



Universidade Federal
de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

Laboratório de Alta Tensão

FILIPPE LUCENA MEDEIROS DE ANDRADE

**SISTEMA DE CARREGAMENTO DE BATERIAS
DE CHUMBO-ÁCIDO DE BAIXO CUSTO**

Campina Grande, Paraíba.
Maio de 2014

FILIPPE LUCENA MEDEIROS DE ANDRADE

SISTEMA DE CARREGAMENTO DE BATERIAS
DE CHUMBO-ÁCIDO DE BAIXO CUSTO

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de concentração: Processamento de energia.

Orientador:
Professor Tarso Vilela Ferreira, D. Sc.

Campina Grande, Paraíba.
Abril de 2014

FILIFE LUCENA MEDEIROS DE ANDRADE

SISTEMA DE CARREGAMENTO DE BATERIAS
DE CHUMBO-ÁCIDO DE BAIXO CUSTO

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de concentração: Sistemas Elétricos

Aprovado em: / /

Professor Convidado

Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Professor Tarso Vilela Ferreira, D. Sc.

Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

Dedico esse trabalho a meus pais, Lenita e
Agrinaldo que lutaram intensamente para
formar a pessoa que sou.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado a vida e por colocar em meu caminho todas essas pessoas a que agradeço imensamente.

Aos meus pais, Agrinaldo e Lenita, e às minhas irmãs, Rafaella e Izabella. Devo este trabalho a vocês que conseguiram me suportar, me apoiar e me dar força em momentos em que nem eu mesmo faria isso por mim.

Aos meus avós, Iraci, Lustrinha e Silvino, que sempre serão referenciais de honra e dignidade na minha vida

Aos meus familiares, pela torcida incessante.

Aos meus amigos de Patos que sempre me apoiaram e me fizeram sorrir mesmo à distância. Também agradeço aos meus irmãos do 2008.1, conquistados durante esse curso, de forma especial a Ilthon Lucas, Mariana Camurça, Lucas Omena e Regelli Suassuna, que estiveram do meu lado até chegarmos a este ponto.

Agradeço a pessoa de Jarlene, Dona Fátima e Neide que durante anos me deram suporte que terminar esse curso, agradeço também aos demais que moram comigo no pensionato.

Ao meu orientador e amigo, Tarso Vilela, por todo o apoio, ajuda, conselhos durante toda a graduação.

Agradeço profundamente a todos do Laboratório de Alta Tensão, onde me “criei” durante a universidade.

Agradeço ao Laboratório de Instrumentação e Metrologia Científicas, o LIMC, pelos componentes disponibilizados para este trabalho.

Agradeço a todos os educadores que de alguma forma contribuíram para a construção de quem sou hoje.

RESUMO

O avanço da tecnologia que toma conta do dia a dia de grande parte da humanidade, como a necessidade de smartphones, notebooks e demais artigos tecnológicos, está determinando as características de uma geração. Isto trouxe a exigência de um fornecimento energético interrupto, assim as baterias se constituíram como o meio de fornecimento no qual garante o fornecimento de energia na ocorrência de falhas no sistema elétrico. Um dos principais problemas no uso de bateria é o carregamento adequado das mesmas, sendo necessário garantir um carregamento completo sem a elevação de temperatura e sem a ocorrência de sobre corrente. Assim este trabalho se dedica a construção de um protótipo de carregador de bateria utilizando um método de carregamento *Two Step Constant Voltage* implementado digitalmente em um micro controlador. A escolha do método deu-se baseado na tentativa de prolongamento da vida útil da bateria.

ABSTRACT

The technological advances are becoming increasingly present in the day-to-day life of the humanity. The use of smartphones, notebooks and other devices are shaping an entire generation. This brought the necessity of an uninterrupted electrical supply, this way batteries became the medium of supply which guaranties electrical energy even in the case of faults in the electrical grid. One of the main issues in the use of batteries is to assure the proper charging, so they can be fully charged without elevation in temperature and without overcurrent. Therefore, the objective of this work is to build a prototype of a battery charger using the Two Step Constant Voltage charging method, digitally implemented in a microcontroller. This method was chosen based in the attempt to prolong the battery's useful life.

SUMÁRIO

| | |
|---|------|
| Resumo..... | vi |
| Abstract | vii |
| Sumário | viii |
| Lista de Tabela..... | x |
| Lista de Ilustrações | xi |
| 1 Introdução | 1 |
| 1.1 Objetivos..... | 2 |
| 1.2 Estrutura do Trabalho | 2 |
| 2 Revisão bibliográfica..... | 4 |
| 2.1 Conversor DC-DC | 4 |
| 2.2 - Conversor <i>Buck</i> : Análise em Regime Permanente. | 5 |
| 2.3 Análise com Interruptor Fechado..... | 7 |
| 2.4 Análise com Interruptor Aberto..... | 7 |
| 2.5 Cálculo da Indutância Mínima: Operação Contínua | 9 |
| 2.6 Cálculo da Capacitância Mínima: Operação Contínua | 10 |
| 2.7 Topologias | 12 |
| 2.7.1 Conversor <i>Buck</i> Síncrono..... | 12 |
| 2.7.2 Conversor <i>Buck</i> com Chave Referenciada ao Terra..... | 13 |
| 2.8 Circuito de Driver e <i>Boot Strap</i> | 14 |
| 2.9 Arduino | 16 |
| 2.10 Controle Proporcional Integral Derivativo..... | 18 |
| 2.10.1 Teoria do Controle PID | 18 |
| 2.10.2 Controle Proporcional..... | 19 |
| 2.10.3 Controle Integral..... | 20 |
| 2.10.4 Controle Derivativo | 21 |
| 2.11 Sintonia de Controle PDI..... | 22 |
| 2.11.1 Sintonia do Controlador PID pelo Método de Ziegler-Nichols | 23 |
| 2.12 Baterias | 24 |
| 2.13 Bateria Chumbo Ácido | 24 |
| 2.13.1 Aspectos Químicos | 25 |
| 2.13.2 Aplicações | 25 |
| 2.13.3 Aspectos Operacionais das Baterias de Chumbo Ácido | 26 |
| 2.14 Métodos de Carga | 30 |
| 2.14.1 Método de Tensão Constante..... | 30 |
| 2.14.2 Método da Corrente Constante | 31 |
| 2.14.3 Método de Dois Níveis de Tensão..... | 31 |
| 3 Metodologia | 33 |

| | | |
|-----|---|----|
| 3.1 | Dimensionamento do Conversor <i>Buck</i> | 33 |
| 3.2 | Calculo do Capacitor e Indutor | 34 |
| 3.3 | Mosfet | 35 |
| 3.4 | Diodo | 35 |
| 3.5 | Conversor <i>Buck</i> com Chave Referenciada à Terra..... | 36 |
| 4 | Simulação | 37 |
| 4.1 | Controle de Corrente..... | 40 |
| 4.2 | Controle de Tensão | 41 |
| 5 | Implementação no Microcontrolador | 42 |
| 6 | Resultado..... | 43 |
| 7 | Conclusão | 47 |
| | Referências Bibliográficas..... | 49 |
| | Apêndice A | 50 |

LISTA DE TABELA

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Características técnicas do Arduino Uno (Arduino, 2014). | 17 |
| Tabela 2 - Efeito dos Parâmetros sobre o sistema. | 23 |
| Tabela 3 - Tabela de parâmetros - Método de Ziegler Nichols. | 23 |
| Tabela 4 - Parâmetros do protótipo. | 33 |
| Tabela 5 - Estimativa do custo do carregador. | 47 |

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 1- (a) Conversor DC-DC; (b) Comutação equivalente; (c) tensão de saída. (Hart, 2001)..... | 5 |
| Figura 2 - (a) Conversor Buck; (b) Circuito equivalente com interruptor fechado; (c) circuito equivalente com o interruptor aberto. | 6 |
| Figura 3 – Formas de onda do conversor buck (a)Tensão no indutor; (b) Corrente no indutor; (c) Corrente no capacitor..... | 9 |
| Figura 4 - Formada de onda da corrente do capacitor - conversor buck. | 11 |
| Figura 5- Meia ponte utilizada no conversor Buck síncrono. (Rahman, 2007)..... | 12 |
| Figura 6 - Conversor Buck invertido | 13 |
| Figura 7- Conversor Buck com mosfet tipo N..... | 14 |
| Figura 8 - (a) Conversor Buck com circuito boot strap; (b) Conversor com interruptor aberto e capacitor do boot strap carregando; (c) Conversor Buck com interruptor fechado. | 16 |
| Figura 9- Diagrama de blocos de uma cadeia de processamento utilizando o Arduino. | 17 |
| Figura 10- Arduino Uno. | 17 |
| Figura 11 - Efeito do ganho proporcional no comportamento do PV. | 20 |
| Figura 12- Efeito do termo integral no controle proporcional. | 21 |
| Figura 13 - Efeito da ação derivativa no controle proporcional. | 22 |
| Figura 14- Malha de controle PID..... | 23 |
| Figura 15 - Elementos de uma célula da bateria. | 24 |
| Figura 16- Tensão nos terminais da bateria de chumbo ácido durante uma descarga..... | 27 |
| Figura 17 - Corrente injetada na bateria durante a sua descarga. | 27 |
| Figura 18 - Tensão nos terminais da bateria durante a sua recarga. | 28 |
| Figura 19 - Expectativa de vida em função da temperatura de trabalho. | 29 |
| Figura 20 - Possibilidade de ciclos em função da profundidade de descarga. | 29 |
| Figura 21 - Curvas características do método de tensão e corrente constantes. | 31 |
| Figura 22 - Curvas características do método de tensão e corrente constantes. | 31 |
| Figura 23- Curvas características do método de dois níveis de tensão..... | 32 |
| Figura 24 – Indutores enrolados para o protótipo do carregador de baterias..... | 35 |
| Figura 25 – Diagrama do conversor Buck com Chave Referenciada à Terra - CBCRT..... | 36 |
| Figura 26 - (a)resposta ao degrau; (b)Diagrama de body do sistema sem controlador. | 38 |
| Figura 27 - (a) resposta ao degrau; (b) diagrama de Bode do sistema com o controlador. | 39 |
| Figura 28 - Diagrama de simulação do controle de corrente | 40 |
| Figura 29 – (a)Tensão de saída; (b)corrente de saída. | 40 |
| Figura 30 - Diagrama de simulação do controle de tensão | 41 |
| Figura 31 – (a) Diagrama do circuito simulado (b) Tensão e corrente de saída do conversor com controlador de tensão; (c) Nível de carga da bateria. | 41 |
| Figura 32- Diagrama de blocos do controle..... | 42 |
| Figura 33 - (a)Foto do microcontrolador; (b) Foto do conversor buck..... | 43 |
| Figura 34 – (a) Bateria nova; (b) Bateria usada 1; (c)Bateria usada 2. | 44 |
| Figura 35 – (a) curva de carga da bateria nova.; (b) curva de carga na bateria 1;(c) curva de carga da bateria 2. | 46 |

1 INTRODUÇÃO

No último século o progresso científico acarretou mudanças consideráveis na vida do homem, de forma que a cada instante são lançados no mercados diversos produtos e serviços com objetivo de melhorar a qualidade de vida humana. Neste processo tecnológico, pode-se destacar a eletrônica de potência, que nas últimas décadas proporcionou avanços consideráveis para tal melhoria da qualidade de vida, destacando-se: os avanços nos estudos de componentes elétricos, que possibilitaram computadores e celulares de baixo custo e boa portabilidade; o avanço dos conversores CC-CC, inversores de frequência, retificadores e outros, que são utilizados em vários equipamentos no dia-dia do homem.

Nessa avalanche tecnológica, a exigência de um fornecimento energético ininterrupto se tornou essencial para diversas aplicações, com isso, surgiram os *Uninterrupted Power Supply* (UPS), dentre os quais os representantes mais conhecidos nacionalmente são os *No-Breaks*. Este sistema pode atuar fornecendo energia durante a ocorrência de uma falta no sistema elétrico, se caracterizando como uma fonte de energia emergencial. Para sistemas sensíveis às harmônicas existentes na rede do sistema elétrico, o UPS pode atuar como fonte principal no fornecimento de energia, visto que o processo de inversão de tensão garante um sinal senoidal com baixa interferência harmônica.

Dados os principais tipos de baterias existente no mercados, a bateria de chumbo-ácido é a mais antiga, de construção mais barata e mais utilizada. Porém o processo de carregamento desse tipo de bateria apresenta dois problemas: o risco de carregamento inadequado, que provoca recarga insuficiente, diminuindo a capacidade da bateria; o processo de carregamento com sobre tensões, variações de temperatura durante a operação e descargas profundas, que provocam reduções no tempo de vida da bateria.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um protótipo de um carregador de baterias de baixo custo, com um algoritmo de carregamento que possibilite um bom funcionamento das baterias e manutenção da sua vida útil.

Para tanto, será utilizado um método de carregamento que proporcione um carregamento adequado ao bom aproveitamento da vida útil da bateria. Esse método deve ser implementado empregando microcontroladores da plataforma Arduino, de modo a reduzir custos.

São ainda objetivos específicos:

- i. O estudo de diversas topologias do conversor *Buck*;
- ii. A determinação de um método de carregamento adequado para bateria de chumbo ácido;
- iii. Simular o circuito de carregamento com o devido método implementado em um ambiente de simulação confiável, de modo a validar o protótipo do carregador;
- iv. Construção do protótipo de carregador baseado no conversor *buck* e no método de carregamento escolhido.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Após a breve introdução apresentada, o trabalho segue na seguinte estrutura: O Capítulo 2 irá tratar de uma revisão teórica sobre o conversor *buck*, ressaltando o dimensionamento do conversor e algumas de suas diversas topologias. Ainda nesse Capítulo será realizado um levantamento do estado da arte sobre os diversos métodos de carregamento e as principais características da bateria de chumbo ácido. O Capítulo 3 mostrará todo o dimensionamento do conversor *buck* e a construção de quatro topologias de conversor, objetivando encontrar um circuito que venha apresentar uma resposta satisfatória utilizando os componentes eletrônicos disponíveis e visando a redução de custo. O Capítulo 4 relata todo o processo de simulação realizado com o objetivo de validar o protótipo. No Capítulo 5 será descrita a implementação do método de carregamento na plataforma Arduino. O Capítulo 6 mostra o protótipo montado e os testes

realizado, bem como seus resultados. Por fim, no Capítulo 7 será apresentada a conclusão dos resultados obtidos com o intuito de contribuir para estudos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONVERSOR DC-DC

Os conversores DC-DC são circuitos eletrônicos que convertem uma tensão contínua em outro nível de tensão contínua e, normalmente, proporcionando uma tensão de saída regulada. (Hart, 2001). Existem dois tipos de conversores DC-DC: os conversores lineares e os conversores comutados. Estes últimos são mais eficientes, alcançando valores superiores a 80% de eficiência.

O advento dos semicondutores de potência, especialmente transistores e diodos, foi fundamental para a prática de conversão por comutação (Sedra, et al., 2000). Nos conversores por comutação, os conversores funcionam como um interruptor eletrônico, que está completamente aberto ou completamente fechado (corte e saturação para os transistores BJT). Devido à esta característica de comutação, os conversores também são conhecidos como reguladores chaveados ou fontes chaveadas. (Chryssis, 1984).

Considerando que o interruptor da Figura 1 (a) é ideal, a tensão de saída é igual a tensão de entrada quando o interruptor está fechado e zero quando está aberto. A abertura e fechamento periódico do interruptor proporciona uma saída de tensão em forma de pulso, como ilustrado na Figura 1 (c). Dessa forma, a média da tensão de saída é dado por:

$$V_0 = \frac{1}{T} \int_0^T V_0(t) dt = V_s D \quad (1)$$

A referida tensão de saída depende diretamente do ciclo de trabalho D, que é determinado pela fração de tempo que o interruptor está fechado em relação ao período.

$$D = \frac{t_{fechado}}{t_{fechado} + t_{aberto}} = \frac{t_{fechado}}{T} \quad (2)$$

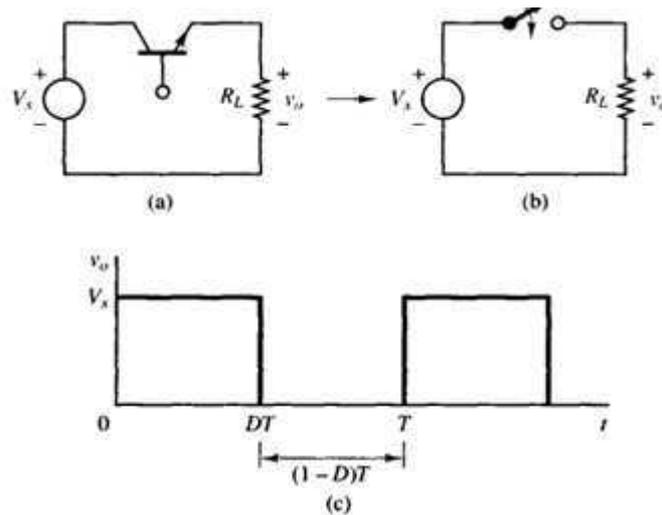


Figura 1- (a) Conversor DC-DC; (b) Comutação equivalente; (c) tensão de saída. (Hart, 2001)

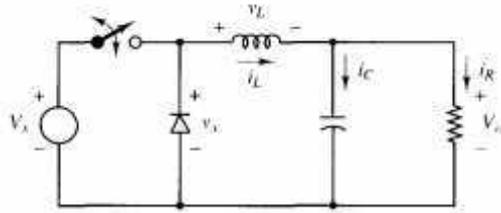
2.2 - CONVERSOR *BUCK*: ANÁLISE EM REGIME PERMANENTE

Uma maneira de obter-se uma saída puramente contínua no circuito da Figura 1(a) é utilizar um filtro passa baixas com indutor e capacitor (LC) para extrair a componente contínua da tensão de saída. O circuito da Figura 2(a) ilustra o circuito referido, que se denomina conversor *buck*. O diodo tem a função de proporcionar um caminho para corrente do indutor quando o interruptor está aberto, sendo chamado de diodo de roda livre.

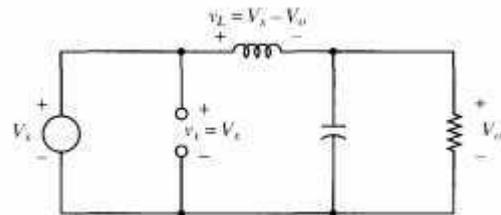
Uma maneira de analisar o funcionamento do conversor *buck* é examinar a corrente e a tensão no indutor. Esse método de análise será útil para o dimensionamento do filtro e para analisar se o circuito opera no modo contínuo ou descontinuo.

Para analisar o conversor serão consideradas as seguintes suposições:

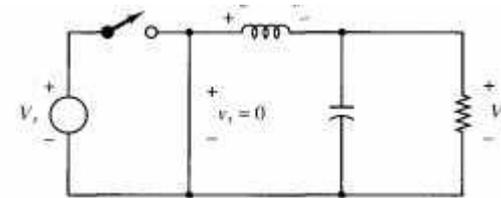
- O circuito opera em condição contínua;
- A corrente no indutor é sempre positiva;
- O valor do capacitor é muito grande e a tensão de saída se mantém constante;
- O período de operação é T ; o interruptor está fechado no tempo $D \cdot T$ e estará aberto no tempo $(1-D) T$;
- Os componentes são ideais.



(a)



(b)



(c)

Figura 2 - (a) Conversor *Buck*; (b) Circuito equivalente com interruptor fechado; (c) circuito equivalente com o interruptor aberto.

Dessa forma, a corrente no indutor é periódica e dada por:

$$i_L(t + T) = i_L(t) \quad (3)$$

em que i_L é a corrente no indutor [A].

O indutor se caracteriza pela tensão média, sobre o mesmo, ser igual a zero, desta forma:

$$V_L = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} v_L(\lambda) d\lambda = 0 \quad (4)$$

em que V_L é a tensão no indutor [V].

E a corrente média do capacitor é zero.

$$I_C = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} i_C(\lambda) d\lambda = 0 \quad (5)$$

Lembrando que considerando que os componentes são ideais, a potência entregue pela fonte é igual a potência consumida pela carga. Porém, se considerado os componentes reais há uma componente de potência dissipada pelos componentes.

2.3 ANALISE COM INTERRUPTOR FECHADO

O circuito mostrado na Figura 2(b) é equivalente ao conversor *buck* quando o interruptor está fechado. Neste caso, o diodo é polarizado inversamente e a tensão no indutor é dada por:

$$V_L = V_s - V_0 = L \frac{di_L}{dt} \quad (6)$$

Como a derivada da corrente é uma constante positiva, a corrente cresce linearmente. Desta forma, a variação da corrente quando o interruptor está fechado é mostrada na equação 7.

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{V_s - V_0}{L} \quad (7)$$

$$(\Delta i_L)_{Fechado} = \left(\frac{V_s - V_0}{L} \right) DT \quad (8)$$

2.4 ANALISE COM INTERRUPTOR ABERTO

Na Figura 2 (C) é ilustrado o circuito equivalente quando o interruptor está aberto. Visto que o indutor não admite variação brusca de corrente, o diodo é polarizado diretamente, permitindo a passagem da corrente do indutor, este diodo é chamado diodo de roda livre. A tensão no indutor, quando o interruptor está aberto é dado por:

(9)

$$V_L = -V_0 = L \frac{di_L}{dt}$$

É notável que a derivada da corrente é uma constante negativa, e a corrente decresce linearmente. A variação da corrente no indutor quando o interruptor está aberto é:

(10)

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{(1-D)T} = \frac{-V_0}{L}$$

(11)

$$(\Delta i_L)_{Aberto} = \left(\frac{-V_0}{L}\right)(1-D)T$$

Em regime permanente, o circuito se comporta de modo periódico, por consequência, é necessário que a corrente seja a mesma no princípio e fim de cada ciclo de comutação. Para isso se deve cumprir.

(12)

$$(\Delta i_L)_{Fechado} + (\Delta i_L)_{Aberto} = 0$$

Substituindo as equações (11) e (8) na equação (12),

(13)

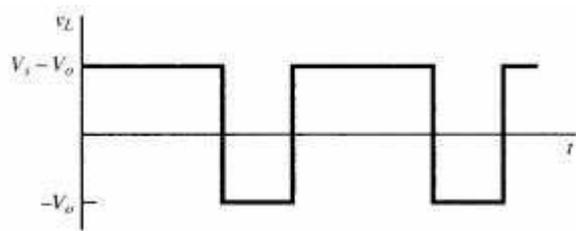
$$\left(\frac{V_s - V_0}{L}\right)DT - \left(\frac{V_0}{L}\right)(1-D)T = 0$$

De maneira que, é possível encontrar uma relação para a tensão de saída V_0 ,

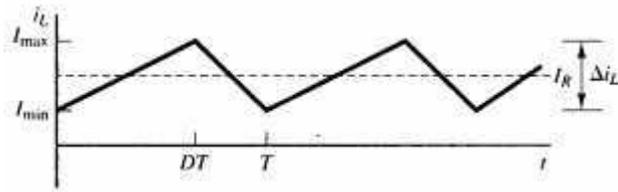
(14)

$$V_0 = V_s D$$

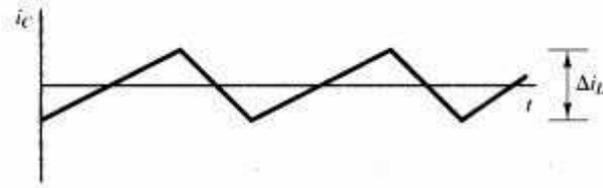
Na Figura 3, são apresentadas as formas de ondas do conversor *buck*.



(a)



(b)



(c)

Figura 3 – Formas de onda do conversor *buck* (a) Tensão no indutor; (b) Corrente no indutor; (c) Corrente no capacitor.

2.5 CÁLCULO DA INDUTÂNCIA MÍNIMA: OPERAÇÃO

CONTÍNUA

Para que as análises realizada até este ponto sejam válidas, é necessário verificar a existência de corrente permanentemente no indutor, isto é, o circuito opera em modo contínuo. Para isto, a corrente mínima no indutor deve ser sempre positiva, com análise na Figura 3:

$$I_{\min} = I_L - \frac{\Delta i_L}{2} \quad (15)$$

$$I_{\min} = V_0 \left[\frac{1}{R} - \frac{(1-D)}{2Lf} \right] \quad (16)$$

O limite entre a corrente contínua e descontínua é,

$$I_{\min} = 0 \quad (17)$$

Logo, pode-se determinar uma combinação entre a frequência e a indutância a fim de garantir que o circuito opere em modo contínuo, no regime permanente.

$$I_{\text{mín}} = 0 = V_0 \left[\frac{1}{R} - \frac{(1-D)}{2Lf} \right] \quad (18)$$

$$(Lf)_{\text{mín}} = \frac{(1-D)R}{2} \quad (19)$$

Fixando a frequência de comutação em um valor desejado,

$$L_{\text{mín}} = \frac{(1-D)R}{2f} \quad (20)$$

Sendo $L_{\text{mín}}$ a indutância mínima para que o circuito opere no modo contínuo em regime permanente.

2.6 CALCULO DA CAPACITÂNCIA MÍNIMA: OPERAÇÃO

CONTÍNUA

Todo o desenvolvimento apresentado supôs que o capacitor era muito grande, de maneira que a tensão de saída fosse constante. Porém, na prática não será possível manter a tensão de saída perfeitamente constante. Desta forma, a variação periódica da tensão de saída se calcula pela relação entre a corrente e tensão do capacitor. A corrente do capacitor é,

$$i_C = i_L - i_R \quad (21)$$

O capacitor se carregará enquanto a corrente sobre o mesmo seja positiva. Aplicando a definição.

$$Q = CV_0 \quad (22)$$

$$\Delta Q = C\Delta V_0 \quad (23)$$

$$\Delta V_0 = \frac{\Delta Q}{C} \quad (24)$$

A variação de carga, ΔQ , pode ser calculada pela área do triângulo situado acima do eixo do tempo, com ilustrado na Figura 4.

$$\Delta Q = \frac{1}{2} \left(\frac{T}{2} \right) \left(\frac{\Delta i_L}{2} \right) \quad (25)$$

Logo,

$$\Delta V_0 = \left(\frac{T \Delta i_L}{8C} \right) \quad (26)$$

Substituindo Δi_L pela equação (8), têm-se

$$\Delta V_0 = \frac{T}{8C} \frac{V_0}{L} (1-D) T = \frac{V_0 (1-D)}{8CLf^2} \quad (27)$$

Na equação (27), ΔV_0 é a variação pico a pico da tensão de saída, que também pode ser expressa em relação a tensão média de saída, isto é, expressa como uma fração da tensão de saída.

$$\frac{\Delta V_0}{V_0} = \frac{(1-D)}{8CLf^2} \quad (28)$$

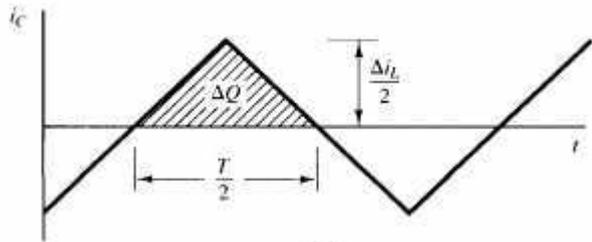


Figura 4 - Formada de onda da corrente do capacitor - conversor *buck*.

Consequentemente, é possível calcular um capacitor mínimo, de forma, que garanta uma variação dentro dos padrão desejado, normalmente 3%, da tensão de saída

$$C_{min} = \frac{V_0 (1-D)}{\Delta V_0 8L f^2} \quad (29)$$

2.7 TOPOLOGIAS

2.7.1 CONVERSOR *BUCK* SÍNCRONO

O conversor é essencialmente o mesmo que o conversor *Buck* convencional, porém o conversor síncrono utiliza a configuração de meia ponte para chavear os estados dos interruptores, conforme ilustrado na Figura 5. O *mosfet* superior controla a transferência de energia da fonte de entrada e carregando a corrente do indutor. Enquanto o *mosfet* inferior garante a circulação da corrente do indutor quando o *mosfet* superior estiver em corte.

Devido à alta eficiência e ao baixo consumo de área, o conversor *buck* síncrono tem recebido grande atenção para a conversão de energia. As desvantagens que antes implicava na não implementação do conversor síncrono, tais como: grande diferença de custo entre o FET e o diodo, e queda de tensão nos diodos em circuitos que saída acima de 5 V, foram superadas com a evolução da tecnologia dos FET, este avanço está proporcionando melhoria na condutividade a preços cada vez mais baixos. Assim, o FET se tornou a principal escolha frente aos diodos Schottky e a topologia do *Buck* síncrono se mostra adequada por conta da dinâmica simples e capacidade simétrica na taxa de chaveamento.

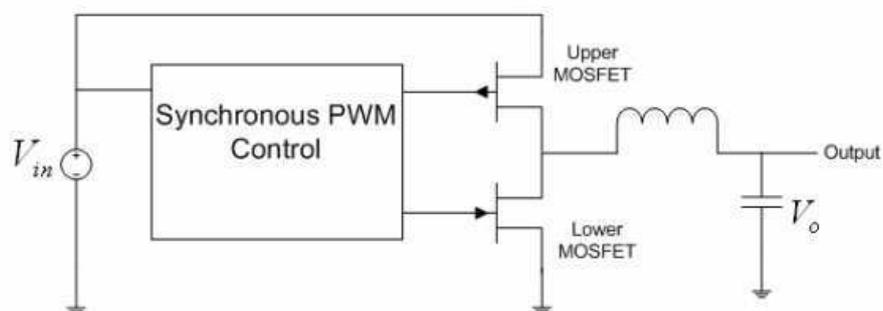


Figura 5- Meia ponte utilizada no conversor *Buck* síncrono. (Rahman, 2007)

O circuito de controle deve garantir o sincronismo no tempo de abertura e fechamento de ambos os *mosfets* com a frequência de chaveamento. O controle baseado na Modulação por Largura de Pulso (do inglês *Pulse Width Modulation*, PWM) síncrono deve regular a tensão de saída através do ciclo de trabalho dos *mosfets* superior e inferior.

Essa topologia proporciona maior eficiência frente ao diodo devido ao rápido chaveamento e baixa resistência série do FET.

Porém, esta topologia requer mais componentes e uma lógica de sequenciamento no interruptor adicional. Esse sequenciamento especial é necessário para garantir que a fonte de tensão primária não seja curto circuitada. Assim, é necessária a adição de um tempo morto no período de chaveamento do mosfet inferior, de modo, que elimine a possibilidade de condução simultânea dos dois mosfets.

2.7.2 CONVERSOR *BUCK* COM CHAVE REFERENCIADA AO TERRA

Nos conversores *Buck* baseados nos mosfets tipo N, o terminal *source* do mosfet não é conectado à terra. Desta forma, para chaveamento do mosfet no conversor *buck* é necessário um circuito chamado *high-side driver* (Saeedifard, 2013), que será apresentado posteriormente.

De modo a contornar o uso deste circuito, pode-se implementar o Conversor *Buck* com Chave Referenciada à Terra (CBCRT), isto é, o interruptor interligado ao lado de baixa tensão do conversor, como ilustrado na Figura 6.

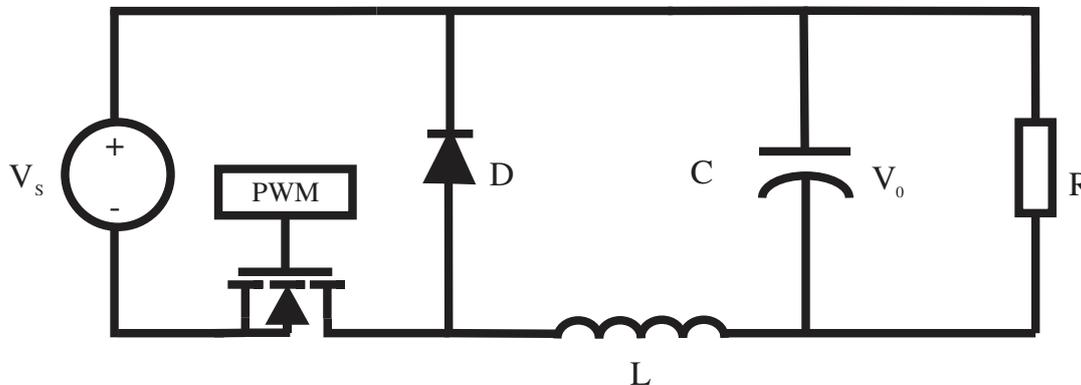


Figura 6 - Conversor *Buck* invertido

Este circuito possibilita um controle do chaveamento do mosfet sem o emprego do *high-side driver*, o que simplifica a topologia do circuito e o torna mais econômico.

2.8 CIRCUITO DE DRIVER E *BOOT STRAP*

A localização do mosfet tipo N no conversor *Buck* introduz uma dificuldade peculiar no desenvolvimento do circuito redutor de tensão. Como ilustrado na Figura 7, o terminal *source* do mosfet não é comum com à terra do gerador de PWM. Além disso, para o correto chaveamento do mosfet a tensão entre o *gate* e o *source*, V_{GS} , deve ser da ordem de 10 a 20 V e idealmente a tensão entre o *dreno* e o *gate*, V_{DS} , deve ser aproximadamente zero. Consequentemente, a tensão no *gate* deve ser:

$$V_G = V_S + V_{GS} \quad (30)$$

Isto implica que a tensão V_G deve ser 10 a 20 V maior que a tensão de entrada do conversor. Portanto, o conversor carece de tensões auxiliares que assegurem o correto chaveamento do mosfet. Essas tensões auxiliares são geradas pelo circuito de *driver* e uma abordagem para resolver tal desafio que é chamado de circuito *boot strap*.

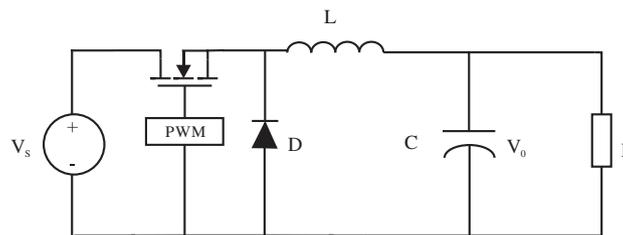


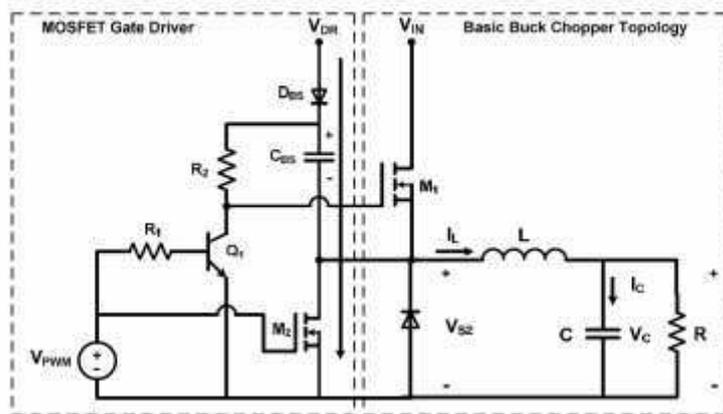
Figura 7- Conversor *Buck* com mosfet tipo N

O circuito, ilustrado na Figura 8 (a), representa o conversor *Buck* com o circuito de *boot strap*. Neste circuito, o V_{PWM} determina o ciclo de trabalho do circuito, esta tensão varia entre 0 e 5 V. A tensão V_{DR} é a tensão do *gate driver* que, normalmente, varia entre 10 e 18 V. A operação do circuito se dar maneiras:

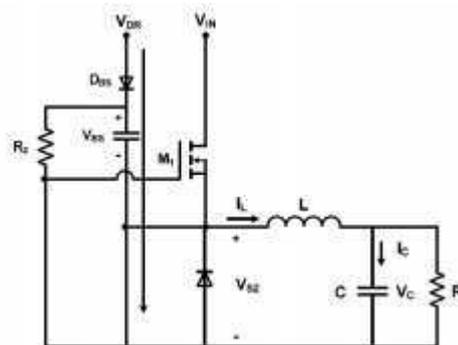
- Quando $V_{PWM} = 5V$ os transistores Q_1 e M_2 são ligados, conforme a Figura 8(b). Consequentemente, o capacitor C_{BS} é carregado com a tensão V_{DR} via o diodo do *boot strap*, e a tensão no *gate* do mosfet M_1 é zero.
- Quando $V_{PWM} = 0V$ os transistores Q_1 e M_2 são desligados e o circuito resultante é ilustrado na figure 8(c). Neste circuito, o terminal negativo do capacitor C_{BS} está conectado ao *source* de M_1 , o terminal positivo está ligado ao *gate* via o resistor R_2 . C_{BS} começa a descarregar, providenciando a tensão necessária para que o transistor M_1 sature. Enquanto M_1 está saturado (ligado), a tensão no terminal *source* sobe para próximo de V_{IN} .

O diodo D_{BS} garante que o capacitor não descarrega em direção a fonte V_{DR} . Quando V_{PWM} retorna aos 5 V, o *gate* de M_1 é ligado à terra e a capacitância ao *gate* é descarregada. Assim se iniciando um novo ciclo.

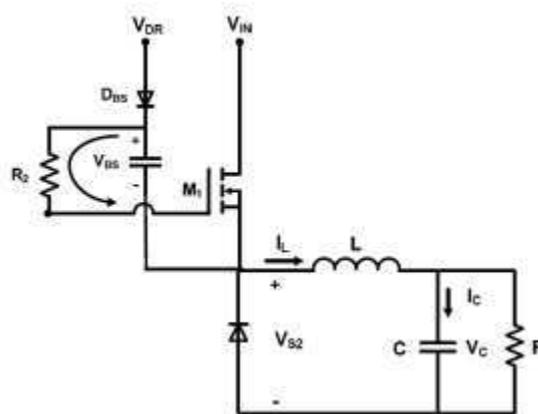
Há muitos *gate drivers* baseado no circuito de *boot strap* disponíveis em chips de circuitos integrados (CI). Neste trabalho foram utilizados dois desses circuitos o IR 2110 e o HCPL 3150. O IR2110 foi projetado de modo a possibilitar o gatilhamento tanto do *high-side* e *low-side* da chave. O HCPL 3150 é projetado para o gatilhamento do *high-side*.



(a)



(b)



(c)

Figura 8 - (a) Conversor *Buck* com circuito *boot strap*; (b) Conversor com interruptor aberto e capacitor do *boot strap* carregando; (c) Conversor *Buck* com interruptor fechado.

2.9 ARDUINO

O Arduino é uma plataforma *open-source* de prototipagem eletrônica baseada em flexibilidade. Fácil de usar tanto em software e hardware. É destinado a artistas, designers, entusiastas e qualquer pessoa interessada em criar objetos ou ambientes interativos. (Arduino, 2014).

O conceito deste microcontrolador surgiu na Itália, em 2005, com o objetivo de criar um dispositivo que fosse utilizado em projetos/protótipos construído de forma menos dispendiosa do que outros sistemas disponíveis no mercado. (Renna, et al., 2013)

Ele é baseado em uma placa micro controlada e no micro controlador Atmega, com acessos de entradas/saídas (I/O), sobre a qual foi desenvolvida uma biblioteca de funções que simplifica a sua programação por meio de uma sintaxe similar à linguagem C/C++.

Em resumo o Arduino é um Kit de desenvolvimento que pode ser visto como uma unidade de processamento capaz de mensurar variáveis de ambiente externo, transformadas em um sinal elétrico correspondente através de sensores ligados aos seus terminais de entradas. De posse da informação, ele pode processá-la computacionalmente.

A Figura 9 ilustra um diagrama de bloco de uma cadeia de processamento.

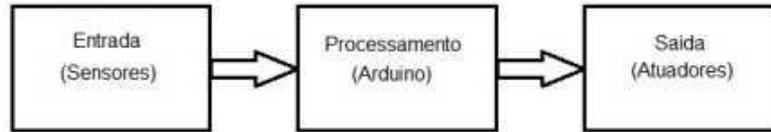


Figura 9- Diagrama de blocos de uma cadeia de processamento utilizando o Arduino.

A Figura 10 mostra um exemplar do Arduino Uno.



Figura 10- Arduino Uno.

A Tabela 1 - Características técnicas do Arduino Uno .apresenta as características básicas do microcontrolador.

Tabela 1 - Características técnicas do Arduino Uno (Arduino, 2014).

| | |
|---|------------------|
| Microcontrolador | Atmega328 |
| Pinos de entrada analógica | 6 |
| Pinos de I/O digitais | 14 |
| Tensão de operação | 5 V |
| Tensão de alimentação(recomenda) | 7-12 V |
| Tensão de alimentação (limites) | 6-20 V |
| Corrente contínua por pino de I/O | 40 mA |
| Corrente contínua para o pino de 3,3 V | 50 mA |
| Número de conversores A/D | 1 |
| Numeros de PWM | 6 |
| EEPROM | 1 kB |
| Frequência de clock | 16 MHz |

2.10 - CONTROLE PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO

Os controladores PID são ferramentas essenciais na automação industrial, a flexibilidade de controle os tornam versáteis para serem aplicados em diversos processos (ASTRÖM, 2008), principalmente quando estes últimos apresentam um comportamento linear.

A importância desse método de controle é tal, que mais da metade dos controladores industriais em uso atualmente emprega esquemas de controle PID ou PID modificado (Ogata, 2010)

Em resumo, é um de controle de processos que une as ações derivativa, integral e proporcional, fazendo com que o sinal de erro seja minimizado pela ação proporcional, zerado pela ação integral e obtido com uma velocidade antecipada pela ação derivativa.

2.10.1 TEORIA DO CONTROLE PID

Primeiramente serão apresentadas algumas definições de siglas e termos vastamente utilizados no estudo dos métodos de controle.

- PV: *Process Variable* ou variável de processo. Variável que é controlada no processo, como: temperatura, tensão, corrente, pressão, entre outros.
- SP ou SV: *Setpoint*. Valor desejado para variável do processo.
- MV: Variável manipulada. Variável sobre a qual o controlador atua para controlar o processo, como: posição de uma válvula, tensão aplicada a uma resistência de aquecimento, entre outros.
- Erro: Diferença entre a variável de processo e o seu valor desejado.
- Ação de controle: Define o modo no qual o controle atua sobre o MV na ocorrência de variação do erro. Esta ação de controle pode ser reversa ou direta.
- Ação reversa: Atua diminuindo o valor de MV na ocorrência de um erro positivo. Tipicamente utilizada em controles de aquecimento.
- Ação Direta: Atua aumentando o valor de MV na ocorrência de um erro negativo. Tipicamente utilizada em controles de refrigeração.
- K_P : Ganho proporcional. Parâmetro de ajuste do controle proporcional.

- K_I : Ganho integral. Parâmetro de ajuste do controle integral.
- K_D : Ganho derivativo. Parâmetro de ajuste do controle derivativo.

O esquema de controle PID tem o nome de seus três termos de correção, cuja soma constitui o valor da variável de manipulação, MV. Portanto, os termos proporcional, integral e derivativo são somados para calcular a saída do controlador. A equação apresenta a representação matemática mais usual do PID.

$$u(t) = MV(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (31)$$

2.10.2 CONTROLE PROPORCIONAL

O termo proporcional produz um valor de saída que é proporcional ao valor do erro atual. A resposta desse termo pode ser ajustada pela multiplicação do erro por uma constante K_P . O termo proporcional é dado por:

$$P_{out} = K_p e(t) \quad (32)$$

Um ganho proporcional elevado resulta em uma grande alteração na saída para uma dada variação no erro. Em contraste, um ganho pequeno resulta em uma pequena resposta de saída a uma grande variação no erro, e um controle menos sensível. A teoria de ajuste e a prática industrial indicam que o termo proporcional deve ser o contribuinte predominante do controle PID.

Contudo, quando a condição desejada é atingida, PV igual a SP. O termo proporcional resulta em MV igual a zero, ou seja, nenhuma energia é entregue ao processo, o que implica na volta do erro. Por isso, um controle proporcional puro nunca consegue atingir a estabilidade.

Na Figure 11(a) ilustra um K_p grande que estabiliza o sistema, porém muito abaixo do *setpoint*. Com a diminuição da banda proporcional, Figure 11(b), a estabilização ocorre mais próximo ao *setpoint*. Contudo, a redução excessiva do K_p , Figure 11(c), pode levar o processo a instabilidade.

O ajuste do ganho proporcional faz parte de um processo chamado sintonia de controle.

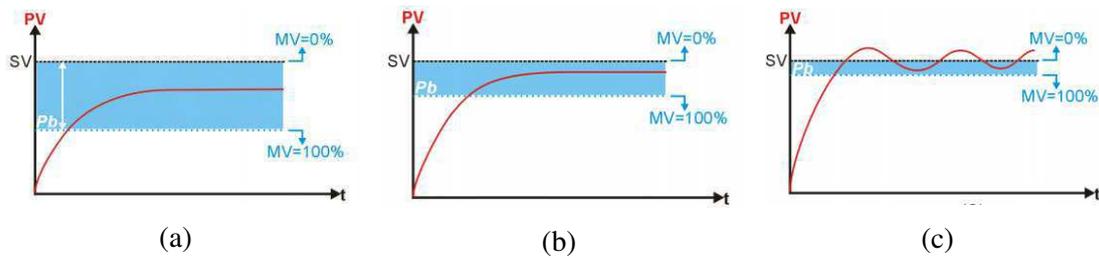


Figura 11 - Efeito do ganho proporcional no comportamento do PV.

2.10.3 CONTROLE INTEGRAL

O controle integral não é, isoladamente uma técnica de controle, pois não pode ser empregado separado de uma ação proporcional.

A contribuição do termo integral é proporcional tanto à magnitude quando a duração do erro. Na equação abaixo o termo integral do controle PID é representado matematicamente, o integrante é a soma instantânea do erro ao longo do tempo que resulta no erro acumulo que deveria ter sido previamente corrigido, este erro acumulado é multiplicado pelo K_I .

$$I_{out} = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (33)$$

O termo integrante acelera o processo de estabilização, além de eliminar o erro de estado estacionário descrito no controlador proporcional.

Na Figura 12(a) o sistema é estabilizado pelo controle proporcional, porém abaixo do *setpoint* (SV), dessa forma existindo o erro em regime permanente.

Observe na Figure 12 (b), no instante assinalado, foi incluída a ação integral. Neste ponto se observa uma gradual elevação do valor de MV e conseqüentemente a eliminação do erro em regime permanente

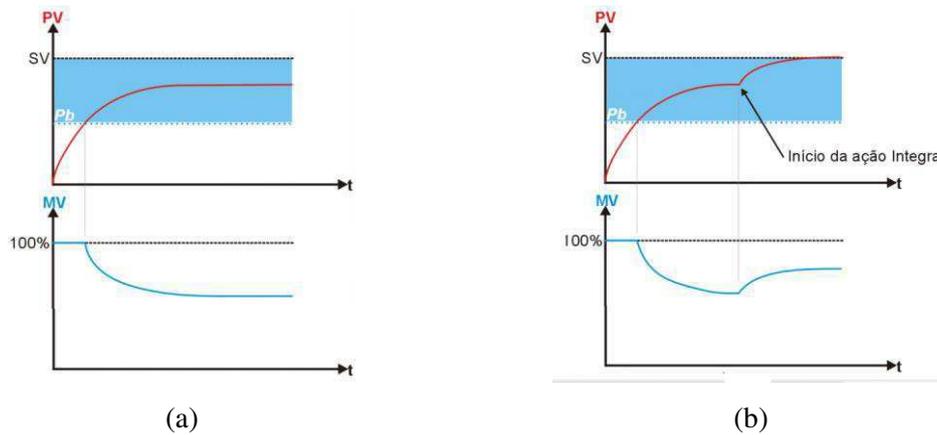


Figura 12- Efeito do termo integral no controle proporcional.

Sintetizando, o termo integral tem como objetivo eliminar o erro em regime permanente. Contudo, a adoção de um termo integral excessivamente atuante pode levar o processo a instabilidade, e a adoção de um tempo pouco atuante retardará demasiadamente a estabilização do processo.

2.10.4 CONTROLE DERIVATIVO

Assim como o controle integral, o controle derivativo não é, isoladamente, uma técnica de controle, visto que não pode ser empregada separado de um controle proporcional.

(34)

$$D_{out} = K_d \frac{d}{dt} e(t)$$

A contribuição do termo derivativo é calculada pela determinação da inclinação do erro ao longo do tempo multiplicada pelo ganho derivativo, K_D , como apresentado na equação acima.

O controle derivativo só atua quando há variação no erro. Se o processo está estável, o efeito da ação derivativa nula. Já durante a ocorrência de perturbação ou na partida do processo, o derivativo atuará no sentido de atenuar estas variações. Com isso, o controle derivativo prediz o comportamento do processo e, portanto, melhora o tempo e estabilidade do sistema.

Na Figure 13 compara respostas de um processo com controle proporcional e controle proporcional derivativo. Na Figure 13(a) o controle proporcional tem um ganho, K_P , que provoca um *overshoot* na resposta do processo. Uma solução para evitar o

overshoot seria aumentada o valor do ganho proporcional, mas isso aumentaria o erro em regime permanente. Uma outra solução é incluir o controle derivativo, Figure 13 (b), que reduz o valor de MV se PV está crescendo rapidamente. Ao antecipar a variação de PV, a ação derivativa reduz ou elimina o *overshoot* e as oscilações no período transitório.

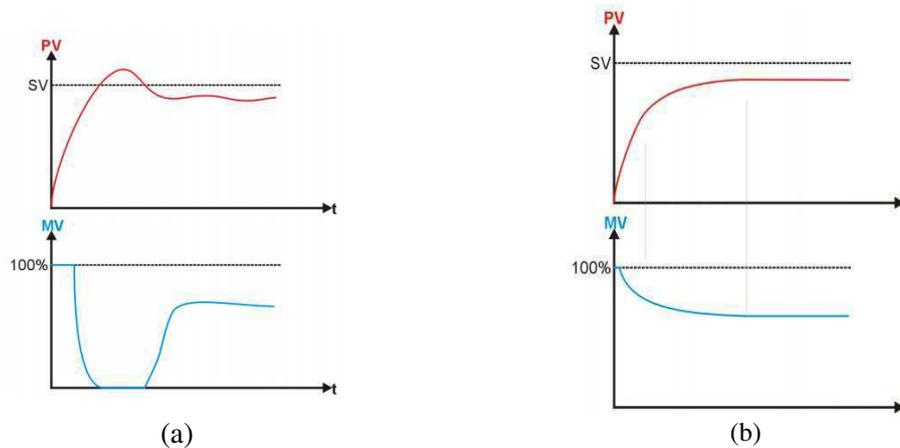


Figura 13 - Efeito da ação derivativa no controle proporcional.

2.11 SINTONIA DE CONTROLE PDI

Ao unir as três técnicas de controle conseguiu-se unir o controle proporcional com a eliminação do erro do controle integral e a redução de oscilações do controle derivativo, porém, se cria a dificuldade de ajustar a intensidade de cada um dos ganhos (K_P , K_I e K_D). Para definir tais valores existe um processo chamado sintonia de controle PID.

A bibliografia de controle apresenta diversas técnicas de sintonia, entre elas: método de Ziegler-Nichols, método SIMC, método de Cohen Coon, entre outras. Neste trabalho os parâmetros de controle aplicados serão baseados no método de Ziegler-Nichols.

Porém, antes de estudar tal método, é fundamenta a compreensão do efeito de cada parâmetro do PID sobre o desempenho do controle. A Tabela 2 resume o efeito de cada um dos parâmetros sobre o desempenho do sistema.

Tabela 2 - Efeito dos Parâmetros sobre o sistema.

| Parâmetro | Ao aumentar, o processo ... | Ao diminuir, o processo ... |
|-----------|--|---|
| K_p | Torna-se mais lento; Geralmente se torna menos oscilante; Tem menos <i>overshoot</i> . | Torna-se mais rápido; Mais oscilante; Maior ocorrência <i>overshoots</i> . |
| K_i | Torna-se mais rápido; Mais instável ou mais oscilante; Tem mais <i>overshoots</i> . | Mais lento; Mais estável ou menos oscilante; Menor ocorrência <i>overshoots</i> . |
| K_d | Torna-se mais lento; Tem menos <i>overshoots</i> . | Torna-se mais rápido Tem mais <i>overshoots</i> . |

2.11.1 SINTONIA DO CONTROLADOR PID PELO MÉTODO DE ZIEGLER-NICHOLS

Ziegler e Nichols sugeriram regras para sintonia de controladores PID baseadas na resposta experimental ao degrau ou no valor de K_p que resulta em uma estabilidade marginal, quando somente uma ação proporcional é utilizada (Ogata, 2010).

Este método se baseia nas constantes características da resposta do sistema a uma entrada degrau. A partir dessas constantes, o atraso L e a constante de tempo T , Ziegler e Nichols sugeriram os valores dos parâmetros de acordo com a fórmula que aparece na Tabela 3.

Tabela 3 - Tabela de parâmetros - Método de Ziegler Nichols.

| Controlador | K_C | τ_i | τ_d |
|-------------|-----------------------|----------|----------|
| PID | $1.2 \frac{\tau}{LK}$ | $2L$ | $0.5L$ |

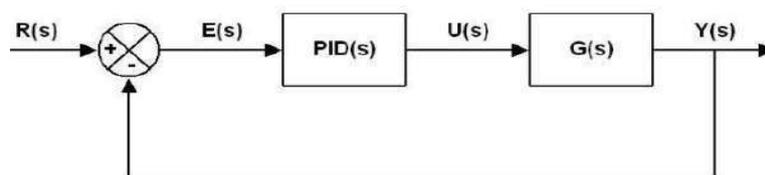


Figura 14- Malha de controle PID.

2.12 - BATERIAS

A bateria é um elemento que armazena energia elétrica. De acordo com reações químicas internas provocadas por alterações nos terminais externos, esta energia pode ser armazenada ou fornecida. Uma bateria não produz energia.

A operação da bateria dar-se pelo processo de reação química de oxidação e redução, sendo oxidação um processo que libera os elétrons, enquanto a redução é um processo que consome os elétrons (Lazzarin, 2006).

A bateria consiste de quatro elementos: o ânodo de matéria eletropositivo, o cátodo que deve ser de matéria eletronegativo, o eletrólito e o separado

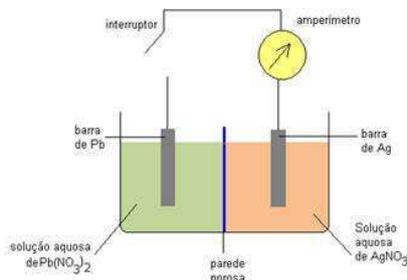


Figura 15 - Elementos de uma célula da bateria.

As baterias podem ser classificadas em dois tipos: as recarregáveis e as de uso únicos. As baterias recarregáveis apresentam um número ciclos, carga e descarga, que a célula pode fornecer energia, enquanto, a de uso único oferece apenas um ciclo de trabalho.

Existem diversos tipos de baterias, que possuem projeto e diferenças construtivas que resulta em diversas características diferentes. Os principais tipos de bateria existem no mercado são: chumbo ácido, níquel metal hidreto, lítion íon e níquel cádmio. Entre estas, será utilizada a bateria de chumbo ácido.

2.13 - BATERIA CHUMBO ÁCIDO

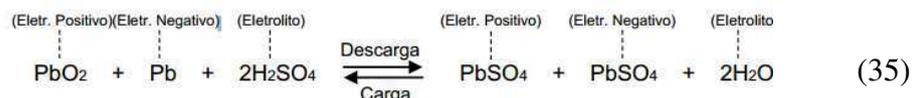
Primeiramente, é apresentado uma síntese dos parâmetros e definições fundamentais no entendimento das baterias.

- Célula: é o dispositivo eletroquímico capaz de suprir a energia resultante de uma reação química;

- Bateria ou acumulador: é um conjunto de células dispostas, em serie ou paralelo, para obtenção tensão e capacidade de corrente requerida;
- Capacidade (C): é a corrente máxima que uma bateria pode fornecer continuamente por um número determinado de horas, sem causar sua inutilização. A capacidade é medida em ampères horas;
- Curva de descarga: é o comportamento da tensão em função do nível de descarga da bateria. Na curva são destacados três valores: tensão de pico, tensão nominal e tensão de bateria descarregada;
- Auto descarga: é a descarga provocada pelas correntes internas nas baterias, que ocasionam perdas de carga;
- Vida útil: número de ciclos de carga e descarga que uma célula recarregável pode fornecer.

2.13.1 ASPECTOS QUÍMICOS

A bateria de chumbo ácido é composta de placas positivas de dióxido de chumbo, placas negativas de chumbo e eletrólito de ácido sulfúrico. A equação abaixo representa a reação química de carga e descarga da bateria.



Desse processo químico, os principais problemas que afetam a vida útil da bateria são: a corrosão do eletrodo positivo, a degradação do material ativo por conta da fadiga mecânica e sulfatação dos finos cristais de PbSO₄ em grânulos PbSO₄.

2.13.2 APLICAÇÕES

As baterias podem ser classificadas em três tipos, de acordo com sua aplicação: bateria automotiva, bateria estacionária e bateria transitória.

As baterias automotivas usadas em automóveis têm como características placas muito finas, porém com área de contato com o eletrólito grande. Isto possibilita o

fornecimento das elevadas correntes de partidas dos veículos. Estas baterias são projetadas para uma descarga máxima de 5% de sua capacidade total.

As baterias transitórias ou de ciclo profundos, têm placas muito mais espessas em comparação as baterias automotivas. Esta característica garante a capacidade de alto grau de descarga, 80%, por vários ciclos durante sua vida útil.

As baterias estacionárias possuem características de construção que são intermediárias entre as automotivas e transitórias, sendo utilizadas em UPS.

2.13.3 ASPECTOS OPERACIONAIS DAS BATERIAS DE CHUMBO ÁCIDO

Inicialmente, é necessário verificar os termos usados na literatura prática para este tipo de bateria, para isso foi usado o manual técnico de uma grande fabricante de bateria (MOURA, 2010).

- Tensão nominal: Definida pelo número de células de chumbo ácido, por definição, cada célula, tem 2 V de tensão nominal.
- Tensão final de carga: tensão na qual o acumulador é considerado tecnicamente descarregado.
- Tensão de flutuação: tensão acima da tensão de circuito aberto, cuja função é manter o acumulador no estado de plena carga.
- Carga de equalização: carga efetuada em nível de tensão maior que a tensão de flutuação, realizada com a finalidade de promover a mistura dos eletrólitos e equalizar às tensões individuais entre os elementos e monoblocos. A utilização de baterias de chumbo ácido em UPS requer uma carga de equalização a cada seis meses.

Durante o processo de carga e descarga, a tensão na bateria varia em função da corrente fornecida ou retirada, do tempo de carga ou descarga, da temperatura e das características construtivas. As curvas das variações de tensão durante a carga ou descarga em função da corrente e do tempo são ilustradas nas Figure 16, Figura 17 e Figure 18.

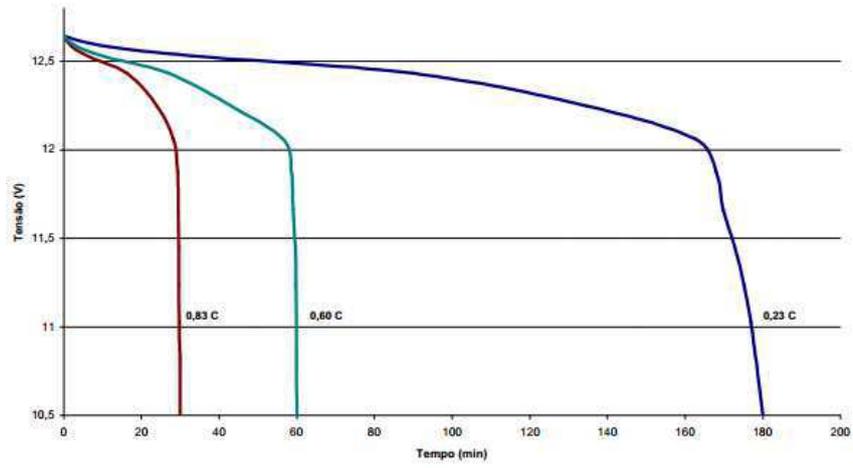


Figura 16- Tensão nos terminais da bateria de chumbo ácido durante uma descarga.

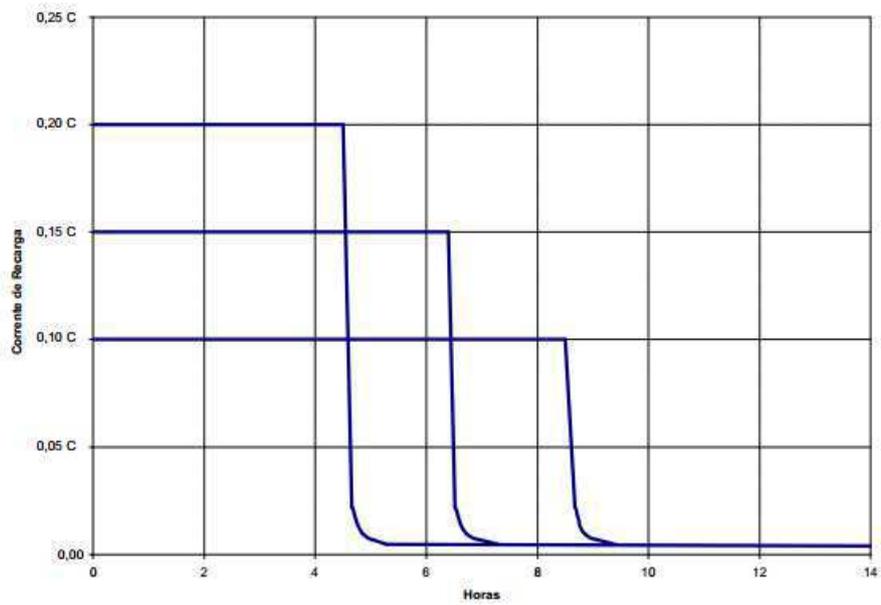


Figura 17 - Corrente injetada na bateria durante a sua descarga.

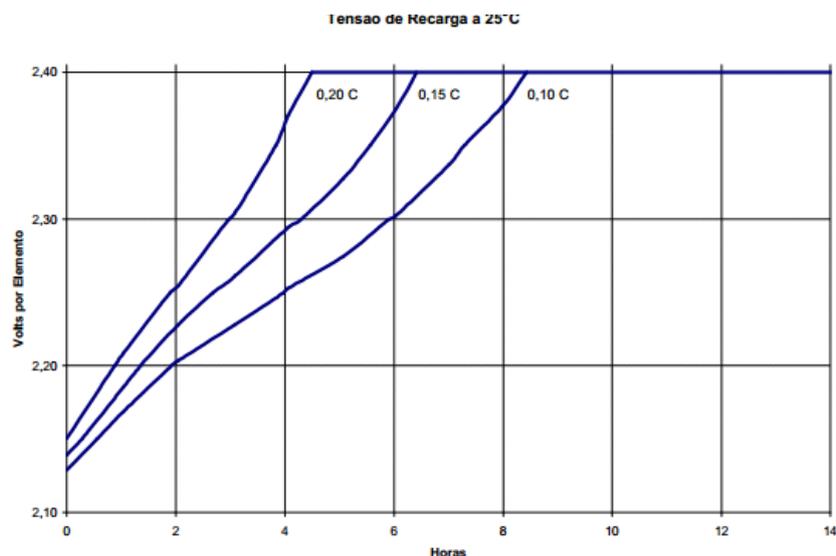


Figura 18 - Tensão nos terminais da bateria durante a sua recarga.

A Figura 16 ilustra as curvas de comportamento de tensão da bateria durante a descarga com níveis de corrente de 0,83, 0,6 e 0,2 da sua capacidade nominal (C). Nota-se que quanto maior a corrente, menor o tempo para descarga, e abaixo de 12 V a tensão diminui rapidamente até a tensão de fim de carga 10,5 V.

As Figuras 17 e 18 mostram as curvas de tensão e corrente durante a recarga da bateria com níveis de corrente 0,2, 0,15 e 0,1 da sua capacidade nominal. As baterias de chumbo ácido não aceitam cargas rápidas, por isso a corrente de carga recomendada é entre 10% e 20% da capacidade da bateria.

Os níveis de tensão de flutuação e equalização geralmente são especificados para 25°C. Esses valores precisam ser corrigidos com a variação da temperatura, para evitar um carregamento incorreto, que pode ocorrer devido a recarga insuficientes ou sobre cargas na bateria. O procedimento para os cálculos dos valores corrigidos é apresentado na norma (IEEE Std 1188-1996, 20 Aug, 1996). Segundo esta norma, para cada 8° C de aumento na temperatura a vida útil da bateria pode ser reduzida até a metade.

A Figura 19 mostra o efeito da variação de temperatura na vida útil da bateria das baterias de válvulas com permeabilidade selada. Esse tipo de bateria se caracteriza pela boa imunidade à temperatura, ainda assim uma variação de 45° C diminui em 50% a vida útil da bateria.

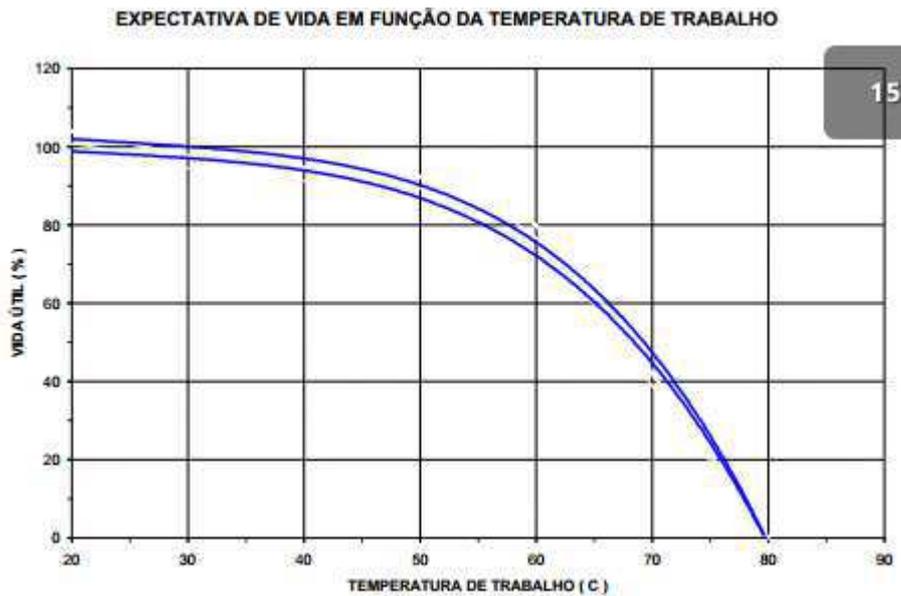


Figura 19 - Expectativa de vida em função da temperatura de trabalho.

A Figure 20 expõe o comportamento da vida útil de duas famílias de bateria estacionárias da marca Moura (MF e MC) em função da profundidade de descarga. Nota-se que há uma diminuição exponencial na vida útil das baterias com o aumento da profundidade de descarga.

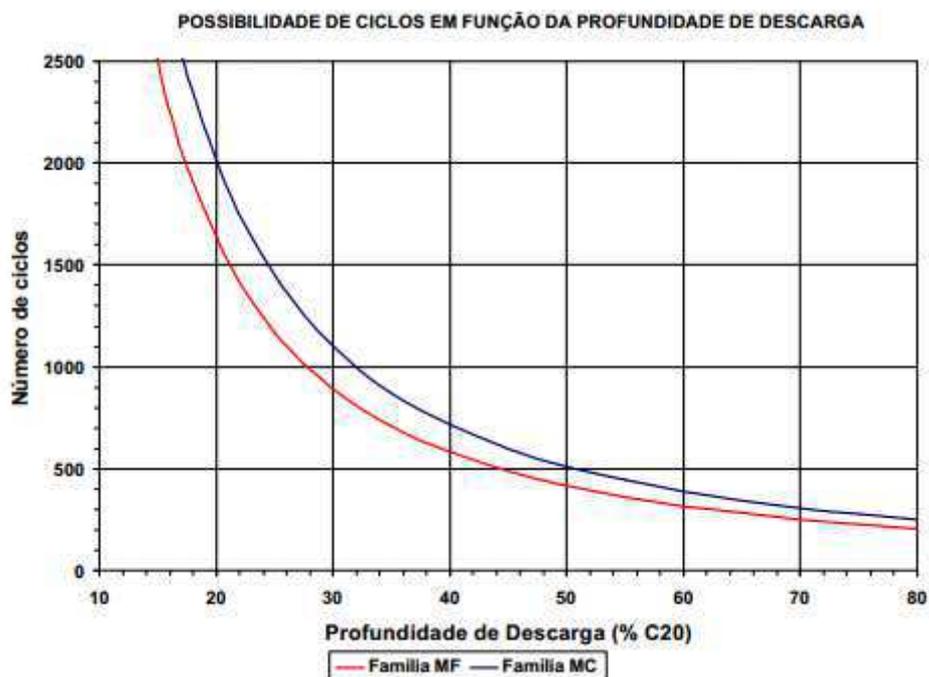


Figura 20 - Possibilidade de ciclos em função da profundidade de descarga.

Em condições normais de uso, isto é, em flutuação com descargas esporádicas, à temperatura recomendada de 25°C e manutenção adequada, a capacidade da bateria

umenta no início da vida, até um valor limite que depende das características construtivas. O acumulador é considerado em “final de vida” quando sua capacidade atingir 80% da capacidade nominal. A vida útil projetada em condições de flutuação e temperatura de 25°C é de 4 anos.

2.14 - MÉTODOS DE CARGA

Os métodos de carga das baterias de chumbo ácido são diferenciados conforme a característica da aplicação de tensão e corrente. De maneira geral há três métodos bem definidos de carga, que se caracterizam por aplicar tensão constante, corrente constante ou potência constante.

Os métodos de carregamento usam essas três características para prolongar a vida útil da bateria e garantir o desempenho total da bateria. Para uma correta implementação desses métodos são necessários diversos sensores, tais como: sensores de corrente, de tensão, de temperatura, além de um algoritmo de carga implementado de forma digital, por meio de microcontroladores, DSPs ou CIs dedicados a esta função.

2.14.1 MÉTODO DE TENSÃO CONSTANTE

Este é o método mais utilizado no carregamento de bateria devido a sua facilidade de implementação. Consiste na aplicação de uma tensão constante, nos terminais da bateria. Esta tensão é definida de acordo com a característica de carga e a temperatura da bateria, usualmente, 2,3 V por célula. A imprecisão nesta tensão de carregamento provoca sobrecargas ou o não carregamento total da bateria, assim afetando o desempenho da mesma.

Este método tem como inconveniente o grande fluxo de corrente demandada no início do processo de carregamento. Este inconveniente tornaria o método inviável economicamente, visto que seria necessário um carregador com grande capacidade de carga. Isso é contornado com a limitação da corrente inicial. Com isso, esse método também é chamado de tensão constante e corrente constante.

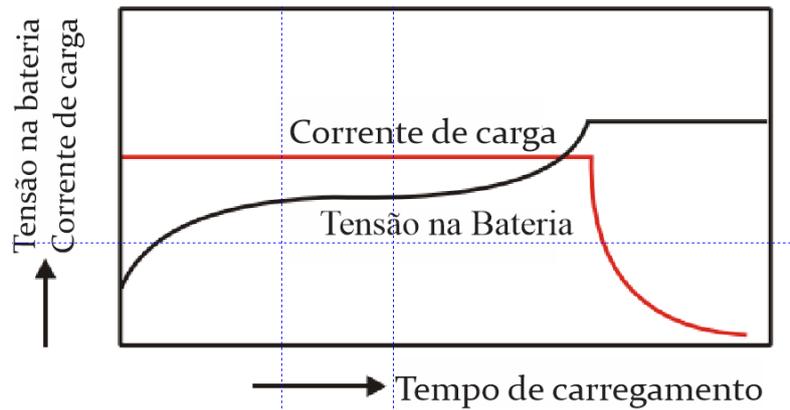


Figura 21 - Curvas características do método de tensão e corrente constantes.

2.14.2 MÉTODO DA CORRENTE CONSTANTE

Esse método consiste no carregamento da bateria com corrente constante. Para tanto, um circuito de elevado custo é necessário para garantir uma corrente constante precisa. Consequentemente, este método é raramente utilizado no carregamento de baterias.

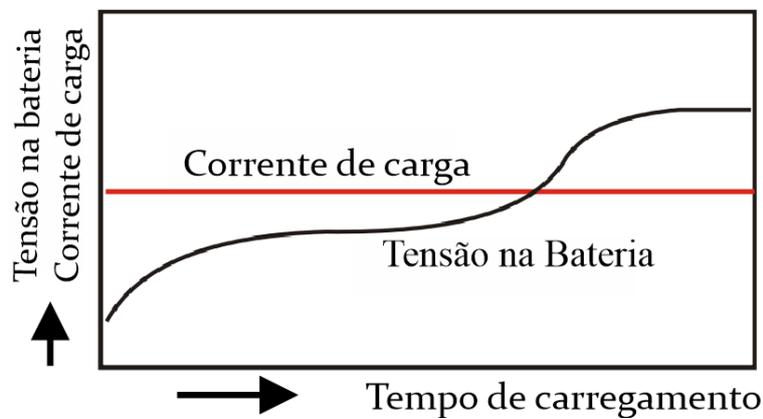


Figura 22 - Curvas características do método de tensão e corrente constantes.

2.14.3 MÉTODO DE DOIS NÍVEIS DE TENSÃO

O Método de Dois Níveis de Tensão (MDNT) consiste em dispositivos de tensão constante. Como ilustrado na Figura 23, inicialmente a bateria é carregada com uma corrente controlada de no máximo $0,3C$, isto ocorre até a tensão na bateria atingir o nível

da tensão de fim de carga, 2,45 V por célula. Posteriormente é aplicada nos terminais da bateria uma tensão de flutuação, a fim de manter a bateria no estado de plena carga.

Este método possibilita um rápido carregamento tanto em bateria em ciclo de trabalho, quanto baterias em *StandBy*. Além disso este método assegura a impossibilidade da ocorrência de sobre cargas, mesmo após longo período de carregamento.

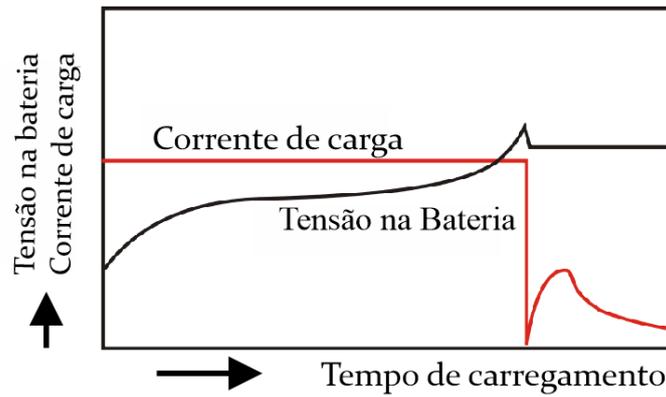


Figura 23- Curvas características do método de dois níveis de tensão

3 METODOLOGIA

O trabalho foi realizado visando o desenvolver um protótipo de carregador de baixo custo baseado no conversor *buck*. Foi ainda utilizado o método de carregamento MDNT e a plataforma Arduino.

A escolha do método de carregamento foi realizada sobre dois pilares: a prevenção vida útil da bateria e o tempo de carregamento. Desta forma, elegeu-se o MDNT que, recentemente, começou a ser usado para carregamento rápido nas baterias de chumbo ácido. Este trabalho, o método de carregamento foi implementado digitalmente em uma plataforma micro controlada. A plataforma Arduino propiciou, dessa maneira, a execução das atribuições do projeto de forma simples, prática e de baixo custo.

3.1 DIMENSIONAMENTO DO CONVERSOR *BUCK*

A escolha dos parâmetros e requisitos para o dimensionamento do conversor foram definidos a partir da teoria apresentada no Capítulo 2. Além da teoria, considerou-se os componentes disponíveis no Laboratório de Alta Tensão (LAT) da UFCG.

Todos os cálculos realizados para o correto funcionamento do conversor dependem da definição dos seguintes parâmetros: tensão da fonte de alimentação, tensão de saída do conversor, frequência de chaveamento, variação admissíveis na tensão e corrente do conversor.

A tabela a seguir apresenta os valores dos parâmetros usados para o dimensionamento do conversor

Tabela 4 - Parâmetros do protótipo.

| Parâmetros | Valores |
|--|--------------------------------------|
| Faixa de tensão de entrada (V_s) | 15 a 18 V |
| Valor máximo de tensão de saída (V_0) | 15 V |
| Variação da tensão de saída (ΔV_0) | 200 mV |
| Corrente de saída (I_0) | 2 A |
| Variação da corrente de saída (I_0) | 60 mA |
| Comutação do transistor | Modulação por largura de pulso (PWM) |

| | |
|-------------------|-------------|
| Frequência do PWM | 32,5 kHz |
| Modo de operação | Contínuo |
| Bateria | 12 V e 7 Ah |

3.2 CALCULO DO CAPACITOR E INDUTOR

Considerando o regime permanente e utilizando as equações demonstrada no decorrer da revisão bibliográfica, capítulo 2. O valor da capacitância e indutância é, respectivamente, dado por:

$$C_{\min} = \frac{V_0(1 - D)}{\Delta V_0 8 L f^2} = 185 \mu F \quad (36)$$

$$L = \frac{V_0(V_{S_{MAX}} - V_0)}{V_{S_{MAX}} f \Delta I} = \frac{15(18 - 15)}{18 \times 32500 \times 0,06} = 1,28 \text{ mH} \quad (37)$$

De posse destes valores, o indutor foi enrolado nas dependências do LAT. Foram produzidos 3 indutores com núcleos diversos, como ilustrado na Figura 24. Os dois primeiros eram núcleos de ferrite e de aço laminado, disponíveis no LAT. Entretanto, estes núcleos não apresentaram respostas satisfatórias quando submetidos à frequência de chaveamento do circuito. Já o terceiro núcleo, construído de liga nano-cristalina, foi disponibilizado pelo Laboratório de Instrumentação e Metrologia Científicas, o LIMC, que mostrou uma resposta satisfatória para o protótipo proposto.



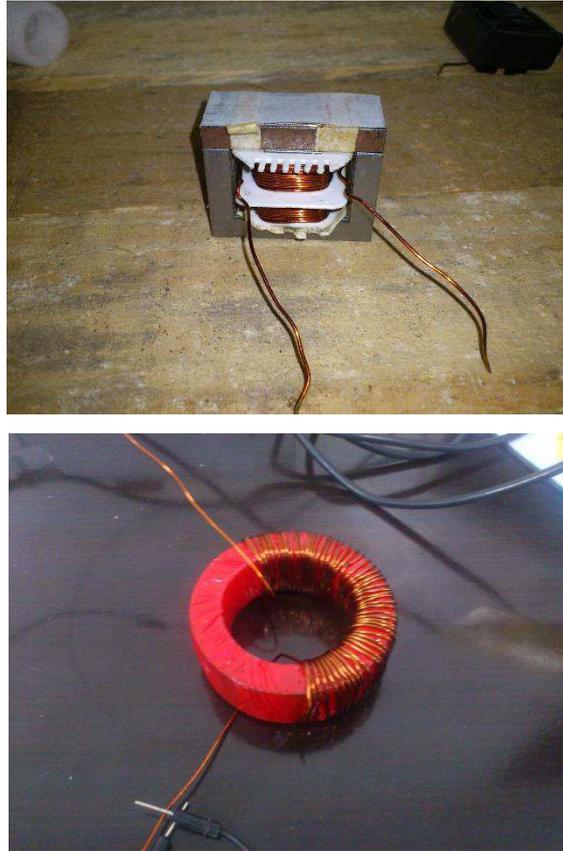


Figura 24 – Indutores enrolados para o protótipo do carregador de baterias.

Efetuiu-se a seleção do capacitor, cujo o valor comercial mais se aproximasse da capacitância mínima calculada. Portanto, utilizou-se um capacitor de 220 μ F.

3.3 MOSFET

Após análise dos transistores disponíveis no LAT, utilizou-se mosfet IRF8010 para função de interruptor do conversor DC-DC. Visto as baixas perdas no interruptor, a escolha deste mosfet se apresentou satisfatória, apesar da corrente direta ser superdimensionada.

3.4 DIODO

Devido a necessidade de um diodo rápido que garantisse o perfeito funcionamento do conversor *buck*, foi escolhido o diodo mais rápido disponível no LAT, o diodo Schottky.

3.5 CONVERSOR *BUCK* COM CHAVE REFERENCIADA À TERRA

Conforme destacado na seção 2.7.2. o uso do Conversor *Buck* com Chave Referenciada à Terra apresenta algumas vantagens à construção do conversor *buck*, em especial a simplicidade de implementação.

Em situações em que a carga atendida pelo circuito *buck* não precisa ter referência com a terra, como é o caso do carregamento de baterias, o CBCRT Figura como uma boa opção. Na Figura 25 pode-se observar uma versão desse circuito, denominado no CBCRT.

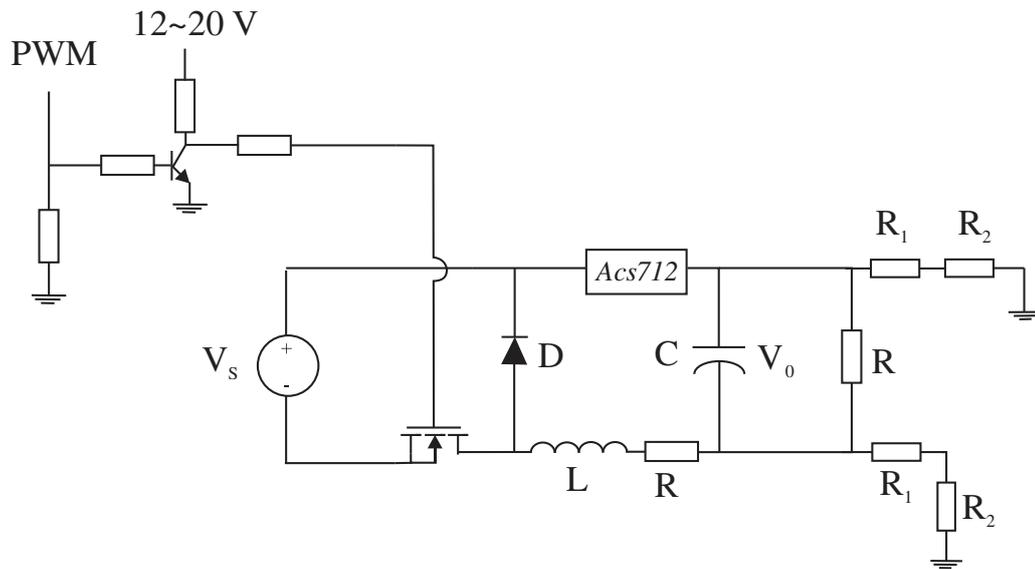


Figura 25 – Diagrama do conversor *Buck* com Chave Referenciada à Terra - CBCRT.

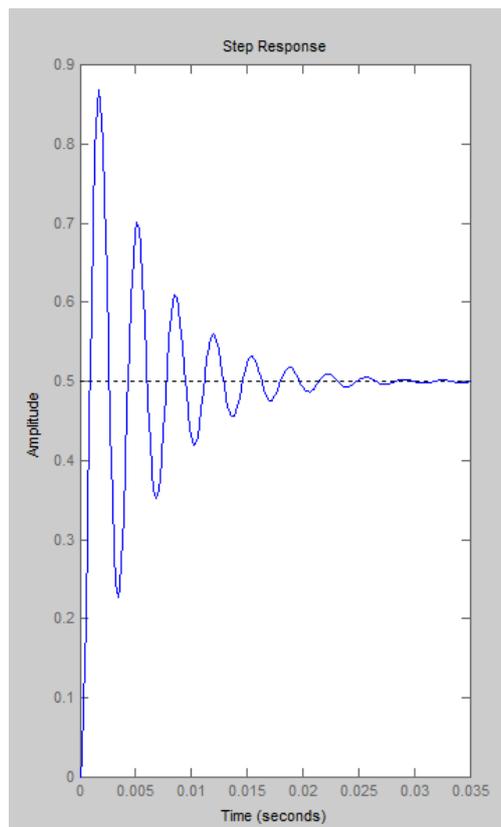
Apesar da falta de referência bibliográfica, essa topologia com testada com situações, nas quais se empregaram vários a cargas e o ciclo de trabalho. Assim, conforme apresentou-se robusta, a topologia foi escolhida para implementação do método de carregamento e construção do protótipo.

4 SIMULAÇÃO

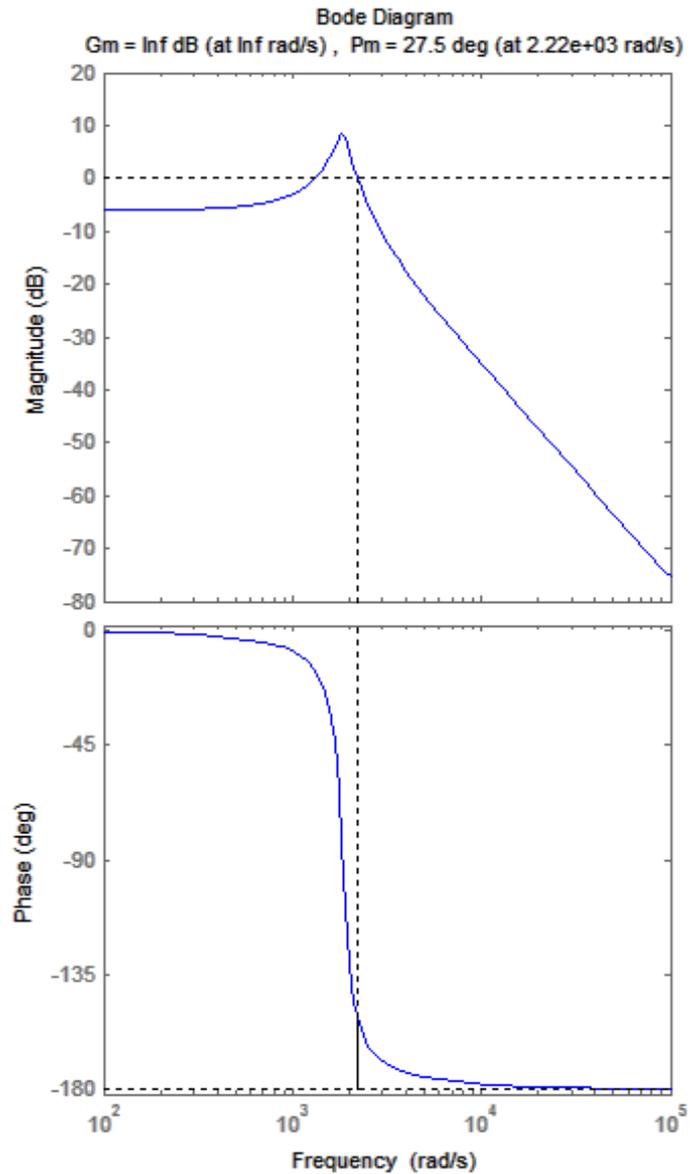
Esta etapa do trabalho foi realizada visando a simulação do conversor controlado pelo método de carga, ligado a uma bateria de chumbo ácido. A ferramenta Simulink® propiciou, dessa maneira, a execução das atribuições de simulação de forma prática.

A simulação foi dividida em duas etapas: controle de corrente e controle de tensão. Como o método de carregamento impõe, inicialmente, corrente constante, foi implementado um controle PI, usando a teoria descrita em 2.8

Posteriormente, realizou-se o controle de tensão pelo mesmo método de controle. Anteriormente foi realizada uma análise da resposta ao degrau e do ganho de fase do sistema e do sistema com controlado de tensão, na Figura 26 pode-se observar a resposta ao degrau do sistema e o diagrama de Bode para o circuito original, sem nenhum tipo de controle.



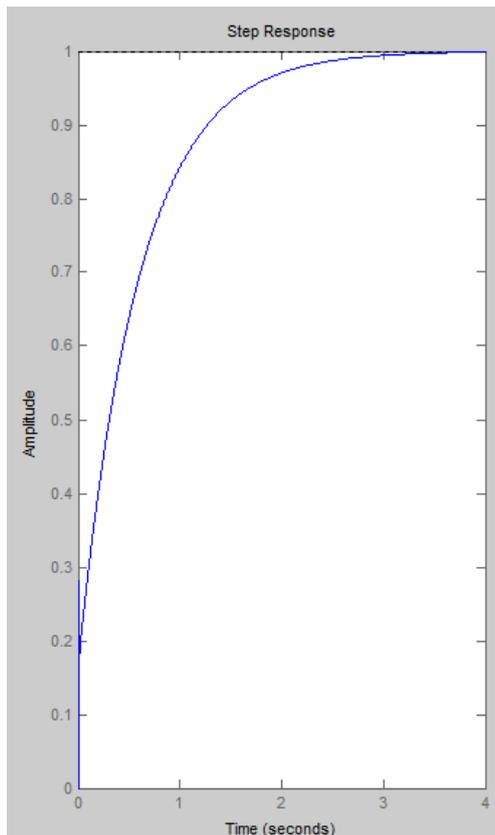
(a)



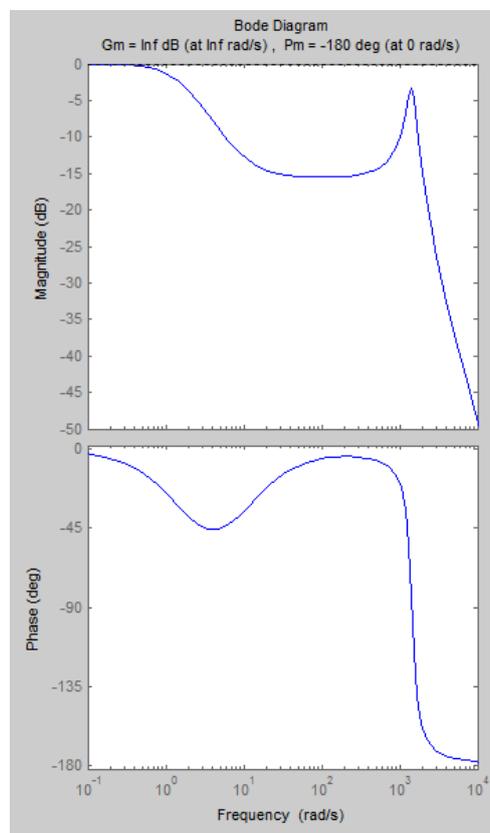
(b)

Figura 26 - (a)resposta ao degrau; (b)Diagrama de body do sistema sem controlador.

Na Figura 27 observa-se a resposta do sistema controlado por meio do controlador PI. É possível notar que a margem de fase aumentou e o comportamento da resposta ao degrau mostrou-se menos oscilatória.



(a)



(b)

Figura 27 - (a) resposta ao degrau; (b) diagrama de Bode do sistema com o controlador.

4.1 CONTROLE DE CORRENTE.

O controle de corrente representa a primeira etapa do método de carregamento, com isso, escolheu-se um *setpoint* no valor de 1,2 A, o que diz respeito a 17% da capacidade da bateria utilizada.

A figura abaixo apresenta a simulação no Simulink®

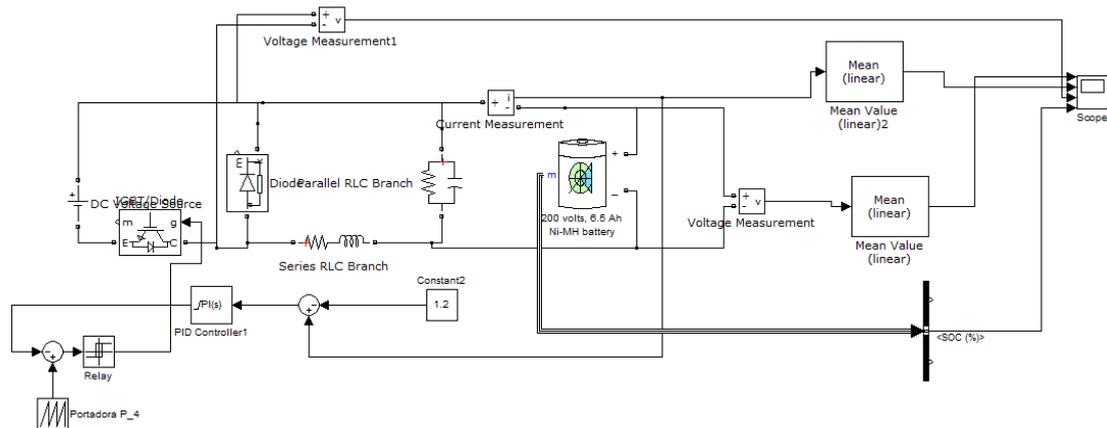
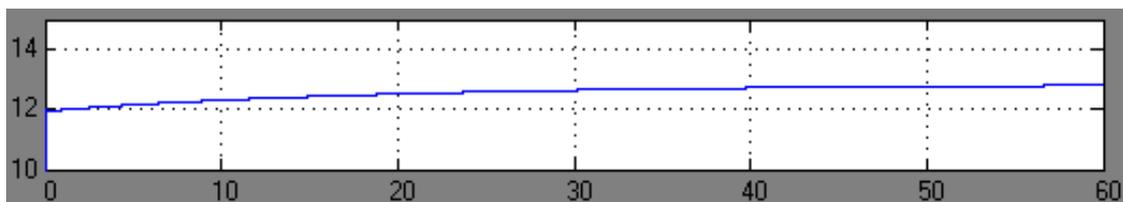
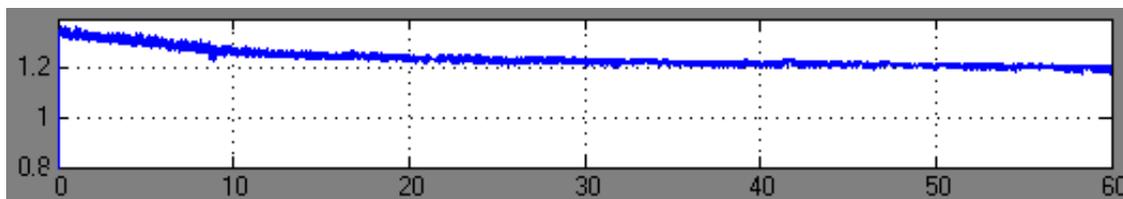


Figura 28 - Diagrama de simulação do controle de corrente

O controle projetado propiciou uma saída nos valores desejados. Na Figura 29 apresenta-se o resultado da simulação para um processo de carga da bateria. Os resultados da simulação, desta maneira, apresentam resultados para um curto intervalo de tempo, cerca de 60 s para cada simulação.



(a)



(b)

Figura 29 – (a)Tensão de saída; (b)corrente de saída.

4.2 CONTROLE DE TENSÃO

De forma análoga ao controle de corrente, o controle de tensão foi realizado baseado na teoria do tópico 2.6. Foi escolhido um *setpoint* igual a tensão de fim de carga, 14,7 V. A seguir são apresentados os diagramas de simulação e os gráficos dos resultados dessa simulação.

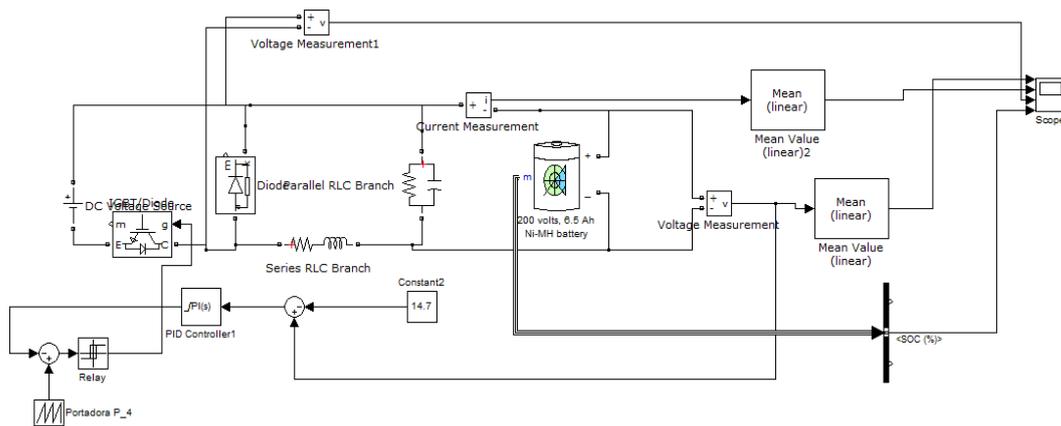
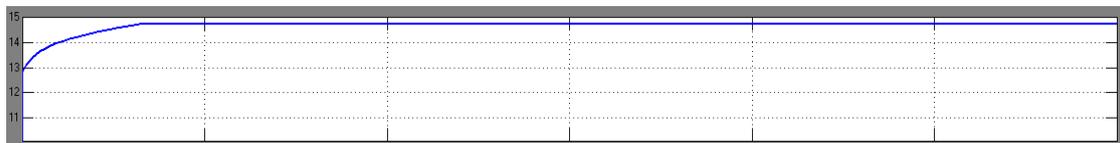


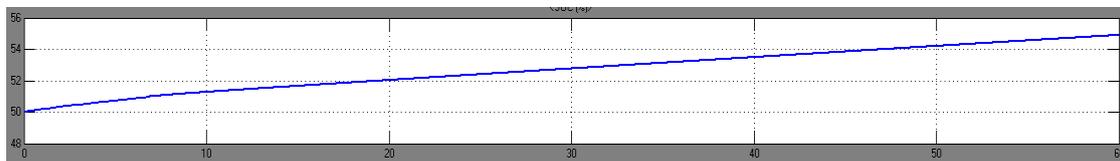
Figura 30 - Diagrama de simulação do controle de tensão



(a)



(b)



(c)

Figura 31 – (a) Diagrama do circuito simulado (b) Tensão e corrente de saída do conversor com controlador de tensão; (c) Nível de carga da bateria.

5 IMPLEMENTAÇÃO NO MICROCONTROLADOR

O método de carregamento foi implementado digitalmente na plataforma Arduino. No anexo A é apresentado o código comentado implementado.

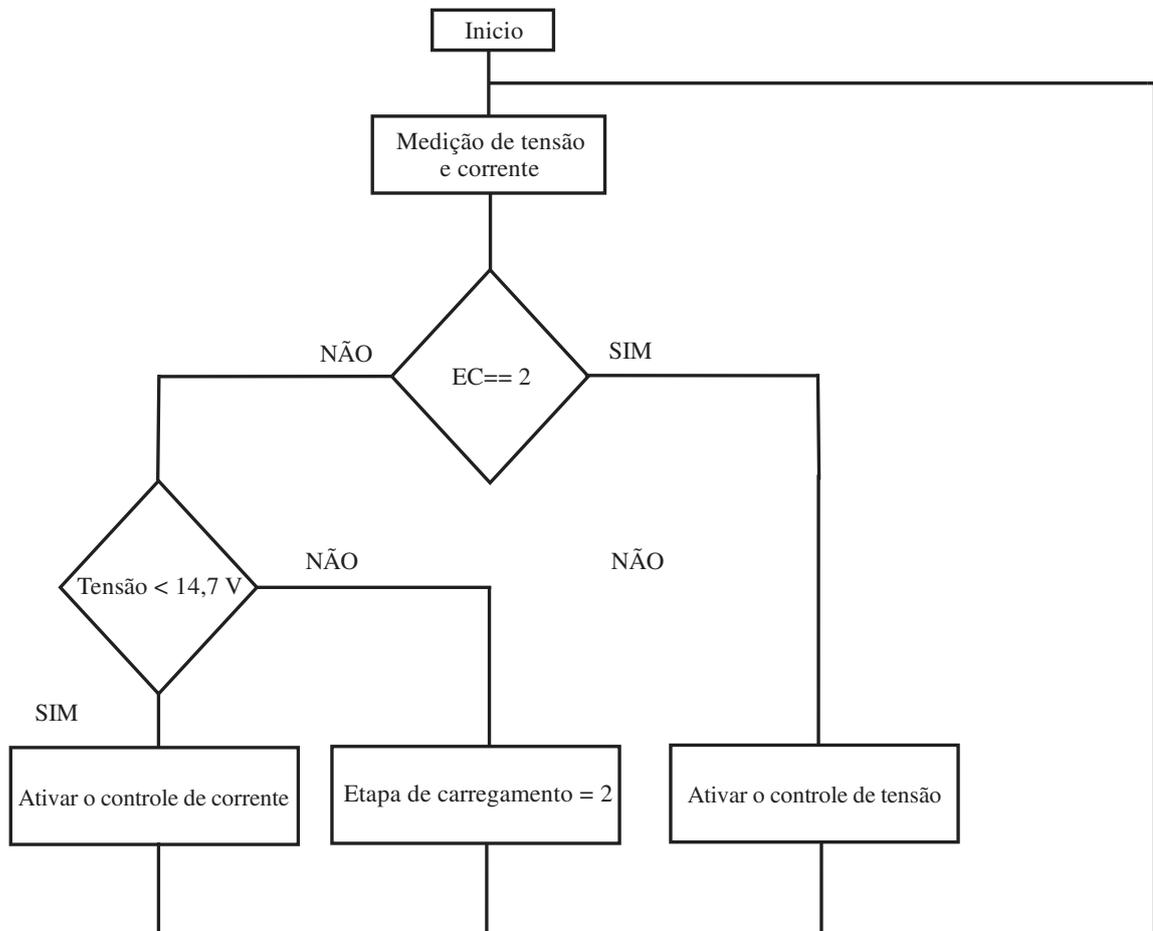
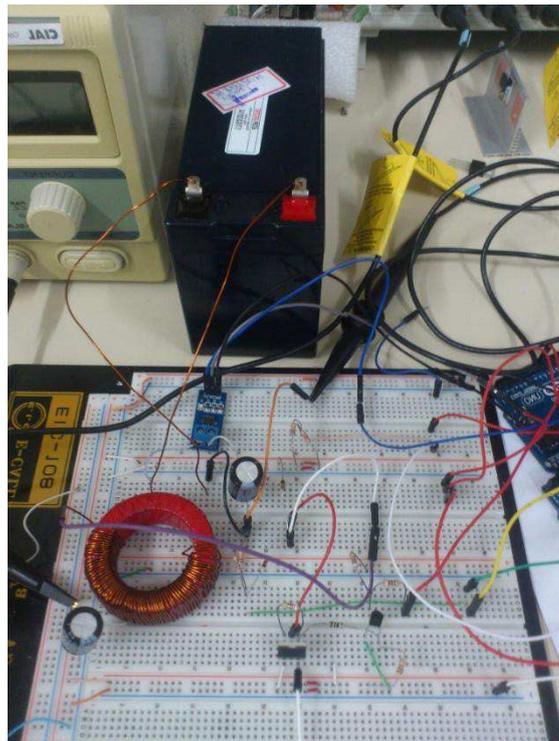


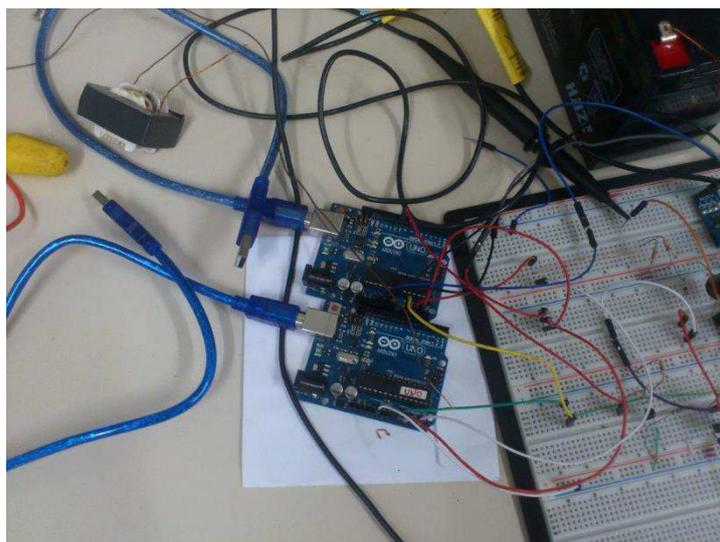
Figura 32- Diagrama de blocos do controle

6 RESULTADO

Os resultados deste trabalho estão resumidos nas formas de ondas de um protótipo de carregador de bateria com método de carregamento MDNT Na Figura abaixo é mostrado o circuito montado.



(a)



(b)

Figura 33 - (a)Foto do microcontrolador; (b) Foto do conversor *buck*.

Foram utilizadas três baterias para serem carregadas pelo protótipo, sendo uma nova e outras duas retiradas de um *nobreak*, denominadas Bateria 1 e Bateria 2. A seguir são apresentadas fotos das três baterias.



(a)



(b)

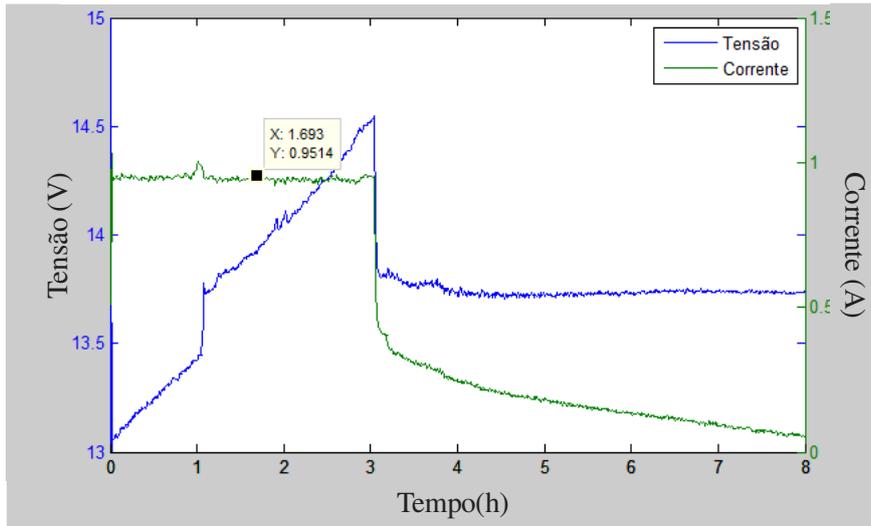


(c)

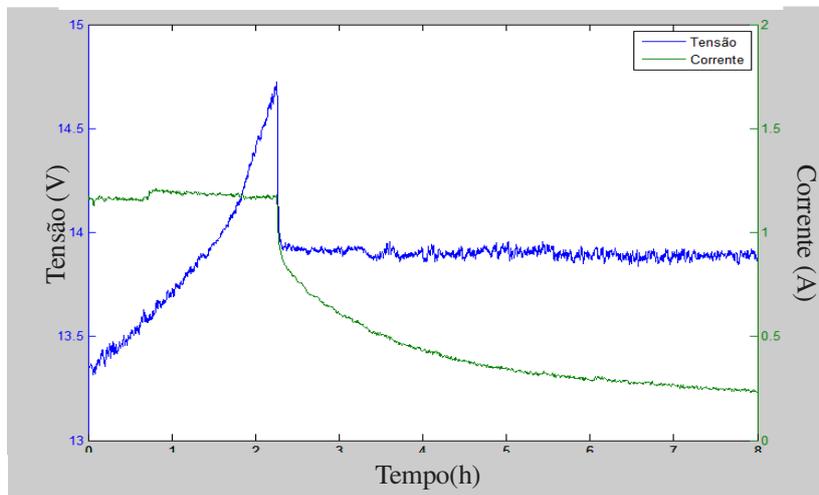
Figura 34 – (a) Bateria nova; (b) Bateria usada 1; (c) Bateria usada 2.

Devido a potência da fonte de tensão utilizada, apresentada na foto a seguir, não foi possível carregar a bateria com a corrente 0,3C, que corresponde 30 % da capacidade da bateria. Assim o carregamento foi realizado com uma corrente entre 1 e 1,2 A, corrente máxima disponível pela fonte com tensão de saída de 18 V.

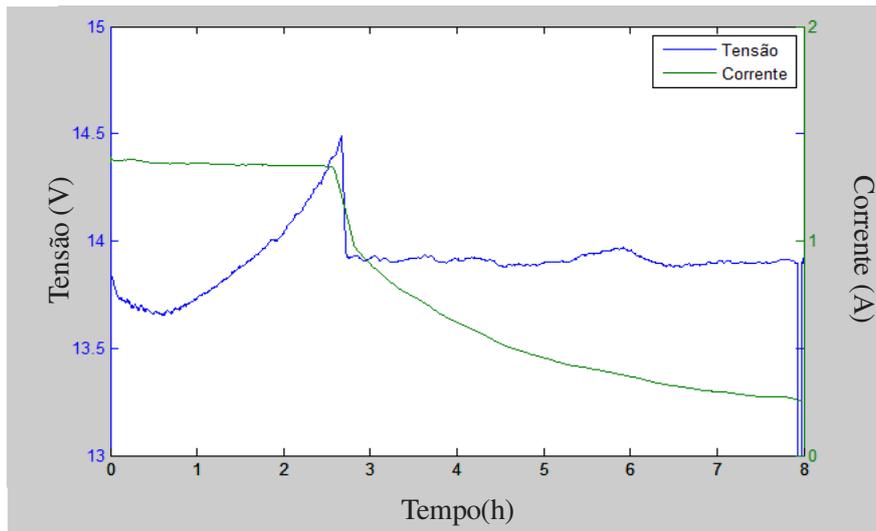
Desta forma os ciclos de carga das baterias foram de oito horas. Nos gráficos, apresentados na Figura 35, ilustras as curvas de corrente e tensão durante o carregamento das três baterias.



(a)



(b)



(c)

Figura 35 – (a) Curva de carga da bateria nova.; (b) Curva de carga na bateria 1;(c) Curva de carga da bateria 2.

Os gráficos apresentam uma variação considerável, visto que se utilizou um controle PID. Após análise no circuito, notou-se que havia uma pequena flutuação na tensão de referência do microcontrolador que resultava em pequenas variações nas variáveis utilizadas no controle. Contudo, estas variações não comprometeram o desempenho do protótipo, levando em consideração a teoria do método de carga.

7 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo elaborar um protótipo de um carregador de bateria de baixo baseado no conversor *buck* e no método de carregamento CBCRT utilizando a plataforma microcontrolada. Nesse sentido, a principal preocupação do trabalho está voltada o prolongamento da vida bateria.

Uma revisão bibliográfica foi realizada a fim de estudar as técnicas empregadas na carga das baterias, de forma que garantisse seu perfeito manuseio das mesmas.

Abrangendo os aspectos práticos, o conversor *buck* foi escolhido para a confecção do protótipo por apresentar estrutura simples e de fácil implementação. A plataforma Arduino facilitou e barateou a implementação do método de carregamento, considerado nas referências bibliográficas de alto custo. Porém essa plataforma de desenvolvimento apresentou limitações, tais como número de conversor analógicos/digital e limitação nas frequências disponível para PWM.

O método de carregamento eleito proporciona um carregamento rápido e sem elevação da temperatura da bateria. Porém esse método não pode ser utilizado diretamente no carregamento de bateria com descargas profundas, isto é a principal deficiência desse método.

Por tudo que foi referido anteriormente, este projeto permitiu uma aprendizagem aprofundada na área de sistemas de conversão de energia, esta área está em constante desenvolvimento, visto que novas fontes de energia renováveis necessitam cada vez mais das baterias. Desta forma, os objetivos a proposta no trabalho foram alcançados.

A seguir é apresentada uma tabela com o custo de cada componente utilizado no protótipo.

Tabela 5 - Estimativa do custo do carregador.

| Componente | Quant. | Valor (R\$) |
|-----------------------------|---------------|--------------------|
| Resistor 9,1 K Ω | 3 | 0,30 |
| Resistor 1 K Ω | 1 | 0,1 |
| Capacitor 220 μ F | 1 | 0,20 |
| Indutor 1,5 mH | 1 | 2,50 |
| Microcontrolador ATmega 328 | 1 | 13,00 |

| | | |
|---------------------------------|----------|--------------|
| Diodo | 1 | 0,25 |
| Mosfet IRF8010 | 1 | 5,00 |
| Valor total do protótipo | 1 | 21,35 |

Por fim, a construção de protótipo permitiu o contato direto com as dificuldades envolvidas na prática que não poderiam ser constatadas nos meios de simulação.

O trabalho realizado possibilita uma série de estudos futuros, propõem-se a realização de análises e aplicações de técnicas para o aumento da eficiência do conversor, confecção do protótipo em placa de circuito impresso, assim como a medição da temperatura da bateria que seria mais um fator para prevenção da vida útil da bateria.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

IEEE. *IEEE Recommended Practice for Maintenance, Testing and Replacement of Valve-Regulated Lead-Acid (VRLA) Batteries for Stationary Applications.* New York, NY, USA : IEEE Std 1188-1996, 20 Aug, 1996. p. 16p.

Avago technologies. . *Datasheet CPL-3150 (Single Channel).*
Fonte: http://www.avagotech.com/pages/en/optocouplers_plastic/plastic_integrated_gate_drive_optocoupler/hcpl-3150/. Acessado 04 de maio de 2014.

International Rectifier. *DataSheet IR2110(-1-2).* Fonte: <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/ir2110.pdf>. Acessado (05 de maio de 2014).

Arduino.Arduino. *Arduino.* [Online] 29 de Abril de 2014. www.arduino.cc.

ASTRÖM, K.J & WITTENMARK, *Adaptive Control.* . : Dover Publication, 2008.

Chryssis, G. *High-frequency switching power supplies.* McDrawHill, 1984.

Hart, Daniel W. *Electrónica de potencia.* Madrid : Pearson educación, 2001.

Lazzarin, T B. *Estudo e implementação de uma carregador de bateria com uma técnica de avaliação de sua via útil .* Florianópolis : Universidade Federal de Santa Catarina, 2006. Dissertação.

MOURA, Acumuladores S.A. *Manual Técnico.* Recife-PE : Acumuladores Mousa S.A., 2010.

Ogata, Katsuhiko. *Engenharia de controle moderno.* São Paulo : Pearson Prentice Hall, 2010.

Rahman, Muhammad Saad. *Buck Converter Design Issues.* Department of Electrical Engineering , Linköping University. Linköping, Sweden : Prof. Dr. Atila Alvandpour, 2007.

Renna, R. B., et al. *Introdução ao kit de desenvolvimento Arduino.* Rio de Janeiro : PET - Tele, Universidade Federal Fluminense, 2013.

Saeedifard, Maryam. *Experiment #5 – Gate Driver.* Northwestern Ave., West Lafayette, IN : Jaya Deepti Dasika , 2013.

Sedra, Adel S. e Smith, K. C.. *Microeletrônica.* Makron, 2000. Vol. Ed 4a.

Mahbub, T. *Low-Side MOSFET Drive Circuits and Techniques - 7 Practical Circuits.* Fonte: Tahmid's blog: http://tahmidmc.blogspot.com.br/2012/12/low-side-mosfet-drive-circuits-and_23.html. Acessado 05 de maio de 2014.

APÊNDICE A

```
#include <PID_v1.h>
```

```
//definição das variáveis necessárias para o PID
```

```
double Setpoint, Input, Output
```

```
;
```

```
//Definição dos parametros do PID do controle de tensão e corrente
```

```
double corKp=20, corKi=0.2, corKd=1; // Paramêtros do controle de corrente
```

```
double tenKp=16, tenKi=0.4545, tenKd=0.25;//Paramêtros do controle de tensão
```

```
//Especificação das entradas e parametros do PID
```

```
PID MC(&Input, &Output, &Setpoint, tenKp, tenKi, tenKd, DIRECT);
```

```
const int analogOutPin = 9; // Analog output pin that the LED is attached to
```

```
const int analogInPin = 10; // Analog output pin that the LED is attached to
```

```
const int analogcorrente = A2; // Entrada analógica do sensor de corrente
```

```
const int analogtensao = A1; // Entrada analógica do divisor resistivo
```

```
const int EtapaMC = 0; // Variavel que determina a etapa de carregamento
```

```
float tensao =0; // Variável ler a tensão de saída
```

```
int Corrente =0; // Variável ler a corrente de saída
```

```
float MedCorrente =0; // Variável ler a corrente de saída
```

```
float M1 =0;
```

```
int sensortensao = 0; // Variável intermedia
```

```
int deadband = 20; // Valor do tempo morto do pwm complementar
```

```

long int PWM1; // Variável do PWM complementar.

long int PWM2; // Variável do PWM complementar.

void setup() {

    // iniciar a porta serial com taxa de transmissão 9600

    TCCR1B = TCCR1B & 0b11111000 | 0x01; //Mudança da frequencia de
chaveamento para 32,5 kHz

    TCCR1A = (TCCR1A & 0x0F) | 0xB0 ; // invertendo a saida do pin 10, a fim de
possibilitar o pwm complementar

    Serial.begin(9600);

    pinMode(analogcorrente, INPUT); // Declaração dos pinos de entrada

    pinMode(analogtensao, INPUT);

    //leitura da variavel de entrada do PID

    Corrente = analogRead(analogcorrente); // calculo da corrente de saída do circuito

    Input = Corrente;

    Setpoint = 40;

    //Ativando o PID no modo automatico

    MC.SetMode(AUTOMATIC);

}

void loop() {

    Corrente = analogRead(analogcorrente);

    delay(2); // Delay necessário para o conversor A/D

    sensortensao = analogRead(analogtensao); //

    M1= (float)(5*sensortensao)/1023;

    tensao = (float)4.02*M1;

```

```

MedCorrente = (float)5*Corrente/1023;

// if( tensao < 14.7 && EtapaMC == 0 )// Garantia da primeira etapa do carregamento
//   Input = Corrente;
//   Setpoint = 40;
//   MC.SetTunings(corKp, corKi, corKd);
//   MC.Compute() ;
// if (EtapaMC == 1) // Garantia da segunda etapa do carregamento
// {
//     Input = tensao;
//     Setpoint = 13.8; // Tensão de flutuação
//   MC.SetTunings(tenKp, tenKi, tenKd);
//   MC.Compute();
// }

// else
//   EtapaMC == 1;
//

PWM1= 100+deadband; // Declaração do pwm complementar com o tempo morto

if(PWM1>254)
{
    PWM1 = 254;
}

if (PWM1<=20){
    PWM1 = 1;
}

```

```
}
```

```
analogWrite(analogOutPin, 100); // Saida de controle da chave do conversor
```

```
analogWrite(analogInvPin, PWM1); // Saida do pwm complementar
```

```
// envio dos resultados para o monitor serial
```

```
Serial.print("PWM " );
```

```
Serial.print(Output);
```

```
Serial.print("\t Etapa do carregamento = ");
```

```
Serial.println(EtapaMC);
```

```
Serial.print("Corrente = " );
```

```
Serial.print(MedCorrente);
```

```
Serial.print("\t Tensão= ");
```

```
Serial.println(tensao,6);
```

```
Serial.print("\t A1= ");
```

```
Serial.println(M1,2);
```

```
delay(4);
```

```
}
```

