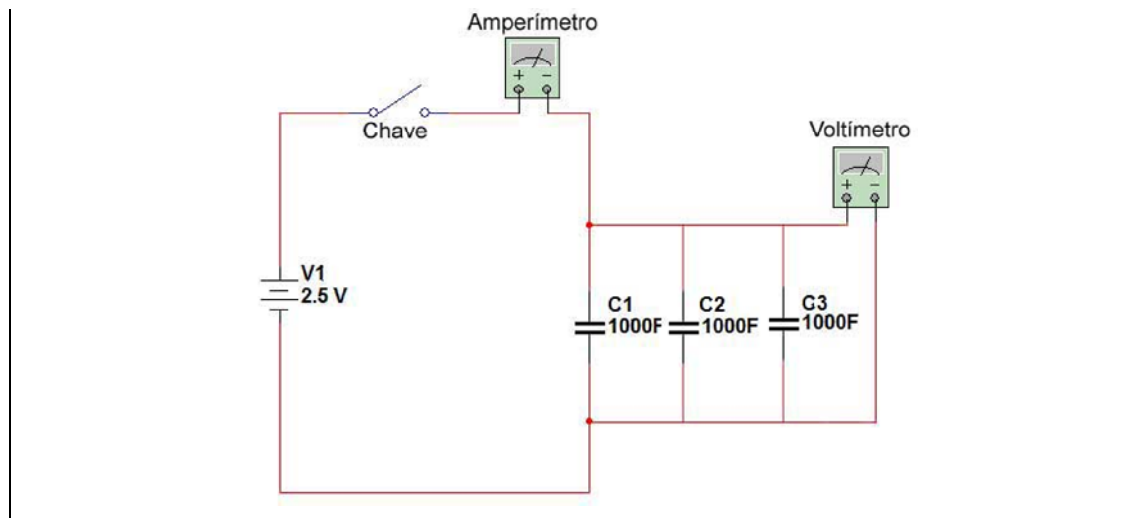


Figura 15: Circuito equivalente a 3000F

4.1.1.1 Teste 1: Teste com Capacitância Equivalente de 333F

Descrição: Os supercapacitores foram conectados em série, através de barras de alumínio, visando a segurança do circuito, seguindo o princípio de associação em série de capacitores, a tensão total foi a soma das tensões de cada componente associado:

$$Tensão_{total} = Tensão_{C_1} + Tensão_{C_2} + Tensão_{C_3} + \dots + Tensão_{C_n} \quad (\text{Fórmula 4})$$

$$\begin{aligned} Tensão_{total} &= 2,5 + 2,5 + 2,5 \\ Tensão_{total} &= 7,5V \end{aligned}$$

Nesta associação o valor da capacitância também é modificado, a fórmula utilizada é a seguinte:

$$\begin{aligned} C_t &= \frac{C}{n} && \text{(Fórmula 9)} \\ C_t &= \frac{1000F}{3} \\ C_t &= 333,33F \end{aligned}$$

Para a carga, a tensão da fonte foi ajustada para 7,5 V e corrente de 2 A.

No procedimento para levantar a curva de descarga foi utilizado um resistor como carga, calculado para que a corrente no circuito seja de 2 A, a mesma do procedimento de carga.

$$\begin{aligned} R &= U/I && \text{(Fórmula 10)} \\ R &= 7,5/2 \\ R &= 3,75 \quad /15W \end{aligned}$$

4.1.1.2 Teste 2: Teste com Capacitância Equivalente de 1000F

Descrição: Para este teste foi selecionado apenas um dos supercapacitores, a tensão da fonte foi ajustada para 2,5 V (tensão nominal do componente) e a corrente de 2 A. No procedimento para levantar a curva de descarga foi utilizado um resistor como carga, calculado para que a corrente no circuito seja de 2 A, a mesma do procedimento de carga.

$$\begin{aligned} R &= U/I && \text{(Fórmula 10)} \\ R &= 2,5/2 \\ R &= 1,5 \quad /20W \end{aligned}$$

4.1.1.3 Teste 3: Teste com Capacitância Equivalente de 3000F

Descrição: Foi realizada a conexão em paralelo dos supercapacitores, com a intenção de aumentar a capacitância, que segundo Gussow (2004), “Quando os capacitores estão ligados em paralelo, a capacitância total (C_t) é a soma das capacitâncias individuais”, então para este teste tem-se que a capacitância total foi de:

$$\begin{aligned} C_t &= C_1 + C_2 + \dots + C_n && \text{(Fórmula 5)} \\ C_t &= 1000F + 1000F + 1000F \\ C_t &= 3000F \end{aligned}$$

O resistor limitador para a descarga permaneceu como para o teste anterior: 1,5 Ohms/20W.

4.1.1.4 Resultados dos Testes Preliminares

Após o levantamento dos dados referentes à tensão de descarga dos supercapacitores nas três configurações determinadas (333F, 1000F e 3000F) elaborou-se um gráfico demonstrando o comportamento dos referidos componentes, o gráfico resultante destes testes são vistos na Figura 16.

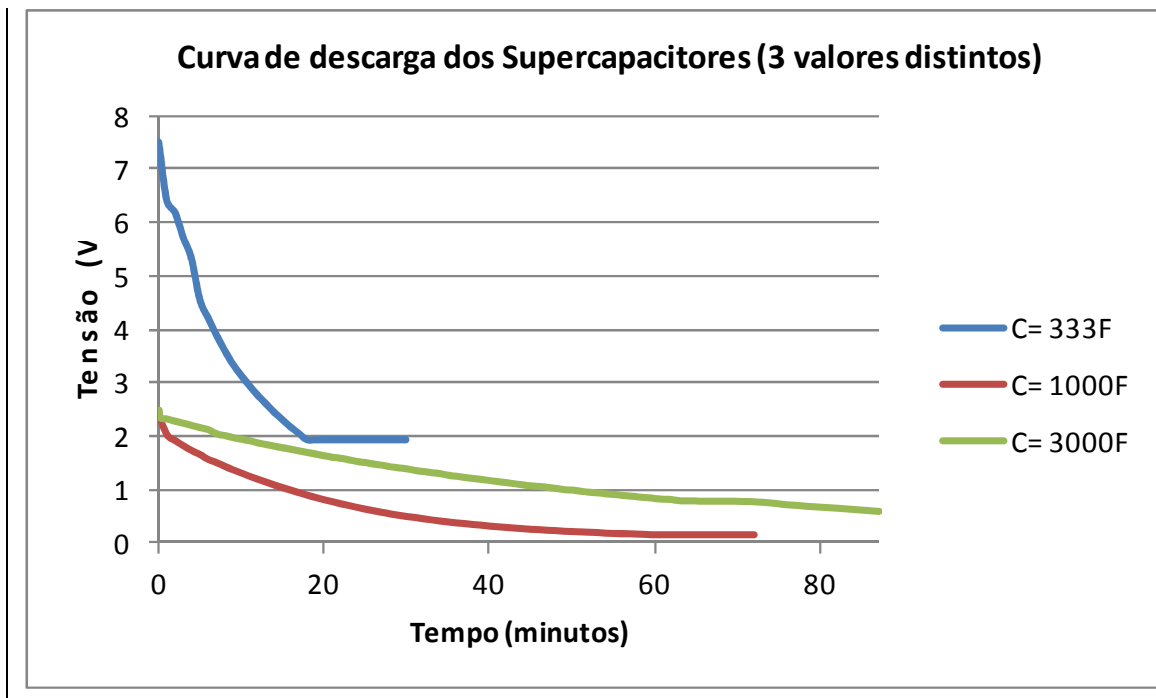


Figura 16: Gráfico resultante dos testes 1,2 e 3 de descarga dos supercapacitores.

4.1.2 Teste Preliminar da Bateria

Segundo Linden e Reddy (2001, p 574), considerando-se uma bateria chumbo-ácido estacionária, a tensão mínima em cada pilha para que não danifique os eletrodos é de 1,8V, ou seja, como a bateria utilizada possui três pilhas, não poderá apresentar valor de tensão total menor que 5,4V.

Tendo o valor máximo de descarga admissível para a bateria, realizou-se um teste para descarga (Figura 17) da mesma até a tensão de 5,4V e identificou o valor da tensão em que a corrente deixa de ser constante.

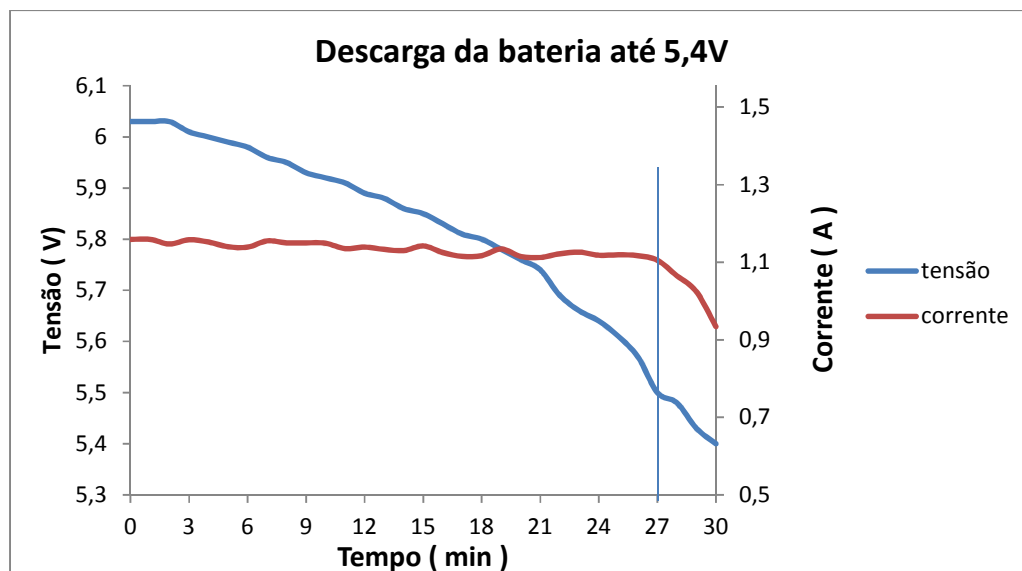


Figura 17: Curva de descarga da bateria Chumbo/ácido até 5,4V

De acordo com o gráfico notou-se que a partir do momento em que a tensão chega em 5,5V o valor da corrente apresenta uma queda, deixando de ser constante. Com isso admite-se esse valor de tensão como limite para que a corrente permaneça constante, será denominado 0% de carga útil.

4.2 DEFINIÇÃO DAS ETAPAS PARA A REALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO

Concluídos os testes preliminares passou-se a elaborar o plano para a realização do teste propriamente dito de carga da bateria de Chumbo/ácido com a aplicação de tensão oriunda dos supercapacitores. Para a realização destes experimentos utilizou-se estes componentes ligados em série, o que representa capacitância equivalente de 333F e tensão nominal de 7,5V.

O fluxograma apresentado na Figura 18 demonstra a ordem definida para a realização dos testes, ou seja, a partir de carregados os supercapacitores efetuar a carregamento da bateria a partir de diferentes níveis de carga desta.

Especificou-se então que os testes seriam realizados inicialmente com a bateria em carga total ou seja 100% e, ao concluir-se cada etapa do procedimento, descarregar-se-ia o dispositivo para 20% a menos de sua carga definida para o teste

anterior. A partir desta condição efetuava-se a recarga da bateria usando o supercapacitor e em seguida o teste de descarga da bateria recém carregada. As curvas de comportamento para cada fase do experimento estão descritas em seguida.

Nesta etapa será descrito as particularidades da utilização de supercapacitores como dispositivo de armazenamento de energia, após estar carregado, sua função será fornecer energia a uma bateria, esta por sua vez apresentará diferentes níveis de carga.

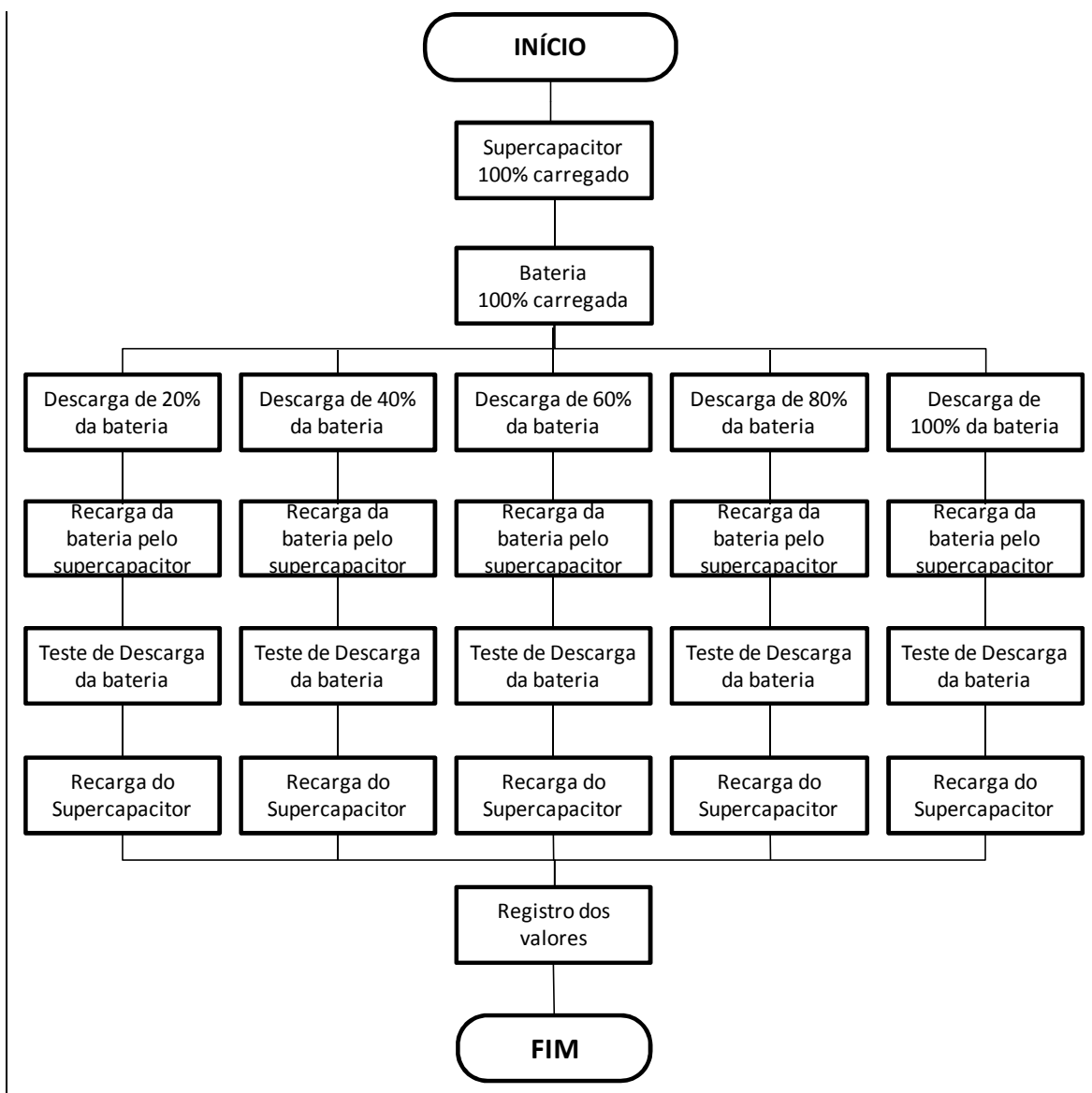


Figura 18: Fluxograma dos testes realizados no experimento.

Carga dos supercapacitores: foram ligados em série somando uma tensão de 7,5V e capacitância total de 333F, carregando-os conforme a seqüência apresentada no item 4.1.1.1.

Descarga da bateria: Considerando a bateria totalmente carregada realizou-se o seu descarregamento a partir de diferentes níveis de tensão (apresentados em porcentagens). Esses valores foram determinados seguindo da fórmula abaixo:

$$V_{\%,-100\%} = Tensão_{i100\%} + Tensão_{L\%} \quad (\text{Fórmula 11})$$

$V_{\%,-100\%}$ = Variação de tensão

$Tensão_{i100\%}$ = Tensão da bateria equivalente a 100% de carga

$Tensão_{L\%}$ = Tensão da bateria equivalente a 0% de carga.

$$T_{x\%} = (V_{\%,-100\%} \cdot n\%) \div 100 + 5,5V \quad (\text{Fórmula 12})$$

$T_{x\%}$ = Tensão da porcentagem requerida

$V_{\%,-100\%}$ = Variação de tensão

$n\%$ = Porcentagem procurada

Recarga da bateria: Após a descarga da bateria no nível de carga especificada conectou-se os supercapacitores como fonte de energia para realizar a recarga, a ligação foi efetuada feita sem o uso de resistores, tomando-se o cuidado de observar a temperatura da bateria.

Teste de descarga: Com a bateria recarregada pelo supercapacitor, efetuou-se um teste para verificar a descarga da bateria, ligando uma lâmpada em seus terminais e verificando a curva característica.

Registro e análise dos resultados: Com base nos valores levantados durante os experimentos, foram comparadas as tensões de descarga no circuito com os índices encontrados nas etapas anteriores.

A proposta para realizar o experimento foi de obedecer a seqüência de testes conforme demonstrado na Tabela 3.

Tabela 3: Definição dos limites de tensão para os testes do experimento

Teste	% inicial da carga para teste	Bateria Carregada		Bateria Descarregada	Vmáx - Vmín	%.(Vmáx-Vmín)	(%.(Vmáx-Vmín)+Vmín)
		Com carga V (Sem carga)	Sem Carga Vmáx	Vmín			
1	80%	6,40	6,13	5,50	0,63	0,504	6,00
2	60%	6,54	6,18	5,50	0,68	0,408	5,91
3	40%	6,55	6,21	5,50	0,71	0,284	5,78
4	20%	6,51	6,22	5,50	0,72	0,144	5,64
5	0%	6,35	5,95	5,50	0,45	0,00	5,50

Os valores apresentados na Tabela 3 foram determinados considerando-se uma carga (lâmpada) como elemento de descarga da bateria, o valor de 5,5 V foi definido como mínima tensão por ser o ponto em que a referida lâmpada cessa de iluminar.

4.2.1 Teste 1 – Bateria com 80% da Carga Útil

Conforme o Fluxograma da Figura 16, a primeira etapa consiste da descarga de 20% da carga da bateria. O valor de 80% do diferencial entre tensão máxima e mínima para o circuito funcionar é encontrado a partir de:

$$V_{\%i-100\%} = Tensão_{i100\%} + Tensão_{L\%} \quad (\text{Fórmula 11})$$

$$V_{\%i-100\%} = 6,13 + 5,50$$

$$V_{\%i-100\%} = 0,63V$$

$$T_{x\%} = (V_{\%i-100\%} \cdot n\%) \div 100 + 5,5V \quad (\text{Fórmula 12})$$

$$T_{\%} = (0,63 \times 80) \div 100 + 5,50$$

$$T_{\%} = 6,004V$$

A descarga inicial da bateria foi feita com o uso da lâmpada e monitoradas tensão e corrente do circuito, a Figura 19 demonstra a realidade encontrada para esta primeira fase dos testes.

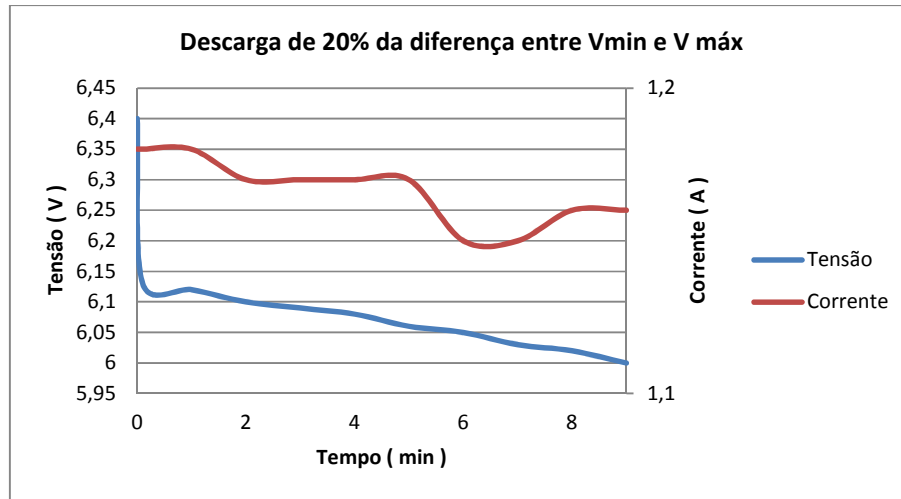


Figura 19: Curva de descarga da bateria para até 80% para início dos testes.

Considerando-se a bateria com uma tensão de 6V e após o circuito do supercapacitor devidamente carregado, efetuou-se a recarga da bateria. A Figura 20 demonstra a curva resultante de tal teste.

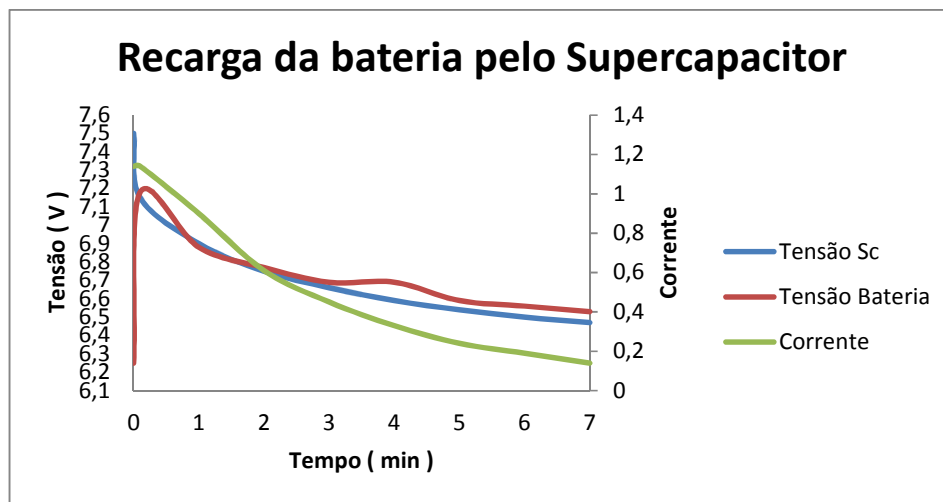


Figura 20: Curva de recarga da bateria a partir da tensão inicial de 6V.

Com a bateria devidamente carregada inicia-se a terceira fase do primeiro teste, ou seja o acompanhamento da descarga da bateria após seu carregamento por meio do supercapacitor. A curva resultante deste teste é demonstrada na Figura 21.

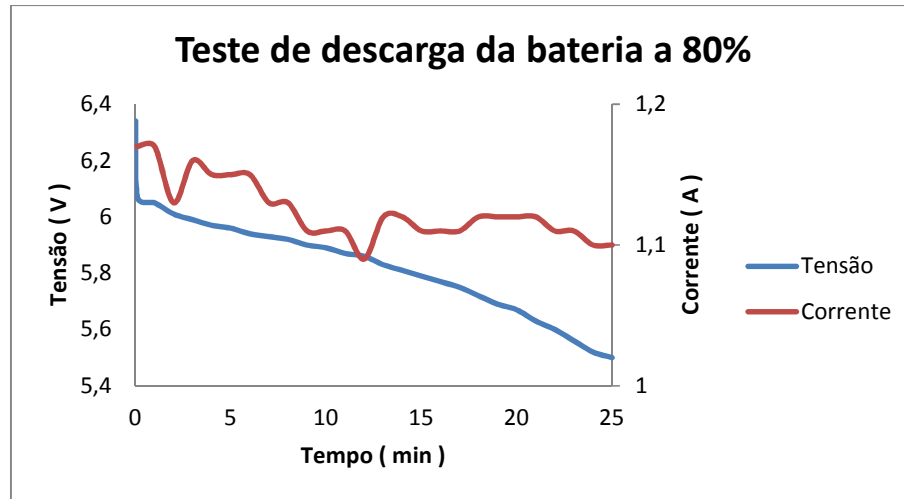


Figura 21: Curva de descarga da bateria após seu carregamento usando supercapacitores.

Ao finalizar o teste, o supercapacitor foi recarregado e a sua curva é demonstrada na Figura 22.

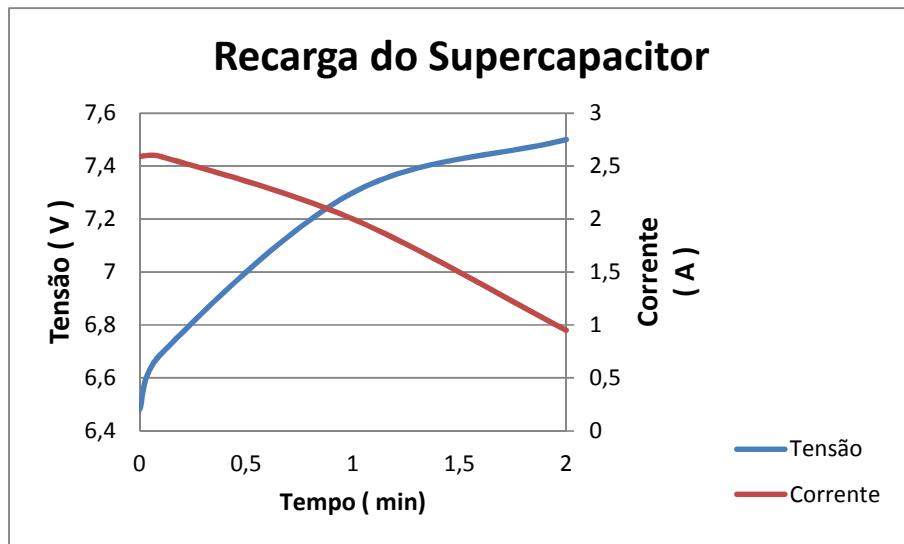


Figura 22: Primeira curva de carga dos supercapacitores usando a fonte de tensão.

4.2.2 Teste 2 – Bateria com 60% da Carga Útil

Da mesma forma como foi conduzido o primeiro teste, a segunda fase consiste em reduzir o nível de tensão da bateria para valores considerados 60% da

diferença entre nível máximo e os 5,5 V determinados anteriormente. As Figuras 23, 24, 25 e 26 são representações dos testes aos mesmos moldes do anterior, e os devidos cálculos usados para encontrar tais valores são apresentadas em seguida.

$$V_{\%,-100\%} = Tens\tilde{a}o_{i100\%} + Tens\tilde{a}o_{L\%} \quad (\text{F\acute{o}rmula 11})$$

$$V_{\%,-100\%} = 6,18 + 5,50$$

$$V_{\%,-100\%} = 0,68V$$

$$T_{x\%} = (V_{\%,-100\%} \cdot n\%) \div 100 + 5,5V \quad (\text{F\acute{o}rmula 12})$$

$$T_{60\%} = (0,68 \times 60) \div 100 + 5,50$$

$$T_{60\%} = 5,904V$$

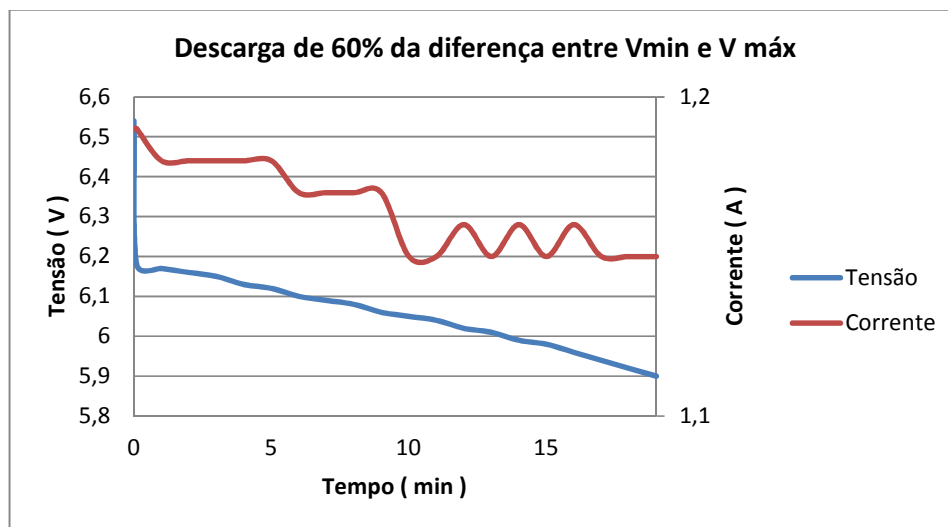


Figura 23: Curva de descarga da bateria para ate 60% para segunda fase dos testes.

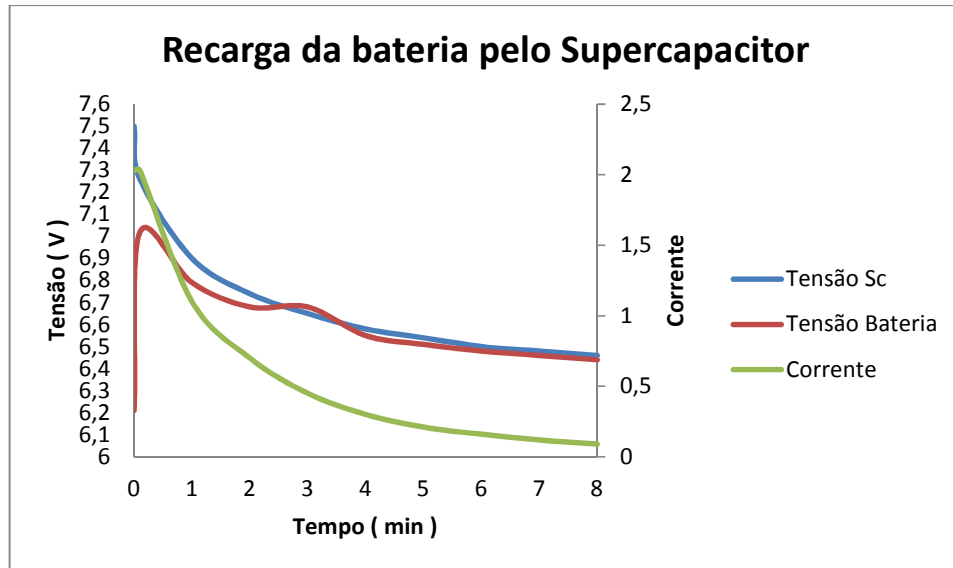


Figura 24: Curva de recarga da bateria a partir da tensão inicial de 5,9V.

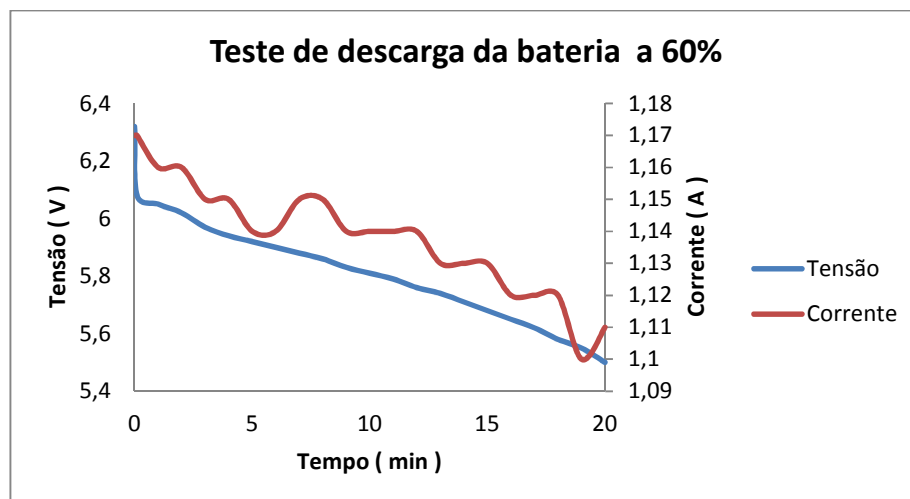


Figura 25: Curva de descarga da bateria após seu carregamento usando supercapacitores.

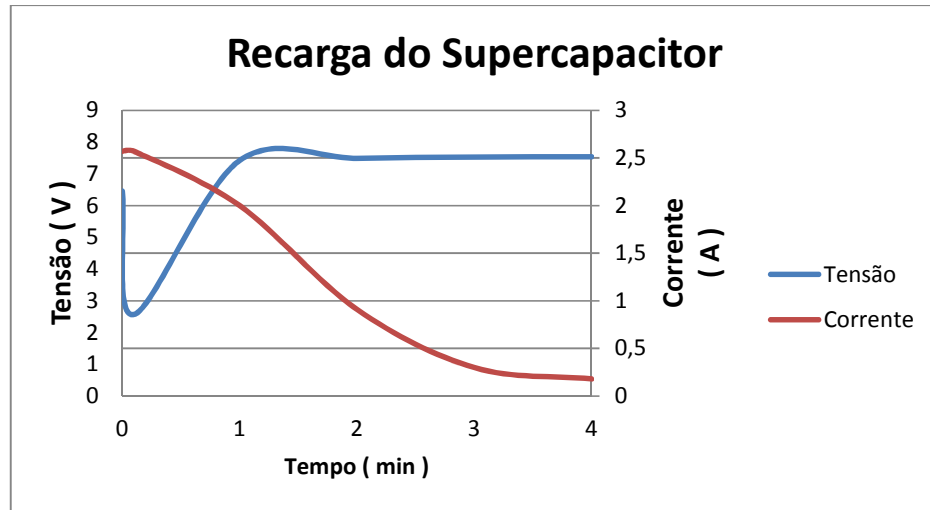


Figura 26: Segunda curva de carga dos supercapacitores usando a fonte de tensão.

4.2.3 Teste 3 – Bateria com 40% da Carga Útil

A terceira fase do experimento consistiu em reduzir o nível de tensão da bateria para valores considerados 40% da diferença entre nível máximo e os 5,5 V determinados anteriormente. Os cálculos usados para encontrar os valores envolvidos para a realização do teste são apresentados em seguida.

$$V_{\%,-100\%} = Tensão_{i100\%} + Tensão_{L\%} \quad (\text{Fórmula 11})$$

$$V_{\%,-100\%} = 6,21 + 5,50$$

$$V_{\%,-100\%} = 0,71V$$

$$T_{x\%} = (V_{\%,-100\%} \cdot n\%) \div 100 + 5,5V \quad (\text{Fórmula 12})$$

$$T_{40\%} = (0,71 \times 40) \div 100 + 5,50$$

$$T_{40\%} = 5,78V$$

As Figuras 27, 28, 29 e 30 são representações dos testes aos mesmos moldes dos anteriores, variando apenas os valores encontrados.

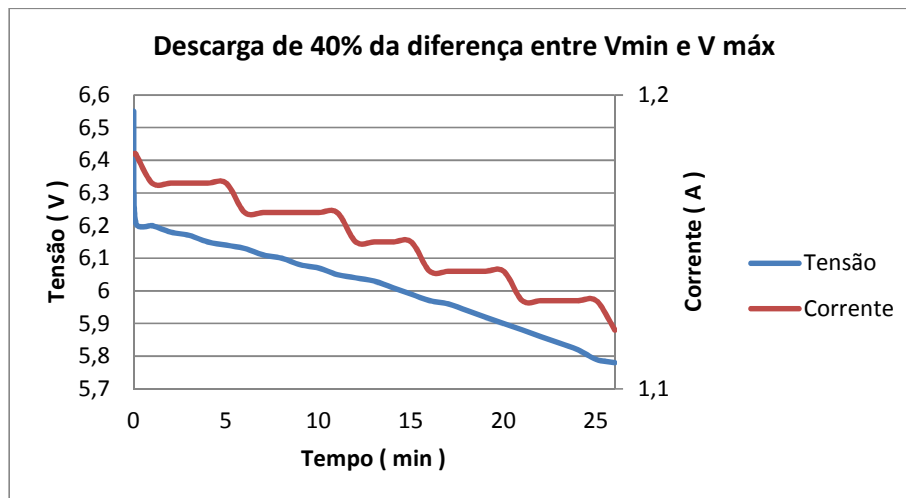


Figura 27: Curva de descarga da bateria para até 40% para terceira fase dos testes.

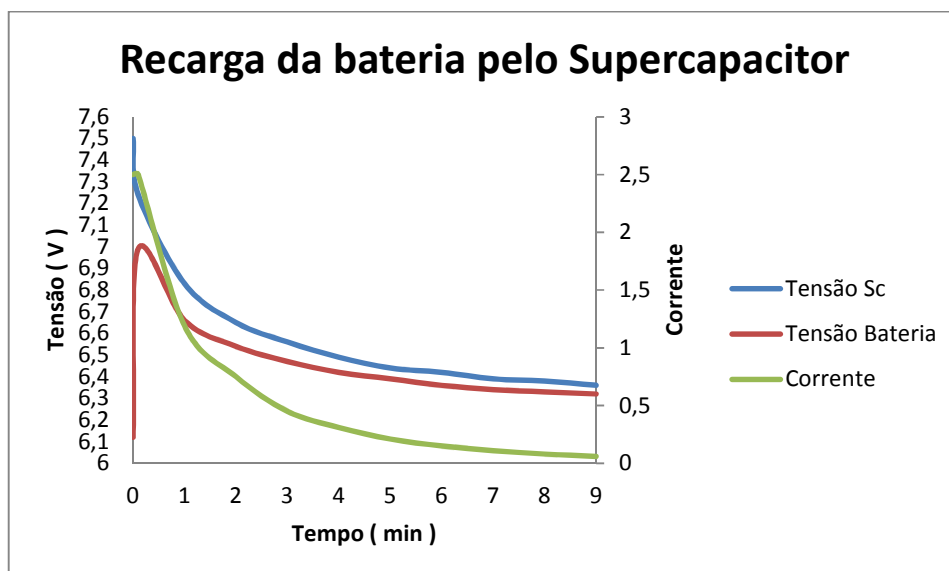


Figura 28: Curva de recarga da bateria a partir da tensão inicial de 5,78V.

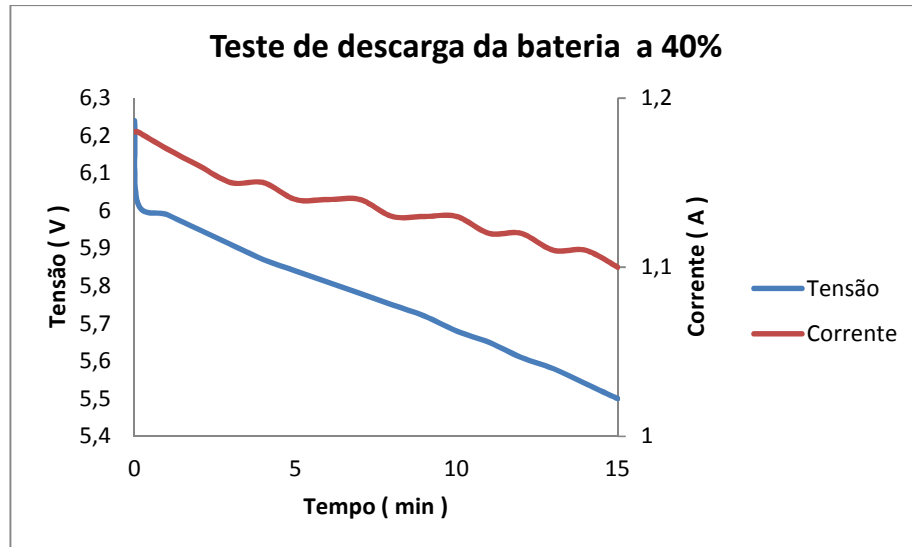


Figura 29: Curva de descarga da bateria após seu carregamento usando supercapacitores.

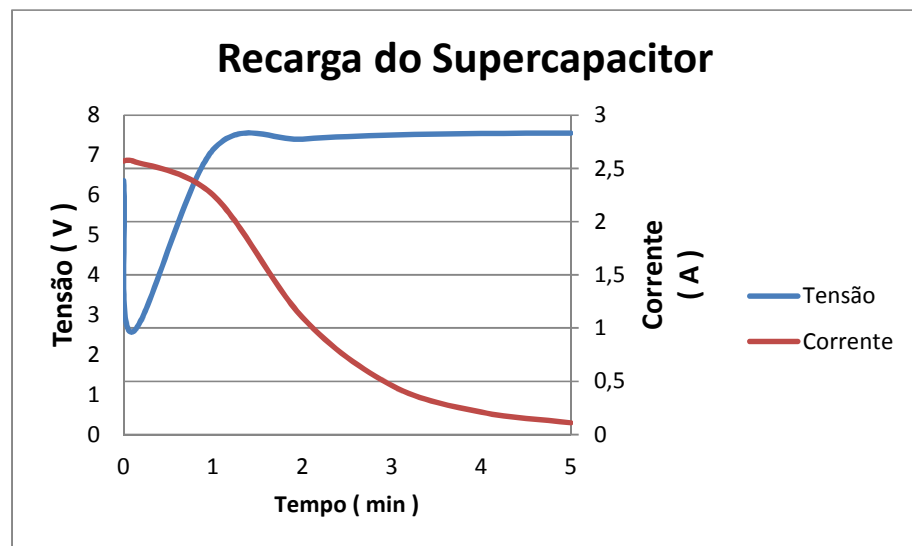


Figura 30: Terceira curva de carga dos supercapacitores usando a fonte de tensão.

4.2.4 Teste 4 – Bateria com 20% da Carga Útil

Seguindo a mesma ordem de passos dos testes anteriores, a quarta etapa do experimento consistiu em continuar reduzindo o nível de tensão da bateria para valores considerados 20% da diferença entre nível máximo e os 5,5 V determinados anteriormente. As Figuras 31, 32, 33 e 34 são representações dos testes aos

mesmos moldes do anterior, e os cálculos usados para encontrar tais valores são apresentados na sequência.

$$V_{\%,-100\%} = Tens\tilde{a}o_{i100\%} + Tens\tilde{a}o_{L\%} \quad (\text{F\acute{o}rmula 11})$$

$$V_{\%,-100\%} = 6,22 + 5,50$$

$$V_{\%,-100\%} = 0,72V$$

$$T_{x\%} = (V_{\%,-100\%} \times n\%) \div 100 + 5,5V \quad (\text{F\acute{o}rmula 12})$$

$$T_{20\%} = (0,72 \times 20) \div 100 + 5,50$$

$$T_{20\%} = 5,64V$$

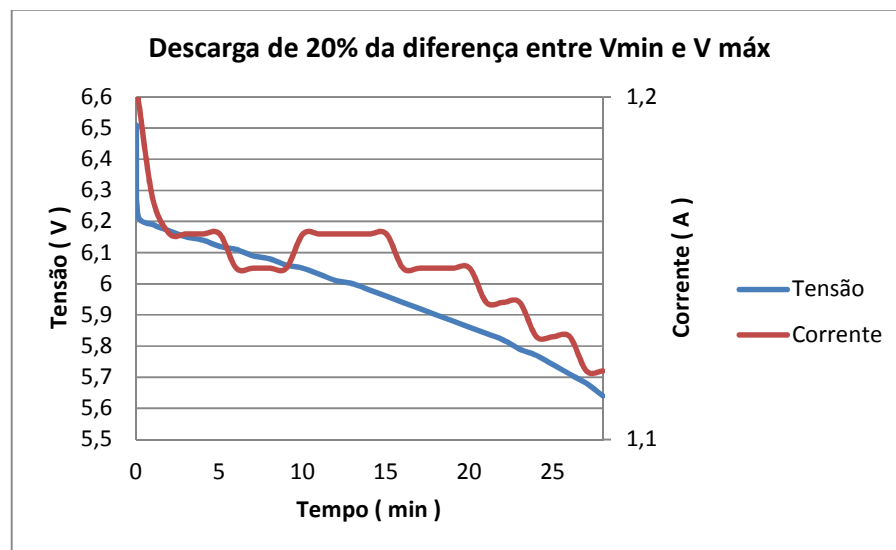


Figura 31: Curva de descarga da bateria para ate 20% para quarta fase dos testes.

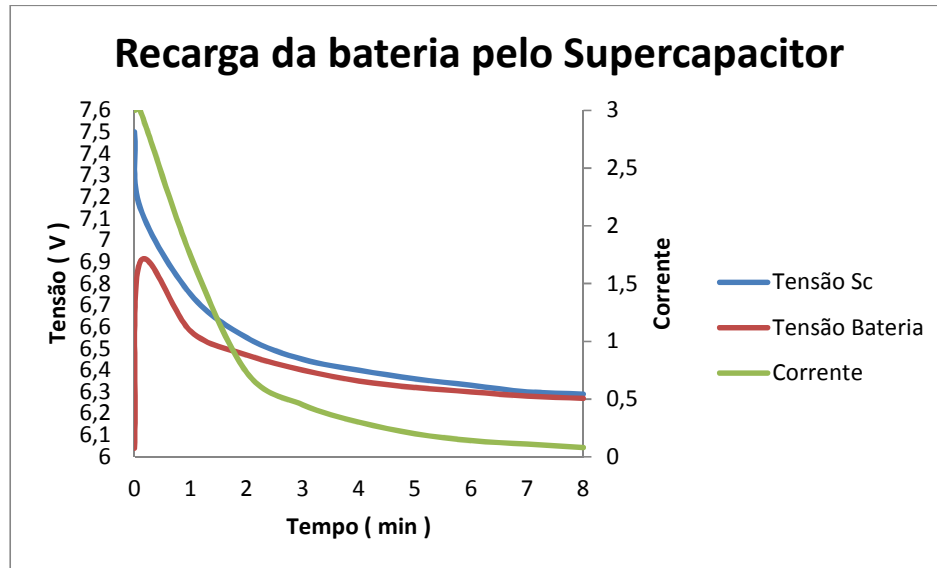


Figura 32: Curva de recarga da bateria a partir da tensão inicial de 5,64V.

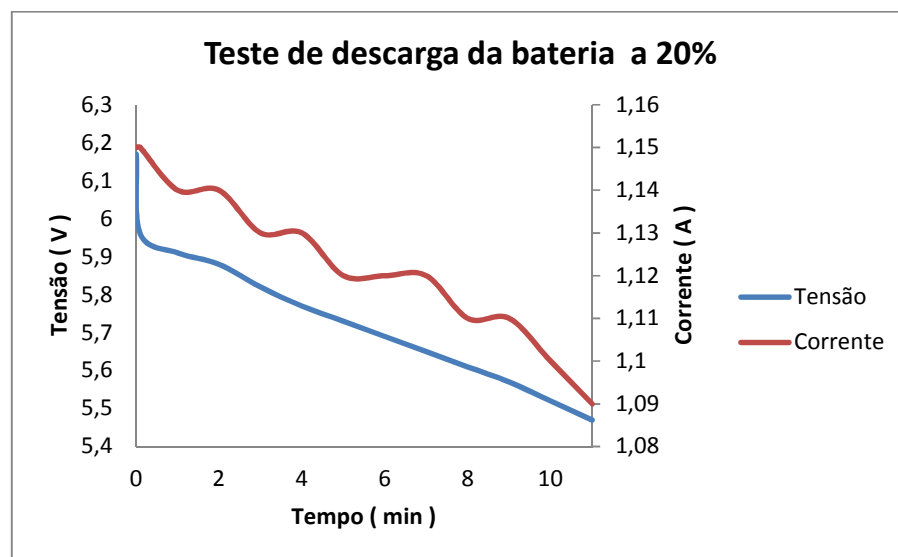


Figura 33: Curva de descarga da bateria após seu carregamento usando supercapacitores.

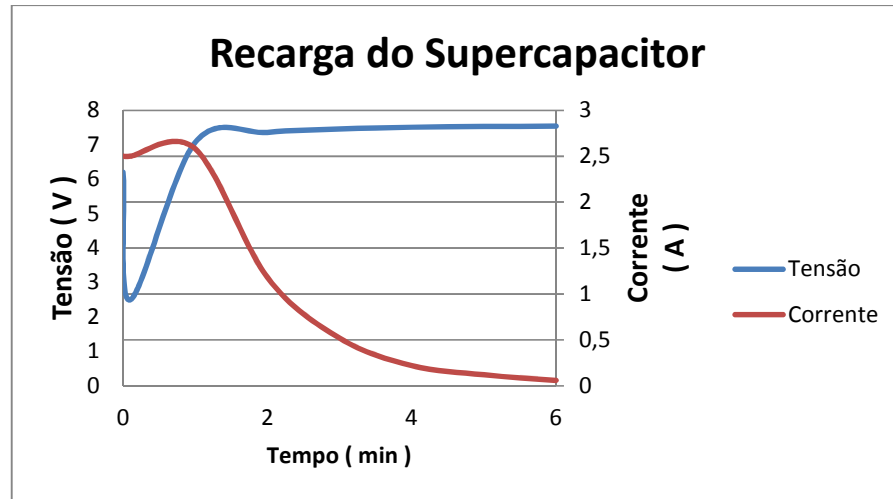


Figura 34: Quarta curva de carga dos supercapacitores usando a fonte de tensão.

4.2.5 Teste 5 - Bateria com 0% da sua Carga Útil

Como quinta e última etapa do teste de comportamento do funcionamento de carga dos supercapacitores, como comentado anteriormente foi definido como 5,5 V a tensão mínima aceitável para a bateria em teste ser considerada útil. Assim esta última etapa consistiu em descarregar a bateria ao referido nível de tensão e efetuar o seu carregamento por meio do circuito com supercapacitores. As Figuras 35, 36, 37 e 38 apresentam as respectivas curvas obtidas com os testes. Em seguida são demonstrados os cálculos para encontrar os limites necessários para a conclusão do experimento.

$$V_{\%,-100\%} = Tens\tilde{a}o_{i100\%} + Tens\tilde{a}o_{L\%} \quad (\text{F\acute{o}rmula 11})$$

$$V_{\%,-100\%} = 5,95 + 5,50$$

$$V_{\%,-100\%} = 0,45V$$

$$T_{x\%} = (V_{\%,-100\%} \cdot n\%) \div 100 + 5,5V \quad (\text{F\acute{o}rmula 12})$$

$$T_{100\%} = (0,45 \times 100) \div 100 + 5,50$$

$$T_{100\%} = 5,5V$$

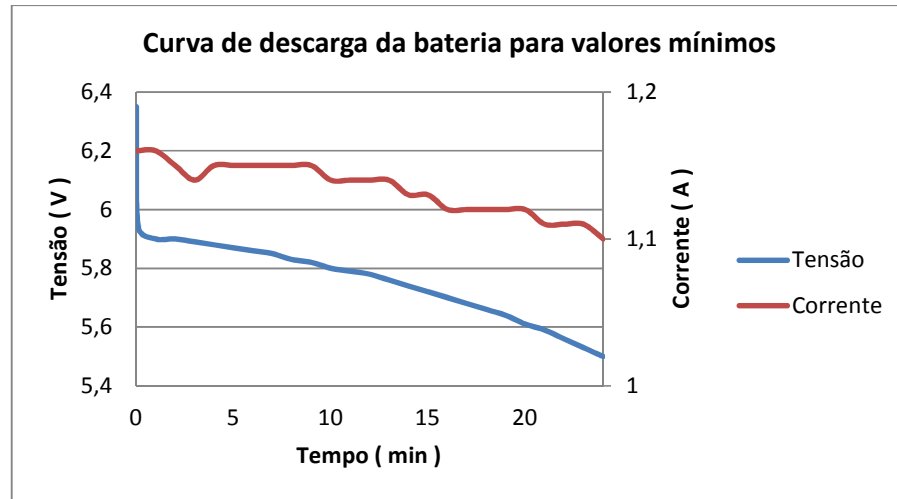


Figura 35: Curva de descarga da bateria para a quinta fase dos testes.

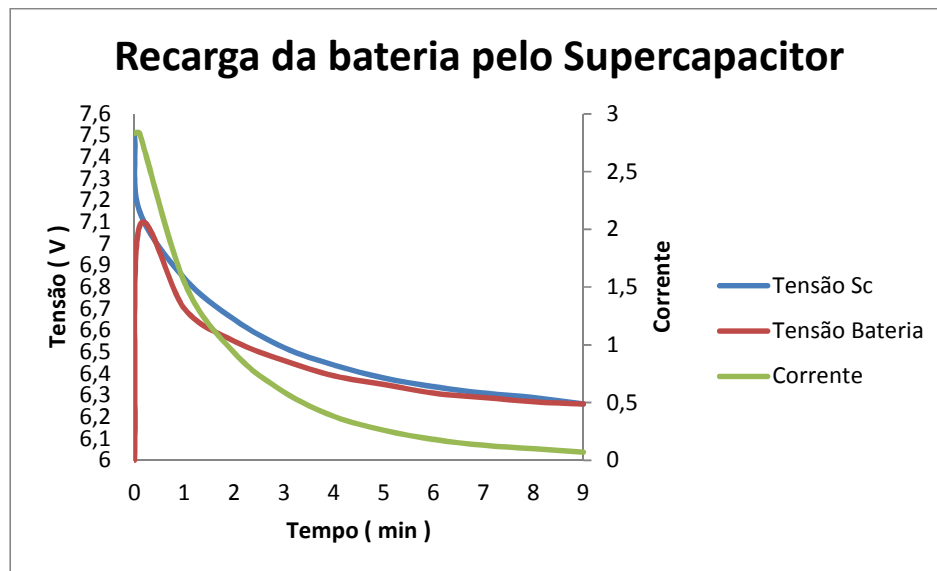


Figura 36: Curva de recarga da bateria a partir da tensão inicial de 5,5V.

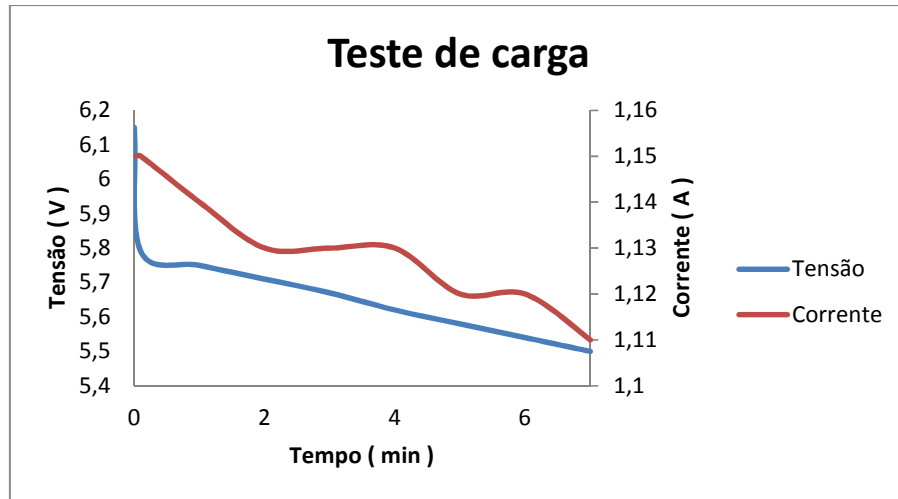


Figura 37: Curva de descarga da bateria após seu carregamento usando supercapacitores.

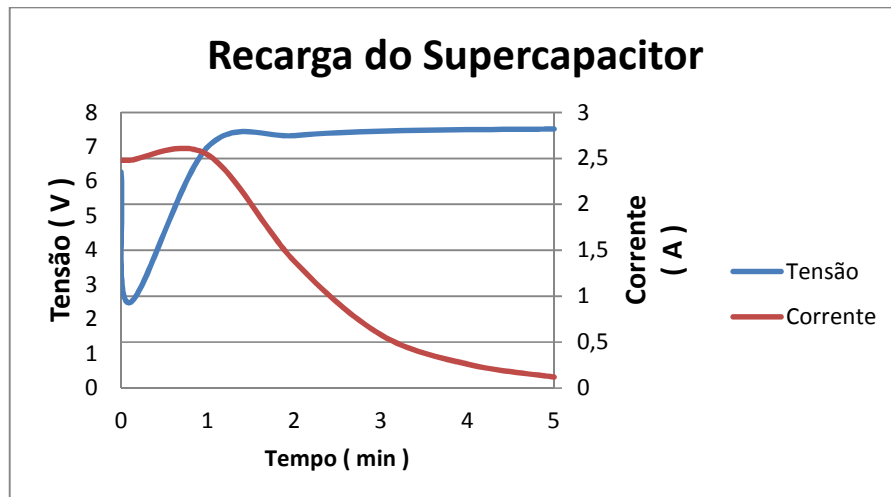


Figura 38: Quinta curva de carga dos supercapacitores usando a fonte de tensão.

4.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Através dos testes realizados foi possível identificar que o processo de recarga da bateria através dos supercapacitores apresentou certa similaridade em suas curvas de tensão em função do tempo (Figura 39), O tempo utilizado para a descarga dos supercapacitores foi calculado a partir do momento da ligação até que as tensões dos dois componentes se igualassem (Figura 40).

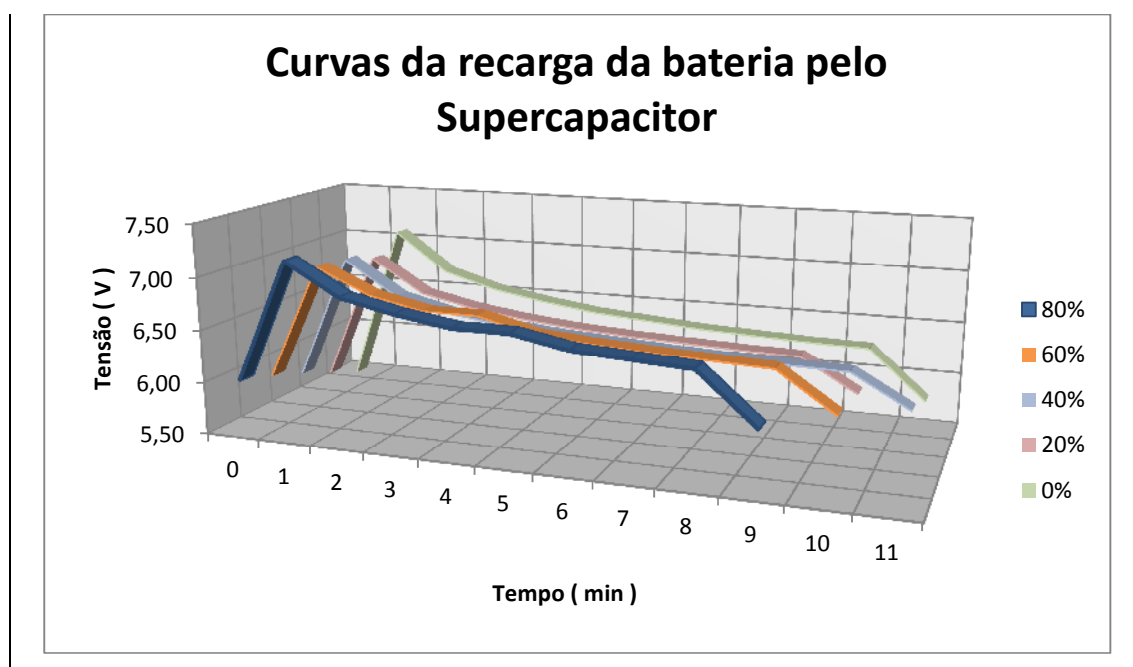


Figura 39: Curvas de recarga da bateria pelo supercapacitor

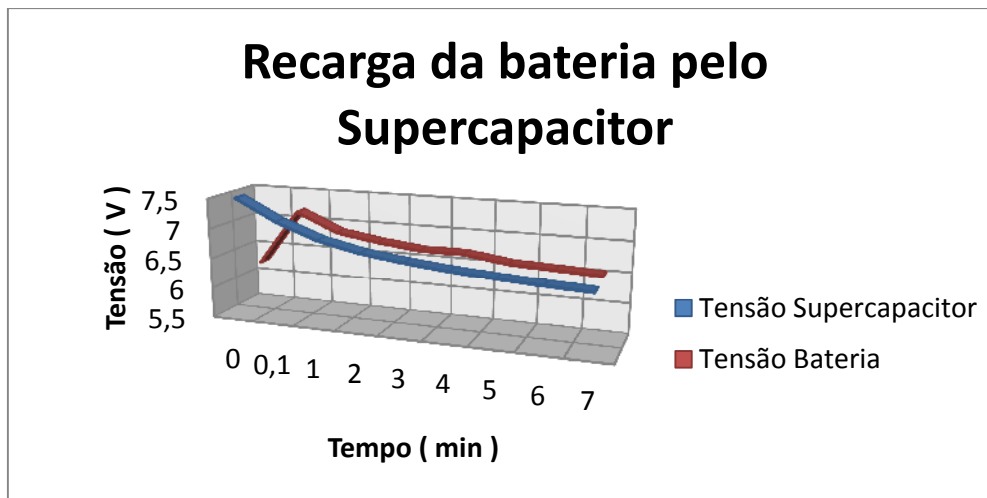


Figura 40: Curva exemplo da recarga da bateria pelo supercapacitor

No procedimento de teste de carga da bateria, onde foi executada a descarga da mesma após ser recarregada pelos supercapacitores, o tempo que a bateria durou até o valor da tensão inicial de cada teste variou consideravelmente (Figura 41)

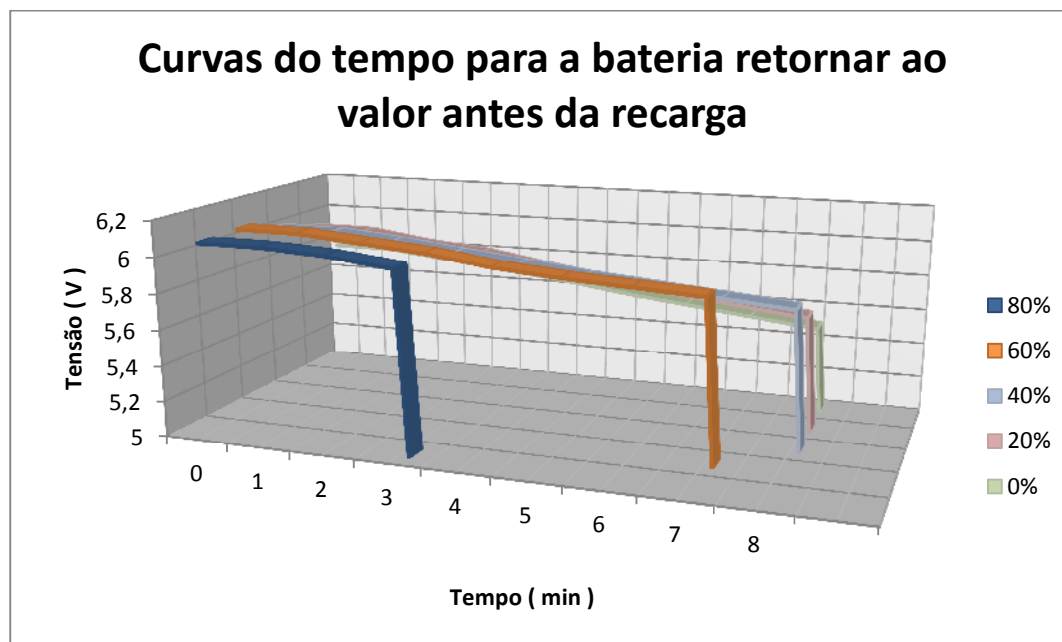


Figura 41: Curvas do tempo para a bateria retornar ao valor antes da recarga

Como resultado dos testes pode-se afirmar que para obter melhor qualidade de recarga feita através do supercapacitores, deve ser realizada em níveis mais baixos de carga (Figura 42).

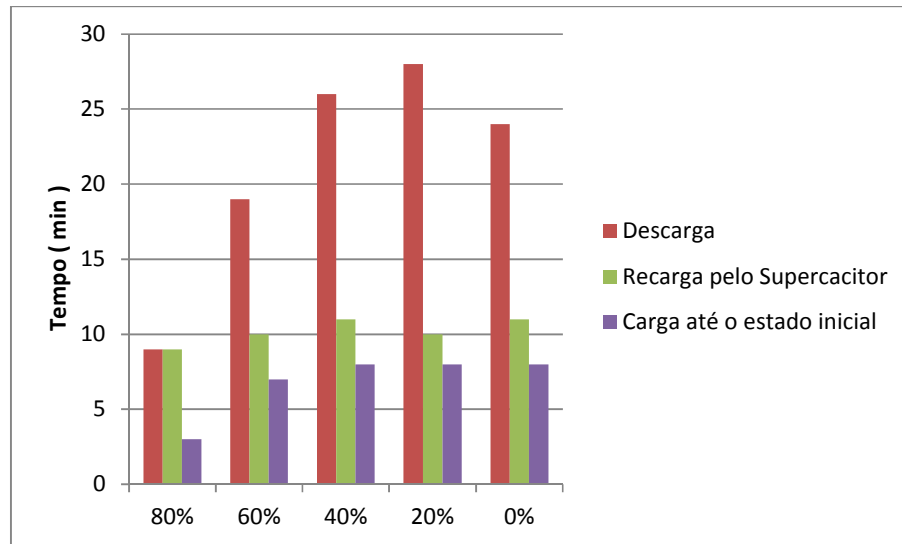


Figura 42: Gráfico de tempo de descarga, recarga pelo Supercapacitor e carga até o estado inicial

Durante os testes foi analisado que no nível mais alta de carga, a capacidade de recarga dos supercapacitores é mais baixa, tem-se como exemplo o teste 1, onde a bateria com 100% de carga esteve nove minutos conectada a lâmpada para ficar com o valor de tensão equivalente a 80% de carga, e a descarga do supercapacitor para lhe fornecer carga/energia durou também nove minutos, porem o tempo para a bateria chegar ao valor de 80% novamente foi de apenas três minutos. Já nos testes seguintes o tempo que a bateria durou até estabelecer a tensão inicial do teste foi significativamente maior que no primeiro, o valor em tempo do teste 2 foi de sete minutos e dos testes 3,4 e 5 foram oito minutos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir deste projeto foi possível utilizar um componente moderno que tem sua múltipla aplicação, mostrando-se através dos resultados obtidos a relevância do componente para armazenamento de energia, entende-se que com as características apresentadas pelo componente, este poderia ser utilizado para armazenar a energia adquirida por fontes alternativas como eólica, frenagem regenerativa, painéis fotovoltaicos etc.

Através dos resultados obtidos conclui-se que o comportamento dos supercapacitores são similares no estágio de descarga de energia na bateria, apresentando valores de tensão e corrente próximos. Observou-se nos testes que quando a recarga foi realizada no nível mais alto de carga, a recarga não foi tão eficiente como nos testes com níveis de carga baixa, onde foi demonstrado maior tempo para a tensão retornar ao estado inicial de carga.

Para que seja melhor aproveitada a energia fornecida por sc á uma bateria chumbo-acido, deve-se levar em conta em que nível de carga a bateria se encontra e efetuar a recarga em 40% ou abaixo desse valor.

REFERÊNCIAS

BÉGUIN, François; FRACKOWIAK, Elzbieta; Piñero, Encarnación R.. **Electrical Double-Layer Capacitors and Pseudocapacitors in Carbons for electrochemical energy storage and conversion systems**. Boca Raton – EUA: Taylor and Francis Group, 2010.

BOCHI, Nerilso; Ferracin, Luiz C.; Biaggio, Sonia R. Pilhas e baterias: Funcionamento e impacto, ambiental, Quimica nova escola, 2000
Disponível em:
<http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/EnsMed/expensqui_vol5.pdf>. Acesso em 15 out 2011.

BOYLESTAD, Robert L..**Introdução à análise de circuitos**. Rio de Janeiro: Prentice-Hall, 1998.

GUSSOW, Milton. **Eletricidade básica**. São Paulo: McGraw-Hill, 2004.

JOHANSSON, Patrik; ANDERSSON, Björn. **Comparison of Simulation Programs for Supercapacitor Modelling**.2008. 131 f. Tese Mestrado em Ciência - CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, Suécia, 2008

LARMINIE, James; LOWRY, John. **Electric Vehicle Technology Explained**. Londres – Inglaterra: John Wiley & Sons Ltd, 2003.

LINDEN, David; REDDY, Thomas B.. **Handbook of Batteries**. Nova Iorque: McGraw-Hill books, 2001.

MAXWELL 2011. Disponível em:
<http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/docs/DATASHEET_K2_SERIES_1015370.PDF>. Acesso em: 10 ago. 2011.

MORÁN, Angel V. **Manutenção elétrica industrial**.São Paulo: Icone, 2004.

ROLAND, Gallay; GUALOUS, Hamid - **Industrial Production of Double-Layer Capacitors in Carbons for electrochemical energy storage and conversion systems**. Boca Raton – EUA: Taylor and Francis Group, 2010.