

**UNIVERSIDADE REGIONAL DO NOROESTE DO ESTADO DO RIO
GRANDE DO SUL – UNIJUI**

WILLIAN PAULO MAY

**MONITORAMENTO DE CARGA E DESCARGA PARA
ACUMULADORES (CHUMBO-ÁCIDO) MICROCONTROLADO**

Santa Rosa

2018

WILLIAN PAULO MAY

**MONITORAMENTO DE CARGA E DESCARGA PARA
ACUMULADORES (CHUMBO-ÁCIDO) MICROCONTROLADO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Elétrica apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Mateus Felzke Schonardie

Santa Rosa

2018

Agradeço a Deus, ao meu Pai e
a minha companheira, dedico
esta conquista a eles.

AGRADECIMENTOS

Ao meu falecido Pai Gerson Vanderlei May pela educação que me proporcionou e por me ensinar que nunca devemos deixar de correr atrás de nossos objetivos.

A minha companheira Taísa Krapf Boschetti que nunca deixou de acreditar no meu potencial e esforço. Pela ajuda, carinho e compreensão.

Ao meu orientador Dr. Mateus Felzke Schonardie por sanar minhas dúvidas e auxiliar na conquista de mais este objetivo em minha vida.

RESUMO

MAY, WILLIAN PAULO. **Monitoramento de carga e descarga para acumuladores (chumbo-ácido) microcontrolado**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ, Santa Rosa, 2017.

Atualmente um suprimento contínuo e confiável de energia elétrica é fundamental para que qualquer sistema de prestação de serviço funcione devidamente, para garantir essa confiabilidade são utilizadas baterias. Sob condições adequadas essas baterias têm vida útil de três a quatro anos, entretanto podem apresentar problemas se não houver um processo de recarga adequado e perdem sua capacidade devido às condições de descarga profunda ocasionada pela falta de controle da carga aplicada. Em meio a essas implicações as baterias se tornam obsoletas e são descartadas, podendo causar danos ao meio ambiente. O desenvolvimento deste trabalho teve como finalidade realizar a implementação de um sistema de monitoramento de carga e descarga de acumuladores de energia do tipo chumbo-ácido. Esse sistema possui grande utilidade em estruturas que empregam essa forma de armazenamento de energia, podendo intervir no momento crítico de sua utilização para que não seja danificado, proporcionando o aumento da vida útil desses acumuladores e a redução dos custos com troca e manutenção desses equipamentos. Para realização do projeto foi utilizada a bateria chumbo-ácido Unipower UP1270SEG (12 V 7 Ah), o microcontrolador Arduino NANO, sensor de corrente ALLEGRO ACS712 30A e o gerador de pulsos PWM SG3524. Com base na revisão bibliográfica do tema, foram encontradas metodologias complexas de estimativa de estado de carga de acumuladores, porém esse estudo foi baseado na metodologia de estimativa de tempo restante de carga pelo método *coulomb counting* combinado com a lei de Peukert.

Palavras-chave: Controle de Carga, Bateria, Microcontrolador, Vida Útil.

ABSTRACT

MAY, WILLIAN PAULO. Monitoring of loading and unloading for accumulators (lead-acid) microcontrolled. 2017. Course Completion Work. Course of Electrical Engineering, Regional University of the Northwest of the State of Rio Grande do Sul - UNIJUÍ, Santa Rosa, 2017.

A service provider is critical to any service delivery system, properly, to ensure such reliability are batteries. Under suitable conditions these batteries have a service life of three to four years, however, there is a recovery process, properly and lose, with the conditions of transfer of information necessary for the maintenance of the applied load. Amid these implications as batteries become obsolete and are discarded, and can cause harm to the environment. Develop the implementation of a system for monitoring the loading and unloading of lead-acid energy storage batteries. This system is very useful in structures that use this form of energy storage, being able to intervene in the critical moment of its use so that it is not damaged, providing an increase in the useful life of the accumulators and a reduction of the costs with equipment exchange and maintenance. For the realization of the project was used for lead-acid battery Unipower UP1270SEG (12 V 7 Ah), the microcontroller Arduino NANO, current sensor ALLEGRO ACS712 30A and pulse generator PWM SG3524. Based on the bibliographic review of the topic, we have found complex methodologies to estimate the state of charge of accumulators, but this study was developed in the methodology of estimation of remaining time of load by coulomb method counting combined with a Peukert law.

Keywords: Charge Control, Battery, Microcontroller, Useful Life.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ciclos de carga em função da descarga	16
Figura 2 - Vida útil em função da temperatura.....	17
Figura 3 - Curva de descarga.....	21
Figura 4 - Composição química das baterias de chumbo	22
Figura 5 - Reações químicas de descarga das baterias de chumbo	23
Figura 6 - Bateria FVLA	24
Figura 7 - Bateria VRLA	25
Figura 8 - Estrutura bateria de chumbo	26
Figura 9 - Estrutura terminológica da célula de uma bateria.....	27
Figura 10 - Bobina de Rogoski.....	32
Figura 11 - Exemplo de ligação Resistor Shunt	33
Figura 12 - Efeito Hall sem detecção de um campo magnético transversal.....	34
Figura 13 - Efeito Hall detectando um campo magnético transversalmente.....	34
Figura 14 - Regulador de tensão de série	35
Figura 15 - Shunt	35
Figura 16 - Classificação das Fontes de Alimentação.....	36
Figura 17 - Topologias conversores CC-CC PWM.....	38
Figura 18 - PWM buck converter e seus circuitos equivalentes ideais para CCM. (a) Circuito. (b) Circuito equivalente quando o comutador permite a passagem de corrente e o diodo impede. (c) Circuito equivalente quando o comutador não está conduzindo e o diodo está.....	40
Figura 19 - Formas de onda idealizadas de corrente e tensão no conversor PWM buck para MCC.....	41
Figura 20 - Circuito do conversor elevador (Boost).....	44
Figura 21 - Formas de onda do conversor Boost.....	44
Figura 22 - (a) Circuito do conversor abaixador-elevador (Buck-Boost); (b) Transistor conduz; (c) Transistor aberto.	46
Figura 23 - Formas de onda do conversor abaixador-elevador (Buck-Boost)	47
Figura 24 - Diagrama de Blocos Monitoramento.....	49
Figura 25 - Gráfico auto-descarga da bateria UNIPOWER	50
Figura 26 - Capacidade em relação à tensão de circuito aberto	50
Figura 27 - Curva de descarga da bateria UNIPOWER	51

Figura 28 - Foto da bateria UNIPOWER	52
Figura 29 - Arduino NANO.....	56
Figura 30 - Layout de pinos Arduino Nano.....	56
Figura 31 - Diagrama elétrico Arduino Nano.....	57
Figura 32 - Sensor de corrente ACS712.....	59
Figura 33 – Circuito sensor de corrente ACS712.....	59
Figura 34 - Representação ilustrativa do CI ACS712_XXA.....	60
Figura 35 - Diagrama de ligação da principal aplicação	60
Figura 36 - Layout de Pinos do CI SG3524	61
Figura 37 - Circuito Buck-boost Malha Aberta.....	67
Figura 38 - Tensão de Malha aberta.	67
Figura 39 - Tensão de saída ao degrau de 1 V	68
Figura 40 - Circuito MA Modo Buck.	68
Figura 41 – Tensão de saída V_O (Modo Buck)	69
Figura 42 - Sinal de saída ao degrau.....	69
Figura 43 - Circuito Função transferência.....	71
Figura 44 - V_O do circuito em malha aberta e sua V_O da Função de Transferência....	71
Figura 45 - Circuito Buck-boost com controle PI.	72
Figura 46 - V_O malha fechada x V_O malha aberta.....	73
Figura 47 - V_O malha aberta x V_O Malha fechada (DEGRAU)	73
Figura 48 - Circuito Simulação Funcional.	75
Figura 49 - Inicialização programa.....	76
Figura 50 - Tela de ajuste de capacidade da bateria.	76
Figura 51 - Tensão de corte.	76
Figura 52 - Coeficiente de Peukert.	77
Figura 53 - Configurações salvas.	77
Figura 54 - Tensão de 12,9V e corrente de carga de 0,72A	78
Figura 55 - Carga 1,44A e Tensão 12,7V.....	78
Figura 56 - Teste de funcionamento 0,4 A.	79
Figura 57 - Teste 4,12 A para estimativa 1 hora	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Descrição dos Pinos.....	57
Tabela 2 - Valores inerentes à curva de descarga.....	65
Tabela 3 - Parâmetros de Projeto Conversor CC-CC.....	65

LISTA DE SIGLAS

CA – Corrente Alternada

CC – Corrente Contínua

UPS – Uninterrupted Power Supply

PbSO₄ – Sulfato de chumbo

VCC –

Ah – Ampère hora

A – Ampère

PbO₂ – Dióxido de Chumbo

Pb – Chumbo

H₂SO₄ – Ácido Sulfúrico

H₂O – Água

SLI - Starting, Lighting and Igniton

FVLA - Free Vented Lead Acid

VRLA - Valve Regulated Lead Acid

SOC – State of Charge

V - Volts

PC - Personal Computer

CPU - Central Processing Unit

RAM - Random Access Memory

ROM - Read Only Memory

USB – Universal Serial Bus

CI – Circuito Integrado

I/O - Input ou Output

ADC - Analogic Digital Converter

PWM - Pulse Width Modulator)

UART - Universal Asynchronous Receiver Transmitter)

A/D - Analógico Digital

DDP - diferença de potencial

LDO – Low drop-out

VS – Tensão de entrada

VO – Tensão de saída

MCD – Modo de condução descontínua

MCC – Modo de condução contínua

C – Celsius

E/S – Entrada e saída

LED – Light Emitting Diode

SMD – Dispositivos de montagem superficial

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	MOTIVAÇÃO	14
1.2	PROBLEMA	Erro! Indicador não definido.
1.3	OBJETIVO	17
2	REVISÃO DE LITERATURA	19
2.1	ACUMULADORES DE ENERGIA ELÉTRICA	19
2.1.1	Bateria de chumbo ácido	22
2.1.2	Características construtivas das baterias Chumbo-Ácidas	25
2.1.3	Características elétricas e Estado de Carga das baterias chumbo-ácido	27
2.2	DISPOSITIVOS ELETRÔNICOS	29
2.2.1	Microprocessadores	29
2.2.2	Sensores de corrente	31
2.2.2.1	<i>Bobina de Rogoski</i>	31
2.2.2.2	<i>Resistor Shunt</i>	32
2.2.2.3	<i>Efeito Hall</i>	33
2.2.3	Conversores CC – CC	34
2.2.3.1	<i>Conversor Buck</i>	39
2.2.3.2	<i>Conversor Boost</i>	43
2.2.3.3	<i>Conversor Buck-Boost</i>	45
3	METODOLOGIA	49
3.1	BATERIA UNIPOWER UP 1270	49
3.2	MONITORAMENTO DE CARGA	52
3.3	MONITORAMENTO DE DESCARGA	53
3.3.1	Método Coulomb Counting	53
3.3.2	Lei de Peukert	54
3.3.3	Metodologia Alternativa	55

3.4	MICROCONTROLADOR ARDUINO NANO	55
3.4.1	IDE do Arduino	58
3.5	SENSOR DE CORRENTE ALLEGRO ACS712	58
3.6	ESTUDO DO CI SG 3524/ SG 2524	61
3.6.1	Princípio de Operação.....	62
4	SIMULAÇÃO E RESULTADOS	64
4.1	PARÂMETROS INICIAIS	64
4.2	PROJETO DO CONVERSOR BUCK-BOOST.....	65
4.2.1	Parâmetros de Projeto	65
4.2.2	Cálculos	66
4.2.3	Simulação	66
4.2.4	Implementação do controle do conversor CC-CC Buck-boost.	70
4.2.4.1	<i>Modelagem Matemática por Média de Valores</i>	70
4.3	SIMULAÇÃO DO MONITORAMENTO DE DESCARGA	74
5	CONSIDERAÇÃO FINAL.....	81
	REFERÊNCIAS	83

1 INTRODUÇÃO

Na atualidade, desde um pequeno escritório a grandes hospitais ou indústrias, necessitam de suprimento contínuo de energia para que equipamentos elétricos e eletrônicos funcionem devidamente. Para garantir a confiabilidade e funcionalidade desses equipamentos são utilizados dispositivos acumuladores de energia, as conhecidas baterias. (LAZZARIN, 2006; CHAGAS, 2007; BAHIA, 2015)

A bateria mais utilizada atualmente é a chumbo-ácido, tendo em vista que é o tipo mais difundido no mercado pelo seu custo e benefício. A inserção de baterias chumbo-ácido começou no início do século XX, é considerada a bateria mais antiga e de barata construção. Cerca de 99% dos automóveis usam essa bateria. (LAZZARIN, 2006; CHAGAS, 2007; BAHIA, 2015)

Sua tecnologia permite a construção de baterias nos níveis de corrente exigido em aplicações automotivas, sistemas de emergência, geração de energia solar, porém, o custo com a manutenção destes dispositivos acaba se tornando considerável. Sob condições adequadas, essas baterias têm vida útil de três a quatro anos, entretanto podem apresentar problemas se não houver um processo de carga adequado e perdem sua capacidade. Em meio a essas implicações as baterias se tornam obsoletas e são descartadas, podendo causar danos ao meio ambiente. (LAZZARIN, 2006; CHAGAS, 2007; BAHIA, 2015)

1.1 MOTIVAÇÃO

As baterias são amplamente utilizadas nas mais variadas aplicações, tais como fonte de energia auxiliar de serviços de telecomunicações, fontes de energia ininterrupta, sistemas fotovoltaicos e muitos outros produtos eletrônicos portáteis. Por exemplo, um dispositivo portátil requer uma bateria como fonte de energia quando você não consegue fornecer tensão de alimentação com seu carregador (ou fonte de energia) que converte tensão CA (corrente alternada) em CC (corrente contínua). Normalmente, as baterias são usadas para iniciar motores e unidades de energia auxiliares, para fornecer energia reserva de emergência como por exemplo, para equipamentos hospitalares. As baterias caracterizam um papel vital nos sistemas em que complementam, de modo que seu desempenho e confiabilidade são de grande importância, bem

como a capacidade de recarga rápida, inclusive o tempo para a bateria carregar completamente. (MOHAMMAD, 2014)

Grande parte dos sistemas de emergência ou Uninterrupted Power Supply (UPS) utilizam baterias estacionárias de chumbo-ácido, que segundo os fabricantes, sob condições adequadas de uso, possuem vida útil de três a quatro anos. Entretanto, essas baterias podem apresentar problemas na operação se não houver um processo de recarga adequado, diminuindo sua vida útil em mais de 50%.

Podem ocorrer três problemas no uso dessas baterias: processo de carga inadequado, recarga com níveis inadequados de tensão e descarga profunda. Até os anos 90, a única maneira de avaliar o estado das baterias, era através do teste de capacidade, nesse teste, o banco de baterias era desconectado do sistema e medida a quantidade de energia armazenada através da sua descarga completa, porém, esse ensaio deixa todo o sistema sem reservas de energia e pode diminuir a vida útil das baterias. (LAZZARIN, 2006; BAHIA, 2015)

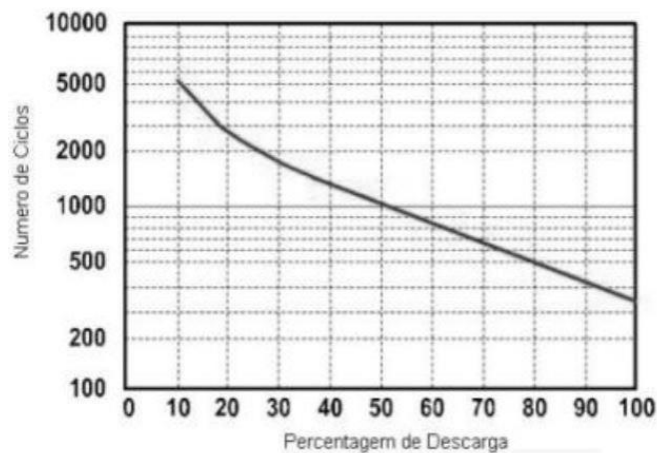
Um UPS é basicamente composto de um circuito retificador, um carregador de baterias, um banco de baterias, um circuito inversor de tensão e uma chave estática. A maioria dos UPS operam sistemas que alimentam equipamentos que não aceitam faltas de energia, por isso a sua confiabilidade precisa ser alta. Nesse contexto, as baterias são elementos vitais na confiabilidade dos UPS, pois é através da energia que elas armazenam que o sistema será mantido em funcionamento. Portanto as mesmas devem estar em condições adequadas, com boa qualidade e 100% carregadas. Os UPS são compostos por diversos dispositivos eletrônicos para prover seu funcionamento adequado, em comum, todos possuem algum tipo de conversor de tensão, seja para converter tensão CA para CC, ou inverter uma tensão CC para CA (LAZZARIN, 2006)

Os conversores CC-CC são dispositivos eletrônicos muito conhecidos utilizados de maneira generalizada para alterar a energia elétrica de CC de forma eficiente de um nível de tensão para outro. Por exemplo, os conversores de energia CC são amplamente utilizados em várias aplicações, como fontes de alimentação, drivers de motores CC, máquinas de solda, fontes de energia para sistemas de telecomunicações, aeroespacial, ambiente militar e assim por diante. A seleção do conversor depende das diferentes aplicações que foram abordadas. Existem cinco comumente usados em topologias de conversão CC-CC que são adequadas para sistemas operados

por bateria que são buck, boost, buck-boost não inversor, charge pump e conversores flyback. (MOHAMMAD, 2014)

A corrosão, a degradação, e a sulfatação são os principais problemas químicos que afetam a vida útil dessas baterias. Na corrosão, o eletrodo positivo é corroído pela transformação do chumbo metálico em óxidos de chumbo, a corrosão leva ao aumento da resistência interna da bateria e perda de material ativo do eletrodo. Na degradação o material ativo do eletrodo positivo sofre fadiga mecânica, isto se deve a constante transformação do material na carga e descarga, este processo pode ocasionar uma ruptura do eletrodo e danificar a bateria. A sulfatação reduz os volumes de chumbo e de eletrólito, conseqüentemente, reduz as capacidades de carga e de fornecimento de energia. Já a sulfatação é a recristalização dos finos cristais de $PbSO_4$ (sulfato de chumbo) em grânulos de $PbSO_4$, isto ocorre devido a grandes períodos de baixo estado de carga. Evidenciado na Figura 1. (LAZZARIN, 2006; BAHIA, 2015)

Figura 1 - Ciclos de carga em função da descarga

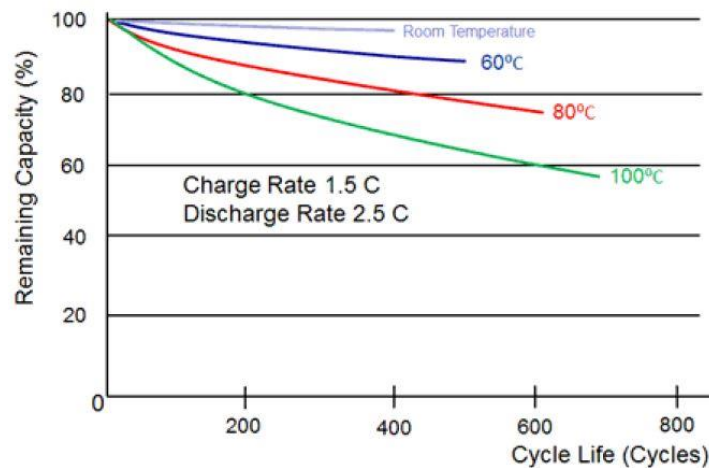


Fonte: Adaptado de BAHIA (2015).

Outro fator que diminui a capacidade das baterias, é a temperatura. Em temperaturas mais baixas ocorre a redução da capacidade, pois a resistividade do eletrólito aumenta de forma significativa, diminuindo a velocidade dos processos de difusão iônica. A solução adotada para sistemas instalados em regiões com baixas temperaturas é utilizar ácido mais concentrado nas baterias. Por outro lado, a operação em altas temperaturas pode ocasionar danos irreversíveis à bateria por efeito da corrosão. A temperatura de operação pode se converter em um fator intensificador dos processos de envelhecimento da bateria, de modo que a mesma deve ser

protegida das condições ambientais acondicionando-a adequadamente para garantir seu funcionamento. A Figura 2 relaciona a temperatura de uma bateria com a sua vida útil. (MACAGNAN, 2007; BAHIA, 2015)

Figura 2 - Vida útil em função da temperatura.



Fonte: Adaptado de BAHIA (2015).

Na figura 2 pode ser observado que a vida útil da bateria está diretamente ligada a temperatura que foi submetida, quanto maior a sua temperatura, menor será sua capacidade e consequentemente sua vida útil.

1.2 OBJETIVO

O desenvolvimento de um equipamento para monitoramento da carga de sistemas acumuladores de energia, objetiva principalmente a redução do custo de manutenção, e também a confiabilidade dos sistemas em que são utilizadas. Os fatores citados anteriormente limitam sumariamente a vida útil da bateria, ainda que se tenha levado em consideração todos os critérios de utilização e manutenção especificadas pelo fabricante. Por isso, BAHIA (2015), cita dois fatores que devem ser evitados para preservação da vida útil de uma bateria chumbo ácida:

- Descarga completa da bateria.
- Operação acima da temperatura nominal

Em meio às implicações descritas sobre estes acumuladores de energia, e devido ao fato de que a imprudência com a falta de monitoramento de suas peculiaridades elétricas afetam

diretamente na vida útil do acumulador, as baterias de um modo geral se tornam obsoletas ao atingirem com frequência o nível máximo de fornecimento de energia, por esse motivo deve ser implementado um método de monitoramento eficaz de seu nível de carga e descarga para aumentar a capacidade desses acumuladores e também para que se possa intervir no momento crítico de sua utilização, sem danos (BAHIA, 2015).

Portanto, este projeto teve como finalidade implementar um analisador de carga e descarga para acumuladores de energia do tipo chumbo-ácido, que atuam no fornecimento de energia de maneira secundária. A bateria utilizada trabalha com tensão de operação de 12 VCC. Tendo em vista que o local onde o equipamento é utilizado, possui uma tensão de entrada CA ligado a uma fonte de energia CC, no qual fornece a tensão de alimentação para o protótipo. A função primordial do sistema é atuar diretamente no controle do consumo de carga da bateria, para preservar e prolongar sua vida útil.

Este trabalho dispõe no capítulo 2 a Revisão de Literatura, em que foi realizado um estudo sobre os aspectos físicos e químicos dos acumuladores de energia, principal objeto de estudo, com ênfase nas peculiares características elétricas das baterias, em particular as chumbo ácidas. Também apresenta um estudo sobre os dispositivos eletrônicos que possibilitam a implementação do monitoramento destas, incluindo sistema de controle de carga, mensuração de sinais elétricos e processamento lógico.

O capítulo 3 apresenta a metodologia utilizada, bem como definições de parâmetros, métodos de estimativa, determinação de dispositivos e um breve estudo individual através de suas folhas de dados (*datasheet's*). As simulações e cálculos foram desenvolvidas no capítulo 4, em que também apresenta as etapas de projeto e controle de um conversor utilizado na técnica de estimativa de tempo restante de carga.

A consideração final está presente no capítulo 5, é nele que está o parecer adquirido durante o desenvolvimento deste trabalho.

2 REVISÃO DE LITERATURA

O item 2 refere-se a todo estudo científico realizado pelo autor para a elaboração do analisador proposto. Primeiramente foi abordado o assunto sobre os acumuladores de energia elétrica, breve histórico, importância nos sistemas que operam com energia elétrica, pontos fracos e fortes. Também abrange suas características construtivas, características elétricas e estado de carga. Na segunda parte são descritos os dispositivos eletrônicos utilizados neste trabalho, microprocessadores embutidos em microcontroladores em que detém as entradas e saídas analógicas e digitais, sensores para medição de sinais elétricos e os conversores CC-CC.

2.1 ACUMULADORES DE ENERGIA ELÉTRICA

O progresso científico dos últimos séculos trouxe mudanças significativas, cada dia um novo produto no mercado, uma nova tecnologia lançada. Por isso, a sociedade tem se tornado cada vez mais dependente do consumo de energia. Esta dependência pode ser notada na produção de bens e serviços, na automação dos processos industriais, nos modernos sistemas UPS, no armazenamento e processamento de dados necessários a qualquer organização, na produção e transformação das diferentes formas de energia e na economia de um modo geral.

A tecnologia de armazenamento da energia através de baterias ainda deve ser mais desenvolvida. O calcanhar de Aquiles dos dispositivos móveis e inclusive carros elétricos se dá pela precariedade dos sistemas atuais de acumulação de energia. Baterias são fabricadas em larga escala, com custo reduzido, baixos índices de defeitos e simples manutenção. Porém a autonomia destes dispositivos com certeza é um ponto fraco, da mesma forma que necessitamos cada vez mais energia para suprir nosso grande sistema elétrico de potência, os sistemas que necessitam de fonte ininterrupta de energia consequentemente também necessitam de um acúmulo maior de energia para se manterem mais tempo ativos. Dessa forma os acumuladores utilizados são adequados em tamanho proporcionalmente à necessidade, ou seja, quanto maior a necessidade de acúmulo de energia maiores são as proporções das baterias ou arranjo de baterias. Observa-se ainda que as baterias são vantajosas se comparadas com outras tecnologias de acumulação de energia, são confiáveis e de rápida reposição pois têm menor custo de manutenção e implantação. (COPETTI, MACAGNAN, 2007)

Pode-se definir baterias, de forma sucinta, como um elemento que armazena energia. Uma bateria não produz energia, de acordo com suas reações químicas a energia é armazenada ou fornecida. (COELHO, 2001)

Junior (2004) faz a alusão que basicamente as baterias operam pelo processo de reação química de oxidação e redução. Uma bateria consiste em quatro elementos, um ânodo, um cátodo, um eletrólito e um separador. Para o funcionamento da bateria, o ânodo contribui com elétrons para a oxidação, na qual gera íons positivos, similarmente o cátodo gera íons negativos. O separador é o elemento chave de uma bateria, pois permite o fluxo livre dos íons. O fluxo de elétrons é forçado pelo circuito externo, completando o sistema. Em uma célula recarregável o processo é reversível, na descarga o terminal positivo é o cátodo e negativo é o ânodo. Normalmente, o ânodo é feito de um material base, e o cátodo é formado de um óxido metálico.

A bateria é um dispositivo eletroquímico, estando seu desempenho diretamente relacionado à temperatura de operação. A temperatura pode influenciar tanto no rendimento como na vida útil da bateria. A temperatura nominal da bateria é 25° C, e a máxima temperatura que a bateria pode atingir é 45° C. Seu melhor rendimento é alcançado operando a temperaturas de 15° C a 35° C. Durante a carga, normalmente observa-se um aumento de temperatura, este, entretanto, nunca deve ultrapassar 45° C para evitar danos irreversíveis à bateria. Para temperaturas na faixa de 10° C a 25° C a tendência é que a vida normal da bateria seja aumentada. (MARINS, 2012)

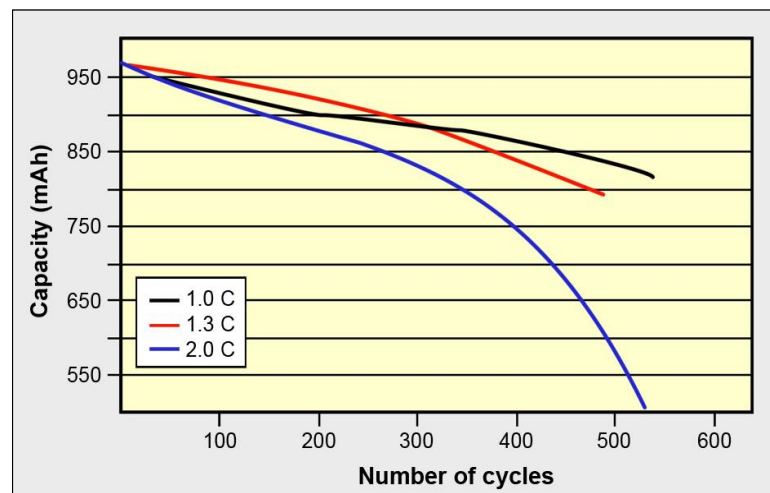
Junior (2004), inclusive descreve alguns parâmetros fundamentais para o entendimento das baterias:

- Célula: é um dispositivo eletroquímico capaz de suprir energia resultante de uma reação química externa.
- Bateria: também pode ser chamada de acumulador, pode ser uma célula simples ou uma combinação de células, estas podem ser arrançadas em paralelo, para obter a capacidade da corrente requerida, ou em série, de maneira que possam atingir o nível de tensão desejada.
- Capacidade: é a corrente máxima que a bateria pode fornecer continuamente. A medida é dada em ampere-hora (Ah), ou seja, se uma bateria debita um Ampère (1

A) de corrente de fluxo por uma hora, sua capacidade correspondente é 1 Ah. Se puder fornecer 7 A por uma hora, sua capacidade é 7 Ah.

- Curva de descarga: é caracterizada pelo comportamento da tensão em função do seu nível de descarga. São destacados três valores: tensão de pico, tensão nominal e tensão de bateria totalmente descarregada, estes parâmetros são específicos de cada bateria, pois seu processo de fabricação e características química difere uma bateria de outra, bem como outros aspectos já estudados, representada pela Figura 3.
- Auto descarga: é resultante de correntes internas, que ocasionam a perda da carga mesmo que a bateria não foi utilizada.
- Vida útil: é a carga seguida de descarga que uma célula recarregável pode fornecer.
- Ciclo: O ciclo é definido como o período de descarga até um determinado ponto, seguido de uma recarga completa.

Figura 3 - Curva de descarga



Fonte: BATTERY (2017).

Segundo Chagas (2007) uma bateria pode ser classificada de acordo com vários critérios, em uma primeira distinção, dividem-se em dois tipos: bateria primária e bateria secundária. A bateria primária não pode ser recarregada e fornece sua energia a partir de uma reação eletroquímica, geralmente irreversível. As combinações mais utilizadas nas baterias primárias são: alcalina, carbono-zinco ou cloro-zinco, lítio, óxido de prata, zinco-ar ou mercúrio. A bateria secundária possui uma característica construtiva que possibilita ser carregada por uma fonte de alimentação externa, e suporta inclusive vários processos de carga e descarga.

Baterias utilizadas em sistemas que exigem grandes intensidades de correntes, podem ser divididas em três tipos: baterias automotivas (de arranque), tracionárias e estacionárias. Além disso, as baterias diferem em baterias que necessitam manutenção e as baterias livre de manutenção. (JUNIOR, 2004)

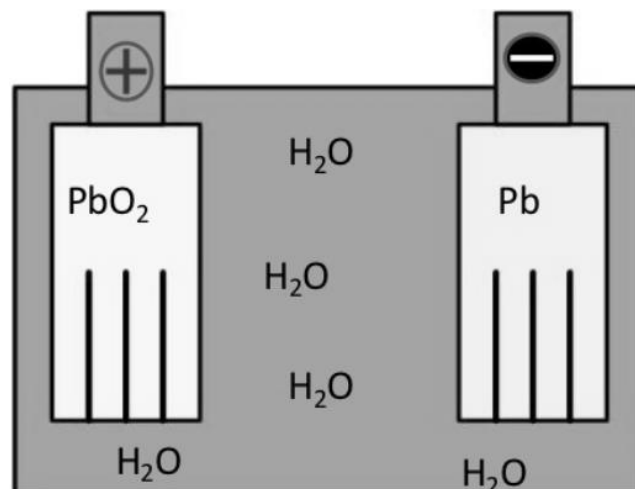
Também podem ser classificadas em relação os materiais ativos usados na sua construção, o tipo de utilização, ou de acordo com suas características internas. Na classificação de acordo com os materiais ativos, as baterias podem ser divididas em chumbo-ácido, alcalinas, íons de lítio, níquel-cádmio, hidreto metálico de níquel, níquel-zinco, entre outras. (CHAGAS, 2007)

2.1.1 Bateria de chumbo ácido

A bateria chumbo ácida foi desenvolvida pelo físico francês Gaston Planté em 1859, conhecida como a primeira bateria vendida em larga escala com a competência de ser recarregada sem que o procedimento de recarga ocasionasse sua destruição. As principais desvantagens em comparação a outros tipos de bateria se dão pela relação entre a quantidade de energia contida e o seu volume, elevado peso, rápida autodescarga e baixa vida útil. (BAHIA, 2015)

Baterias de chumbo são normalmente constituídas por células eletroquímicas ligadas em série ou paralelo. Cada célula é formada por um anodo (placa de chumbo) e um catodo (placa de dióxido de chumbo) imersos em um eletrólito de ácido sulfúrico, onde ocorre a reação química ilustrada a seguir na Figura 4. (CHAGAS, 2007)

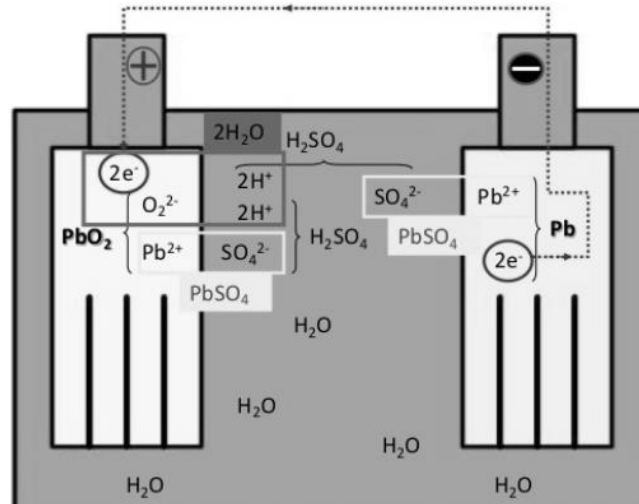
Figura 4 - Composição química das baterias de chumbo



Fonte: Adaptado de <https://pt.slideshare.net/MarioTimotius/emobilidade-baterias-de-chumbo>.

Durante o processo de descarga, o dióxido de chumbo (PbO_2), o chumbo (Pb) e o ácido sulfúrico (H_2SO_4) reagem formando sulfato de chumbo (PbSO_4) e água (H_2O), e no processo de carga a reação é revertida que pode ser melhor compreendida pela Figura 5. (PANASONIC, 2003)

Figura 5 - Reações químicas de descarga das baterias de chumbo



Fonte: adaptado de <https://pt.slideshare.net/MarioTimotius/emobilidade-baterias-de-chumbo>.

Estas baterias produzem gases decorrentes das reações no eletrólito. Estes são ventilados da bateria por meio de ventilação passiva (aberturas e dutos de ar) ou ativa (ventoinhas e exaustores). Algumas baterias, no entanto, são seladas e recombinam estes gases novamente em eletrólito internamente, não possuindo ventilação.

Os acumuladores ou baterias em questão estão subdivididas em: SLI (Start, Light, Ignition - Início, Iluminação e Ignição), baterias de Tração e Estacionárias. As baterias SLI foram desenvolvidas para operarem em ciclos de curta duração, são comumente utilizadas pela indústria automotiva na partida de veículos. Suas células possuem um grande número de placas finas, o que proporciona uma maior superfície ativa entre elas e altas descargas de corrente em curtos espaços de tempo, usadas em sistemas de baixo custo. As baterias de Tração permitem descargas profundas e ciclos longos, possuem placas mais grossas e duráveis. Por suas características, são geralmente utilizadas em veículos elétricos e são recomendadas para sistemas fotovoltaicos autônomos. (SAAD, 2012)

As baterias Estacionárias, são comumente utilizadas em nobreaks ou short-breaks para equipamentos telefônicos e outros sistemas onde não se pode ter interrupção da alimentação, estas

baterias permitem descargas mais profundas do que as SLI em ciclos menores (tempos curtos), sendo projetadas para ocasionais descargas. Pode haver grande semelhança desta bateria com as SLI ou de tração. Entretanto, a informação da operação das baterias de forma estacionária é importante para que o sistema de carga force, periodicamente, uma sobrecarga e gaseificação momentânea do eletrólito para promover sua agitação e homogeneização da solução. (SAAD, 2012)

Dois tipos de acumuladores de energia estacionários são evidenciados por Chagas (2007), as FVLA (baterias chumbo-ácido ventiladas) e as VRLA (bateria chumbo-ácido regulada por válvula).

As baterias FVLA, apresentam uma forma mais comum de acumuladores de energia de chumbo (Figura 6). Em sua estrutura construtiva existem lacunas para a eliminação de gases nocivos aos seres humanos, provocados pelos processos químicos internos para a obtenção de energia elétrica. O evento descrito indica que este tipo de bateria deverá ser instalado em um ambiente especial, com controle de ventilação e instalações elétricas de iluminação à prova de explosão. Estas características apresentam uma desvantagem na aplicação deste projeto pois, além disso é necessário o preenchimento com água em intervalos regulares. (CHAGAS, 2007)

Figura 6 - Bateria FVLA



Fonte: CHAGAS (2007)

As baterias VRLA são fabricadas em dois modelos, as de eletrólito gel e as de eletrólito absorvido nos separadores (Figura 7). Estas baterias podem operar em qualquer posição, pois sua elaboração permite a recombinação da maior parte dos gases produzidos durante o seu funcionamento, o que reduz as perdas de água. São utilizadas principalmente em aplicações estacionárias (sistemas de telecomunicações, no-breaks, sistemas hospitalares, bancos, instalações militares e etc.) que necessitem de um sistema UPS para não prejudicar a funcionalidade de seus respectivos órgãos, cabido ao baixo custo, a manutenção reduzida e a diversidade de capacidade que vai de poucos Ah até vários milhares de Ah. (CHAGAS, 2007)

Figura 7 - Bateria VRLA



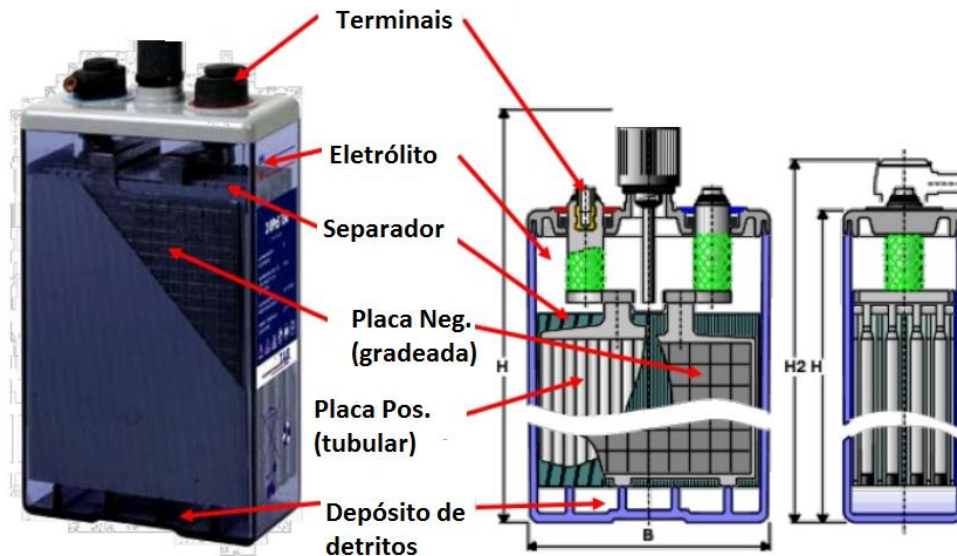
Fonte: adaptado de: <http://iceal.wikidot.com/ilektriko-systima-aytokiniton>.

Este projeto utilizou a bateria do tipo VRLA, têm características de um acumulador de energia do tipo estacionário. São utilizadas tipicamente em UPS, são versáteis, confiáveis e apresentam boa relação custo-benefício. São projetadas para trabalhar em local fixo e sem movimentação do eletrólito, em sua construção leva-se em conta a minimização da sulfatação. (LAZZARIN, 2006; COPETTI, MACAGNAN, 2007)

2.1.2 Características construtivas das baterias Chumbo-Ácidas

A Célula (Figura 8), é uma unidade (as baterias podem conter mais de uma) eletroquímica básica de uma bateria, que consiste em placas positivas e negativas divididas entre si por separadores e imersas em um eletrólito.

Figura 8 - Estrutura bateria de chumbo



Fonte: Adaptado de <https://pt.slideshare.net/MarioTimotius/emobilidade-baterias-de-chumbo>.

O Eletrólito, visto na Figura 8 funciona como condutor permitindo a troca iônica entre as placas de uma bateria (corrente). Em baterias de chumbo, o eletrólito é uma solução diluída de ácido sulfúrico em água que pode ser líquida. Nesta mesma figura, inclusive são evidenciadas as placas, que são molduras que contém uma rede de sustentação em que se situa o material ativo, permitindo a condução de corrente. (SAAD, 2012)

Sua capacidade de carga (Ah), depende de vários aspectos construtivos da bateria (densidade específica do eletrólito, material ativo presente nas placas, e do número, formato e dimensões, das placas por célula, etc.). É a medida de quanta corrente (A) uma bateria pode fornecer em um determinado tempo em horas. A capacidade de uma bateria também depende da taxa de descarga (corrente) e profundidade de descarga da mesma, assim como a tensão de corte, temperatura e histórico de ciclos da bateria. (SAAD, 2012)

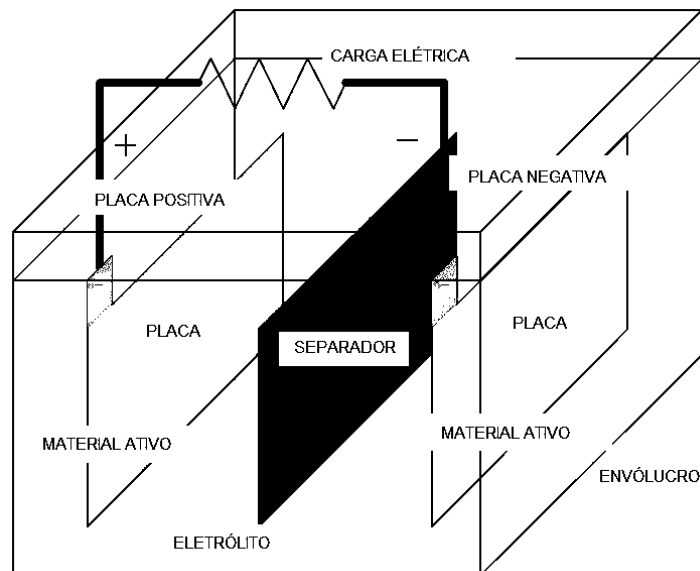
Diversas placas, positivas e negativas, são posicionadas em paralelo em uma bateria, e o seu desenho afeta as características da capacidade de armazenamento de cargas e maior ou menor correntes de descarga. Os separadores, assim como se designa, têm a finalidade de realizar o

isolamento entre as placas para evitar seu contato direto e com isso a incidência de um curto circuito. Poroso, o separador permite a passagem de eletrólito e íons entre as placas positiva e negativa. Enfim os terminais, também chamados de conectores (positivo e negativo), externos a bateria e ligados internamente às células que propiciam a conexão entre a bateria e o seu devido sistema. (SAAD, 2012)

2.1.3 Características elétricas e Estado de Carga das baterias chumbo-ácido

Segundo Saad (2012) as baterias chumbo-ácidas possuem as características terminológicas representadas na Figura 9:

Figura 9 - Estrutura terminológica da célula de uma bateria



Fonte: Saad (2012).

Em baterias chumbo-ácidas, a tensão nominal de cada célula é de 2.14V, que alocadas em uma configuração de circuito série com uma composição de 6 células equivalendo assim 12,84V. Bahia (2015) relata que devido a auto descarga, a tensão aplicada nos terminais para manter a carga da bateria é de 2,2V por célula, ou 13,2 V. A quantidade de eletricidade, ou a capacidade, é dada pelo produto da corrente de descarga pelo tempo de duração da mesma e depende de como são utilizados os materiais ativos no processo. A descarga se caracteriza por uma progressiva redução da tensão, da densidade do eletrólito e do estado de carga e influem os fatores construtivos da bateria (estrutura dos materiais ativos, porosidade, concentração de ácido, espessura das placas) e

os fatores operacionais, como o regime de corrente, a temperatura e a tensão final de descarga. (COPETTI, MACAGNAN, 2007; BAHIA, 2015)

A Tensão de Corte representa o menor valor de tensão que uma bateria deve alcançar enquanto estiver fornecendo corrente para uma carga, ou devido ao seu fator de auto descarga. Além disso, a tensão de circuito aberto representa a tensão em uma bateria quando esta não está sendo carregada nem descarregada, e encontra-se em repouso. Esta varia conforme o seu estado de carga. Aplicar com uma fonte externa uma tensão superior à tensão de circuito aberto irá provocar um carregamento da bateria. Uma tensão menor retirará carga da mesma.

Por fim a Tensão de flutuação, tensão que uma fonte externa poderá aplicar indefinidamente à bateria sem qualquer dano a esta. Se a bateria estiver totalmente carregada, ficará em estado de equilíbrio sem troca de corrente após uma pequena perda. É como se a bateria estivesse flutuando ou desconectada. (SAAD 2012)

A partir do estudo sobre este equipamento analisador, os acumuladores ou baterias, foi possível identificar os conceitos principais pertinentes ao projeto, para que se possa entender alguns cuidados na utilização desse tipo de bateria:

- A tensão nominal de uma célula de chumbo-ácido é definida 2,14 V;
- Tensão final de carga, ou “Tensão de Corte”, é a tensão na qual o acumulador é considerado; descarregado, e pode ser comprometido;
- Tensão de flutuação ou tensão de recarga, é uma tensão acima da tensão de circuito aberto, acrescida apenas do necessário para carregar e manter o acumulador no estado de carga plena;
- Carga de equalização é a carga efetuada em um nível de tensão maior que o de operação normal, tem a finalidade de promover a mistura do eletrólito e equalizar as tensões individuais. (NETO, 2003)

O estado de carga (*SOC*) da bateria é tão importante quanto seus variados marcadores de tensão, pois este justamente determina a quantidade de energia armazenada na bateria, com o intuito que se possa fornecer uma tensão ajustada aos limites de alimentação da carga aplicada em seus terminais. Porém as baterias de chumbo ácido apresentam algumas desvantagens na obtenção de seu *SOC* tornando os métodos de estimativa complexos e inadequados. Um dos problemas

encontrados para a estimação de tempo restante de carga é a modelagem dos efeitos não lineares que acontecem durante a descarga da bateria. (PEIXOTO, 2012)

Alguns métodos para realizar a estimativa são descritos por PEIXOTO (2012), como:

- Método Linear: método mais simples por considerar a bateria como um dispositivo linear de corrente, em que C é a capacidade de carga atual da bateria, C_i é a capacidade de carga inicial, I é a corrente de descarga e t_d é o tempo de descarga, demonstrado pela equação 1.

$$C = C_i - I \cdot t_d \quad (1)$$

- Metodologia “Coulomb Counting”: A metodologia conhecida como “Coulomb Counting” calcula o estado de carga de uma bateria usando a integral no tempo da corrente de descarga i_{bat} , em que SoC é o estado de carga atual, Q_c representa o estado de carga inicial da bateria evidenciado na equação 2:

$$SoC(t) = 100x\left(\frac{Q_c - \int_0^t i_{bat}(\tau) d\tau}{Q_c}\right) \quad (2)$$

A metodologia escolhida pelo autor foi a metodologia alternativa que submete o cálculo pelo método do coulomb counting e o ajuste proporcionado pela lei de Peukert, descritos no capítulo 3.3. Para a realização da mensuração dos sinais de tensão e corrente necessárias nas estimativas de tempo restante de carga serão utilizados alguns dispositivos eletrônicos e, a teoria acerca destes dispositivos foram abordadas no item seguinte.

2.2 DISPOSITIVOS ELETRÔNICOS

Neste projeto foram utilizados alguns dispositivos eletrônicos para auxiliar na estimativa do tempo restante de energia que a bateria é capaz de fornecer. Os cálculos deverão ser realizados por um microprocessador (embutido em um hardware microcontrolador), que irá receber os dados de tensão e corrente, sensor de corrente, conversor CC-CC e um dispositivo de interface homem-máquina. As características individuais destes Dispositivos Eletrônicos serão abordadas nos subitens seguintes.

2.2.1 Microprocessadores

Os microprocessadores são máquinas elétricas que armazenam instruções lógicas, aritméticas e de tomada de decisão permitindo que o mesmo funcione de várias maneiras dependendo das instruções (programa) que foram armazenadas em sua memória. Em sistemas microprocessados, o microprocessador é conhecido como CPU e funciona como o cérebro de todo

o sistema, ou seja, é ele quem comanda tudo que é realizado pelo sistema microprocessado. Um exemplo muito conhecido de sistemas microprocessados é o computador pessoal (PC – *Personal Computer*) que é utilizado todos os dias. (CETINKUNT, 2007)

Qualquer computador com dispositivos de interface de entrada e saída (E/S digital e analógica) pode ser usado como controlador. Por exemplo um computador desktop tipo PC pode ser utilizado como controlador de processo adicionando-se uma placa de expansão e o software de controle. (CETINKUNT, 2007)

Existe uma grande variedade de componentes de hardware em um computador do tipo PC (computador não embutido) que não são necessários para as funções de controle de processo. Conforme Cetinkunt (2007) um computador embutido (embarcado) usa apenas componentes de hardware e software necessários e é muito menor do que um computador não embutido, tal como um PC desktop.

O microcontrolador é um sistema computacional completo inserido em um único circuito integrado. Possui CPU, memória de dados RAM (*Random Access Memory*) e programa ROM (*Read Only Memory*) para manipulação de dados e armazenamento de instruções, sistema de clock para dar sequência às atividades da CPU, portas de I/O além de 2 outros possíveis periféricos como, módulos de temporização, conversor analógico digital e até mesmo nos mais avançados conversores USB (Universal Serial Bus) ou ETHERNET. (MELO, 2011)

As necessidades para o armazenamento e a recuperação de dados para memória de programa e memória de dados não são as mesmas. Por exemplo, normalmente o conteúdo da memória de dados necessita ser alterado conforme os dados vão sendo coletados. (FRANCHI, CAMARGO, 2013)

Os microcontroladores em geral têm pinos para conexões externas de entradas e saídas, alimentação, clock e sinais de controle. Os pinos para as entradas e saídas são agrupados em unidades denominadas portas. As portas podem ser apenas de entrada, apenas de saída ou programáveis como entrada ou saída. Em suma, um microcontrolador difere de um microprocessador em vários aspectos, primeiramente devido a sua funcionalidade. Para que um microprocessador possa ser usado, outros componentes devem ser adicionados, tais como memória

e componentes para enviar e receber dados, ou seja, o microprocessador é o verdadeiro coração do computador. (BOLTON, 2010)

Um microcontrolador é utilizado como objeto de estudo pelo fato de sua robustez e baixo consumo da configuração, além da infinita disponibilidade de configurações encontradas no mercado, que facilitam a questão da implementação do protótipo em prática. Os microcontroladores são específicos para controle, não tem grande capacidade de processamento e por isso nunca haverá computador pessoal cuja CPU seja um microcontrolador. Segundo Souza (2000), um microcontrolador é um CI (circuito integrado) capaz de efetuar processos lógicos com extrema rapidez e precisão. A grande vantagem deste CI é a sua possibilidade de programação, o que o torna adaptável à finalidade desejada, e que possibilita seu ajuste de acordo com a tarefa que deverá executar.

A partir dessa breve explicação das principais características dos microcontroladores, de um modo generalizado, serão levadas em consideração os seguintes periféricos, para a escolha do microcontrolador relevantes ao trabalho: entradas e saídas digitais (I/O's), conversores analógicos digitais (ADC's), contadores internos, modulador por largura de pulso PWM (*pulse width modulator*), interface de comunicação serial assíncrona UART (*Universal Asynchronous Receiver Transmitter*).

2.2.2 Sensores de corrente

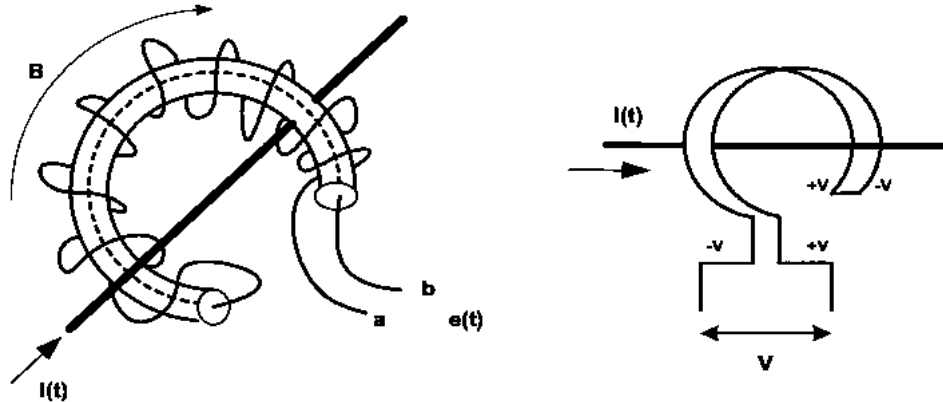
Para a mensuração da corrente elétrica necessária para a aplicação da metodologia de estimação do tempo restante de carga, deverá ser utilizado algum tipo de dispositivo ou circuito que a realize, neste caso, estes dispositivos são denominados sensores de corrente. (PEIXOTO, 2012)

Um sensor de corrente possui a função de monitorar uma corrente em uma carga, fornecendo um sinal que pode ser usado, por exemplo, por um microcontrolador, através de seus terminais de conversão A/D (analógico-digital), que é o caso do projeto em questão. As principais diversidades de sensores de correntes evidenciados por HIGASHI (2006) e CONCEIÇÃO (2013) são Bobina de Rogoski, Resistor Shunt, e Efeito Hall.

2.2.2.1 Bobina de Rogoski

Este sensor de corrente utiliza a bobina de Rogoski para medir a corrente alternada ou pulsos de alta velocidade, são constituídos por várias espiras enroladas em um núcleo magnético. Na Figura 10 pode ser observado uma bobina helicoidal com núcleo toroidal não magnético e sem núcleo de ferro, que é colocado dentro do condutor.

Figura 10 - Bobina de Rogoski



Fonte: Adaptado de HIGASHI (2003).

Segundo Conceição (2012) o dispositivo basicamente é enrolado sobre o núcleo de ar, com espaçamento igual de uma extremidade a outra e retorna através do centro do núcleo da bobina à outra extremidade. Devido ao núcleo de ar, a bobina tem baixa indutância e pode responder a rápidas alterações de falta.

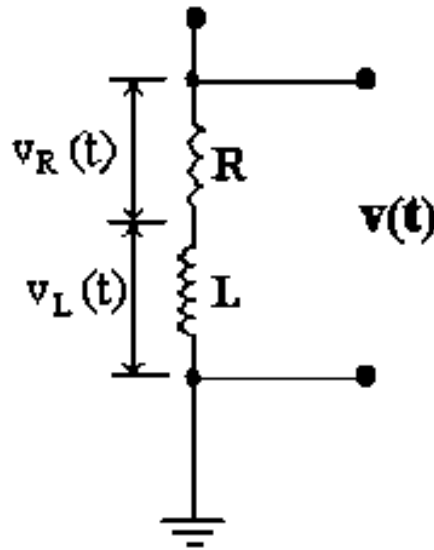
Foi evidenciado por Conceição (2012), inclusive, que este dispositivo proporciona uma tensão senoidal na saída a partir de uma correlação da variação entre a corrente aplicada e o fluxo magnético aplicando-se a Lei de Amperes para o circuito na frequência fundamental de 50 ou 60 Hz, a referida tensão senoidal apresenta-se com defasagem angular de 90° atrasada.

2.2.2.2 Resistor Shunt

Um resistor conhecido, pode ser empregado em um circuito para medições de correntes elétricas. Este processo de medida de corrente é realizado introduzindo-se uma resistência *shunt* em série com o circuito, desta forma, pela lei de Ohm, quando a corrente a ser medida passa pelo resistor, o shunt resulta em uma tensão em seus terminais. A alta corrente (provoca aquecimento do resistor), a tensão (causa problemas de isolamento elétrica do sistema de media) e a alta frequência

(produz Efeito Pelicular) são alguns aspectos negativos pelo dispositivo abordado apresentado na Figura 11. (HIGASHI,2006 e CONCEIÇÃO, 2013)

Figura 11 - Exemplo de ligação Resistor Shunt



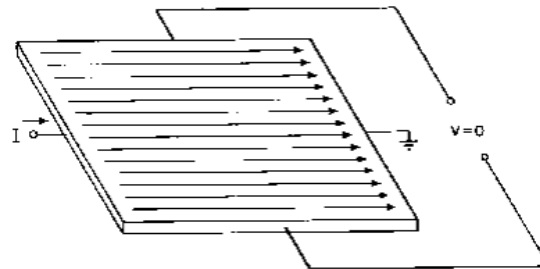
Fonte: Adaptado de HIGASHI (2003).

2.2.2.3 Efeito Hall

Por fim este dispositivo que está diretamente relacionado ao surgimento de um campo elétrico transversal em um condutor percorrido por uma corrente elétrica, quando o mesmo se encontra mergulhado em um campo magnético.

As Figuras 12 e 13 auxiliam na demonstração do princípio básico do efeito Hall, descrita por uma folha fina de um material semiconductor através da qual circula uma corrente elétrica (Figura 12). Quando o campo magnético (B) não está presente, a distribuição de corrente é uniforme e não é visto diferença de potencial (DDP) através da saída. (CONCEIÇÃO, 2012)

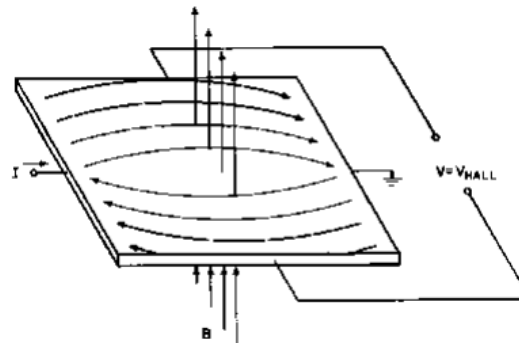
Figura 12 - Efeito Hall sem detecção de um campo magnético transversal



Fonte: Adaptado de CONCEIÇÃO (2012).

A Figura 13 demonstra como, na presença de um campo magnético perpendicular, o fluxo de corrente é distorcido. A distribuição resultante provoca o aparecimento de uma DDP entre os terminais de saída. Esta DDP é chamada “Tensão Hall”.

Figura 13 - Efeito Hall detectando um campo magnético transversalmente

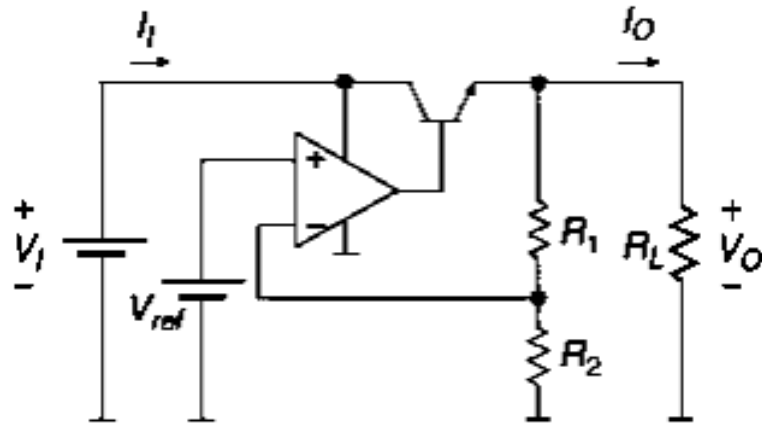


Fonte: Adaptado de CONCEIÇÃO (2012).

2.2.3 Conversores CC – CC

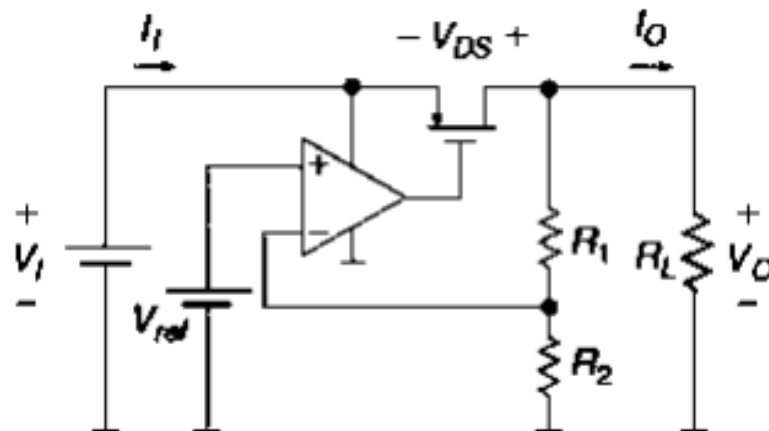
Conforme Rashid (2011), as tecnologias de ponta seguem características em comum, como: alta qualidade, confiabilidade e eficiência, incorporados e exigidos pelos consumidores em espaços cada vez menores. Os conversores CC-CC fazem parte da família das “*Power Supplies*” (Fontes de Alimentação) que se dividem em *Linear Regulator* (Regulador Linear) e os “*Switching Regulators*” (Reguladores Comutados). Existem duas topologias básicas de Reguladores Lineares: o regulador de tensão em série (Figura 14) e o regulador de tensão de derivação (Shunt), (Figura 15).

Figura 14 - Regulador de tensão de série



Fonte: Adaptado de KAZIMIERKZUK (2008).

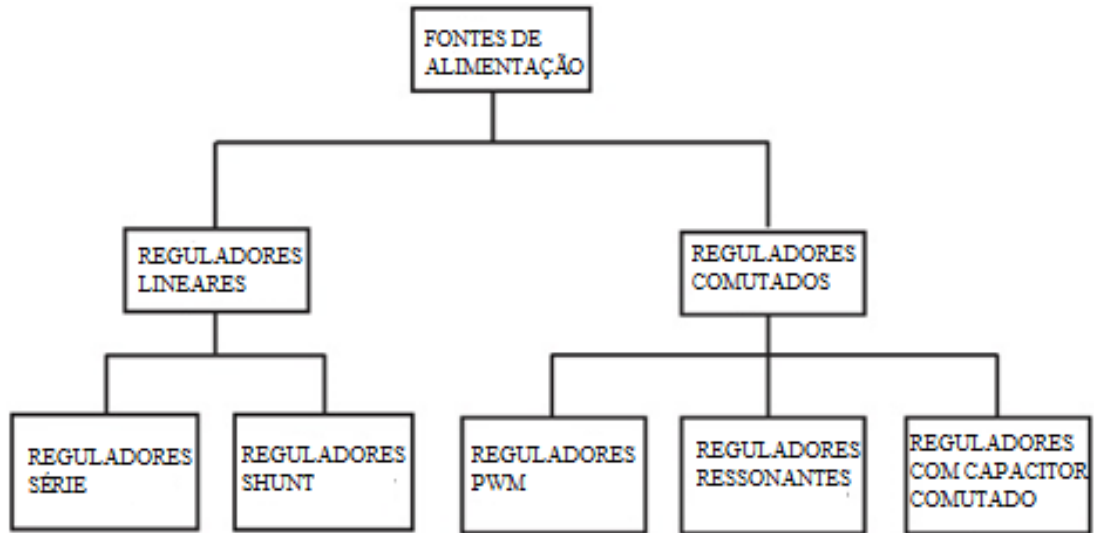
Figura 15 - Shunt



Fonte: Adaptado de KAZIMIERKZUK (2008).

Os reguladores de tensão comutados são divididos em três categorias: conversores CC-CC com modulação por largura de pulso (PWM), conversores CC-CC ressonantes e reguladores de tensão com capacitores comutados (também chamados de bomba de carga ou “*charge-pump*”) como mostra a Figura 16. (KAZIMIERKZUK, 2008; MOHAMMED, 2014; RASHID, 2011)

Figura 16 - Classificação das Fontes de Alimentação



Fonte: Adaptado de KAZIMIERCZUK (2008).

Os Reguladores Lineares possuem uma característica adversa devido ao seu princípio de operação baseado em divisores de tensão ou corrente. Este fato os limita ao resultado de fornecer tensões menores que a tensão de entrada. Os reguladores lineares podem, no entanto, fornecer uma tensão de saída de alta qualidade. A sua principal área de aplicação está em baixos níveis de potência com baixa tensão de saída (LDO – Low drop-out) operando linearmente. (MOHAMMED, 2014; KAZIMIERCZUK, 2008)

Para níveis de potência mais elevados, são utilizados Reguladores Ressonantes e os Reguladores Comutados (ou chaveados). Os chaveados utilizam comutadores eletrônicos feitos de semicondutores para realizar a função de chaveamento, que por sua vez podem alcançar considerável eficiência na conversão de energia (em torno de 80% e 90%). Os interruptores eletrônicos modernos podem operar com altas frequências. Quanto maior a frequência de operação, menores e mais leves são os transformadores, indutores e capacitores a serem utilizados. Além disso, altas frequências de operação permitem alcançar uma resposta dinâmica rápida às mudanças repentinas de corrente de carga ou tensão de entrada. Porém sua eficiência diminui por causa das perdas de chaveamento que aumentam proporcionalmente com o aumento da frequência de chaveamento. (KAZIMIERCZUK, 2008; MOHAMMED, 2014)

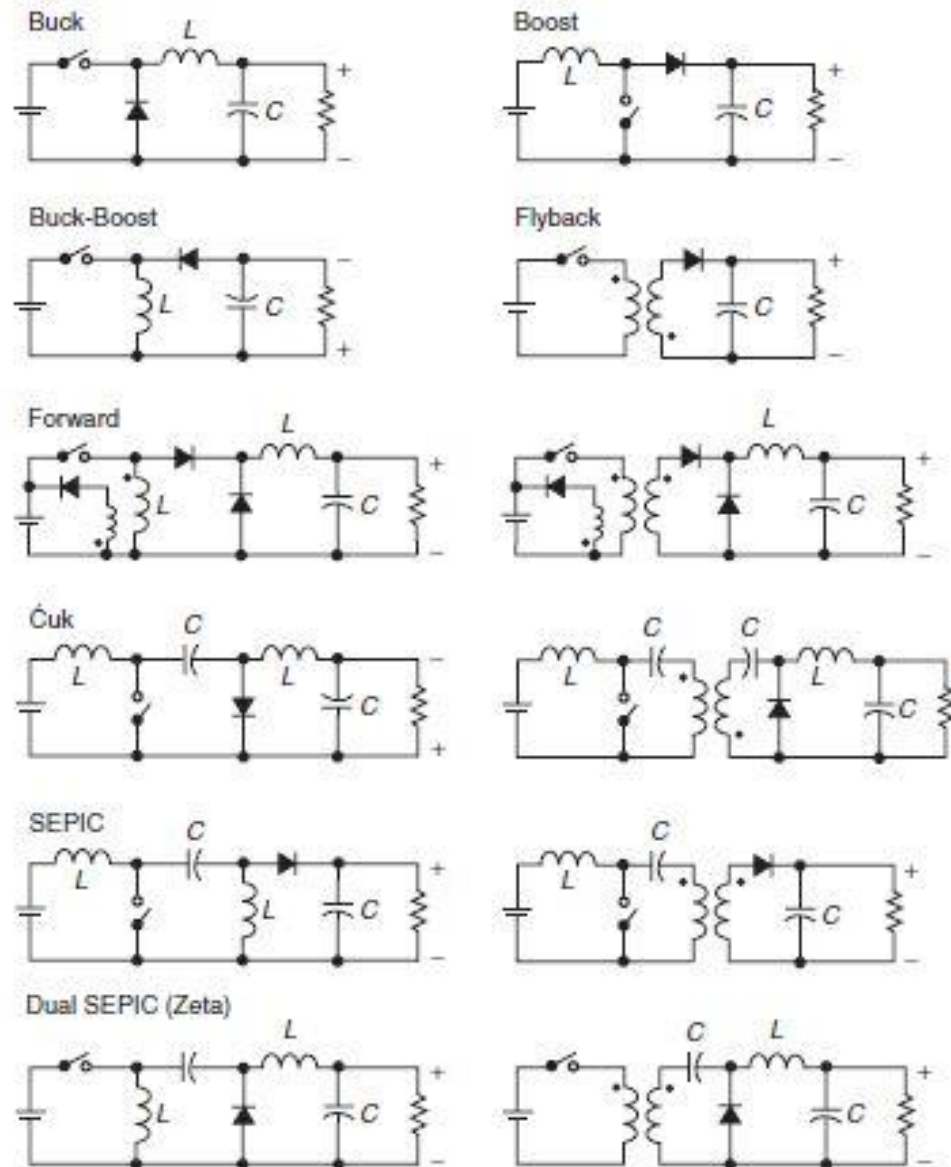
Os conversores CC-CC PWM, são acionados por uma tensão retangular de alta frequência, que é retificada e filtrada. O ciclo de trabalho (ou a largura do pulso) da onda retangular é variada

para controlar a tensão de saída CC. As principais aplicações dos conversores CC-CC citadas por RASHID (2011) são, converter uma tensão de entrada VS em uma tensão de saída VO, regular a tensão de saída de CC contra variações de carga e linha, proporcionar isolamento entre a fonte de entrada e a carga e proporcionar proteção contra interferências eletromagnéticas. Estes dispositivos são incumbidos como circuitos que realizam a conversão de uma tensão CC fixa para outra tensão CC de mesma intensidade, maior ou menor. São utilizados para evitar a pulsação na tensão de entrada, manter o nível de corrente constante e evitar danos a carga e ao acumulador de energia elétrica, denominado conversor CC-CC (também conhecido como *Chopper*). (BAHIA, 2015, RASHID, 2011; KAZIMIERKZUK, 2008)

Para este projeto optou-se pelo conversor PWM devido à sua popularidade, alta eficiência, operação de frequência constante, controle relativamente simples e podem ser implementados facilmente com uma grande variedade de microcontroladores, tanto para conversores step-down (abaixadores) como para os step-up (elevadores). Um conversor CC-CC deve fornecer uma tensão de saída CC regulada para condições variáveis de carga e tensão de entrada. (RASHID, 2011)

As três topologias básicas de conversores CC-CC PWM não isolados, descritos por Bahia (2015), são os conversores abaixadores ou *Buck*, que apresentam a finalidade de transformar a tensão de entrada em uma tensão de saída menor que a de entrada; os conversores elevadores ou *Boost*, que realizam a conversão da tensão de entrada para uma tensão de magnitude superior na saída; conversores abaixadores-elevadores ou *Buck-Boost*, que transformam a tensão de entrada em uma tensão maior ou menor na saída. RASHID (2011) exemplifica os conversores abaixadores (*step-down*) como os que são aplicados em sistemas de acionamento CC de alto desempenho, tração elétrica de veículos e também em ferramentas. A tensão média de saída deste conversor é uma função linear do “*duty ratio*” do comutador. Já os conversores elevadores (*step-up*) são utilizados principalmente em radares e sistemas de ignição. As demais topologias de conversores CC-CC PWM, inclusive as principais, são mostradas na Figura 17.

Figura 17 - Topologias conversores CC-CC PWM



Fonte: Adaptado de KAZIMIERKZUK (2008).

Na literatura técnica especializada são encontrados diversos trabalhos sobre topologias básicas de conversores CC-CC. Estes conversores inclusive podem ser classificados quanto ao seu isolamento, sendo os conversores isolados (isolamento entre fonte e carga realizado por um transformador) e não-isolados. Apesar do simplificado isolamento galvânico proporcionado pelo transformador, estes são difíceis de serem projetados pois são projetados para operar em frequências elevadas. As principais topologias de conversores não-isolados são: Buck ou abaixador, Boost ou elevador, Cuk, Sepic e Zeta. (DAMASCENO, 2008).

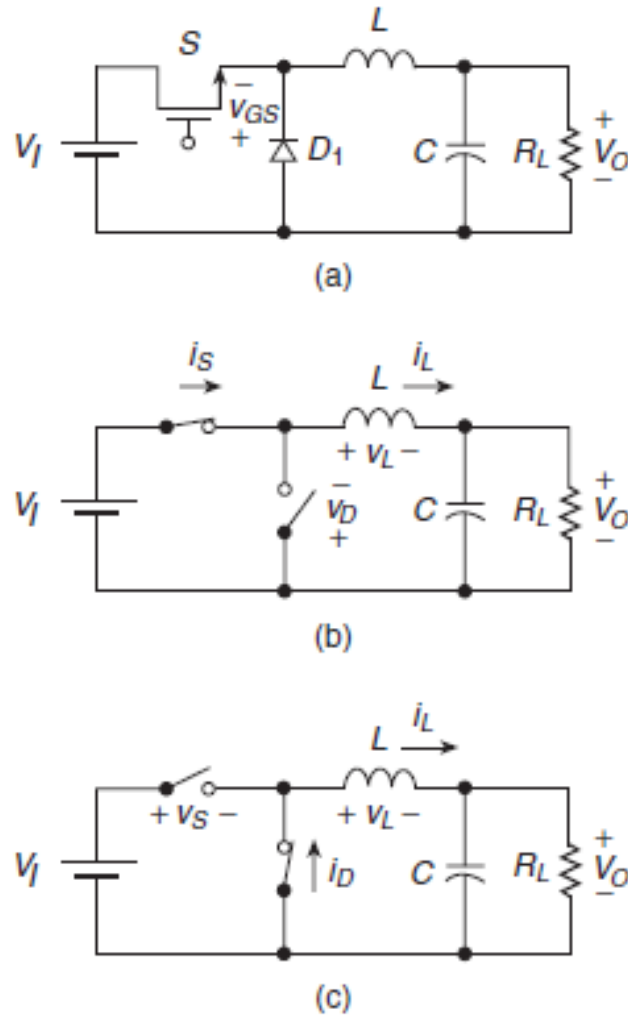
Damasceno (2008) afirma que os conversores do tipo Zeta e Buck-Boost são inadequados para controlar carga e descarga de acumuladores de energia, pois suas correntes de saída possuem valores elevados de ondulação que prejudicam a vida útil da bateria. Conversores Cuk, Sepic e Zeta possuem grande número passivos e um comportamento dinâmico de quarta ordem que aumentam a complexidade da modelagem e do controle dos mesmos. O Sepic apresenta apenas uma das correntes filtradas, enquanto que o Cuk tem ambas. Contudo o Cuk apresenta inconveniente de uma das tensões ser invertida assim como o Buck-Boost.

A seguir foram descritas as três principais topologias citadas, de forma ideal, ou seja, os circuitos dos conversores não apresentam perdas internas e a potência de entrada permanece equivalente a potência de saída.

2.2.3.1 *Conversor Buck*

Um conversor Buck com uma carga resistiva mostrado na Figura 18, em seu segmento (a) está representado idealmente seu MCC ou Modo de Condução Contínua. Em suma apresenta um circuito em série, incumbido de uma fonte de alimentação CC (fonte V_I), interruptor controlável (S) e resistência de carga (R_L), diodo (D_1), indutor de filtro (L), Capacitor de filtro (C). Na maioria dos casos, o interruptor S possui capacidades de bloqueio de tensão unidirecionais e capacidades de condução de corrente unidirecional. Os interruptores eletrônicos de potência geralmente são implementados com MOSFET de potência, IGBTs, MCTs, TBJs de potência ou GTOs. Se um diodo for acrescentado no circuito, o comutador então irá exibir uma propriedade de condução bidirecional.

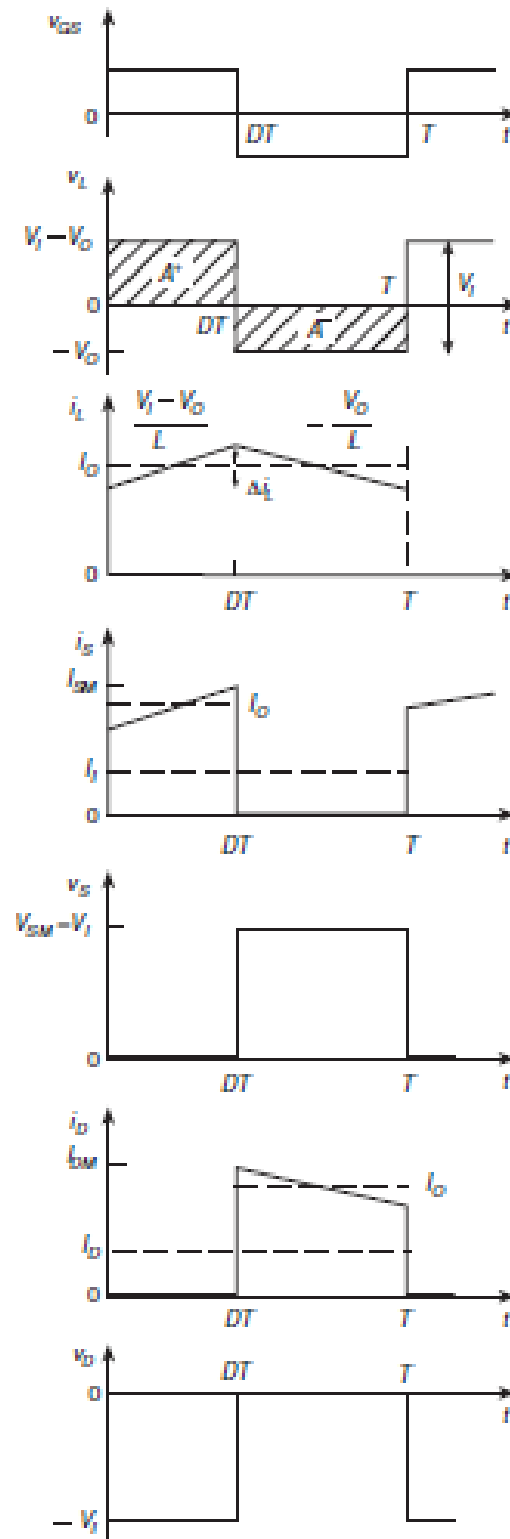
Figura 18 - PWM buck converter e seus circuitos equivalentes ideais para CCM. (a) Circuito. (b) Circuito equivalente quando o comutador permite a passagem de corrente e o diodo impede. (c) Circuito equivalente quando o comutador não está conduzindo e o diodo está



Fonte: Adaptado de KAZIMIERKZUK (2008).

. O princípio da operação do conversor é explicado pelas formas idealizadas de onda de corrente e tensão representadas na Figura 19. Em tempo $t = 0$, o interruptor é ligado pelo driver. Consequentemente, a tensão em todo o diodo é $V_D = -V_I$, fazendo com que o diodo seja polarizado de volta. A tensão através do indutor L é $v_L = v_I - v_O$ e, portanto, a corrente do indutor aumenta linearmente com uma inclinação de $(v_I - v_O) / L$. A corrente do indutor i_L flui através do interruptor. Por isso, $i_S = i_L$. Durante este intervalo de tempo, a energia é transferida da alimentação CC para o indutor, capacitor e carga.

Figura 19 - Formas de onda idealizadas de corrente e tensão no conversor PWM buck para MCC



Fonte: Adaptado de KAZIMIERKZUK (2008).

A corrente do indutor nunca chega a zero para qualquer período de tempo, neste caso o modo de condução é chamado contínuo ou modo de operação comum. Pode-se ver no circuito que, quando o interruptor S é comandado para o estado de condução, o diodo D é polarizado inversamente. Quando o interruptor S está desligado, o diodo conduz para suportar uma corrente ininterrupta no indutor.

Este tipo de conversor objetiva apresentar na saída de seu circuito uma tensão menor que a tensão de entrada, a partir de uma comutação realizada por um transistor. Seu funcionamento é descrito em duas etapas: na primeira etapa o transistor está conduzindo, então o diodo entra em corte propiciando o carregamento do indutor; na segunda etapa com o transistor em corte, o diodo passa a conduzir mantendo a corrente no indutor, e nesse momento o indutor passa a descarregar. (BAHIA, 2015; RASHID, 2011).

Os referidos conversores são geralmente representados nos modos de operação contínuo e descontínuo, relativos ao comportamento do indutor mostrado no circuito acima (Figura 18 (a)), modo de operação em condução descontínua (MCD – Modo de Condução Descontínua), quando a corrente no indutor chega a zero durante a descarga e contínua (MCC – Modo de Condução Contínua), quando o indutor não descarrega por completo. É incomum utilizar os dois modos de condução em um conversor pelo fato da necessidade de diferentes algoritmos de controle. (BAHIA, 2015; RASHID, 2011)

Rashid (2011) escreve que nos conversores *Buck*, o valor da indutância do filtro que determina o limite entre MCC e MCD, e pode ser encontrado a partir da equação (3).

$$L_{lim} = \frac{(1 - D)R}{2f} \quad (3)$$

Com isto para um indutor $L > L_{lim}$ diz-se que o conversor opera em MCC, no MCD o indutor L apresenta indutância menor que a limite calculada através de (3). Ainda pode ser observado na Figura 18 (b) que a corrente no indutor de filtro i_L consiste em uma componente CC I_O sobreposto de uma componente CA triangular, porém sempre se mantendo positiva. Quase todo esse componente CA flui através do capacitor de filtro como uma corrente i_C , esta corrente causa um pequeno ripple na tensão de saída V_O . Para limitar a tensão pico a pico do ripple (V_r) a capacitância de C deve ser maior que:

$$C_{min} = \frac{(1 - D)V_o}{8V_r L f^2} \quad (4)$$

BAHIA (2015) sustenta que o ganho estático do conversor (G) é definido pela razão da tensão de saída pela tensão de entrada e pode ser expresso em razão do tempo de condução (t_T) e o período do chaveamento (τ). Com isso podemos definir o ciclo de trabalho (D) pela equação (5).

$$D = \frac{t_T}{\tau} \quad (5)$$

Dessa forma o ganho estático do conversor *Buck* é definido pela equação (6).

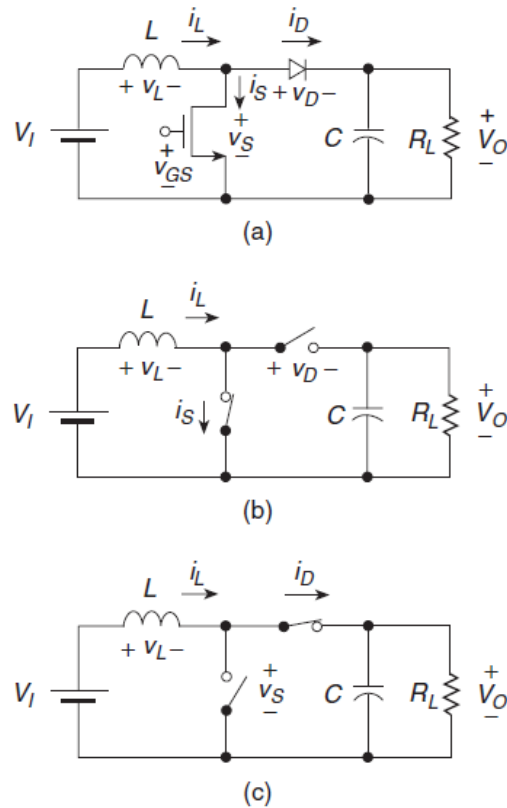
$$G = D \quad (6)$$

2.2.3.2 *Conversor Boost*

Esta topologia de conversores CC-CC, são chamados de elevadores, justamente pela sua característica de elevar a tensão aplicada à entrada, efetivamente na saída de seu circuito (Figura 21), essencialmente, este conversor trabalha carregando o indutor L, que ao descarregar eleva a tensão de saída do sistema.

A tensão de saída VO é sempre maior do que a tensão de entrada VI para operação no estado estacionário. O conversor consiste em um indutor L, um MOSFET de potência, um diodo D1, um capacitor de filtro C e um resistor de carga RL. O interruptor S é ligado e desligado na frequência de comutação $f_s = 1 / T$ com a relação de funcionamento $ON = ton / T$, onde ton é o intervalo de tempo quando o interruptor S está ligado. O modo de operação destes conversores também é descrito pelos autores como contínua ou descontínua, dependendo da forma de onda da corrente do indutor. A figura 20 (b) - (c) mostra os circuitos equivalentes MCC quando o interruptor S está LIGADO e o diodo está DESLIGADO e quando o interruptor está DESLIGADO e o diodo é LIGADO, respectivamente. (BAHIA, 2015; RASHID, 2011, KAZIMIERKZUK, 2008)

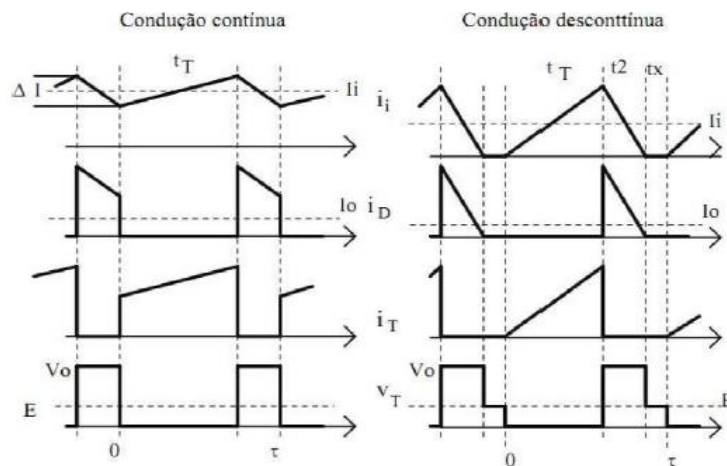
Figura 20 - Circuito do conversor elevador (Boost).



Fonte: Fonte: Adaptado de KAZIMIERKZUK (2008).

Seu desempenho também pode ser fragmentado em duas etapas correlacionadas a condução do comutador (transistor), os chamados modo de condução contínua (MCC) e modo de condução descontínua (MCD) (Figura 21).

Figura 21 - Formas de onda do conversor Boost



Fonte: Adaptado de BAHIA (2015).

Na primeira etapa quando o transistor está conduzindo, a tensão de entrada é aplicada ao indutor “L” fazendo com que a intensidade de energia se acumule em seus terminais. Nesse instante, o diodo “D” está dissociado devido a tensão de saída ser maior do que a de entrada.

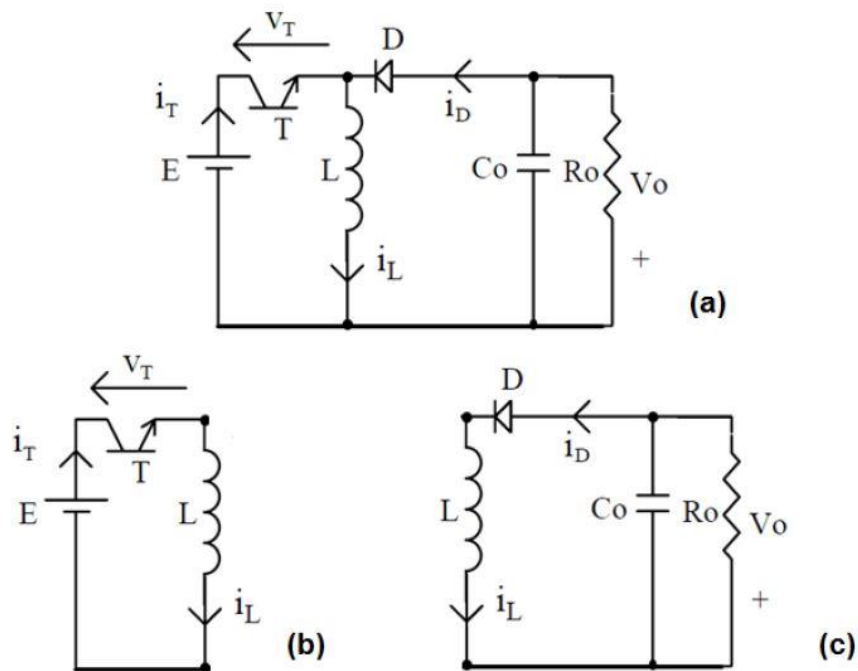
Em um segundo momento, quando o transistor para de conduzir, a tensão de saída é resultante do somatório entre a tensão de entrada e a tensão do indutor, pois o diodo passa a conduzir, ou seja, a tensão de saída tem uma tensão maior que a tensão de entrada, desde que a tensão do indutor não seja nula. (BAHIA, 2015)

2.2.3.3 *Conversor Buck-Boost*

A topologia de conversor não isolado *Buck-Boost* (Figura 22 (a)) é composta por uma fonte de tensão de entrada CC (E), interruptor controlado (T), indutor (L), diodo (D), capacitor (Co) e resistência de carga R. Com o comutador acionado (saturado – Figura 22 (b)), a corrente do indutor aumenta enquanto o diodo é mantido desligado. Quando o comutador está desligado (Figura 22 (c)), o diodo fornece um caminho para a corrente do indutor. Basicamente, o indutor L (visto na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**22 (a)) é carregado sendo capaz de fornecer uma tensão maior ou menor que a tensão de alimentação. Pode-se visualizar inclusive, que quando o comutador está aberto, não há transferência de energia da fonte de alimentação para o circuito, isto ocorre devido a polarização inversa do diodo D, quando a mesma fecha, começa a circular uma corrente somente através do indutor L, que irá armazenar energia. (KAZIMIERKZUK, 2008)

Quando a chave abrir, a energia armazenada fará o diodo D conduzir, entregando a tensão ao capacitor C, carregando-o, que por estar em paralelo com a carga, finalmente entregará a tensão na saída. Como a corrente resultante está em sentido contrário ao da entrada, provoca o aparecimento de uma tensão negativa na saída, com polaridade oposta a tensão de entrada, também visualizada na Figura 22 (a). (KAZIMIERKZUK, 2008)

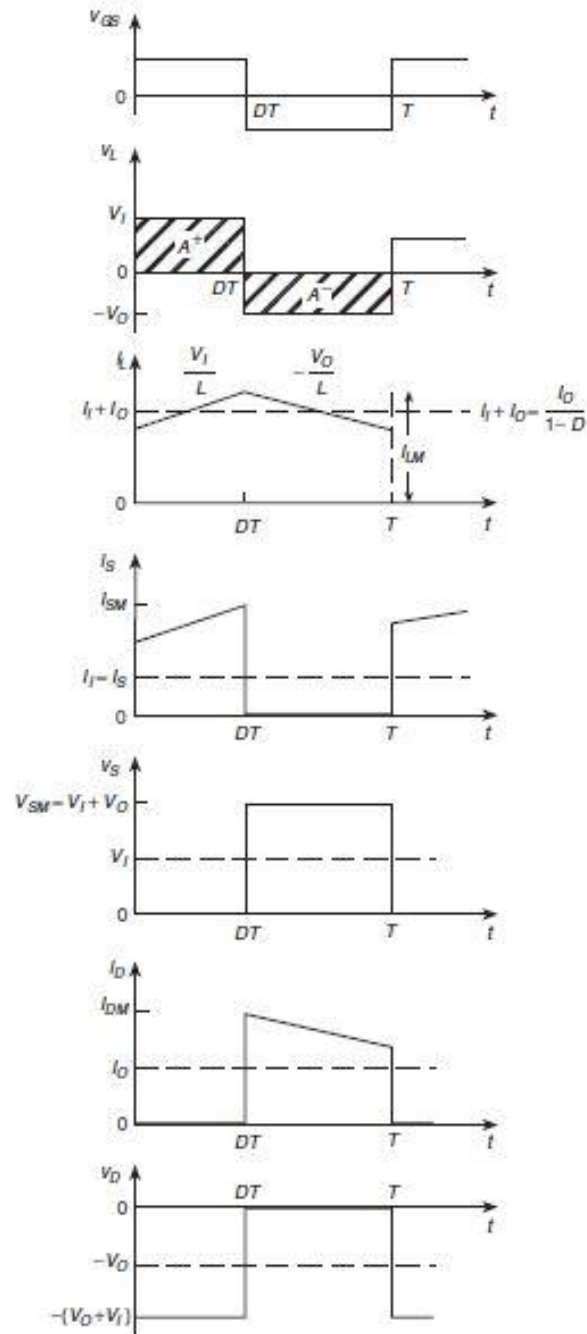
Figura 22 - (a) Circuito do conversor abaixador-elevador (Buck-Boost); (b) Transistor conduz; (c) Transistor aberto.



Fonte: Adaptado de POMÍLIO (2014).

Durante o intervalo de tempo $0 < t \leq DT$, o interruptor está ligado e o diodo está desligado como indicado na Figura 22 (b). A tensão em todo o diodo é $-(E + V_o)$ e mantém o diodo no estado de desligado. A tensão através do indutor é E e dá origem para um aumento linear na corrente do indutor com uma inclinação de E / L . Durante o intervalo de tempo $DT < t \leq T$, o interruptor está desligado e o diodo está ligado como mostrado na Figura 22 (c). A tensão através do indutor é $-V_o$ e faz com que a corrente do indutor diminua linearmente com uma inclinação de $-V_o / L$. A tensão através do interruptor é $E + V_o$. No tempo $t = T$, o interruptor atua novamente e o próximo ciclo começa, as formas de onda podem ser visualizadas na Figura 23.

Figura 23 - Formas de onda do conversor abaixador-elevador (Buck-Boost)



Fonte: Adaptado de KAZIMIERKZUK (2008).

Em seguida serão apresentadas as fórmulas para realização do projeto baseadas na bibliografia apresentada no decorrer deste item.

Para o cálculo da razão cíclica nominal (D) utiliza-se a equação 7.

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{D}{1-D} = \frac{D}{D'} \quad (7)$$

Para calcular o valor do indutor, levando-se em consideração uma porcentagem de ondulação de corrente na saída, utiliza-se a equação 8.

$$L = \frac{V_i \times D}{f \times \Delta I_L} \quad (8)$$

$V_i =$ Tensão de entrada

$D =$ Duty Cycle

$f =$ Frequência de chaveamento

$\Delta I_L(\%) =$ Ondulação percentual de Corrente

Para a obtenção do valor do capacitor, para o referido conversor, utilizando uma ondulação percentual de entrada, utiliza-se a equação 9.

$$C = \frac{P_o \times D}{V_o^2 \times (\Delta V_o) \times f} \quad (9)$$

De modo que:

$P_o =$ Potência de Saída (W);

$D =$ Duty Cycle;

$V_o =$ Tensão de Saída do Conversor; (V)

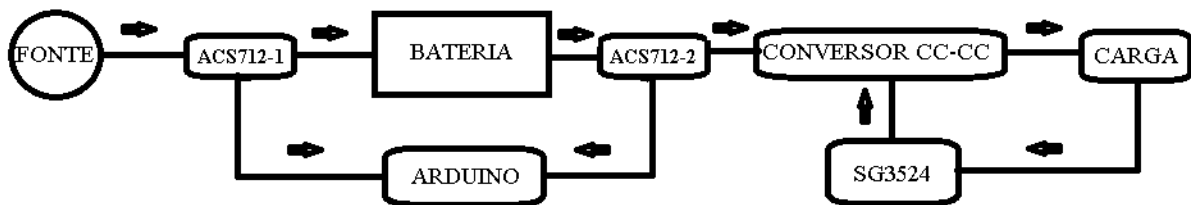
$\Delta V_o =$ Ondulação de Tensão de saída;

$f =$ Frequência de chaveamento(kHz).

3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta quais e como foram utilizados os dispositivos envolvidos no projeto, características de operação, cálculos necessários para a estimativa do tempo restante de carga.e obtenção do sinal PWM para a comutação do conversor a partir do CI SG3524. Em princípio uma tensão de alimentação será fornecida por uma fonte externa, neste caso um carregador de baterias, a corrente entregue a bateria (UP 1270) por este será lida pelo primeiro sensor de corrente (ACS 712-1) e enviada para a porta conversora A/D do Arduino NANO. Em seguida o sensor de corrente 2 (ACS712-2) lê a tensão entregue à carga. O conversor Buck-boost age por intermédio, juntamente com o SG3524 com seu controle Proporcional Integral (PI), realizando o ajuste do nível de tensão entregue à carga. Um diagrama de blocos foi criado para prover um melhor entendimento do funcionamento do dispositivo, e está disposto na figura 24.

Figura 24 - Diagrama de Blocos Monitoramento.



Fonte: Autoria própria, 2017.

Os dispositivos mencionados foram escolhidos devido á disponibilidade em laboratório, agilizar e facilitar a implementação do projeto devido à sua complexidade de elaboração.

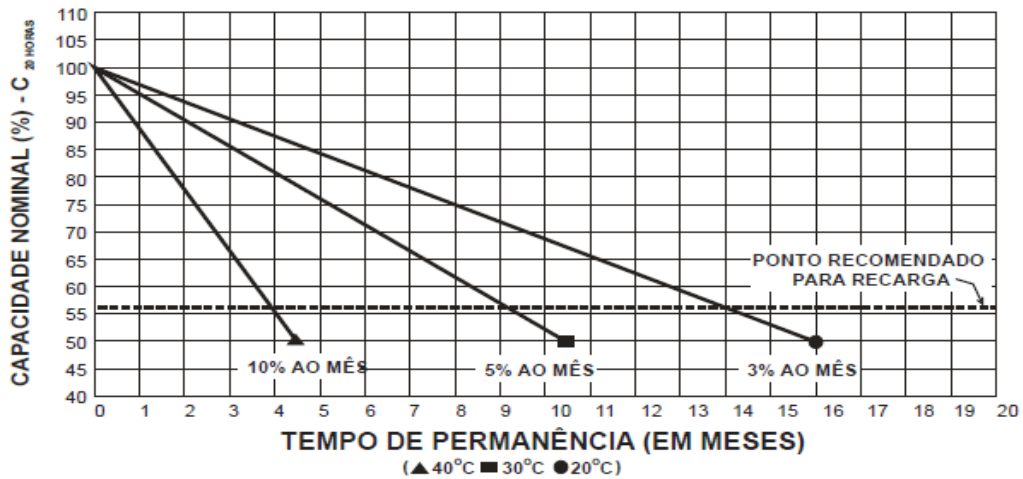
3.1 BATERIA UNIPOWER UP 1270

Segundo Unicoba, 2013 as baterias chumbo-ácidas seladas UNIPOWER são compostas através de elementos ou células de 2 V, formando um monobloco. Isto é, as baterias de 2 V são compostas por um elemento, as de 6 V por 3 elementos e as de 12 V por 7 elementos.

O acumulador em questão foi projetado para atingir uma média de 1000 ciclos de carga e descarga em uso sob condições normais, em temperatura ambiente de 20°C, a vida útil da bateria

sobre uma tensão de flutuação é de 5 a 7 anos para a capacidade inferior a 30 Ah, sendo que nesta temperatura sua taxa de autor-descarga mensal da bateria é aproximadamente 3% da sua capacidade nominal apresentado na figura 25 (UNICOBA, 2013)

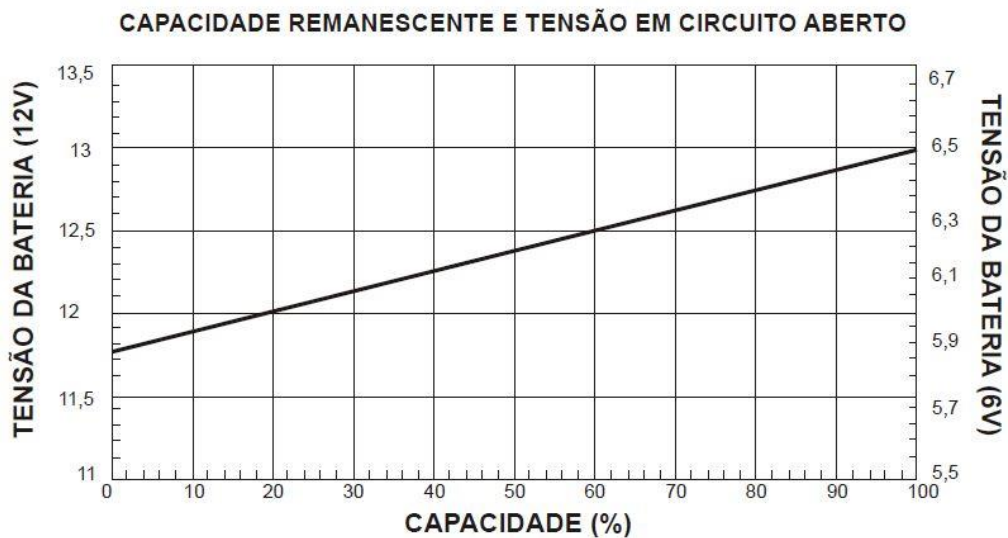
Figura 25 - Gráfico auto-descarga da bateria UNIPOWER



Fonte: Adaptado de UNICOBA, 2013.

A profundidade aproximada de descarga ou capacidade remanescente deste modelo de bateria, levando-se em consideração a tensão de circuito aberto, é apresentada na Figura 26.

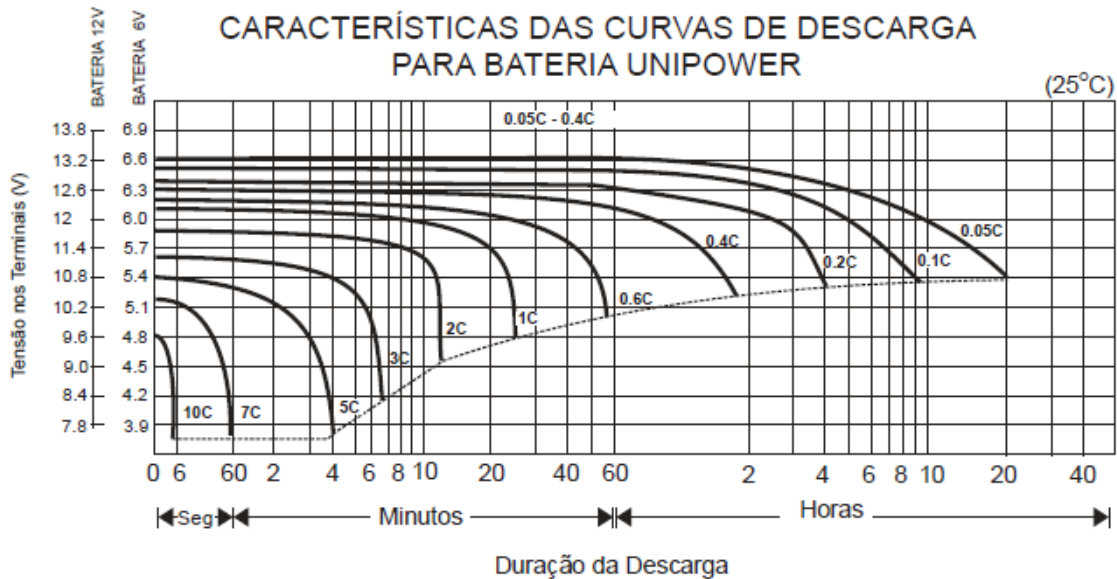
Figura 26 - Capacidade em relação à tensão de circuito aberto



Fonte: Adaptado de UNICOBA (2013).

As curvas de descarga na Figura 27 apresentam as características típicas de descarga da bateria em uma temperatura ambiente de 25°C. O C indica a capacidade nominal da bateria medida em 20 horas de descarga com tensão final de 1,75 V/elemento, o equivalente a 10,5 V. (UNICOBA, 2013)

Figura 27 - Curva de descarga da bateria UNIPOWER



Fonte: Adaptado de UNICOBA (2013).

As baterias chumbo-ácidas seladas reguladas por válvula em geral perdem a sua capacidade nominal e vida útil quando descarregadas abaixo do valor recomendado da tensão de corte. Se a bateria for descarregada até 0 V/elemento e permanecer por um período longo de tempo sem carga, a bateria sofrerá “sulfatação” e terá um aumento na sua resistência interna. Em alguns casos, a bateria poderá não mais aceitar carga. (UNICOBA, 2013). Em consideração a relação de vida Útil da bateria, a fabricante apresentou os seguintes fatores para identificar o final de sua vida útil:

- Redução da capacidade elétrica nominal;
- Curto-circuito interno;
- Corrosão e “sulfatação” das placas;
- Danos no vaso ou na tampa;
- Corrosão nos terminais;
- Redução da tensão em circuito aberto.

Este modelo de bateria deve ser carregado pelo método de carga por tensão constante (UNICOBA,2013), que representa o modo mais apropriado e comum. No referido método deve ser aplicado aos terminais da bateria, em estado de flutuação 2,25 ~ 2,45 V/elemento a 25°C com uma corrente inicial limitada de 0,1 ~ 0,25 C, em que “C” representa a capacidade nominal da bateria medida em 20 horas de descarga que neste caso é 7 Ah observados na Figura 2828, destacado pelo quadrado em vermelho.

Figura 28 - Foto da bateria UNIPOWER



Fonte: Autoria própria, 2017.

3.2 MONITORAMENTO DE CARGA

O primeiro ponto a ser considerado quando se trata de operação de baterias é sua tensão de carregamento. Durante um processo de carregamento, uma aplicação incorreta da tensão de flutuação pode prejudicar a bateria. Caso esse valor de tensão esteja abaixo do valor mínimo estabelecido (para uma bateria de 12 V esse valor é de 10,5 V), pode ocorrer uma sub-carga na bateria, causando uma sulfatação irreversível na mesma. Quanto mais avançado o grau de sulfatação menor é a capacidade de armazenamento da bateria. Porém, se for aplicada uma tensão de flutuação acima do valor correto, ocorrerá um aumento da corrente de flutuação e uma consequente corrosão prematura da grade positiva. Outro fator importante, é a carga de equalização, a bateria chumbo-ácido requer uma carga de equalização a cada seis meses. O que consiste em carregar a bateria, mesmo que esteja carregada, com uma tensão constante de 6 a 12 horas. (MARINS, 2012; NETO, 2003)

A metodologia de carga, apresenta uma simplicidade que facilita seu monitoramento, devido ao fato de que, segundo Neto (2003) os métodos de recarga das baterias de chumbo-ácido são diferenciados conforme a característica de corrente e tensão. De uma forma geral, há três métodos de carga: método a um nível de corrente e um nível de tensão, método duplo nível de tensão, método duplo nível de corrente. Neste trabalho o analisador apenas monitora o sistema em questão e não o controla. O papel de controle de carga é executado pelo carregador. Faz-se então somente a medida de tensão e corrente fornecidos pelo carregador, para identificar as fases de carregamento.

3.3 MONITORAMENTO DE DESCARGA

Para o monitoramento de descarga foi utilizado o método do Coulomb Counting (Contador de Coulombs) É um dos métodos mais convencionais utilizado na determinação do SOC.

3.3.1 Método Coulomb Counting

Equipamentos médicos portáteis e outros dispositivos portáteis profissionais usam contando estimar *SoC* medindo a corrente de entrada e saída (fluxo de coulomb). Um coulomb por segundo é um ampère (1 A), um termo que é usado tanto para carga e descarga. "Coulomb" o nome foi dado em homenagem a Charles-Augustin de Coulomb (1736 – 1806), que é mais conhecido por desenvolver a lei de Coulomb. (JONGERDEN, HAVERKORT, 2008)

O método Coulomb Counting baseia-se na medição da corrente da bateria, e sua integração em relação ao tempo para obtenção da quantidade de carga elétrica. Neste método a corrente terminal é integrada de forma a determinar a carga armazenada na bateria. Esta é em seguida comparada com a carga total, que é possível armazenar, de forma a obter o estado de carga. O exposto é ilustrado na equação 10. (LANGUANG ET AL, 2013; CHENG ET AL, 2011)

$$SOC = SOC_0 - \frac{1}{C_N} \int_{\tau_0}^{\tau} \eta \cdot I \cdot d(\tau) \quad (10)$$

Nesta, SOC_0 é o estado de carga em t_0 (estado inicial), C_N representa a capacidade da bateria em condições standard, η representa a eficiência de Coulomb (que em regra é 1 na descarga e menor que 1 em carga). A corrente I representa a corrente que assume valores negativos em carga e positivos na descarga. (LANGUANG ET AL, 2013; CHENG ET AL, 2011)

A energia contida em uma carga elétrica é medida em Coulombs e é igual à integral no tempo da corrente que forneceu a carga. A capacidade restante em uma célula pode ser calculada medindo a entrada atual (carga) ou deixando (descarregando) as células e integrando (acumulando) isso ao longo do tempo. Em outras palavras, a carga transferida para dentro ou para fora da célula é obtida acumulando o dreno de corrente ao longo do tempo. O ponto de referência de calibração é uma célula totalmente carregada, não uma célula vazia, e o SOC é obtido subtraindo o fluxo de carga líquido da carga em uma célula totalmente carregada. Este método, conhecido como contagem de Coulomb, fornece maior precisão que a maioria das outras medições de SOC, pois mede o fluxo de carga diretamente. No entanto, ainda precisa de compensação para permitir as condições de operação. (LANGUANG ET AL, 2013; CHENG ET AL, 2011)

O Coulomb Counting é de fácil implementação, no entanto, é limitado pelo desconhecimento do estado de carga inicial da bateria e não modeliza o efeito da taxa associada à intensidade de corrente nem o efeito de recuperação. A sua eficiência pode ainda ser influenciada pelos diferentes estados de operação da bateria e pela própria precisão dos sensores de corrente, cujo erro é cumulativo devido à integração. (LANGUANG ET AL, 2013; CHENG ET AL, 2011)

Este método é impraticável para estimação em tempo real porque necessita de um longo período de monitorização e muita memória. Uma desvantagem do método de contagem de Coulombs é que a capacidade da bateria é considerada constante, uma aproximação que se desvia bastante da realidade quando a corrente de descarga é elevada. Esse fenômeno foi estudado e matematicamente modelado por Wilhelm Peukert em 1897 e é regido pela equação (11), apresentada de duas formas equivalentes. K e p são constantes numéricas determinadas a partir do ajuste da equação a dados da bateria obtidos experimentalmente ou fornecidos na folha de dados. (LANGUANG ET AL, 2013; CHENG ET AL, 2011)

3.3.2 Lei de Peukert

A lei de Peukert captura a relação não linear entre o tempo de vida da bateria e a taxa de descarga, é o modelo analítico mais simples, que considera parte das propriedades não lineares da bateria dada pela equação

$$I_D^p \cdot T = K \text{ ou } C = K \cdot I_D^{1-p} \quad (11)$$

De maneira que:

C : *capacidade disponível [Ah]*

K : *capacidade de Peukert*

p : *constante ou expoente de Peukert*

I_D : *corrente de descarga*

Observa-se que essa lei, por outro lado, não considera o efeito de recuperação. Em decorrência dessa característica os resultados da aplicação da Lei de Peukert, para a predição do tempo de vida da bateria, são razoáveis para cargas constantes, mas não para cargas variáveis, o que justifica a aplicação de um conversor CC-CC. (JONGERDEN, HAVERKORT, 2008)

3.3.3 Metodologia Alternativa

A fim de mitigar a limitação mencionada do método de contagem de Coulombs e melhorar a estimativa do SOC , a representação da queda da capacidade da bateria com o aumento da corrente de descarga através da lei de Peukert também foi implementada. Considerando um estado inicial genérico da bateria SOC_0 e a capacidade disponível C calculada em (11), o SOC estimado pode ser encontrado pela equação (12).

$$SOC = SOC_0 - \frac{\int_{\tau_0}^{\tau} \eta \cdot I_D \cdot d(\tau)}{C} \quad (12)$$

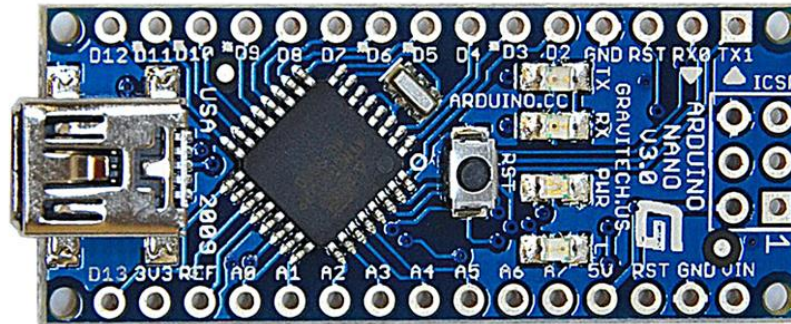
Deste modo os cálculos inerentes ao resultado esperado, correspondente ao estado de carga e uma estimativa podem ser implementados por um microcontrolador a partir de uma lógica de programação. Neste caso optou-se pela utilização da plataforma Arduino, devido a facilidade de implementação da lógica computacional e para agilizar o projeto em questão.

3.4 MICROCONTROLADOR ARDUINO NANO

O Arduino possui algumas variedades de versões, a versão utilizada na implantação desse projeto foi o Arduino NANO (Figura 29). Esta plataforma pode ser utilizada para desenvolver objetos interativos independentes, ou pode ser conectada a um computador, uma rede, ou até mesmo à internet. Esta, também pode ser complementada uma grande variedade de periféricos

como displays, botões, sensores, módulos Ethernet, ou qualquer outro dispositivo que auxilie na complementação da aplicação desejada.

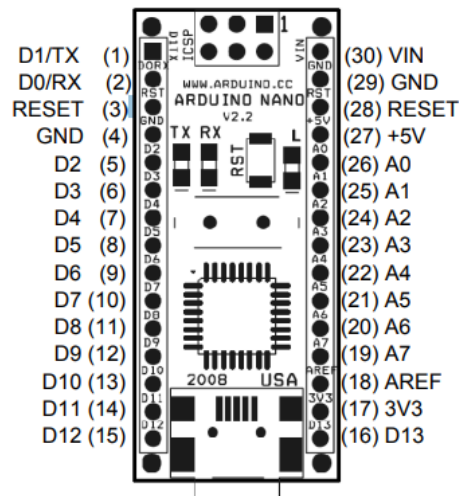
Figura 29 - Arduino NANO.



Fonte: <http://www.robotshop.com/en/arduino-nano-usb-microcontroller-v3-no-headers.html>

Esta placa apresenta os conectores correspondentes às entradas e saídas do microcontrolador, permitindo a conexão dos periféricos, além de uma porta USB com conversor usb-serial que permite conectá-lo a um computador para envio e recebimento de dados. O layout de pinos é apresentado na Figura 30.

Figura 30 - Layout de pinos Arduino Nano.

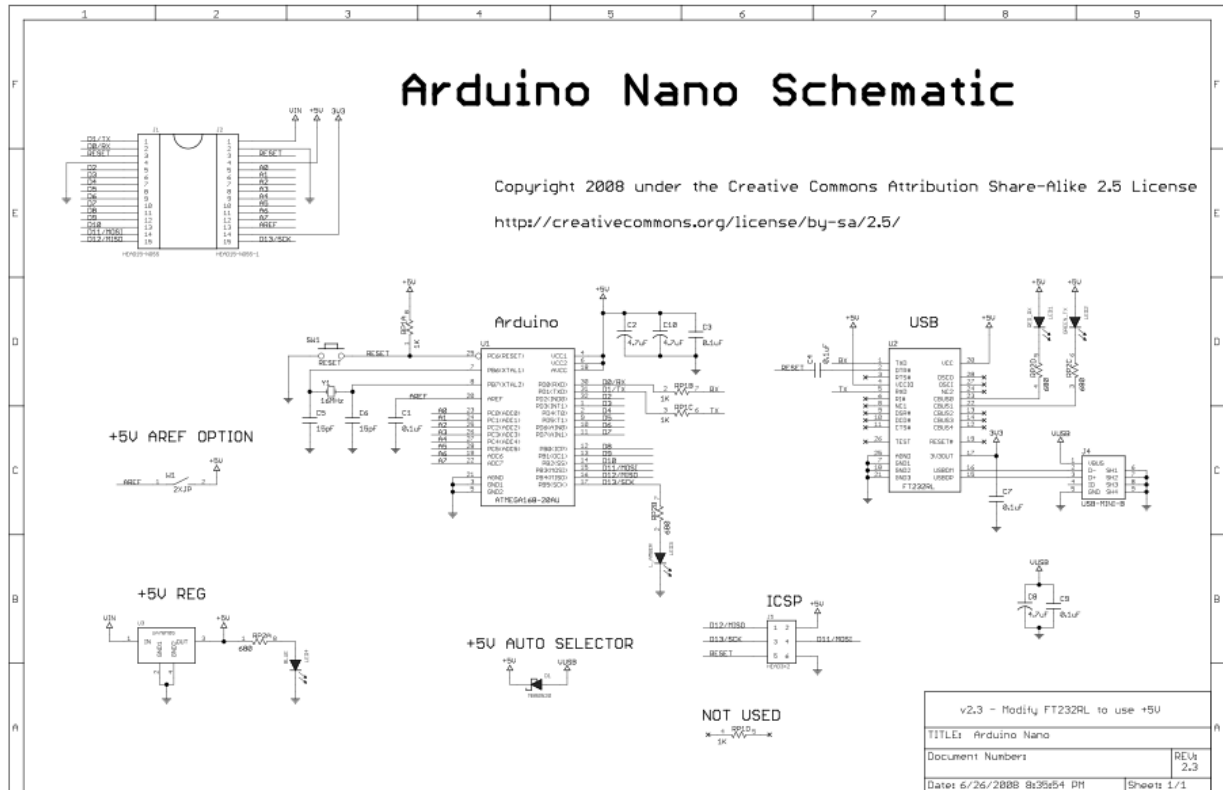


Fonte: Arduino, 2017.

A Figura 31 ilustra o esquema elétrico da plataforma Arduino Nano, bem como suas respectivas entradas e saídas. Nela podem ser apresentadas os elementos de alimentação do

equipamento, no centro está o microcontrolador e os referidos pinos E/S (entrada e saída), já, na parte direita é exibido o dispositivo responsável pela comunicação USB entre a plataforma e o computador, que cria uma porta COM virtual para estabelecer a comunicação serial de dados.

Figura 31 - Diagrama elétrico Arduino Nano.



Fonte: Arduino (2017)

Segundo a folha de dados do fabricante a plataforma Arduino NANO, apresenta as seguintes especificações técnicas apresentadas na tabela 1:

Tabela 1 - Descrição dos Pinos

Pino	Nome	Tipo	Descrição
1-2, 5-16	D0-D13	I/O	Entrada/Saída Digital
3, 28	RESET	Entrada	Reset
4, 29	GND	PWR	Terra
17	3v3	Saída	+3V3 saída
18	AREF	Saída	ADC referência
19 – 26	A7-A0	Entrada	Entradas Analógicas
27	+ 5V	Entrada ou Saída	Entrada ou saída 5V
30	VIN	PWR	Tensão Alimentação

Fonte: adaptado de Arduino (2017).

A plataforma pode ser alimentada com fonte de alimentação externa de 0 a 20V e inclusive pela porta USB do computador ou notebook, sendo selecionada automaticamente. No entanto se a alimentação for inferior a 7 V, o pino 5 V pode fornecer menos de 5 V e a placa pode apresentar instabilidade. Se a alimentação for maior do que 12 V, o regulador de tensão pode superaquecer e danificar a placa. A faixa recomendada é de 7 a 12 V. (Arduino, 2017)

Os pinos de alimentação do Arduino são respectivamente: VIN – que corresponde a entrada de alimentação da placa, quando esta for alimentada por fonte externa, 5 V – fonte de alimentação regulada usada para o microcontrolador e para outros componentes na placa e 3V3 – fonte de 3,3 V gerada pelo regulador embarcado com uma capacidade de corrente máxima de 50 mA.

O Arduino Nano possui 14 pinos digitais configuráveis como entrada ou saída, operantes à 5V como nível lógico alto e 0 V como nível lógico baixo. Possui uma entrada serial que quando configurada com valor 0 serve para receber dados e quando configurada com valor 1 serve para transmitir dados seriais TTL, o pino LED representa um LED integrado ao pino digital 13, quando está em nível lógico alto o LED está aceso. O pino AREF apresenta uma tensão de referência para as entradas analógicas e por fim o pino Reset, assim como o nome, reseta o microcontrolador ao receber um pulso de nível lógico baixo. (ARDUINO, 2017)

3.4.1 IDE do Arduino

O IDE desta plataforma é utilizada para desenvolver os códigos e realizar seus uploads. A plataforma incita o termo *sketch*, que representa o código em desenvolvimento. Este IDE é um software disponibilizado gratuitamente no portal oficial do Arduino, existem versões para *Windows*, *MAC* e *Linux*, além de inclusive ser possível ter acesso a códigos.

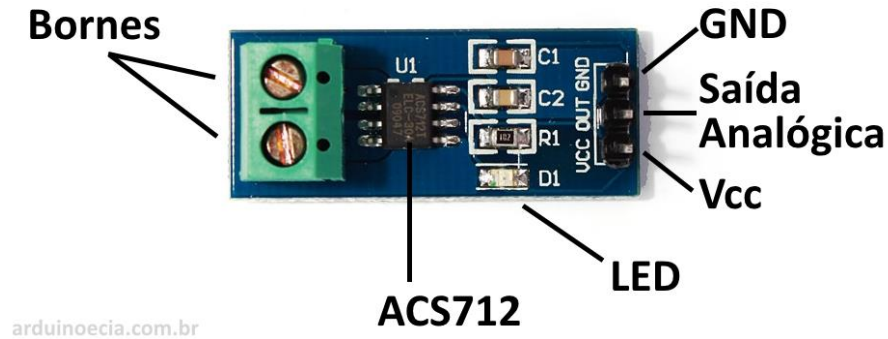
No software deve ser definido o modelo de plataforma Arduino a ser utilizado e inclusive a respectiva porta de comunicação. O fabricante disponibiliza todas as informações pertinentes para utilização de menus, instruções e inclusive instruções necessárias para desenvolvimento do código na linguagem utilizada pelo IDE do Arduino. (ARDUINO, 2017)

3.5 SENSOR DE CORRENTE ALLEGRO ACS712

O Sensor de Corrente Bidirecional (lê correntes negativas ou positivas) ACS712 do Fabricante Allegro Micro Systems, funciona com princípio do efeito Hall, além de ser

disponibilizado em uma estrutura que facilita a implementação do sensor em um dispositivo microcontrolador (Figura 32).

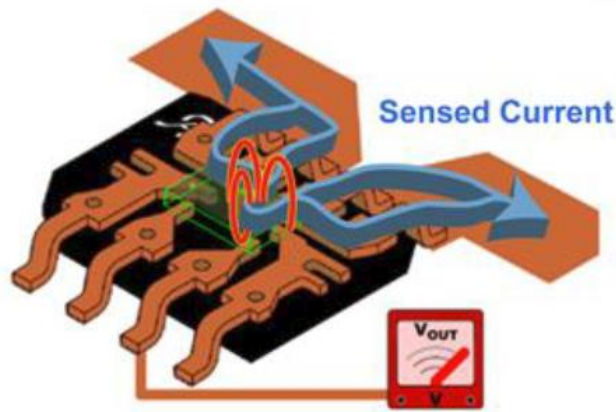
Figura 32 - Sensor de corrente ACS712



Fonte: Site Arduino e Cia

O dispositivo detecta o campo magnético processado pelas correntes alternadas ou contínuas proveniente nos seus pinos de entrada, gerando uma tensão de saída proporcional de 66 mV/A (no modelo 30 A), apresenta um circuito entre entrada e saída completamente isolado por opto isoladores, proporcionando leituras máximas de correntes em -30 A a +30 A (ALLEGRO, 2013), conforme é apresentado na Figura 3333.

Figura 33 – Circuito sensor de corrente ACS712

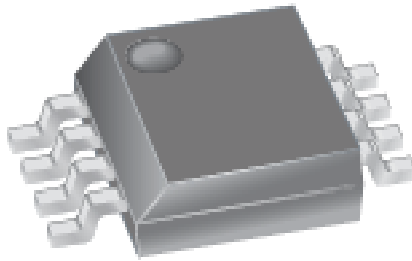


Fonte: Adaptado de CONCEIÇÃO (2012).

Segundo a folha de dados do fabricante (ALLEGRO, 2013), pode ser observada a principal aplicação para este Circuito Integrado com encapsulação SMD (Dispositivos de Montagem Superficial), apresentado na Figura 3334, que consiste basicamente em emitir um sinal analógico

pelo pino VOUT, que varia linearmente sua tensão (66 mV/A para o modelo 30A) com a corrente alternada ou bidirecional AC ou DC, dentro da especificação de cada componente, ou seja, dentro da faixa de atuação dos três modelos existentes para este tipo de CI (Circuito Integrado).

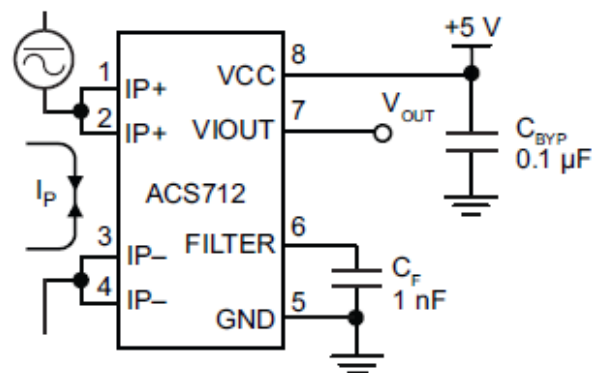
Figura 34 - Representação ilustrativa do CI ACS712_XXA



Fonte: Adaptado de ALLEGRO, 2013.

O diagrama apresentado na figura 35 faz uma representação fidedigna do esquema de ligação da placa onde está inserido o componente em questão, pronto para ser ligado em seus terminais o sinal em que será realizado sensoriamento, inclusos na mesma estão também os terminais de aterramento (GND) e fonte de alimentação (VCC – 4,5 V a 5,5 V) para o dispositivo e além disso o terminal de saída (VOUT) liga a uma porta conversora A/D (A/D – Analógico - Digital). Segundo Allegro (2013), o circuito é invasivo, ou seja, é necessária realizar uma interrupção na programação do microcontrolador para realizar a mensuração a partir da leitura da porta analógica A1.

Figura 35 - Diagrama de ligação da principal aplicação

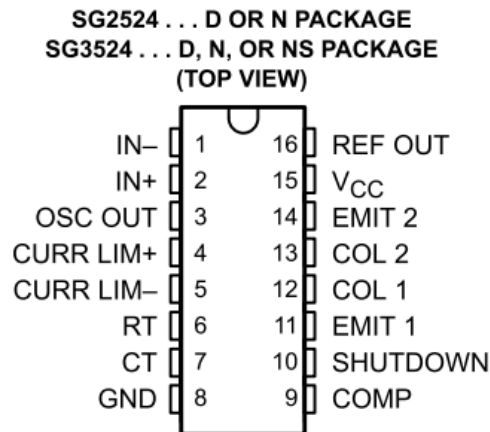


Fonte: Adaptado de ALLEGRO, 2013.

3.6 ESTUDO DO CI SG 3524/ SG 2524

Os CI's SG2524 e SG3524 (figura 36) são utilizados como geradores de sinal PWM e podem ser utilizados na implementação de fonte de tensão reguladas e inclusive conversores CC-CC e inversores de tensão comutados. Todas as funções necessárias estão incorporadas em um único chip. (TEXAS, 2017)

Figura 36 - Layout de Pinos do CI SG3524



Fonte: adaptado de SG3524(2017).

Outro fator relevante é que a folha de dados do fabricante e entre outras referências, utilizam este CI como elemento de controle em conversores comutados de ambas as polaridades, conversores cc/cc com transformador de acoplamento (isolados), e conversor de polaridade empregando frequência fixa e a técnica de modulação por largura de pulso (PWM). (TEXAS, 2017)

As saídas complementares permitem a aplicação em saída única e push-pull. Cada dispositivo inclui no chip um regulador, um amplificador de erro, um oscilador programável (através de RT e CT), um flip-flop (tipo de multivibrador biestável) de direcionamento de pulso, dois transistores de saída independentes e com coletores e emissores desengajados, um comparador de alto ganho e circuito de limitação de corrente e de interrupção de emergência (shutdown). (TEXAS, 2017)

3.6.1 Princípio de Operação

O SG 3524 é um circuito de controle regulador de tensão do tipo PWM de frequência fixa. O regulador opera a uma frequência fixa que pode ser programada por um resistor R_T e um capacitor C_T . R_T estabelece uma corrente de carga constante para C_T que resulta em uma rampa de tensão linear em C_T , que é aplicada ao comparador. O comparador provê um controle linear da largura de pulso de saída. (TEXAS, 2017)

O CI contém um regulador de 5V interno, que serve como referência bem como fonte para os circuitos de controle interno do regulador. A tensão de referência interna é dividida externamente por um circuito divisor de tensão a fim de promover uma tensão de referência para o amplificador de erro dentro de sua faixa de modo comum. A tensão a ser regulada é detectada por outro circuito divisor de tensão. O sinal de erro é amplificado e comparado com a rampa linear de C_T através do comparador de alto ganho. O pulso resultante é então direcionado para o transistor de saída apropriado (Q1 ou Q2) pelo flip-flop de direcionamento de pulso, que muda de estado a cada pulso de saída do oscilador. (TEXAS, 2017)

O pulso de saída do oscilador também serve como um pulso de tempo morto que assegura que ambas as saídas nunca conduzam simultaneamente durante os intervalos de tempo das transições. A duração de cada pulso de tempo morto é controlada pelo valor de C_T . (SG3524, 2017)

As saídas podem ser aplicadas em uma configuração push-pull, na qual sua frequência é a metade da frequência do oscilador de base. Se as saídas forem conectadas em paralelo, a frequência será igual à do oscilador. A saída do amplificador de erro compartilha uma entrada comum para o comparador com os circuitos de limitação de corrente e de interrupção de emergência. Este ponto comum é acessível externamente através do pino COMP (Compensador de Polo/controlador, pino nove), que pode ser usado para controlar o ganho do amplificador de erro, ou compensá-lo. Adicionalmente, o pino COMP pode ser usado para prover um controle adicional para o regulador (por exemplo, para uma partida suave). (TEXAS, 2017)

A frequência de oscilação é dada pela equação (13),

$$R_t = \frac{1.30}{f_s \times C_T} \quad (13)$$

Com R_T em Kiloohms($k\Omega$), C_T em microfarads (μF) e f_s em quilohertz (kHz).

O tempo morto de saída, que é função de CT, varia de $0,5 \mu s$ ($CT = 0,001 \mu F$) a $4 \mu s$ ($CT = 0,1 \mu F$). Assim, escolhe-se primeiro o CT conforme o tempo morto desejado e depois RT, levando em conta o valor determinado de CT. (TEXAS, 2017)

Os valores de RT e CT são obtidos através do cálculo com base nas informações cedidas pela folha de dados da indústria fabricante do CI SG3524/2524 e pela equação de frequência igual a 1,30 sobre $R_T \times CT$, estipulando um valor qualquer para CT, assim é estimado o valor do resistor, sabendo que ele tem que ficar na faixa entre 1k8 e 100k, escolhemos um capacitor entre a faixa de 0,001 e 0,1 μF (no caso escolhemos 1nF ou 0,001 μF). Então, substituindo os valores na equação, para uma frequência de 50kHz: (TEXAS, 2017)

$$RT = \frac{1.30}{50.10^3 \times 10.10^{-9}} = 2,6 k\Omega$$

A chave SW ao estar fechada, acaba curto-circuitando os pinos 11 e 14, fazendo o PWM ter a frequência de 50 kHz como já explicado. O capacitor C₁ e o resistor R₃ oferecem um ganho proporcional na saída do comparador do sinal de erro. O resistor R₁ está destinado a limitar a corrente oriunda da fonte interna do CI, tensão essa que alimenta a entrada não inversora do comparador do sinal de erro. O resistor R₂ está destinado a limitar a corrente oriunda do circuito divisor de tensão, responsável por colher a amostra do nível de tensão da saída do conversor. Os resistores R₅, R₆ e R₇ são destinados para não deixar que o sinal flutue quando não há tensão nas saídas dos pinos 11 e 14, já para o pino 10, ele garante 0 V quando não há sinal de shutdown. (TEXAS, 2017)

4 SIMULAÇÃO E RESULTADOS

Este capítulo apresenta os cálculos e resultados do protótipo em questão bem como suas respectivas simulações utilizando softwares como PSIM que apresenta melhores recursos de visualização e plotagem de gráficos para simular as características do projeto do conversor Buck-boost, em seguida uma segunda simulação foi realizada no software PROTEUS – ISIS referente a metodologia descrita pois o mesmo possibilita a interação muitos dos componentes selecionados e o próprio IDE da Arduino para a realização da lógica de programação desenvolvida para a realização da mensuração de estimava de carga da bateria em questão.

4.1 PARÂMETROS INICIAIS

Para realização do projeto foram identificados alguns parâmetros necessários para o dimensionamento do circuito conversor e dos outros dispositivos eletrônicos que irão auxiliar o microcontrolador de forma secundária.

Inclusive foram levadas em considerações as características abaixo, todas retiradas da folha de dados da fabricante das baterias UP1270 12V 7Ah.

- O sistema proposto foi projetado levando-se em consideração que o acumulador permanece em temperatura ambiente em uma faixa de 20°C a 25°C, definida como temperatura ideal para maximizar a vida útil;
- A bateria em questão possui 6 células com tensão equivalente a 2 V cada;
- Tensão final de 1,75 V/elemento, o equivalente a 10,5 V.
- Capacidade remanescente de 100% em uma tensão de circuito aberto de 13 V.
- Para carga com tensão constante, a tensão de flutuação deve se manter na faixa entre 13,5 a 13,8 V, com corrente inicial máxima de 1,4 A.
- Sua condição de operação foi caracterizada como “Tensão de Flutuação”, ou seja, na maior parte de seu emprego a bateria ficará submetida ao nível de tensão de flutuação já mencionado;
- Na Tabela 01, observam-se os valores inerentes à curva de descarga para este modelo de bateria, retirados da figura 27:

Tabela 2 - Valores inerentes à curva de descarga

Capacidade – C (Ah)	Corrente de Descarga (A)	Tensão Fornecida (V)	Tensão de corte por elemento(V)	Tensão final de corte (V_{cutoff})	Tempo de Descarga(h)
$0,05 \times C$	0,35	13,2	1,75	10,5	20h
$0,1 \times C$	0,7	12,9	1,75	10,5	9h
$0,2 \times C$	1,4	12,7	1,75	10,5	4h
$0,4 \times C$	2,8	12,6	1,75	10,5	1,8h \approx 2
$0,6 \times C$	4,2	12,4	1,75	10,5	57s \approx 1h

Fonte: Adaptado de UNICOBÁ, 2013.

4.2 PROJETO DO CONVERSOR BUCK-BOOST

Neste item são descritos os cálculos realizados para o dimensionamento do circuito do conversor Buck-boost. O devido terá a finalidade de manter uma tensão constante na carga, pois, conforme já descrito, a corrente de descarga de uma bateria (obviamente em condição de descarga), tem comportamento não linear, pois existe a variação de tensão e consequentemente seus adendos (corrente e potência) ocasionados pelos processos químicos ocorridos internamente da bateria para fornecer tensão para a carga que, idealmente será tratada como resistiva afim de facilitar os cálculos, estimativas e comparativos do projeto.

4.2.1 Parâmetros de Projeto

O primeiro procedimento para projetar um conversor é o levantamento das tensões correntes de entrada e saída do conversor. Neste caso como a intenção é manter uma tensão constante na saída do conversor, tendo em vista que deste modo a corrente será mantida linearmente, caso não haja variação de impedância de carga. Então estes parâmetros são organizados uma melhor forma na tabela 3

Tabela 3 - Parâmetros de Projeto Conversor CC-CC

Parâmetros	Simbologia	Valor
Frequência de Comutação	f (kHz)	50k
Tensão Mínima de Entrada	$V_{i,min}$ (V)	10,5
Tensão Máxima de Entrada	$V_{i,máx}$ (V)	15
Corrente Máxima de Entrada	I_{in} (A)	10
Potência Máxima de Entrada	P_{in} (W)	100
Tensão de Saída	V_{out} (V)	12
Corrente Mínima de Saída	$I_{o,min}$ (A)	0,20
Corrente Máxima de Saída	$I_{o,máx}$ (A)	5

Potência Máxima de Saída	$P_{o,máx}(W)$	100
Rendimento Teórico	$\eta(\%)$	95
Ondulação percentual de Corrente	$\Delta I_L(\%)$	15%
Ondulação Percentual de Tensão	$\Delta V_o(\%)$	1%

Fonte: autoria própria.

4.2.2 Cálculos

Em seguida são apresentados os cálculos pertinentes para a implementação do conversor:

- Razão Cíclica Nominal (D):

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{D}{1-D} \rightarrow \frac{12}{13,8} = \frac{D}{1-D} \rightarrow D = 0,465117.$$

$$D' = 1 - D = 1 - 0,465117 = 0,534883.$$

O Indutor deve ser calculado de forma que se garanta uma $\Delta I_L = 15\%$, então

$$L = \frac{V_i \times D}{f \times \Delta I_L} = \frac{13,8 \times 0,465117}{50kHz \times 0,15} = 52,1837 \mu H.$$

Para obter o valor do capacitor, levando-se em consideração $\Delta V_o = 1\%$, tem-se:

$$C = \frac{P_o \times D}{V_o^2 \times (\Delta V_o) \times f} = \frac{100 \times 0,465117}{12^2 \times (0,01) \times 50k} = 646 \mu F.$$

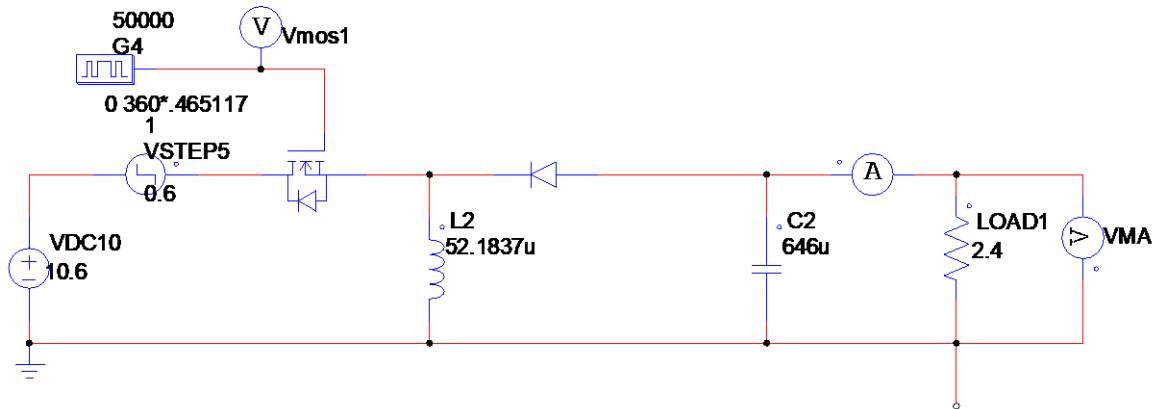
4.2.3 Simulação

Para a simulação do conversor optou-se por utilizar o software PSIM, pois o mesmo possui recursos de análise de gráficos e sinais e inclusive pode também ser utilizado o SmrtCtrl que realiza a projeção de conversores apenas com a interatividade de sua interface. Os valores obtidos acima foram utilizados para realizar a análise do conversor CC-CC BuckBoost. Primeiramente optou-se por analisar o comportamento do conversor em malha aberta (sem controle) com o objetivo de visualizar seu comportamento para a necessidade do projeto.

O circuito da figura 37, ilustra o arranjo elétrico do Buck-boost. A fonte de alimentação foi ajustada para fornecer 10.6V simulando a situação em que a bateria estaria no seu limiar de operação (próximo de V_{corte} .) e também o comportamento do conversor em seu modo boost

(elevador de tensão). Um degrau foi conectado em série com o circuito para simular uma variação de tensão, e analisar se o comportamento do conversor é satisfatório.

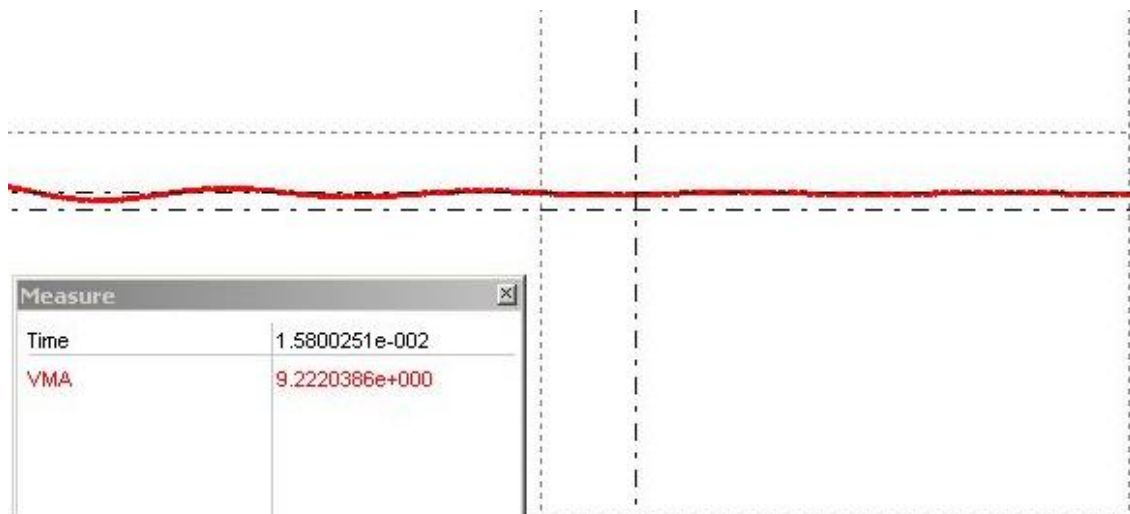
Figura 37 - Circuito Buck-boost Malha Aberta



Fonte: autoria própria.

Na figura 38 pode ser analisada a tensão entregue na carga simulada com um resistor de 2.4Ω . Pela teoria estudada, idealmente a tensão de saída deve ser mantida constante em 12 V, para uma variação da tensão de entrada entre 10,5 V e 15 V. Porém o que ocorre é que após o tempo de acomodação do sinal o valor de tensão observado é equivalente a 9,22 V.

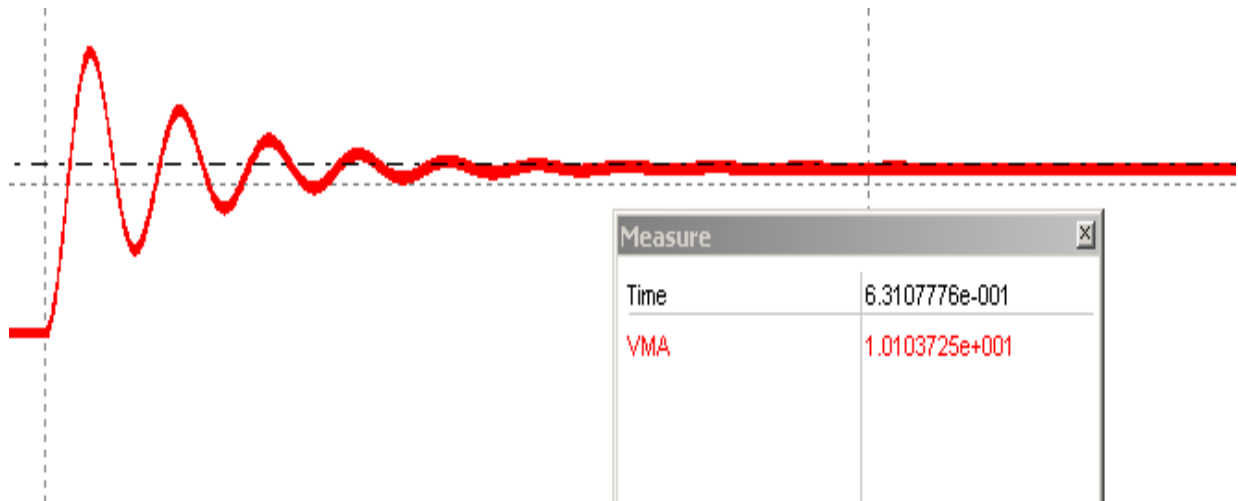
Figura 38 - Tensão de Malha aberta.



Fonte: autoria própria.

Após o degrau no valor de 1 V foi encontrado o valor de 10.1 V (visto na figura 39), comprovando mais uma vez que o conversor não opera de maneira satisfatória para o projeto em questão.

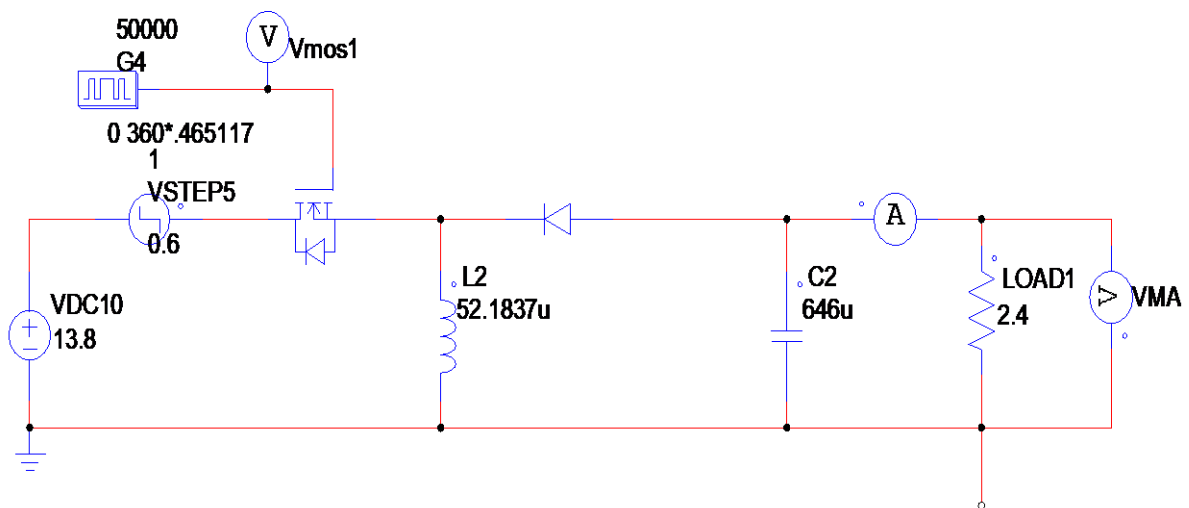
Figura 39 - Tensão de saída ao degrau de 1 V



Fonte: autoria própria.

Com o objetivo de verificar a análise do comportamento do conversor no seu modo buck (abaixador), a fonte de tensão foi ajustada no PSIM para a tensão de 13,8 V verificada na figura 40.

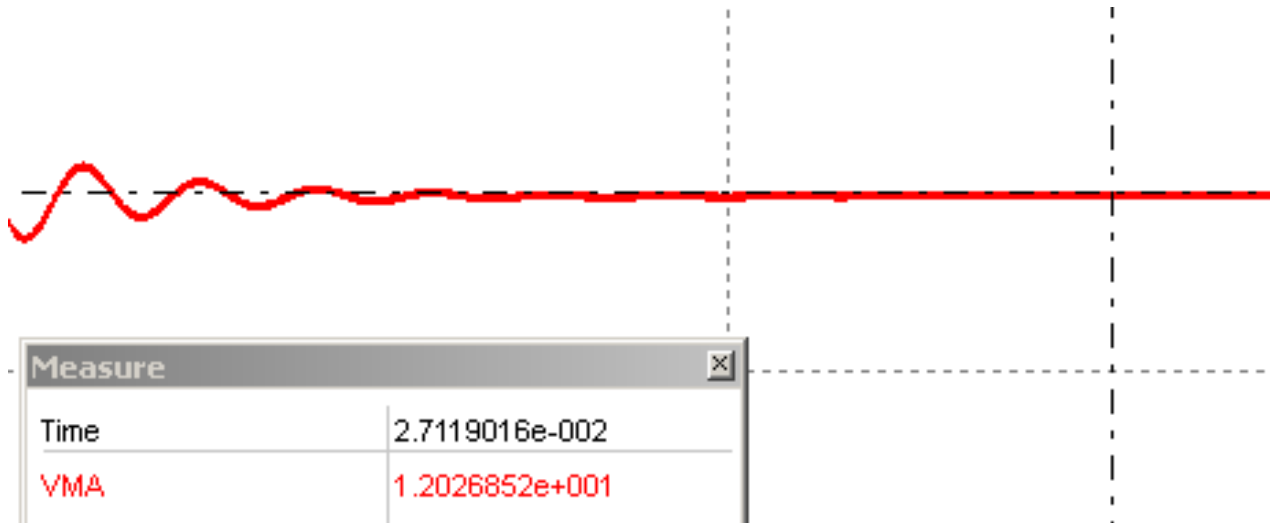
Figura 40 - Circuito MA Modo Buck.



Fonte: Autoria própria, 2017.

E o seu respectivo sinal de saída V_O é apresentado na Figura 41, ao qual demonstra que o conversor ajusta a tensão entregue para a carga no valor desejado de 12 V.

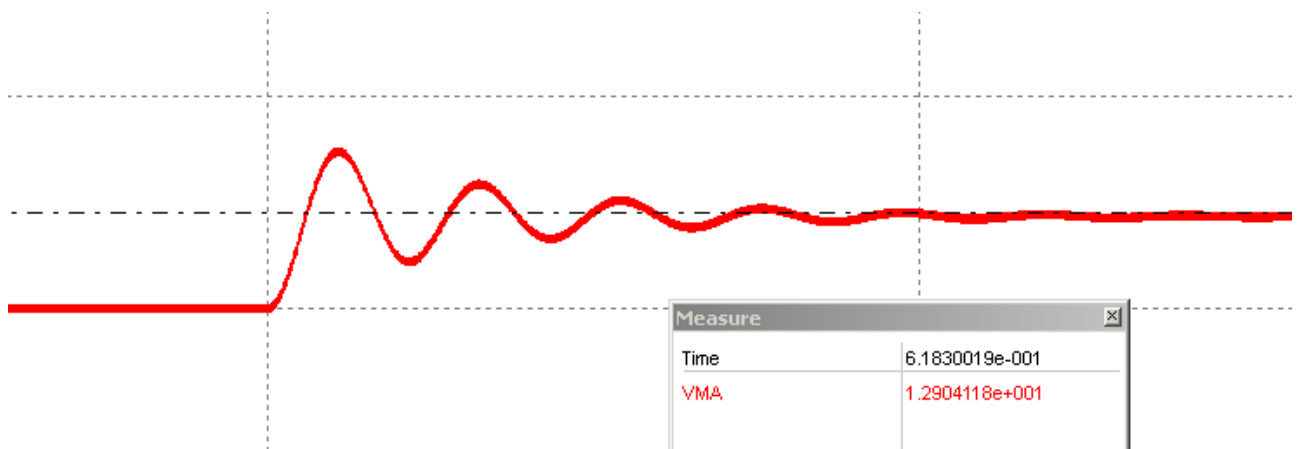
Figura 41 – Tensão de saída V_O (Modo Buck)



Fonte: Autoria própria, 2017.

Porém na análise do sinal após a inserção do degrau já mencionado, a tensão sobe para 12,9v, visto na figura 42, e mais uma vez comprada a falta de eficiência do conversor.

Figura 42 - Sinal de saída ao degrau



Fonte: autoria própria.

Os sinais vistos comprovam que sem a realização de um sistema de sensoriamento não é garantida a estabilidade do conversor em congruência sua confiabilidade. Desta forma a literatura técnica especializada indica que o procedimento seguinte é então implementar um controle (realimentação), deste modo o circuito caracteriza um circuito com malha fechada. Neste caso o

circuito precisa ser analisado matematicamente de forma que seus componentes sejam modelados matematicamente de maneira individual, assim permitindo sua análise matemática

4.2.4 Implementação do controle do conversor CC-CC Buck-boost.

Para implementar o controle do conversor foi necessário obter a função de transferência do conversor dimensionado para o projeto. Os procedimentos e cálculos são mostrados nos itens seguintes.

4.2.4.1 Modelagem Matemática por Média de Valores

Para o projeto do sistema de controle se tornou necessária a modelagem do conversor para obtenção do seu comportamento dinâmico. Para tal, utilizou-se o modelo médio em Espaço de Estados do conversor Buck-boost (equação 14), o qual despreza os harmônicos de comutação e as não linearidades presentes no modelo (ERICKSON e MAKSIMOVIC, 1997).

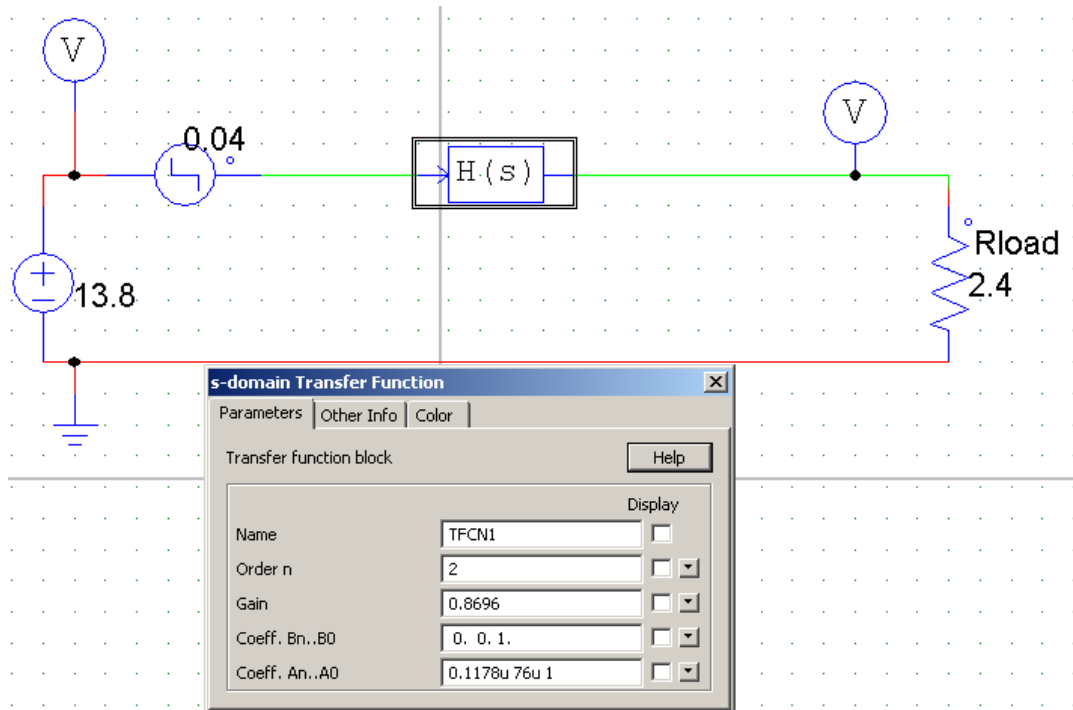
$$G_{vovin} = \frac{\hat{v}_{out}}{\hat{v}_{in}} \Big|_{\{\hat{d}(s) = 0\}} = \left[\left(\frac{D}{D'} \right) \cdot \left(\frac{1}{1 + \left(\frac{L}{D'^2 \cdot R} \right) \cdot s + \left(\frac{L \cdot C}{D'^2} \right) \cdot s^2} \right) \cdot \hat{v}_{in}(s) \right] \quad (14)$$

Substituindo os valores em na equação G_{vovin} temos que a função de transferência para a planta de ganho na relação da tensão de entrada pela saída do conversor à ser controlado equivale a equação:

$$G_{vovin} = \frac{0,8696}{1,178 \cdot 10^{-7} s^2 + 7,6 \cdot 10^{-5} s + 1} \quad (15)$$

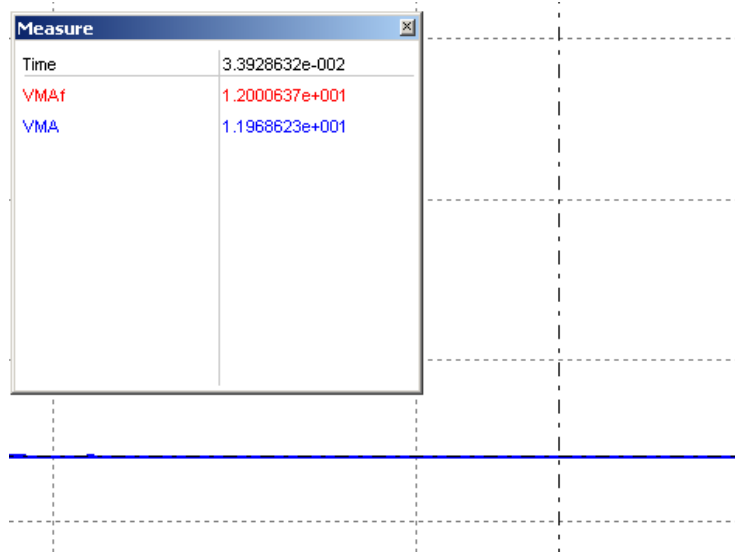
A sua comprovação pode ser apresentada na figura 44, referente a simulação do conversor utilizando a função de transferência acima mencionada.

Figura 43 - Circuito Função transferência



Fonte: autoria própria.

Em seguida a Figura 44 apresenta a comprovação da semelhança de comportamento das duas curvas plotadas, em que a curva vermelha representa o sinal de tensão do circuito do conversor e o sinal em azul representa o sinal de tensão da função de transferência simulada no PSIM.

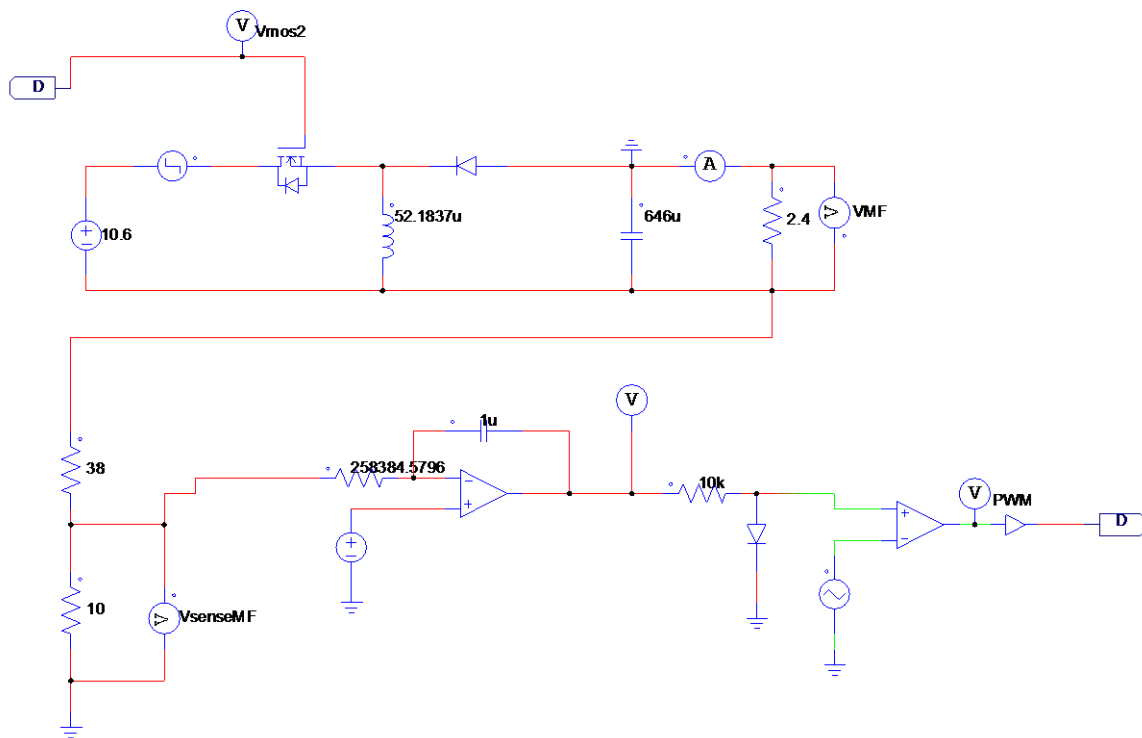
Figura 44 - V_O do circuito em malha aberta e sua V_O da Função de Transferência.

Fonte: autoria própria.

O software Matlab também foi utilizado para comprovar a legitimidade da função de transferência e no auxílio dos cálculos e inclusive auxiliar na implementação de um controlador PI (Proporcional Integral) facilmente implementado em conjunto com o SG 3524, já descrito. Os parâmetros do controlador PI foram obtidos através da ferramenta *SisoTool* do MATLAB®.

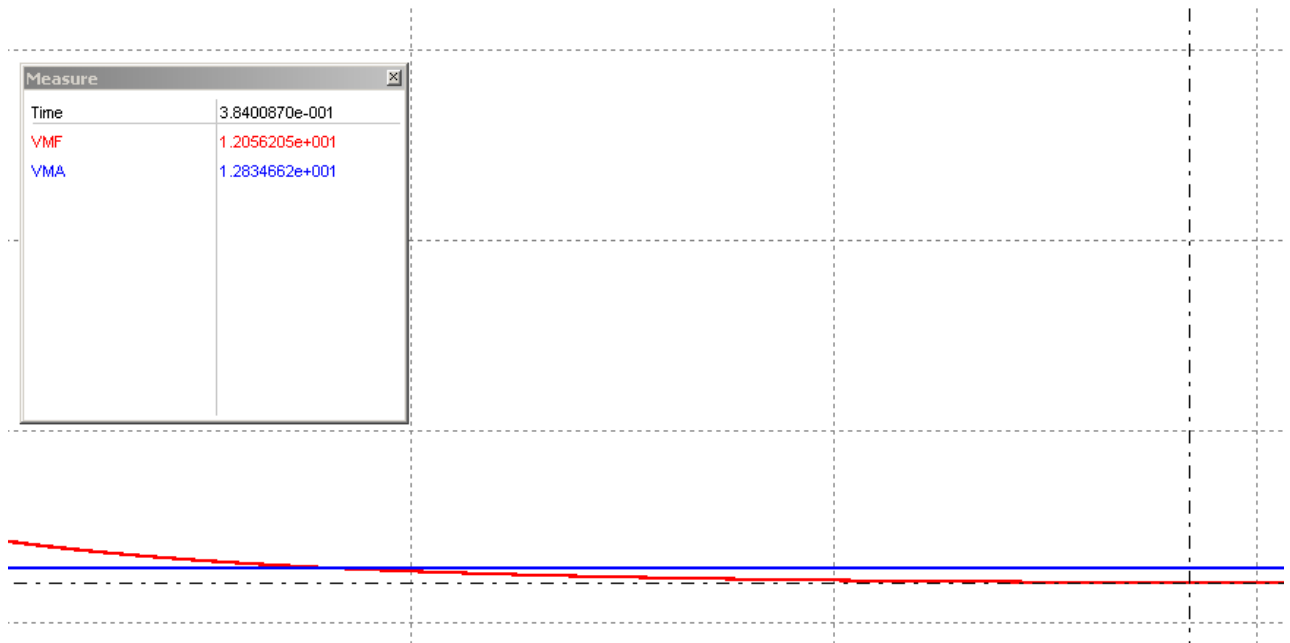
Deste modo o circuito a seguir (Figura 45) representa a simulação do controle implementado no PSIM para o conversor Buck-boost.

Figura 45 - Circuito Buck-boost com controle PI.



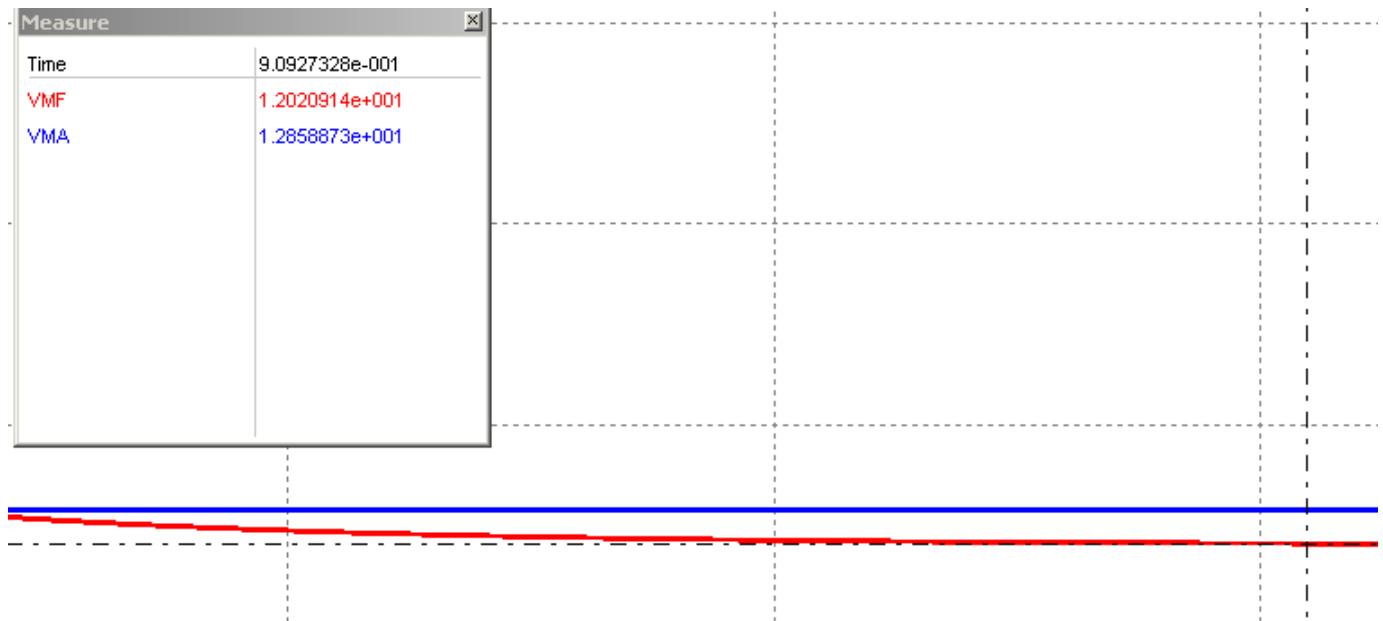
Fonte: autoria própria.

Para comprovar a funcionalidade do conversor e o correto funcionamento do controle implementado, foram plotadas as curvas mostradas na figura 46, em que o sinal em vermelho representa o sinal depois da inserção do controle, e o sinal em azul o sinal do circuito antes do controle para fins de comparação. No quadro em destaque são apresentados valores de tensão dos dois circuitos, sendo em vermelho $VMF = \text{tensão de malha fechada} = 12,056 \text{ V}$ e em azul $VMA = \text{tensão de malha aberta} = 12,634 \text{ V}$.

Figura 46 - V_o malha fechada x V_o malha aberta

Fonte: Autoria própria, 2017.

Em seguida na figura 47 foi plotado o sinal de tensão de saída conversor, para o comportamento ao Degrau aplicado à entrada, o mesmo inserido no circuito em malha aberta para a finalidade de testar do controle de nível de tensão do conversor.

Figura 47 - V_o malha aberta x V_o Malha fechada (DEGRAU)

Fonte: Autoria própria.

No quadro de medição do PSIM: VMA (Azul) = 12,85V e VMF (vermelho) = 12,02V

Deste modo fica comprovado o funcionamento do conversor projetado. A próxima etapa será a simulação do protótipo utilizando o software Proteus ISIS, de maneira que o mesmo apresenta a possibilidade de simular o comportamento do programa desenvolvido para a estimativa de estado de carga da bateria, com os dispositivos descritos na metodologia.

4.3 SIMULAÇÃO DO MONITORAMENTO DE DESCARGA

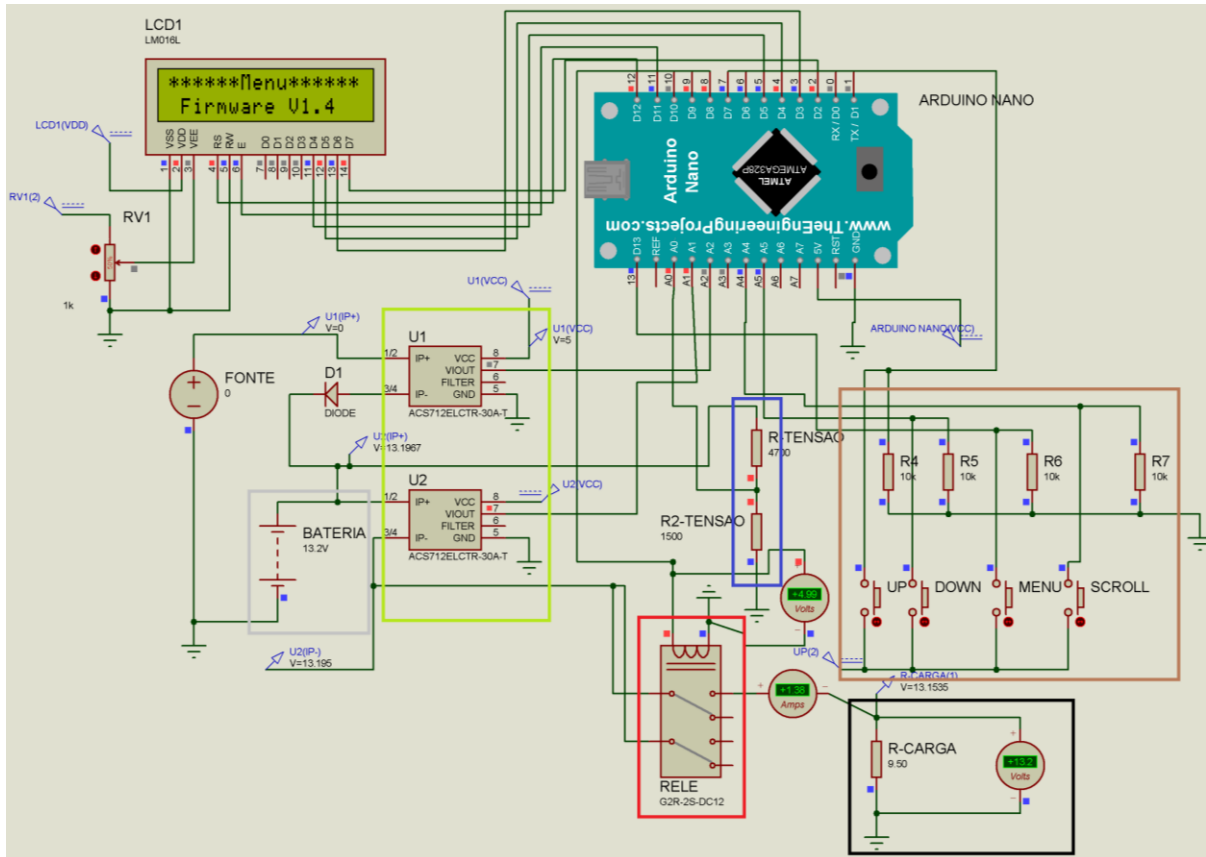
Levou-se em consideração algumas características iniciais para a realização da lógica de programação do microcontrolador. Tendo em vista que o papel do Arduino será prover a comunicação entre os sensores do protótipo, identificar os pontos críticos do sistema e realizar uma interação com o usuário através de um display LCD 16x2 e alguns botões para a navegação e configuração que também deve ser realizada pelo usuário.

Não foi possível integrar a simulação do conversor CC-CC projetado, pois a biblioteca do CI SG3524, responsável pelo sinal de comutação do conversor, não foi encontrada para ser simulada no software em questão. Porém este fato não é agravante pois a interação do Arduino com o SG3524 (que realiza o chaveamento e controle analógico foram comprovados no capítulo anterior) se dá pelo acionamento do PINO 10 que encerra a comutação do conversor fazendo com que este pare de fornecer uma tensão de saída para a carga aplicada. Deste modo foi implementado um relé que praticamente fará o mesmo papel do SG, para fins de simulação de corrente na carga.

A figura 48 representa o circuito proposto simulado no software em questão, com a implementação do firmware gravado no Arduino NANO utilizado no protótipo. Em destaque, na mesma figura, pode ser observado o retângulo vermelho que representa o relé adaptado para simular o comportamento do SG. No retângulo verde estão os dois sensores (ACS712) que realizam a leitura de corrente, O retângulo azul apresenta o circuito divisor de tensão implementado como sensor de tensão entregue para a bateria. No retângulo preto está indicada a resistência que simula o comportamento da carga. No retângulo marrom se destacam os botões para a interação do usuário com o programa desenvolvido e sua funcionalidade acompanhada pelo display LCD. Em cinza está o componente que representa a bateria em questão (deve ser destacado que o programa permite a configuração de uma resistência interna para a bateria) e seu comportamento de queda de tensão em função da sua descarga (característica comum entre as baterias). O Proteus permite a

interatividade do seu usuário com o circuito simulado, o que contribui para a comprovação do funcionamento da programação desenvolvida no IDE do Arduino.

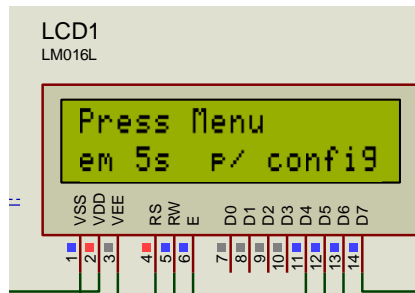
Figura 48 - Circuito Simulação Funcional.



Fonte: autoria própria.

O programa desenvolvido funciona de maneira em que o usuário deva configurar alguns parâmetros iniciais para garantir a estimativa fidedigna de tempo restante de carga, estes são gravados na memória EEPROM do microcontrolador, para evitar que seja necessário configurar o protótipo todas as vezes após inicializado. Inicialmente o programa solicita que o usuário pressione o botão menu em 5 segundos para realizar as configurações iniciais, caso contrário será carregada uma configuração padrão gravada na EPROM, como pode ser observado na figura 49.

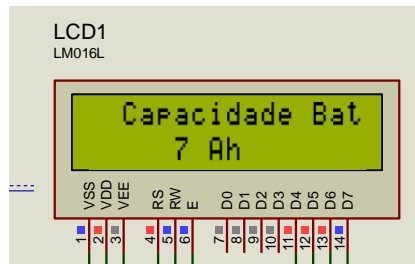
Figura 49 - Inicialização programa.



Fonte: autoria própria.

Ao pressionar o botão menu a próxima tela de configuração aparece e indaga ao usuário a seleção da capacidade da bateria à ser monitorada, neste caso, a bateria a ser monitorada apresenta a capacidade de 7Ah mostrado na figura 50, que pode ser setada pelos botões UP (cima) e DOWN (baixo) e confirmada no botão SCROLL, que seguirá para a próxima janela de configuração.

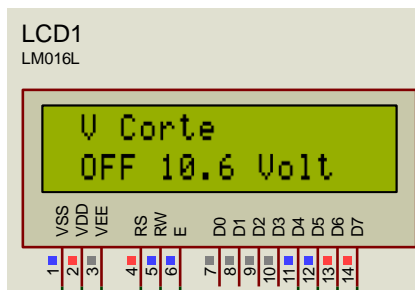
Figura 50 - Tela de ajuste de capacidade da bateria.



Fonte: autoria própria.

O próximo passo é configurar o limiar de operação para o controle do conversor CC-CC através do SG3524, assim sendo para a bateria em questão o limite da tensão de corte é representado pela tensão de 10,5 V (equivalente a 1,75V por elemento), porém ajustada para 10,6 V afim de manter uma margem de segurança como visto na figura 51.

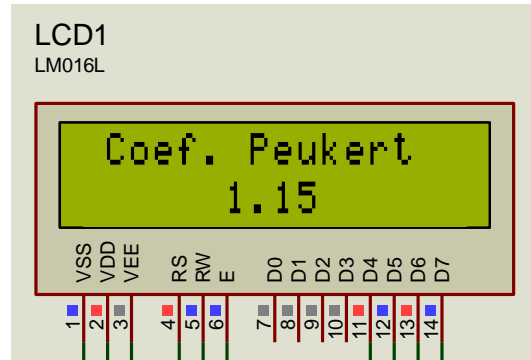
Figura 51 - Tensão de corte.



Fonte: autoria própria.

Por último, a figura 52 apresenta a janela de configura do coeficiente de Peukert, mencionado na metodologia. Pela equação (11) tem-se que o coeficiente de Peukert calculado para a bateria em questão e já setado.

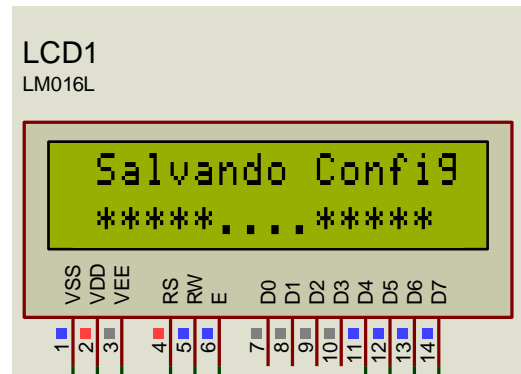
Figura 52 - Coeficiente de Peukert.



Fonte: autoria própria.

Após estas configurações iniciais se dá por encerrada a rotina inicial de programação e o firmware salva as configurações (figura 53) na EPROM como padrão a ser seguido ao inicializar o programa novamente.

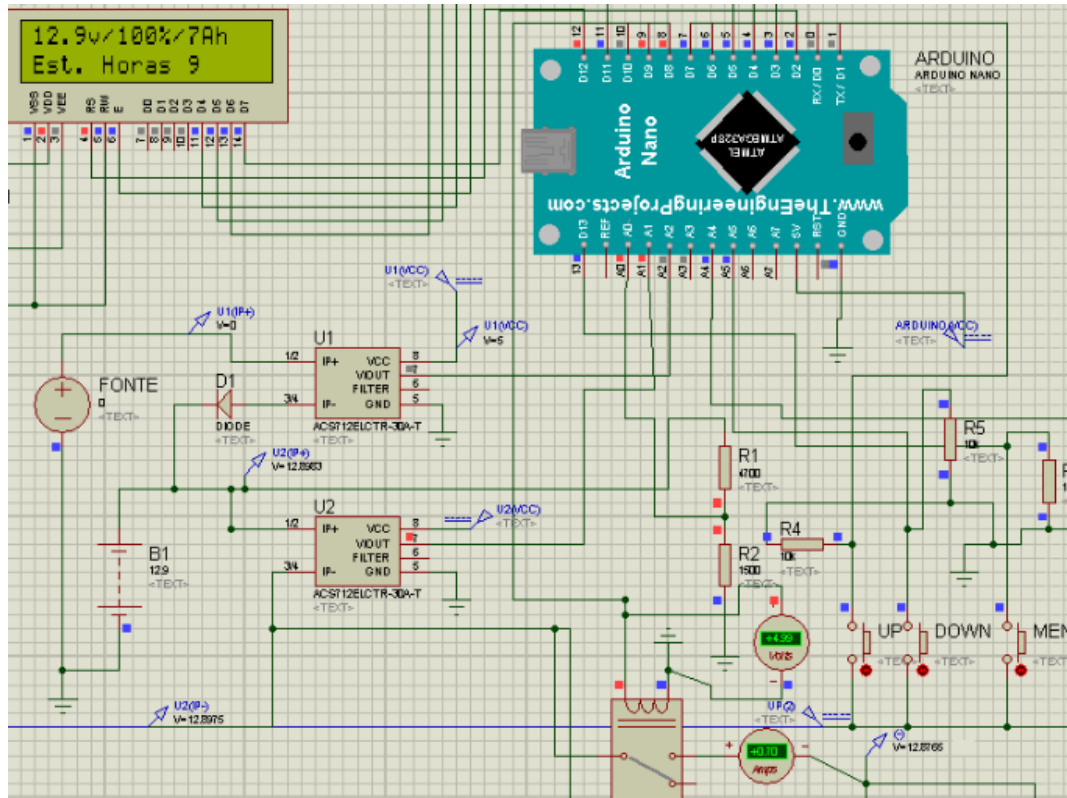
Figura 53 - Configurações salvas.



Fonte: autoria própria.

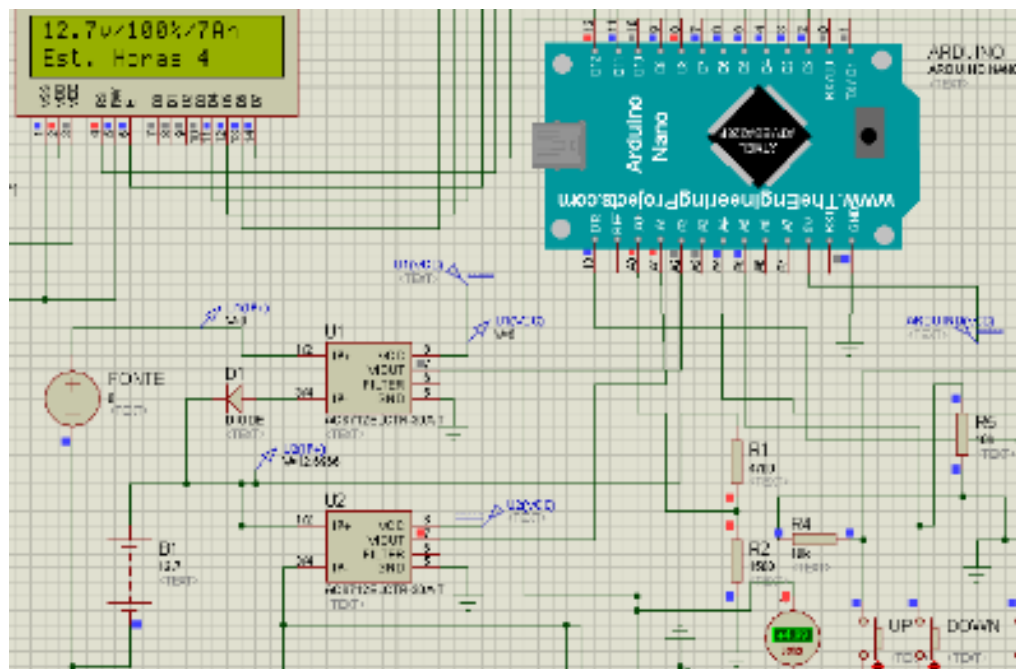
Após as configurações iniciais uma resistência de carga foi na simulação, de modo que seja fornecida uma corrente de 0,72A e depois 1,44A para a carga, valor escolhido pois conforme a Tabela (2), retirada da folha de dados da bateria, apresenta uma estimativa de tempo restante de carga equivalente a 9 horas e 4 horas respectivamente nas tensões de 12,9 e 12,7V. O valor para a estimativa do protótipo obtido com a simulação foi correspondente ao da tabela e comprovado pela figura 54 e 55.

Figura 54 - Tensão de 12,9V e corrente de carga de 0,72A



Fonte: autoria própria.

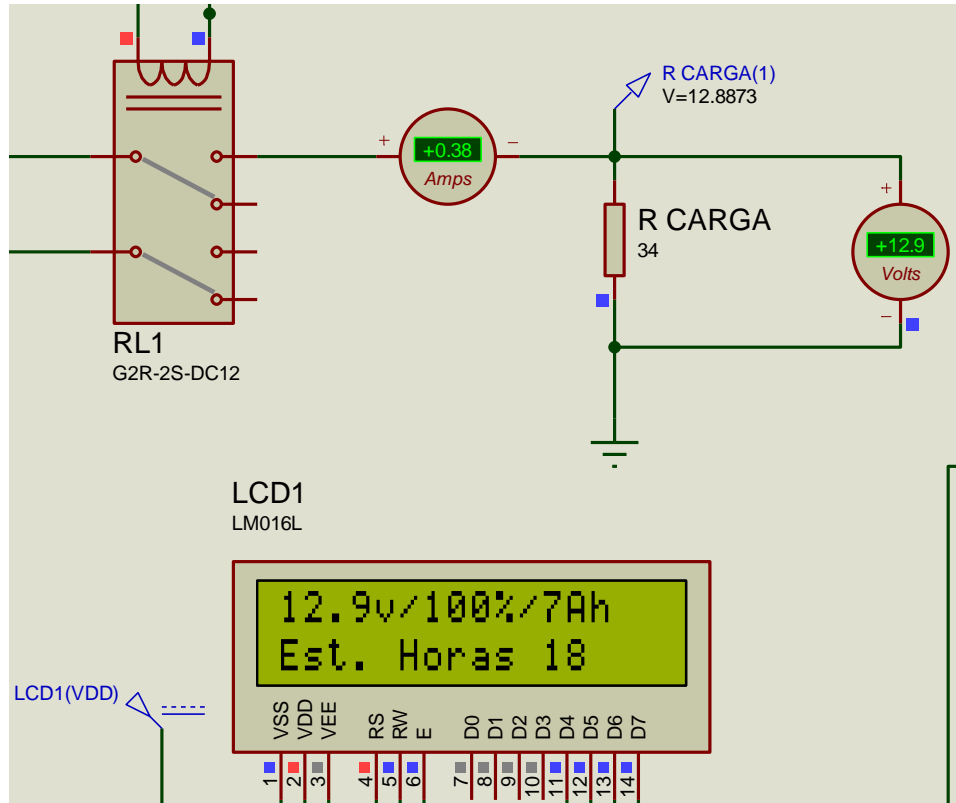
Figura 55 - Carga 1,44A e Tensão 12,7V.



Fonte: autoria própria.

Em seguida são apresentados os testes para dois outros valores de tensão e corrente na carga. Na figura 57 a carga foi ajustada no valor de 34Ω , para a tensão de 12,9 V pela lei de ohm isso acarreta em uma corrente de 0,38 A, comprovado pelo medidor de corrente ligado em série com a carga. O algoritmo apresentou uma estimativa de 18 horas restantes de carga na bateria.

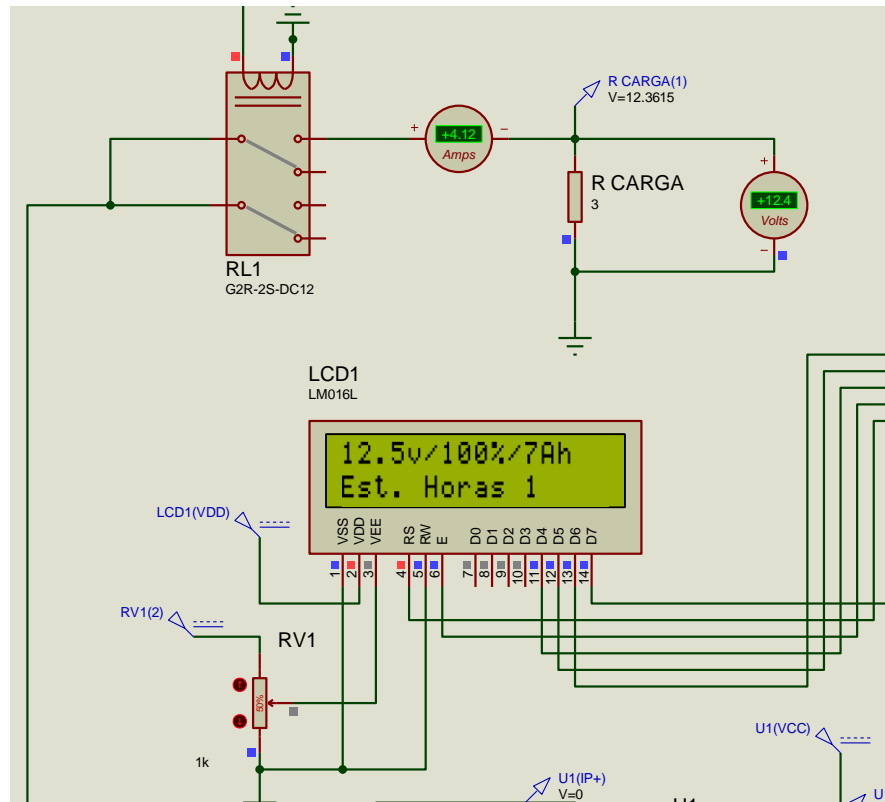
Figura 56 - Teste de funcionamento 0,4 A.



Fonte: Autoria própria.

A estimativa informada pelo manual da bateria apresenta uma estimativa de aproximadamente 57 s conforme a Tabela 2. A figura 57 apresenta o resultado para uma tensão de 12,5 V com uma resistência de carga de 3Ω produzindo uma corrente de 4,12 A e o resultado do algoritmo informa que o tempo restante de carga nas configurações citadas é de 1 hora.

Figura 57 - Teste 4,12 A para estimativa 1 hora



Fonte: autoria própria.

Após a realização dos testes pode ser concluído que o algoritmo criado atendeu às expectativas funcionais apresentando de forma ideal respostas de estimativas muito semelhantes às disponíveis no manual do acumulador utilizado como referência para os testes. Em todo caso, a funcionalidade do algoritmo tem fiel similaridade ao resultado empenhado pelo software Proteus. Desta forma mais uma vez fica a importância das ferramentas computacionais no desenvolvimento de projetos para os engenheiros, poupando tempo e evitando gastos desnecessários com erros de projeto.

5 CONSIDERAÇÃO FINAL

Observou-se uma grande variedade bibliográfica para metodologias de predição de tempo restante de carga, em algumas referências também chamados de SOC (estado de carga). Na maioria dos artigos e trabalhos estavam envolvidos os sistemas fotovoltaicos, mais especificamente em sistemas de controle de carga em usinas de geração de energia elétrica fotovoltaica (off grid – que utilizam acumuladores de energia), abordavam a teoria da Máxima Transferência de Potência (MPPT) e relacionada com a variação da energia fornecida pelo painel fotovoltaico influenciado pela inconstância da radiação solar. Muitos métodos para estimativa do tempo de descarga foram encontrados, quanto mais precisos, mais complexos e em grande parte não conseguiam estimativas exatas de tempo restante de carga. Acredito que este fato seja devido pela não linearidade do comportamento das baterias em geral.

O projeto do conversor CC-CC Buck-boost foi de grande importância pois atingiu seu propósito. Em um primeiro momento foram realizados os testes com o conversor operando em malha aberta, desse modo o comportamento desse não atendeu os requisitos desejados, por isso foi necessário buscar melhorias de projeto. A solução encontrada foi realizar a análise matemática do circuito conversor e com isso obter sua função de transferência. Com a função de transferência em mãos, somados com o auxílio de ferramentas computacionais como o Matlab e PSIM, foi implementado o controle do conversor que proporcionou o resultado desejado, como mostrado na Figura 44 - V_O malha aberta x V_O Malha fechada (DEGRAU).

A etapa seguinte foi o desenvolvimento do algoritmo, a ideia inicial foi utilizar o máximo de recursos disponíveis pelo microcontrolador e de forma que conservasse seu desempenho. Entretanto obtiveram-se questionamentos e adversidades, todo o material de estudo e principalmente a dedicação proporcionaram as soluções. A utilização da EEPROM do Arduino NANO, foi uma ótima opção, pois atribuiu ao sistema algumas capacidades como o armazenamento das últimas configurações - para não haver necessidade de toda vez configurar o dispositivo ao acioná-lo (habilitando seu emprego em sistemas fixos, como nobreaks, carregadores de baterias e UPS) e, em casos de interrupção do fornecimento de energia ou defeito, os sistemas permanecem salvos e são carregados como configurações padrão garantindo a confiabilidade do dispositivo. Um ponto fraco foi a necessidade de ajuste do algoritmo, para que proporcione melhor precisão da estimativa de tempo restante de carga sendo possível assim, o acompanhamento da

contagem de minutos e inclusive segundos. Porém, ao se comparar com dados retirados do manual do acumulador (Tabela 2) nota-se uma boa precisão das estimativas. O desenvolvimento de um menu para interatividade do usuário foi muito interessante, facilitou a realização dos testes além de proporcionar seletividade ao dispositivo que desta forma pode analisar baterias de capacidade até 160 A/h.

Uma opção de continuidade, seria adequar o projeto para que o dispositivo funcione a partir da tensão da bateria, mas com um sistema interno de armazenamento próprio de energia, aumentando a confiabilidade do sistema. Também pode ser sugerida a adequação para prover a interatividade do usuário pela internet, proporcionando o acesso aos dados obtidos da bateria em um ponto distante do local de instalação do protótipo.

O trabalho apresentado atingiu seu objetivo no ponto de vista funcional, as ferramentas computacionais de simulação desempenharam um papel muito importante na implementação do projeto, deste modo estando apto para a aplicação em prática, que possibilitará analisar o comportamento real da variação de tensão da bateria quando passar pelo seu estado de descarga.

REFERÊNCIAS

- ALLEGRO. ACS712. Folha de Dados. Rev. 15 Massachusetts 2013. Acessado em 12 de abril de 2017 em: <http://www.alldatasheet.com/datasheetpdf/pdf/168326/ALLEGRO/ACS712.html>. Acesso em: 30/03/2017.
- ARDUINO. Arduino Development Environment. Disponível em: <<http://arduino.cc/en/Guide/Environment>> acesso em 05/07/2017.
- BAHIA, M. L. Desenvolvimento de um conversor CA-CC para carga de uma bateria chumbo-ácido. Trabalho de conclusão de curso, Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, 2015.
- BASTOS, R. F. Sistema de Gerenciamento para Carga e Descarga de Baterias (chumbo-ácido) e para Busca do Ponto de Máxima potência Gerada em Painéis Fotovoltaicos Empregados em Sistemas de Geração Distribuída. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, São Paulo, 2013.
- BATTERY UNIVERSITY. Site Universidade da Bateria (Battery University). Disponível em: batteryuniversity.com. Acesso em: 21/03/2017.
- BOLTON, W. Mecatrônica: uma abordagem multidisciplinar. 4.ed. Porto Alegre: Bookman, 2010.
- CETINKUNT, S. Mecatrônica. Rio de Janeiro. LTC, 2010.
- CHAGAS, M. W. P. Novas Tecnologias para Avaliação de Baterias. Dissertação de Mestrado, Instituto de Educação e Pesquisa, Curitiba, 2007.
- CONCEIÇÃO, T. G. V. Data Logger para Utilização em Avaliação de Sistemas de Irrigação, Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Luterana do Brasil, Canoas, Rio Grande do Sul, 2012.
- COPETTI, J. B.; MACAGNAN, M. H. Baterias em Sistemas Solares Fotovoltaicos. In: I Congresso Brasileiro de Energia Solar, Fortaleza, 2007.
- COELHO, K. D. Estudo de uma fonte ininterrupta de Corrente Contínua de Baixa Potência Gerenciada por um Microcontrolador. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.
- DAMASCENO, A. C. H. Controle preditivo de corrente aplicado a um controlador de carga de baterias baseado em conversor CC-CC bidirecional. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Juiz de Fora, Minas Gerais, 2008.
- ERICKSON, R. W.; MAKSIMOVIC, D. Fundamentals of Power Electronics. New York: Chapman and Hall, 1997.

FRANCHI, C. M.; CAMARGO, V. L. A. Controladores Lógicos Programáveis: sistemas discretos. 2.ed. São Paulo: Érica, 2013

HIGASHI, E. M. Modelagem da Bobina de Rogowski para medida de pulsos de corrente elétrica. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências de Materiais), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006

JONGERDEN, M.R.; HAVERKORT, B.R.H.M. Which battery model to use? In: UK PERFORMANCE ENGINEERING WORKSHOP, 24th, 2008, London, UK. Technical Report Series of the Department of Computing, Imperial College London (DTR08-9). Imperial College London, 2008. p. 76-88

JUNIOR, E. M. S. Sistema Fotovoltaico para Iluminação Pública em Horário de Ponte. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2004.

KAZIMIERKZUK, M. K. Pulse-width Modulated DC-DC Power Converters. Wright State University Dayton, Ohio, USA, 2008.

K. W E Cheng, B. P. Divakar, Hongjie Wu, Kai Ding, e Ho Fai Ho. Battery-management system (bms) and soc development for electrical vehicles. Vehicular Technology, IEEE Transactions on, 60(1):76–88, 2011.

Languang Lu, Xuebing Han, Jianqiu Li, Jianfeng Hua, e Minggao Ouyang. A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles. Journal of Power Sources, 226(0):272–288, 2013.

LAZZARIN, T. B. Estudo e Implementação de um Carregador de Baterias com uma Técnica de Avaliação de sua Vida Útil. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

MARINS, D. S. Carregador de Baterias Baseado em um Conversor Buck para Aplicação em Sistemas Ininterruptos de Energia. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

MOHAMMAD, N. N. B. Development of time delay voltage control for lead acid battery using Arduino. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica), Faculty of Electrical and Electronic Engineering Universiti Tun Hussein Onn, Malaysia, Malásia, 2014.

NETO, R. M. F. Um Carregador de Baterias Inteligente, Alto Fator de Potência, Usando Tecnologias de Fontes Chaveadas com Comutação não Dissipativa e Correção de Fator de Potência. Tese (Doutorado em Ciências), UFU, Minas Gerais, 2003.

PANASONIC. VRLA Batteries. Manual Técnico, fevereiro 2003.

PEIXOTO, R. L. Monitoramento da Descarga de Bateria com o uso de Microprocessador ARM. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012

RASHID, M. H. (editor), Power Electronics Handbook - devices, circuits, and applications - Third Edition, Burlington, USA, Elsevier, 2011.

SAAD, M. C.; Controlador de carga e descarga de baterias, microcontrolado com pic, com aplicação em sistemas de fornecimento de energia em geral, incluindo sistemas fotovoltaicos. Projeto de Graduação, PUC, Rio de Janeiro, 2012.

SOUZA, D.J. Desbravando o PIC: Baseado no microcontrolador PIC 16F84. 5. ed. São Paulo: Érica, 2000.

TEXAS, SG2524/3524. Regulador PWM. Folha de dados do componente. Acesso em 20/10/2017. Disponível em: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/sg2524.pdf>.

UNICOBA. Manual Técnico UNIPOWER - Bateria Chumbo Ácida.