

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**Método de Carga para Banco de Baterias em Fontes
Ininterruptas de Energia que Busca Garantir o Estado de
Carga Completa: Corrente Pulsada Modificado**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Renato Tavares Cardoso

Santa Maria, RS, Brasil

2016

**Método de Carga para Banco de Baterias em Fontes Ininterruptas
de Energia que Busca Garantir o Estado de Carga Completa:
Corrente Pulsada Modificado**

por

Renato Tavares Cardoso

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Processamento de Energia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Elétrica.**

Orientador: Prof. Luciano Schuch

Santa Maria, RS, Brasil

2016

© 2016

Todos os direitos autorais reservados a Renato Tavares Cardoso. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita com autorização por escrito do autor.

Endereço: Av. Roraima, Nº 1000, Bairro Camobi, Santa Maria, RS, Brasil, CEP: 97105-900;
Endereço Eletrônico: elet.eng.rtc@gmail.com

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**Método de Carga para Banco de Baterias em Fontes Ininterruptas de
Energia que Busca Garantir o Estado de Carga Completa: Corrente
Pulsada Modificado**

elaborada por
Renato Tavares Cardoso

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Elétrica

COMISSÃO EXAMINADORA:

Luciano Schuch, Dr.
(Presidente/Orientador)

Mário Lúcio da Silva Martins, Dr. (UFSM)



Fabrício Hoff Dupont, Dr. (URI)

Santa Maria, 15 de fevereiro de 2015.

Dedico este trabalho
a minha família
a minha namorada e melhor amiga de todas as horas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado a vida e proporcionado momentos maravilhosos e desafiantes como o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço a minha melhor amiga e companheira de todas as horas, minha namorada Francisca Lima Rodrigues, por compreender os momentos difíceis e nunca desistir da nossa parceria em ajudar um ao outro.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Luciano Schuch, por ter confiado a mim o desenvolvimento deste trabalho junto a sua sabedoria transmitida e amizade oferecida.

Agradeço a CAPES pelo apoio financeiro oferecido durante os anos em estudo e desenvolvimento em laboratório, pois sem estes recursos não seria possível chegar no objetivo delineado.

Agradeço a todos os colegas do GEPOC pela ajuda direta e indireta, em especial aos que se tornaram grandes amigos, Antonio Manuel Spencer, Jonas Tibola e Marcel Dall Pai, que na fase final deram uma ajuda fundamental tanto no apoio técnico quanto psicológico.

Aos meus pais e irmãs pelo carinho e apoio emocional de sempre, sempre motivando a seguir em frente e vencer os desafios.

“Não tenho nenhum talento especial.
Sou somente apaixonadamente curioso.”

(Albert Einstein)

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Santa Maria

Método de Carga para Banco de Baterias em Fontes Ininterruptas de Energia que Busca Garantir o Estado de Carga Completa: Corrente Pulsada Modificado

AUTOR: RENATO TAVARES CARDOSO

ORIENTADOR: LUCIANO SCHUCH

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 15 de fevereiro de 2015.

Esta dissertação de mestrado tem como proposta o desenvolvimento de um sistema de gerenciamento de carga de um banco de 16 baterias de chumbo ácido, com capacidade de carga de 7Ah, comumente utilizado em Fontes Ininterruptas de Energia (UPS). Este sistema visa garantir que estas baterias cheguem a um estado de carga completo e de forma mais rápida que a convencional. Para isto, foi escolhido fazer a modificação do método de carga de corrente pulsada, com o objetivo de reduzir problemas inerentes do método tomado como base, quando ocorre o intervalo de retirada de energia da bateria, tais como: elevação da tensão do barramento ao retornar a energia para ele, ou, dissipar esta energia em uma resistência, o que acarreta em baixa eficiência do sistema. Para o desenvolvimento do sistema de carga sugerido foi escolhido o conversor estático Full-Bridge Isolado com modulação Phase Shift. Foi feita a modelagem simplificada deste conversor, para a implementação do controle digital, assim como o desenvolvimento prático do mesmo em laboratório. São apresentados os resultados de simulação e experimentais para validar o método.

Palavras-chave: Conversor Full-Bridge, Método de Carga de Corrente Pulsada, Baterias VRLA, UPS.

ABSTRACT

Master Thesis
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Santa Maria

Charge Method to Bank of Batteries for Uninterruptible Power Supplies Search to Ensure the State of Full Load: Pulsed Current Modified

AUTHOR: RENATO TAVARES CARDOSO
RESEARCH SUPERVISOR: LUCIANO SCHUCH
Santa Maria, February 15th, 2015.

This Master's Dissertation is proposes the development of a charge management system of a bank of 16 lead-acid batteries with 7Ah load capacity, commonly used in Uninterruptible Power Supplies (UPS). This system aims to ensure that these batteries reach a full charge status faster than the conventional way. To this, it was chosen to make the modification of the pulsed current charging method, in order to reduce problems, such as elevation of bus voltage to return the energy to it, or dissipation of that energy in a resistance, resulting in lower system efficiency, inherent in the method taken as a basis when the battery power withdrawal interval occurs. For the development of the suggested charging system the static converter Full-Bridge Isolated with modulation Phase Shift was chosen. To implement the digital control as well as its practical development in the same laboratory the simplified modeling of this converter was made. The results of simulation and experimental to validate the method are presented.

Keywords: Full-Bridge Converter, Current Pulsed Load method, VRLA Batteries, UPS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Configuração básica de uma UPS do tipo <i>off-line</i>	15
Figura 1.2 - Configuração básica de uma UPS do tipo <i>line interactive</i>	16
Figura 1.3 - Configuração básica de uma UPS do tipo <i>on-line</i>	16
Figura 2.1 - Retenção da capacidade x Vida útil, Fonte [Baterias Moura].	23
Figura 2.2 - Vida útil de uma bateria x grau de descarga, Fonte [Baterias Moura].	24
Figura 2.3 - Números de ciclos x Profundidade de descarga, Fonte [Baterias Moura].....	24
Figura 2.4 - Números de ciclos x Profundidade de descarga, Fonte [Baterias Tudor].....	25
Figura 2.5 - Capacidade x Tempo de armazenamento x Temperatura, Fonte [Baterias Ajax].	26
Figura 2.6 - Variação da capacidade em função da temperatura, Fonte [Baterias Moura].	30
Figura 2.7 - Variação da vida útil em função da temperatura, Fonte [Baterias Moura].....	31
Figura 3.1 - Método de carga a um nível de tensão.....	34
Figura 3.2 - Método a dois níveis de tensão.	35
Figura 3.3 - Método a um nível de corrente.	36
Figura 3.4 - Método a dois níveis de corrente e um de tensão.	37
Figura 3.5 - Método à um nível de corrente e um de tensão.	37
Figura 3.6 - Método a dois níveis de corrente.	38
Figura 3.7 - Análise microscópica comparativa entre método de carga rápido com corrente constante e método convencional com tensão constante.....	39
Figura 3.8 - Método de carga a corrente pulsada.	40
Figura 4.1 – Método de carga proposto.....	43
Figura 4.2 - Conversor implementado para gerenciar o método de carga.....	44
Figura 4.3 - Ábaco de seleção do núcleo toroidal do indutor de filtro. Fonte [Powder].	56
Figura 4.4 - Ábaco para escolha da nova permeabilidade via campo magnético, Fonte [Magnetics].....	57
Figura 4.5 - Modulação empregada no conversor - Phase-Shift.	59
Figura 4.6 - Versão simplificada do modelo médio do sistema de carga implementado.	60
Figura 4.7 - Diagrama de BODE do sistema em malha aberta	61
Figura 4.8 - Formas de onda do método de carga proposto. Tensão na bateria, Corrente na bateria e corrente da bateria de referência, ação de controle e estado interno do PI.....	63
Figura 5.1 - Esquema utilizado para implementação do sistema de carga.....	65
Figura 5.2 - Sistema implementado em bancada no laboratório.	66
Figura 5.3 - Ensaio de teste do acionamento em malha aberta do conversor, com carga RC. .	67

Figura 5.4 - Momento de bloqueio de um dos braços do conversor, operando em malha aberta e com carga RC.....	68
Figura 5.5 - Tensão de saída (CH2), tensão do primário do transformador (CH3) e corrente de saída (CH4), com carga RC.....	68
Figura 5.6 - Tensão de saída do conversor (CH1) e corrente de saída (CH4.) em malha fechada e carga RC.....	69
Figura 5.7 - Tensão do primário do transformador (CH2), tensão nas baterias (CH3) e corrente nas baterias (CH4), conversor em pleno funcionamento.....	70
Figura 5.8 - Tensão de entrada do conversor (CH2), tensão nas baterias (CH3) e corrente nas baterias (CH4).	71
Figura 5.9 - Tensão no primário do transformador (CH1), tensão de entrada do conversor (CH2) , tensão nas baterias (CH3) e corrente nas baterias (CH4).....	72
Figura 5.10 - Tensão de entrada do conversor (CH2) , tensão nas baterias (CH3) e corrente nas baterias (CH4).	72
Figura 5.11 - Método de corrente pulsada implementado.	73
Figura 5.12 - Tempo morto inserido entre o desligamento do conversor e o acionamento do interruptor extra para gerar o pulso negativo.....	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Valores típicos de tensão para monitoramento do estado de carga.	27
Tabela 2.2 - Ajustes da tensão de flutuação em função da variação de temperatura.	28
Tabela 4.1 - Definições do projeto do conversor.	46
Tabela 4.2 - Parâmetros de projeto do transformador.	46
Tabela 4.3 - Tabela de núcleos EE, Fonte [Thornton].....	47
Tabela 4.4 - Tabela de bitolas de fios AWG.	49
Tabela 4.5 - Tabela de referência de valores do núcleo escolhido para o transformador.	51
Tabela 4.6 - Resumo do projeto do transformador.	52
Tabela 4.7 - Parâmetros usados para a implementação do sistema proposto.	58
Tabela 4.8 – Parâmetros utilizados para simulação.....	62
Tabela 5.1 - Semicondutores usados na implementação prática do carregador.	64
Tabela 5.2 - Parâmetros usados para a implementação do sistema proposto.	65

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Configurações básicas de UPS's.....	15
1.1.1 UPS <i>off-line</i>	15
1.1.2 UPS <i>line interactive</i>	15
1.1.3 UPS <i>on-line</i>	16
1.2 Organização da dissertação.....	18
CAPÍTULO 2 BATERIAS DE CHUMBO ÁCIDO REGULADAS POR VÁLVULA (VRLA) 20	20
2.1 Introdução	20
2.2 Capacidade da bateria	22
2.3 Vida útil	22
2.4 Níveis de tensão	26
2.4.1 Estado de descarregada.....	27
2.4.2 Estado de flutuação.....	27
2.4.3 Estado de equalização.....	28
2.5 Níveis de correntes.....	29
2.6 Temperatura	30
2.6.1 Avalanche Térmica.....	31
2.7 Conclusão	32
CAPÍTULO 3 MÉTODOS DE CARGA ESTUDADOS	33
3.1 Introdução	33
3.2 Métodos de cargas convencionais de baterias	33
3.2.1 Método de carga a um nível de tensão.....	33
3.2.2 Método a dois níveis de tensão	35
3.2.3 Método a um nível de corrente	35
3.2.4 Método a dois níveis de corrente e um de tensão	36
3.2.5 Método a um nível de corrente e um de tensão	37
3.2.6 Método a dois níveis de corrente	38
3.3 Métodos rápidos de carregamento	38
3.4 Conclusão	40
CAPÍTULO 4 SISTEMA DE CARGA IMPLEMENTADO	42
4.1 Introdução	42
4.2 Método de carga.....	42
4.3 Topologia escolhida.....	43
4.4 Projeto do Conversor	45
4.4.1 Definições prévias de projeto.....	45

4.4.2	Definições de projeto do conversor	46
4.4.3	Projeto do transformador	46
4.4.4	Definição do núcleo	47
4.4.5	Projeto do controle do conversor	58
4.4.6	Projeto do controlador de corrente.....	61
4.5	Resultados de simulação	61
4.6	Conclusão	63
CAPÍTULO 5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS		64
5.1	Introdução	64
5.2	Resultados e aquisições experimentais	66
5.2.1	Teste dos drivers e acionamento do conversor	66
5.2.2	Teste do controle em malha fechada.....	69
5.2.3	Resultados de funcionamento do conversor com baterias e método proposto.....	70
5.2.4	Resultados do conversor em funcionamento com baterias e método corrente pulsada	73
5.2.5	Comparativo entre o método híbrido, o proposto e o corrente pulsada	74
5.3	Conclusão	75
CAPÍTULO 6 CONCLUSÃO.....		76
6.1	Propostas para trabalhos futuros	77
6.2	Artigos vinculados ao trabalho desenvolvido	77
BIBLIOGRAFIA.....		79

1 INTRODUÇÃO

Estudos realizados pela Organização das Nações Unidas (ONU) indicam que a população mundial chegará a 9,6 bilhões no ano de 2050, um crescimento de 2,4 bilhões ao que temos hoje (UNITED NATIONS, 2013). A previsão é de que este crescimento se dará principalmente em países em desenvolvimento e, que no geral, a expectativa de vida deverá aumentar nestes mesmos países nos próximos anos, quantizada de 76 anos no período de 2045-2050 e de 82 anos em 2095-2100.

Para que mesmo com um crescimento demográfico, se mantenha a qualidade de vida de uma nação, com crescimento econômico e saúde pública, é imprescindível que a disponibilidade de energia aumente e se torne mais confiável.

Estudos recentes enfatizam que ainda hoje as principais fontes de energia da matriz energética mundial são o petróleo, o carvão e o gás natural. Estas fontes por sua vez não são renováveis e suas reservas estão em lugares específicos no planeta (GIACCHETTA; LEPORINI; MARCHETTI, 2015) e já não são mais suficientes para manter a população mundial num próspero desenvolvimento, pois estão se esgotando (HADIAN; MADANI, 2015).

Uma solução encontrada para suprir a demanda energética e descentralizar a produção, a fim de disponibilizar energia para um maior número de pessoas e diminuir custos de geração e distribuição, é a geração por meio de energias renováveis, como a exploração da força dos ventos e da energia solar, utilizando turbinas eólicas e painéis fotovoltaicos, respectivamente (PEREIRA; FILHO, 2000).

Já para tornar a disponibilidade de energia mais confiável, existem sistemas, chamados de Fontes Ininterruptas de Energia (UPS) (do inglês, *Uninterruptible Power Supply*) que se utilizam de elementos armazenadores de energia, geralmente baterias, para que na falta do suprimento de energia por meio convencional, rede elétrica pública, por exemplo, a carga a ser conectada neste sistema se mantenha alimentada por um período finito, que varia de minutos a horas.

As UPS's são encontradas em três configurações básicas de funcionamento com relação à forma de ligação com a rede elétrica, que são: *off-line*, *line interactive* e *on-line* (KARVE, 2000).

1.1 Configurações básicas de UPS's

1.1.1 UPS *off-line*

No tipo *off-line*, Figura 1.1, a UPS em operação normal, transfere a energia para a carga diretamente da rede através da chave de transferência, enquanto os elementos armazenadores (baterias) são recarregados pelo retificador, também conectado a rede.

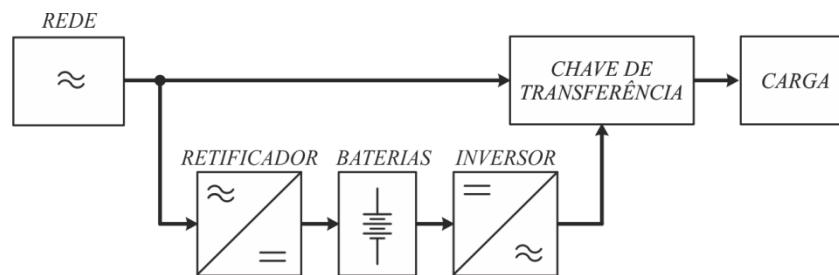


Figura 1.1 - Configuração básica de uma UPS do tipo *off-line*.

Caso ocorra uma falha da rede, a chave de transferência desconecta a carga da rede e a conecta ao inversor, passando desta forma as baterias a suprirem a energia para a carga. Esta comutação entre rede e inversor, pode ocasionar danos a alguns tipos de cargas, devido ao tempo de interrupção de energia.

Este tipo de UPS tem como vantagens um custo intermediário, alta eficiência, poucos elementos em série com o fluxo de potência. Já como desvantagens, não protege a carga contra surtos oriundos da rede elétrica e apresenta um intervalo sem alimentação da carga durante a falta da rede.

1.1.2 UPS *line interactive*

Em UPS's deste tipo, Figura 1.2, a carga é suprida pela a energia oriunda da rede através da chave estática, já a bateria é recarregada pelo conversor bidirecional de fluxo de potência, que por hora funciona como retificador.

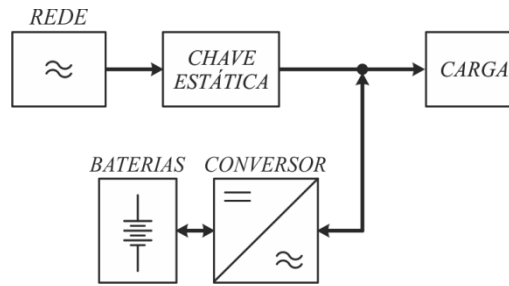


Figura 1.2 - Configuração básica de uma UPS do tipo *line interactive*.

Durante a falta de energia da rede, a chave estática é aberta e o conversor bidirecional passa a funcionar como um inversor de frequência, a fim de suprir a energia demandada pela carga. Da mesma forma que a configuração anterior, esta também tem um intervalo que não alimenta a carga.

Como vantagens, esta configuração possui custo reduzido, alta eficiência, poucos elementos em série com o fluxo de potência. Já como desvantagens, apresenta um curto intervalo sem alimentação da carga na falta da rede e também não projeto a carga contra surtos de energia oriundos da rede.

1.1.3 UPS *on-line*

Em sistemas UPS denominados *on-line*, Figura 1.3, a carga é sempre alimentada pelo inversor que por sua vez drena energia do retificador, o qual processa toda a potência do sistema, tanto a demandada pra a carga quanto para a recarga das baterias.

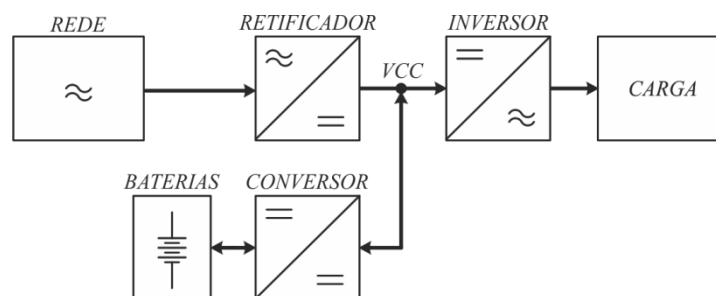


Figura 1.3 - Configuração básica de uma UPS do tipo *on-line*.

Durante uma falha da rede, o inversor continua alimentando a carga a partir da energia das baterias, não havendo desta forma um intervalo de interrupção de energia como nas configurações anteriores.

Tem-se como vantagens nesta configuração a não interrupção da energia demandada pela carga, caso haja uma falha da rede e protege a carga contra distúrbios oriundos da rede. Também é a configuração mais flexível entre as apresentadas, no que se refere à conexão com diferentes tipos de geração de energia, através do barramento CC (VCC), tais como geradores eólicos e solares. Como desvantagens, tem maior custo e complexidade de projeto, menor eficiência e maior número de elementos em série com o fluxo de potência.

Independentemente da escolha da configuração de UPS a ser usada, as baterias correspondem a uma parte bastante significativa do custo destes sistemas (ESSIG; BRAUN, 1991). E estas, devido as suas energias serem oriundas de reações químicas, podem ter uma abreviação em seu tempo de vida diretamente relacionada aos regimes de carga e descarga (AGARWAL et al., 2010).

Na literatura são encontradas várias propostas de métodos de carga para diferentes tipos de baterias e aplicações, com objetivos comuns em manter sempre uma estreita relação entre manutenção da carga e prosperidade da vida das baterias.

Para baterias de chumbo ácido VRLA (*Valve Regulated Lead Acid*), comumente utilizadas em UPS's, alguns métodos se popularizaram entre os fabricantes, por serem de fácil implementação e controle, como por exemplo, o método híbrido (SUNITO, 2000).

O método híbrido é composto por dois estágios de carregamento. Primeiramente o carregador fornece corrente de carga constante à bateria até que a tensão em seus terminais atinja um valor definido, geralmente estipulado como valor de tensão de flutuação (aproximadamente 2.23V/cel). Uma vez que a bateria atinge a tensão estipulada, a corrente de carga diminui até que a bateria esteja carregada. Portanto, a regulação de tensão é um aspecto importante da carga de tensão constante. No entanto, este método não garante estado de carga completo e, ainda, devido à alta taxa de corrente inicial empregada à bateria, as placas da mesma são sobreaquecidas, o que reduz a vida útil.

Com intuito de reduzir o tempo de carga, não abreviar a vida útil e ao mesmo tempo garantir o estado de carga completo, projeto de carregadores com diferentes métodos de carga vêm sendo estudados há décadas (AGARWAL et al., 2010; CHENG; CHEN, 2003; LIANG et al., 2001).

Vários pesquisadores no início dos anos 2000 (CHU et al., 2005; WANG; CHUANG, 2005) propuseram um método de corrente pulsada, que consiste de uma corrente de carregamento pulsada positiva e de uma corrente de carregamento pulsada negativa seguida por um período de tempo em espera. Este processo é repetido até que a bateria esteja completamente carregada.

Em estudos prévios (HUA; LIN, 2000), as diferentes amplitudes e períodos de corrente de carregamento pulsado foram medidos e comparados para apresentar a eficácia do método de carregamento pulsado, o que pode reduzir o tempo de carga e estender a vida da bateria. No entanto, a energia de descarga negativa é liberada através de um resistor dissipador, o que reduz a eficiência do carregador. A fim de melhorar este problema, métodos de controle de carregamento pulsado regenerativo e não dissipativo foram propostos. (CHENG; CHEN, 2003; LIANG et al., 2001). Em ambos a corrente de descarga do pulso negativo é regenerada de volta para o barramento CC, utilizado como fonte para o carregador, o que acarreta numa sobre tensão no mesmo. Portanto, uma consideração prática de projeto entre o barramento e o conversor incorporado com esquema de carregamento rápido deve ser estudada detalhadamente.

Considerando que o método de carregamento com corrente pulsada agrega características que reduzem o tempo de carga e ao mesmo tempo não prejudica a vida útil das baterias da mesma forma que métodos mais convencionais, tal como o método híbrido supracitado, este trabalho tem como proposta uma modificação do método de corrente pulsada. Esta modificação consiste em suprimir o pulso negativo, com o intuito de melhorar a eficiência do conversor, eliminando o problema de sobretensão no barramento e/ou o uso de elementos dissipativos.

Para desenvolver e alcançar o objetivo da devida proposta, alguns pontos são definidos:

- Fazer um estudo sobre os métodos de carga mais utilizados e propostos na literatura;
- Definir um conversor que atenda as especificações do método proposto e fazer uma análise matemática do ponto de vista de controle, estipulando e demonstrando as estratégias tomadas;
- Desenvolver um projeto prático de sistemas de carga para validar a proposta com resultados comparativos com o método de carga convencional híbrido e corrente pulsada;

1.2 Organização da dissertação

No capítulo 2 será feita uma introdução às baterias VRLA, com um breve histórico e descrição das características de construção das mesmas. Será também descrito os principais

fatores que devem ser considerados na construção de um sistema que gerencie o fluxo de energia deste tipo de acumulador.

No capítulo 3 será feito um comparativo entre alguns métodos de carga a fim de justificar o tema deste trabalho.

No capítulo 4 é feita a descrição do método desenvolvido, assim como, da implementação prática do conversor utilizado com o projeto do controle e resultados de simulação.

Já no capítulo 5 serão discutidos e apresentados os resultados experimentais adquiridos em laboratório.

Por fim, no capítulo 6 teremos as considerações finais, propostas de trabalhos futuros e citações de artigos publicados.

2 BATERIAS DE CHUMBO ÁCIDO REGULADAS POR VÁLVULA (VRLA)

2.1 Introdução

O objetivo deste capítulo é fazer uma breve introdução a cerca do estado da arte das baterias de chumbo-ácido, tipos de acumuladores utilizados no desenvolvimento deste trabalho.

Baterias de chumbo-ácido foram as primeiras baterias recarregáveis (baterias secundárias) criadas para uso comercial. O físico francês Gaston Planté, em 1860, foi um dos precursores na descoberta e desenvolvimento deste tipo de acumulador de energia (KURZWEIL, 2010). Seu primeiro modelo continha duas folhas de chumbo, separadas por tiras de borrachas e imersas em uma solução contendo 10% de ácido sulfúrico. Após um ano, um novo modelo com maior capacidade de carga foi criado, composto de nove elementos conectados em paralelo e alojados em uma caixa isolada.

A partir daí o desafio foi estabelecer um modelo que contivesse na placa positiva um material ativo que proporcionasse capacidades maiores nas reações químicas, uma vez que a fuga de eletrólito era bastante intensa. Em 1881, Faure e outros, desenvolveram baterias com o material ativo de chumbo em forma de pasta, o que permitiu reações mais rápidas e maiores rendimentos do que a placa sólida criada por Planté.

No entanto, o chumbo puro entrou em desuso, devido a sua resistência física ser macia. Foram então criadas várias ligas para tornar a bateria mais resistente estruturalmente e melhorar suas propriedades elétricas. Aditivos como, antimônio, cálcio, selênio, estanho e nano tubos de carbono são os mais usados atualmente.

Para cada aplicação se faz o uso de um ou mais tipos de aditivos, que combinados, podem agregar às baterias propriedades como maior resistência mecânica e/ou capacidade de carga. O antimônio com estanho, por exemplo, melhora a capacidade para ciclos profundos, porém, aumenta o consumo de água e a necessidade de equalização. Já o cálcio ajuda a manter a capacidade de carga, pois reduz a autodescarga, mas com excesso de carga a placa é mais propensa a aumentar de tamanho devido à oxidação. Projetos recentes, com estruturas em nano tubos de carbono, garantem eliminar a sulfatação e aumentar a vida útil. (SUGUMARAN et al., 2015).

Ainda no contexto da aplicação, além da diferenciação que se faz em relação às ligas de chumbo com outros materiais, tem-se também a construção física propriamente dita, denotando se a bateria é ventilada ou não (“selada”, ou *VRLA*¹), ou seja, se há possibilidade/necessidade de manutenção do eletrólito ou não.

O termo “selada” é bastante difundido, mas não existem baterias 100% seladas, pois a gaseificação gerada pela carga a cada ciclo, quando ocorre o processo de eletrólise (quebra da molécula) da água acumulada pela descarga, resultado da associação do oxigênio com o eletrodo positivo e do hidrogênio com o eletrodo negativo, se faz necessária uma forma de escape dos gases, caso contrário, a bateria poderia explodir. No entanto, a denominação “selada” foi criada para diferenciar as baterias ventiladas das não ventiladas.

As ventiladas têm a possibilidade de controle e manutenção do eletrólito através de orifícios disponíveis para a adição de água, mas que as desabilitam de serem usadas em várias posições, devido a possíveis derramamentos do ácido, podendo causar acidentes se mal manuseadas.

Em contrapartida foram criadas as baterias não ventiladas, *VRLA*, providas de uma válvula que as possibilita ter um escape dos gases durante toda sua vida útil e de serem usadas em qualquer orientação física sem a preocupação com o derramamento do ácido.

O eletrólito das *VRLA*, contrário ao das baterias ventiladas, onde as placas são submergidas, pode ser acondicionado em manta de vidro (*AGM*²) ou gel. Na primeira forma, o eletrólito é imobilizado pela absorção da porosidade da manta de vidro. Já na segunda, é usado um tipo de sílica que absorve o eletrólito e forma um composto gelificado possibilitando construção de baterias com maiores capacidade de descarga. (TANTICHANAKUL; CHAILAPAKUL; TANTAVICHET, 2013).

Atualmente existem outros tipos de baterias com maiores capacidades que as de chumbo-ácido, com melhor mobilidade e vida útil (ANUPHAPPHARADORN et al., 2014). Porém os custos são mais altos, tanto na aquisição quanto na manutenção e em projeto dos sistemas de gerenciamento de carga e descarga. Por conta disto, a bateria de chumbo-ácido ainda é o tipo de bateria recarregável mais usada para sistemas de *backup* (*UPS*) e telecomunicações (BATTERIES; LIBRARY; COMPANIES, 2004; SUNTIO; GLAD, 1990).

¹ Do inglês VALVE-REGULATED LEAD-ACID BATTERY.

² Do inglês ABSORBENT GLASS MAT

Demais características e definições a cerca das baterias *VRLA* serão explanadas nas seções a seguir, tais como: capacidade, vida útil, níveis de tensão, níveis de corrente e temperatura.

2.2 Capacidade da bateria

Para todo tipo de acumulador de energia, a definição de capacidade, é a quantidade de corrente que este entrega num determinado período, expresso em Ah (Ampére hora). Porém, como o que muda de um tipo de bateria para outra são os materiais ativos e reativos, o resultado é que os tempos das reações são diferentes. Isto implica, por exemplo, que baterias de chumbo-ácido, íon-lítio e níquel-cadmio, por consequência de serem diferentes nos materiais construtivos, os tempos de carga e descarga também são diferentes.

Para baterias de chumbo-ácido, o tempo definido é de 20 horas. Como exemplo, se temos uma bateria de 100Ah, significa que esta deverá, sob condições normais de operação, entregar durante 20h uma corrente constante de 5A.

A sigla usada para definir a capacidade de uma bateria é C_h , onde “h”, é o tempo expresso em horas que a bateria deve entregar energia em sua plena carga, que para baterias de chumbo-ácido fica C_{20} .

Para baterias de mesmo tipo, material construtivo igual, o que difere a capacidade maior da menor, em geral, é a quantidade de material ativo depositado na fabricação, que no caso das baterias de chumbo-ácido, são as placas de chumbo, que quanto mais espessas, maior é a capacidade de reação com o eletrólito.

Contudo, quanto mais espessas as placas, maior e mais pesada se torna a bateria. Desta forma, para sistemas que exigem potências altas, é comum que vários acumuladores sejam ligados em paralelo (IEEE, 1995).

2.3 Vida útil

É considerado que uma bateria de chumbo-ácido chega ao final de sua vida útil quando atinge 80% de sua capacidade nominal. Inúmeros fatores podem influenciar na abreviação deste tempo (ATWATER, 1994; FAIRWEATHER; FOSTER; STONE, 2011), tais como: regime de carga e descarga, manutenção, temperatura, tensão de flutuação e idade.

Segundo a fabricante MOURA, uma bateria sob condições normais de operação, à temperatura de 25°C e 1,75V/e, mantida em flutuação, pode durar mais que 10 anos, conforme mostra a Figura 2.1.

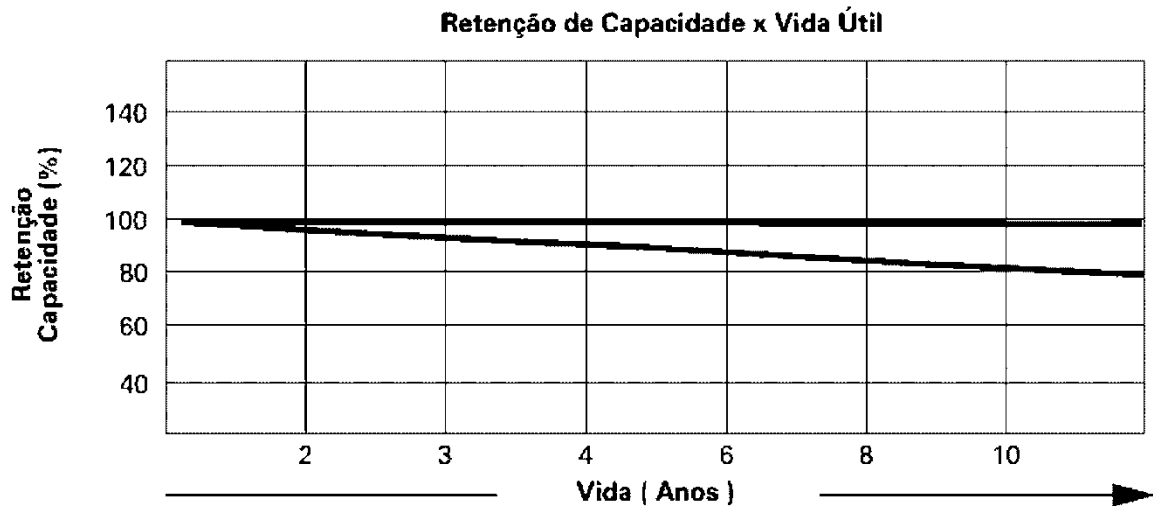


Figura 2.1 - Retenção da capacidade x Vida útil, Fonte [Baterias Moura].

O regime de carga e descarga está relacionado à vida útil da bateria pela profundidade com que é submetida, chamado “grau de descarga”. Em outras palavras, é a percentagem da capacidade da bateria com que ela é descarregada e carregada novamente. A percentagem limite da capacidade de uma bateria de chumbo-ácido, que se deve descarregá-la, é de 80%.

Na Figura 2.2, tem-se a relação entre a vida útil de uma bateria, medida em ciclos, com a profundidade de descarga. Nota-se, que dependendo do grau (%) de descarga em relação à capacidade da bateria, o número de ciclos de carga e descarga variam de forma não linear (BONDUELLE; COLDRICK; POPE, 2011), podendo haver uma discrepância maior de fabricante para fabricante e até de um mesmo lote de baterias de um só fabricante (AGARWAL et al., 2010). Por exemplo, analisando o gráfico da Figura 2.2, para um grau de descarga de 80% o número de ciclos ficaria em torno de 700 ciclos, já para um grau de 10%, seriam 3000 ciclos.

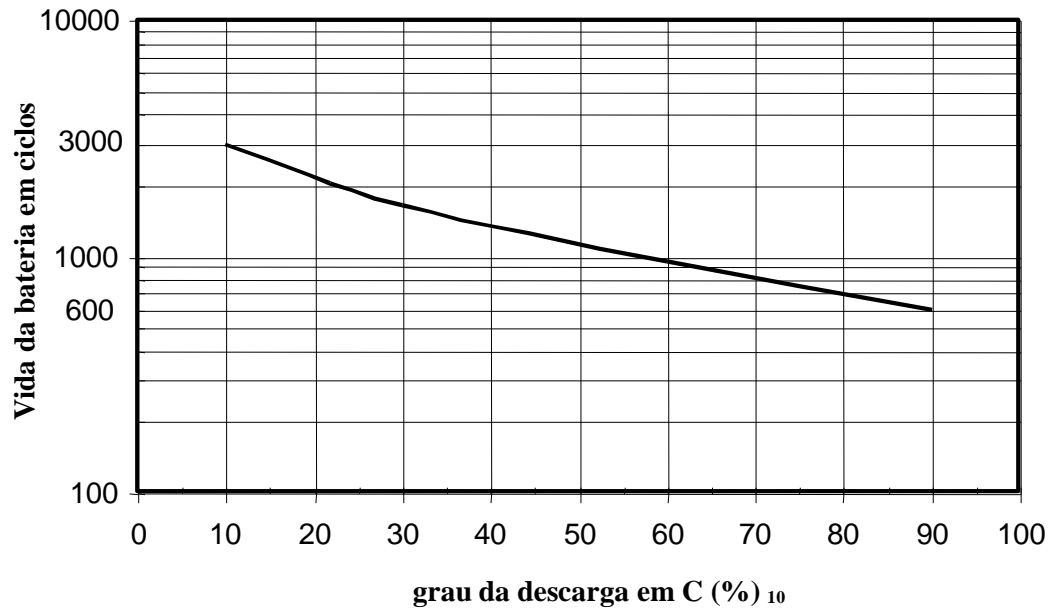


Figura 2.2 - Vida útil de uma bateria x grau de descarga, Fonte [Baterias Moura].

A fim de confirmar o já explanado, seguem as figuras retiradas de catálogos dos respectivos fabricantes, Figura 2.3 – baterias Moura e Figura 2.4 – baterias Tudor, demonstrando a vida útil medida em ciclos, em relação à profundidade de descarga.

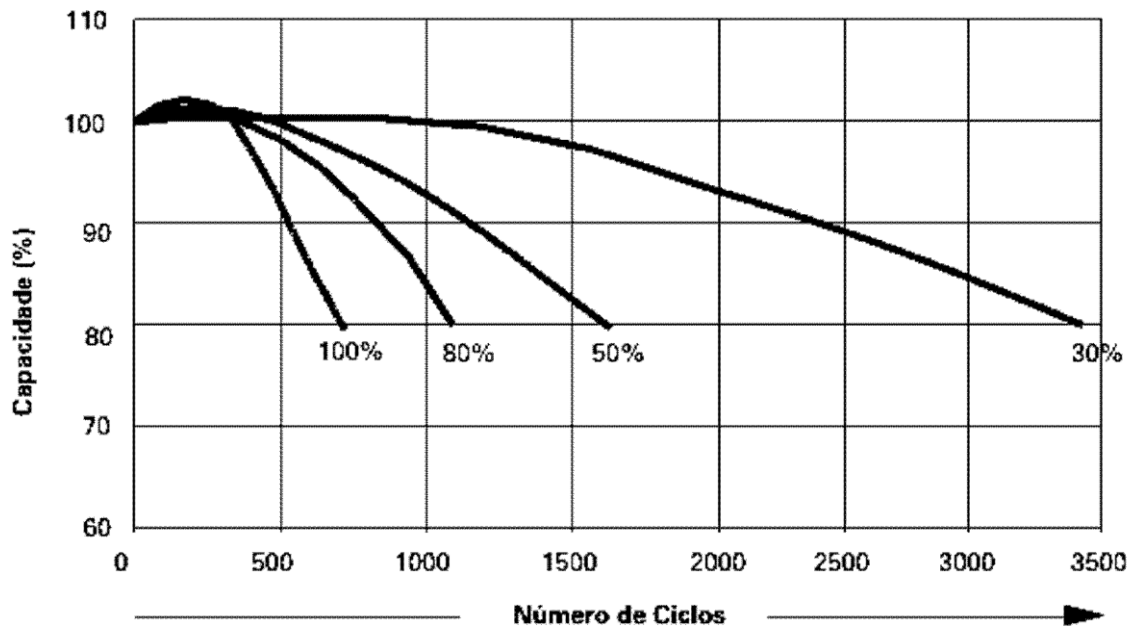


Figura 2.3 - Números de ciclos x Profundidade de descarga, Fonte [Baterias Moura].

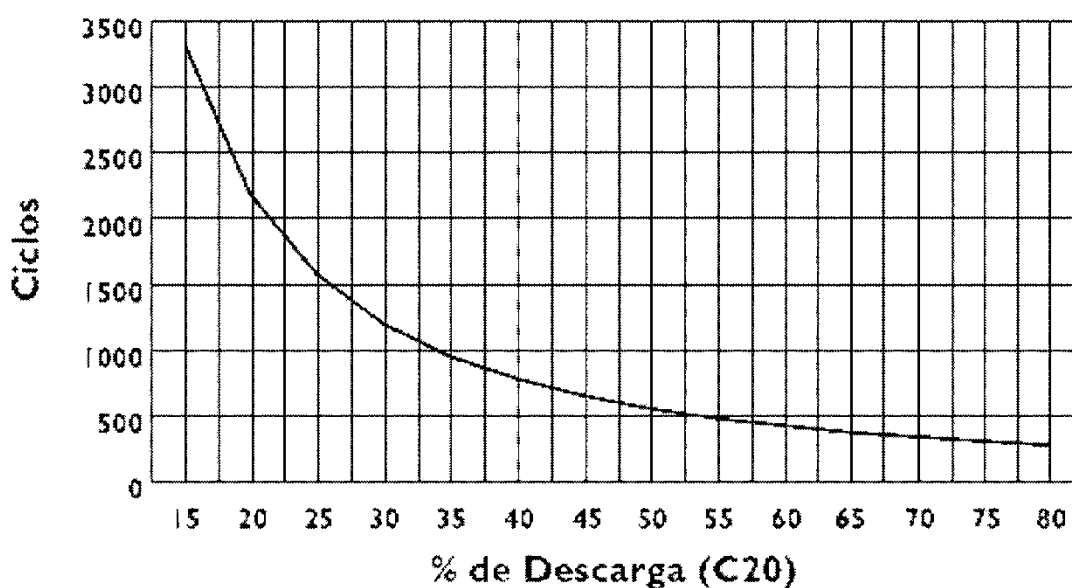


Figura 2.4 - Números de ciclos x Profundidade de descarga, Fonte [Baterias Tudor].

Para uma bateria que tenha sofrido uma profunda descarga, uma forma de recuperar sua capacidade é recarregá-la com o nível de corrente máximo permitido pelo fabricante. (VUTETAKIS; WU, 1992).

Uma forma de averiguar o tempo de vida de uma bateria é o peso (BOSE, 1998), pois com o passar do tempo há uma redução do volume de água, resultado de ineficientes recombinações do oxigênio, corrosão da placa positiva e permeabilidade do material com que é revestido o acumulador. (CULPIN; PETERS, 2006; TAKASAKI; TAKANO; ICHIMURA, 1996).

Na literatura encontram-se inclusive algumas propostas de avaliação *on-line* da vida útil de uma bateria, ou de um banco, (BONDUELLE; COLDRICK; POPE, 2011; COLEMAN; LEE; HURLEY, 2006; SHAHRIARI; FARROKHI, 2013), fazendo o uso de circuitos que excitam a bateria com algumas frequências, a fim de mensurar a variação da impedância interna. Com a variação da impedância, pode-se estimar através de testes contínuos o quão a bateria está sendo afetada pelos métodos empregados nos regimes de carga e descarga, os quais serão mais discutidos no próximo capítulo.

Outro fator a ser considerado, que pode abreviar a vida útil de uma bateria é a forma como é armazenada. Toda a bateria deve ser guardada completamente carregada, em local limpo, seco e bem ventilado a fim de evitar a corrosão das placas e a sulfatação.

A Figura 2.5 mostra a relação da temperatura com o tempo (em meses) de armazenamento e a capacidade de carga, retirado do manual da fabricante AJAX.

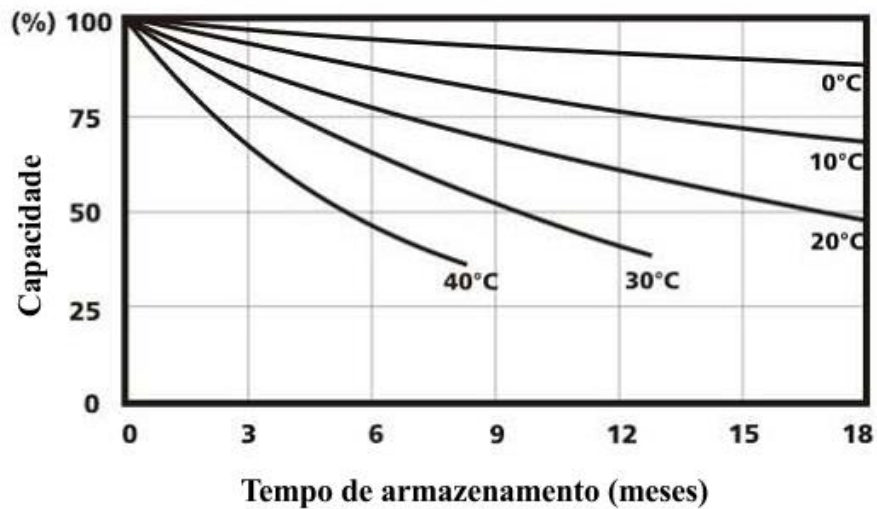


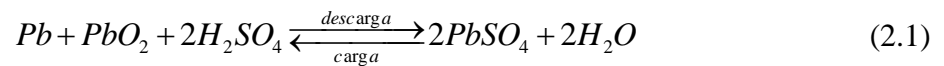
Figura 2.5 - Capacidade x Tempo de armazenamento x Temperatura, Fonte [Baterias Ajax].

Demais fatores que influenciam na abreviação da vida útil de uma bateria serão apresentados a seguir.

2.4 Níveis de tensão

A tensão nos terminais de uma bateria é resultado das reações químicas corriqueiras de cargas e descargas, desta forma, define-se que o valor desta grandeza tem relação direta com a densidade do eletrólito (SAUER, 2009).

Quando a bateria está entregando energia, sendo descarregada, há uma diminuição da concentração de ácido devido à produção de água. Em contrapartida, quando a bateria está sendo recarregada, há produção de ácido e consumo de água. A equação (2.1) descreve tais reações.



Existem alguns valores típicos de tensão nas baterias que devem ser considerados a fim de monitorar o estado de carga das baterias, Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Valores típicos de tensão para monitoramento do estado de carga.

Estado	Valor (volts por elemento)
<i>Descarregada</i>	1,75V/e
<i>Flutuação</i>	2,23V/e
<i>Equalização</i>	2,40V/e
<i>Sobrecarga</i>	2,70V/e
<i>Fim de carga</i>	2,65 – 2,70V/e

2.4.1 Estado de descarregada

Quando a bateria chega a este estado de carga significa que a mesma não possui mais energia disponível a ser entregue e, que caso ainda seja exigido mais descarga, pode-se avariar a mesma.

No entanto, dependendo do tipo de descarga que tenha ocorrido na bateria, tal como uma descarga profunda, pode acontecer da mesma dar sinais de fim de carga. Porém, depois de um tempo, ao ser medida a tensão em seus terminais, o valor poderá estar acima dos 1,75V/e.

2.4.2 Estado de flutuação

Este é um estado que mantém a bateria em equilíbrio, que tem por objetivo compensar a autodescarga e as correntes de fuga.

Valores acima dos estipulados para este estado, só devem ser tomados com a intensão de recarga, pois geram correntes de flutuação altas, ocorrendo corrosão da placa positiva, o que abrevia a vida útil da bateria. Já valores abaixo não compensam a autodescarga, deixando a bateria com uma menor capacidade.

A temperatura é um fator importante que deve ser considerado para determinar a tensão de flutuação, devendo assim, no sistema de gerenciamento de carga, haver um ajuste automático dos valores de tensão com relação às variações de temperatura.

Abaixo podemos ver alguns efeitos que podem ser causados pela falta de ajuste da tensão de flutuação:

- Baixa tensão de flutuação
 - Recarga insuficiente;
 - Sulfatação irreversível;
 - Despolarização da placa negativa e conseqüente descarga.
- Alta tensão de flutuação
 - Aumento do volume de gases na recombinação do oxigênio;
 - Corrosão prematura da grade positiva;
 - Aumento da corrente de flutuação;
 - Avalanche térmica.

A Tabela 2.2, com valores retirados do manual do fabricante LORICA, demonstra os ajustes, segundo este fabricante, que devem ser considerados em relação à temperatura.

Tabela 2.2 - Ajustes da tensão de flutuação em função da variação de temperatura.

Temperatura do elemento	Tensão de Flutuação
5°C	2,32V/e
15°C	2,25V/e
25°C	2,25V/e
35°C	2,25V/e
45°C	2,22V/e

2.4.3 Estado de equalização

Este estado é utilizado para recarga a fim de garantir que os elementos internos sejam nivelados, pois com o nível de tensão um pouco acima do de flutuação, considerando que a bateria já esteja carregada, a corrente drenada pela bateria é pequena, o necessário apenas para que as reações se completem.

Desta forma, a bateria deve ser mantida neste estado por curto espaço de tempo, senão sofrerá uma sobretensão, o que também abrevia sua vida útil.

2.5 Níveis de correntes

Os níveis de correntes empregados à bateria é que estabelecem de que forma as reações químicas ocorreram, sejam na recarga ou na descarga. É de suma importância que o sistema que gerencia a energia absorvida e posteriormente entregue pela bateria, controle precisamente estes níveis.

Níveis elevados de recarga, valores acima do estipulado pelos fabricantes, até 25% do valor nominal, provocam superaquecimento dos elementos, o que diminui a resistência interna da bateria e um desprendimento maior de gases. Já níveis abaixo dos estipulados, dependendo do estado de carga da bateria, podem não compensar a autodescarga (WENZL, 2009). Contudo, caso a bateria esteja no nível de carga mínima, é aconselhado, se disponível tempo, que seja mantido esta condição, dando tempo necessário para as reações acontecerem (WALTARI et al., 2002).

Na descarga, o nível de profundidade deve ser considerado, quanto maior o nível de corrente num menor espaço de tempo, maior a profundidade e, como já mencionado, a vida útil da bateria é dependente disto. Uma profunda descarga diminui a concentração de ácido e aumenta consideravelmente a resistência interna, podendo ser irreversível o processo. (DICKINSON, 2009).

Outra característica de corrente que deve ser considerada, é que seja o mais constante possível. No entanto, existe uma ondulação residual, proveniente dos conversores estáticos usados para o gerenciamento de carga, que deve ser controlada (KIM et al., 2013), pois estas ondulações interferem na qualidade de como as reações ocorrem, variando a impedância da bateria e, conseqüentemente, a temperatura interna, abreviando desta forma a sua vida útil.

As recomendações por parte dos fabricantes é de que se evite uma ondulação de tensão maior que 0,5% da tensão contínua aplicada na recarga das baterias, para que não seja induzida uma ondulação de corrente maior que 5% da capacidade nominal C_{10} (POWER, 2013).

Na literatura existem métodos para se reduzir esta ondulação de corrente a partir de diferentes projetos dos conversores usados para os gerenciadores de carga, desde o acoplamento de indutores (BAO; HU; WANG, 2010) até a manipulação das impedâncias

intrínsecas dos componentes para que atenuem as frequências das ondulações. (WANG et al., 2010).

2.6 Temperatura

Como quaisquer reações químicas são geridas por troca de energia, a temperatura do ambiente onde elas ocorrem é um fator fundamental de influência. Portanto, o ambiente onde as baterias estejam armazenadas ou sendo utilizadas, deve ser considerado monitorado constantemente.

Via de regra, temos que para temperaturas altas a capacidade das baterias aumenta, porém, para cada 8°C acima de 25°C a vida útil é reduzida pela metade. Com relação às temperaturas baixas, apesar da vida ser prolongada, a capacidade é reduzida. (HÄRING; GIESS, 2003). Ambas as constatações podem ser averiguadas pelas figuras a seguir.

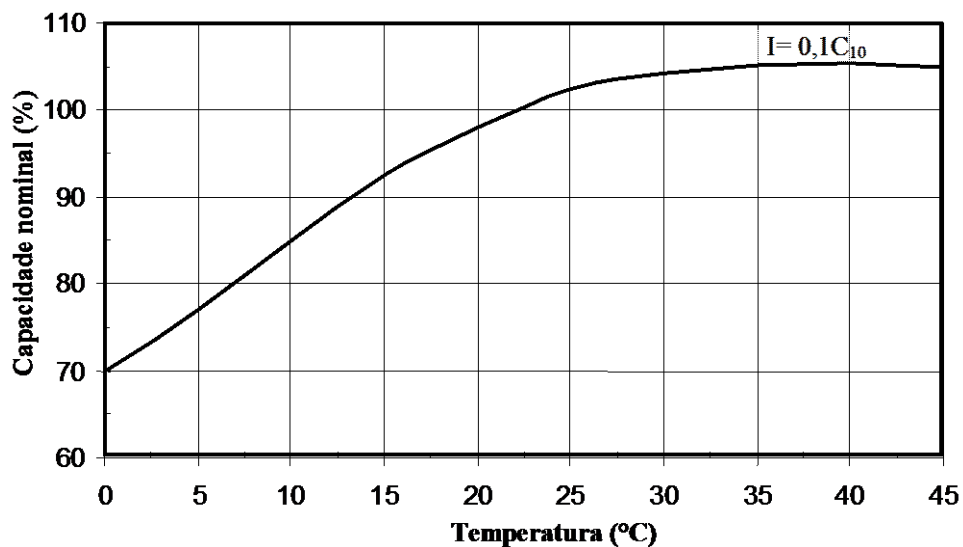


Figura 2.6 - Variação da capacidade em função da temperatura, Fonte [Baterias Moura].

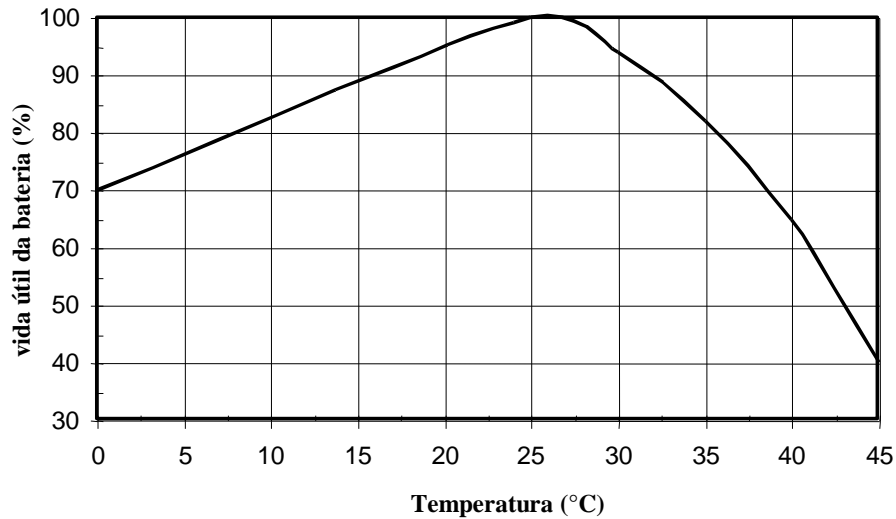


Figura 2.7 - Variação da vida útil em função da temperatura, Fonte [Baterias Moura].

A correção da capacidade em função da temperatura para regimes nominais pode ser obtida pela equação (2.2):

$$C_{25^{\circ}\text{C}} = \frac{C_T}{1 + \alpha(T - 25)} \quad (2.2)$$

Onde:

$C_{25^{\circ}\text{C}}$ = Capacidade em regime nominal, corrigida para 25°C

C_T = Capacidade obtida na temperatura T

α = Coeficiente de temperatura

$\alpha = 0,006$ para descargas $\geq 1\text{h}$

$\alpha = 0,01$ para descargas $< 1\text{h}$

2.6.1 Avalanche Térmica

Este fenômeno pode ocorrer durante uma carga com tensão constante ou até mesmo em flutuação nas seguintes condições: tensão de carga ou de flutuação ajustada em excessivos valores, baterias velhas ou em estado de degradação ou quando a bateria apresenta vários elementos em curto-circuito.

O fenômeno acontece da seguinte forma: se houver um aumento anormal de temperatura, a resistência interna da bateria cai e, segundo a Lei de Ohm, a corrente aumenta. O aumento da corrente conduz para um aumento de temperatura, que por sua vez diminui a

resistência interna e novamente aumenta a corrente. Se a corrente não for limitada a baixos valores por um mecanismo regulador, a total destruição da bateria se processará rapidamente.

Se a tensão de flutuação não for ajustada com a temperatura, o efeito direto desta avalanche será a gaseificação da água que compõe o eletrólito e conseqüente secagem do elemento.

2.7 Conclusão

Neste capítulo foi feita uma introdução às baterias de chumbo ácido no que se refere a sua história de criação e sua evolução na forma de construção até os dias de hoje, demonstrando que ainda é um tipo de bateria que possui características ímpares para certas aplicações, tal como a que se destina este trabalho, UPS's. Pode-se citar como uma das características bastante marcantes: o preço da densidade energética, em relação a outros tipos.

Foi também dado ênfase aos cuidados que se deve ter com este tipo de bateria em relação a sua vida útil correlacionada a diversos fatores, estes, devido ao fato deste tipo de acumulador ser popular, são de grande interesse ainda hoje por parte de pesquisadores controlá-los, propondo inúmeras metodologias que visam à busca por um equilíbrio entre preço e eficiência dos projetos.

3 MÉTODOS DE CARGA ESTUDADOS

3.1 Introdução

A fim de justificar o uso do método de carga escolhido, fez-se um estudo de alguns métodos mais utilizados, tanto por parte dos fabricantes quanto os propostos na literatura.

A popularização das baterias de chumbo ácido e a preocupação em evitar o descarte prematuro das mesmas e conseqüentemente a poluição ambiental, fez com que projetos de carregadores com diferentes métodos de carga fossem estudados desde o seu evento, resultando em inúmeras propostas em diminuir o tempo de carga e ao mesmo tempo prolongar a vida útil das mesmas. (CHENG; CHEN, 2003; LIANG et al., 2001).

O que ocasiona diferença entre os métodos é o tempo disponível para a carga, limitado à aplicação que se destina.

Para cargas críticas como: hospitais, estações de telecomunicações e bancos monetários, faz-se necessário que o método empregado contenha uma relação tempo de carga e duração em descarga bastante ajustada, pois é imprevisível a ocorrência de uma falta no fornecimento de energia convencional tão pouco a volta.

Neste contexto, este capítulo fará uma breve descrição de métodos convencionais e de métodos tidos como de carga rápida. Sendo dada uma ênfase nestes últimos, por ser o tema que abrange o presente trabalho.

3.2 Métodos de cargas convencionais de baterias

Nesta seção serão apresentados os principais métodos de carga de baterias de chumbo-ácido utilizados por alguns fabricantes.

3.2.1 Método de carga a um nível de tensão

Este método é apresentado na Figura 3.1 e consiste em aplicar uma tensão constante, V_{flut} , durante todo o processo e, conseqüentemente, a corrente decresce à medida que a bateria atinge seu nível de plena carga até se manter em um nível que compense a autodescarga, representado por I_{flut} .

Tem como característica interessante a simplicidade de implementação, porém no início do processo de carga a corrente é bastante elevada, podendo ocasionar um aquecimento das placas e provocar uma avalanche térmica se a corrente não for limitada. Este fato é mais prejudicial a baterias que sofreram uma descarga profunda.

Outro inconveniente deste método é o fato de não garantir o estado de carga completo devido a tensão ser fixada em V_{flut} , para não causar uma sobretensão.

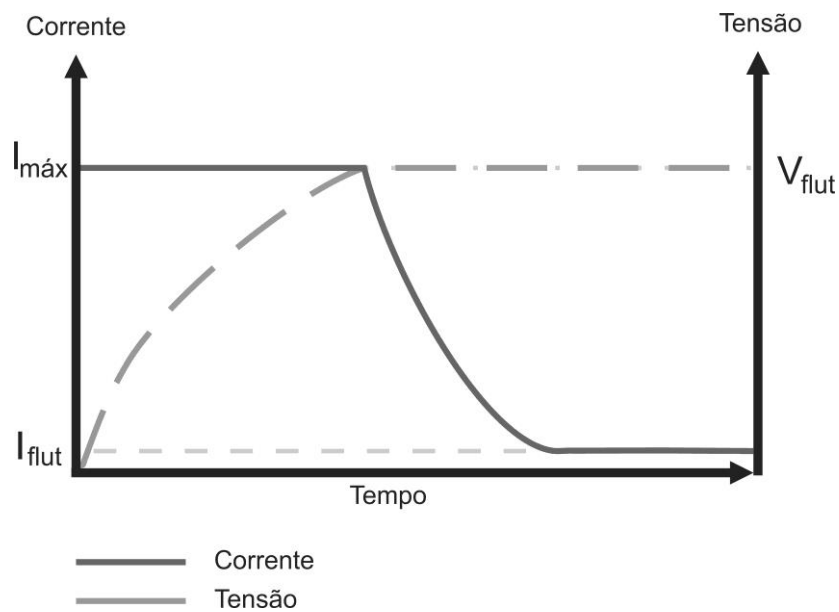


Figura 3.1 - Método de carga a um nível de tensão.

3.2.2 Método a dois níveis de tensão

Este método, Figura 3.2, diferentemente do anterior, busca garantir o estado de carga completo, pois aplica a tensão de equalização às baterias. Porém dependendo do tempo nesta etapa, pode se ocasionado uma sobrecarga nas baterias, o que abrevia a vida útil das mesmas.

O método funciona da seguinte forma: inicialmente se impõe uma corrente de valor máximo até que a tensão na bateria atinja a tensão de equalização (V_{eq}). Atingindo este ponto, aplica-se a tensão de equalização na bateria até que a corrente decresça ao patamar da corrente de retenção (I_{min}). Ao atingir esta corrente, aplica-se a tensão de flutuação. Caso a tensão da bateria esteja abaixo da tensão mínima (V_{min}), acrescenta-se uma etapa de pré-carga, onde a corrente é limitada em I_{cond} até que a tensão atinja o valor de carga mínima (V_{min}).

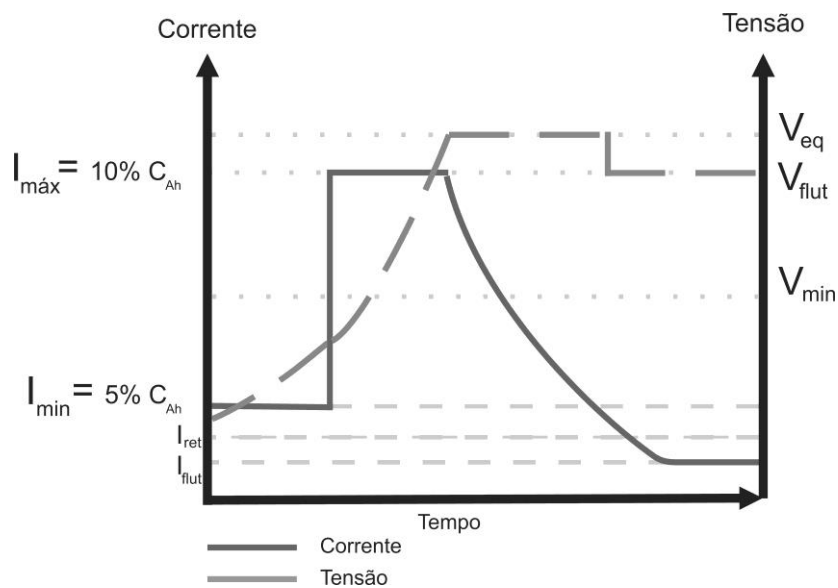


Figura 3.2 - Método a dois níveis de tensão.

3.2.3 Método a um nível de corrente

Como no método de um nível de tensão, este método, de recarga não se preocupa com a autodescarga da bateria, pois, após a carga final ser alcançada, retira-se a corrente. Necessita-se apenas regular a tensão final e esta tensão será diretamente proporcional à corrente de carga. Contudo, também não garante o estado de carga completo e tempo em carga é bastante prolongado.

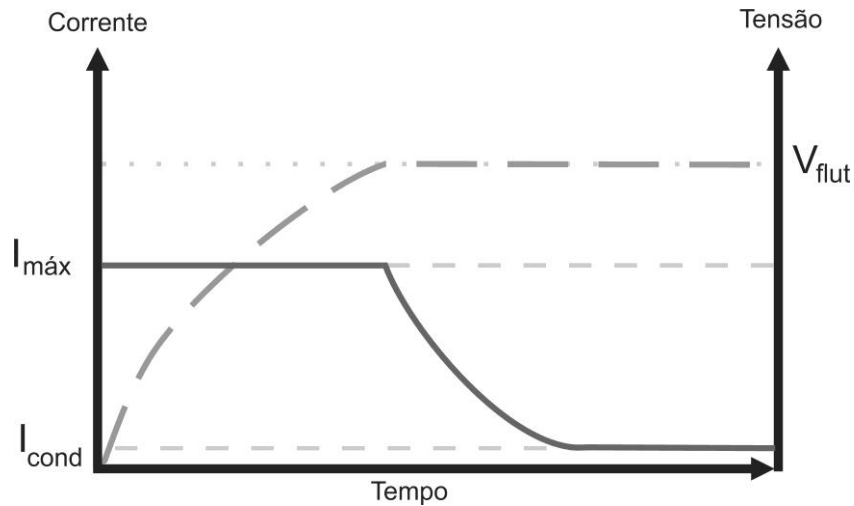


Figura 3.3 - Método a um nível de corrente.

3.2.4 Método a dois níveis de corrente e um de tensão

Quando se carregam grandes grupos de baterias este método, Figura 3.4, tem vantagem sobre o de duplo nível de tensão, pois se aplica apenas uma tensão para garantir a carga de flutuação. Não há como garantir se todos os elementos estão se carregando igualmente. Porém, se for garantida uma corrente de retenção, quando a tensão começar a subir, isso garante carga igual a todos os elementos.

O método consiste em aplicar inicialmente uma corrente constante de aproximadamente 10% da corrente nominal, até que a tensão alcance um nível logo acima do valor nominal (sem dar sobrecarga). Logo em seguida, aplica-se uma tensão constante até que a corrente atinja o valor da corrente de retenção (5% da nominal). Quando a corrente atinge este valor é mantida constante.

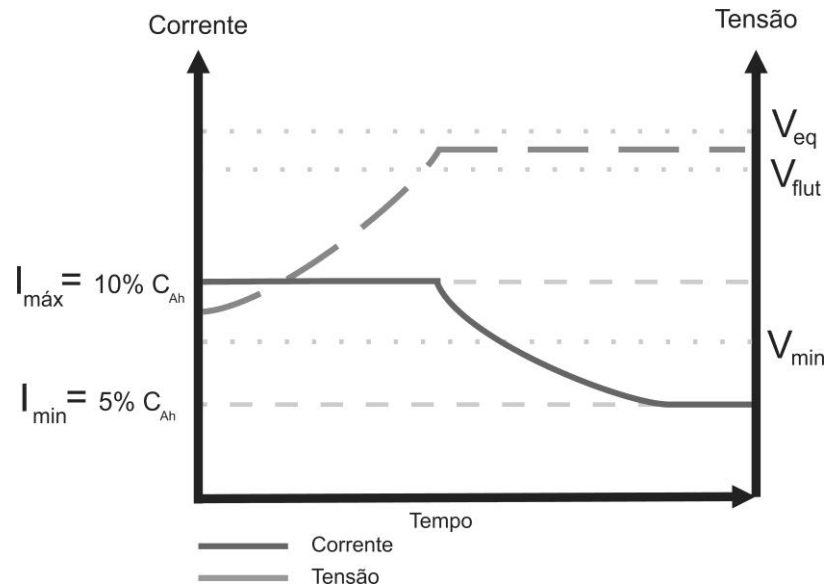


Figura 3.4 - Método a dois níveis de corrente e um de tensão.

3.2.5 Método a um nível de corrente e um de tensão

Esse método, Figura 3.5, consiste em aplicar um nível de corrente (normalmente 10% da capacidade nominal) até que a tensão atinja o valor de equalização (ou de gaseificação 2,4V/e). Para se chegar ao nível de corrente de retenção é aplicada uma tensão constante de flutuação. Esse é um dos métodos convencionais mais recomendados para se carregar baterias, principalmente as VRLA, pois o nível da corrente imposta na carga é controlado, dando tempo para a recombinação da água e evitando perdas.

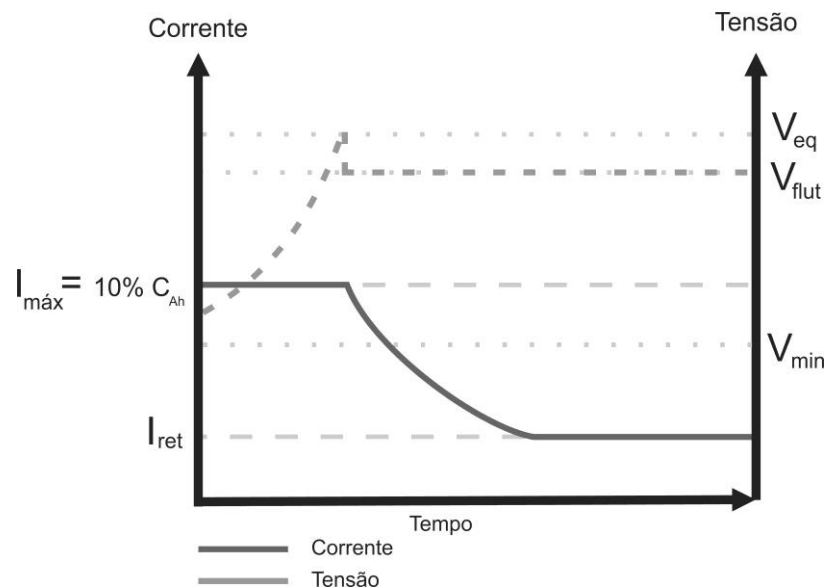


Figura 3.5 - Método à um nível de corrente e um de tensão.

3.2.6 Método a dois níveis de corrente

Neste método, Figura 3.6, inicialmente se aplica a corrente máxima até que a tensão atinja V_{eq} . Na etapa seguinte é aplicado pulsos de corrente, sendo que o valor médio desta corrente deve ser igual à I_{min} para manter a tensão de flutuação. Pode-se incluir uma etapa de pré-carga com uma corrente constante ficada em I_{min} .

O método é semelhante ao de dois níveis de tensão, porém evita a sobrecarga através da aplicação da corrente pulsada, o que apesar de prolongar o tempo de carga, permite que a reação química da bateria seja cessada, prolongando sua vida útil.

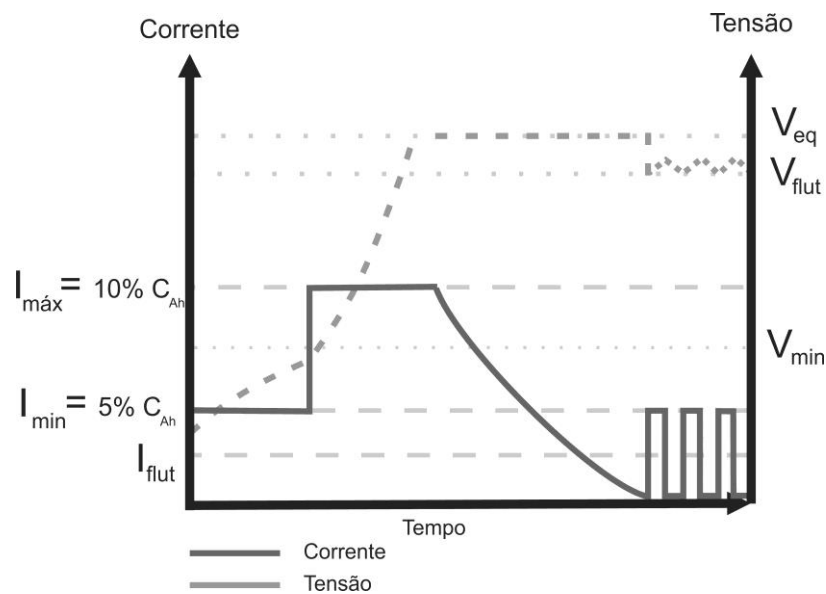


Figura 3.6 - Método a dois níveis de corrente.

3.3 Métodos rápidos de carregamento

Para melhorar o tempo de carga, não abreviando a vida útil das baterias, muitos trabalhos já no início da década de 90 foram propostos e renderam algumas patentes. (FREEMAN; HEACOCK, 1993; HUNG; HOPKINS; MOSLING, 1993; VALERIOTE; CHANG; JOCHIM, 1994).

Contudo, foi com o método de corrente pulsada, Figura 3.8 que resultados com menor e tempo e menos prejudicial à vida útil da bateria foram atingidos. (HUA; LIN, 2000).

Este método consiste em um pulso positivo de corrente de carga, um pulso negativo de corrente de descarga e seguido por um período de tempo de espera. Este processo é repetido até que a bateria esteja completamente carregada.

Estudos feitos em 2005, (SVOBODA; DOERING; GARCHE, 2005), comprovaram que carregamentos rápidos com corrente pulsada se comparado a métodos convencionais de tensão constante, degradam menos as baterias, como pode ser visto pela Figura 3.7, mostrando um comparativo depois de vários ciclos.

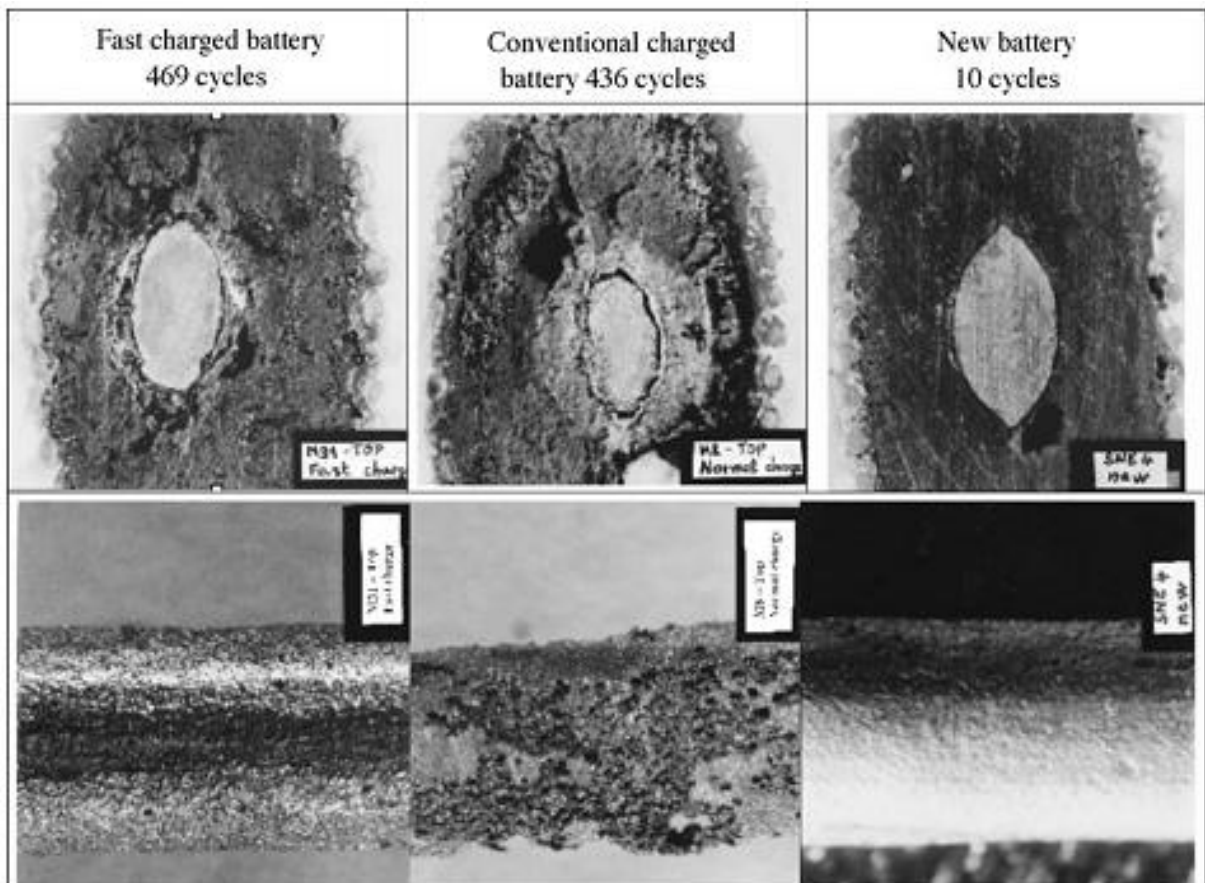


Figura 3.7 - Análise microscópica comparativa entre método de carga rápido com corrente constante e método convencional com tensão constante.

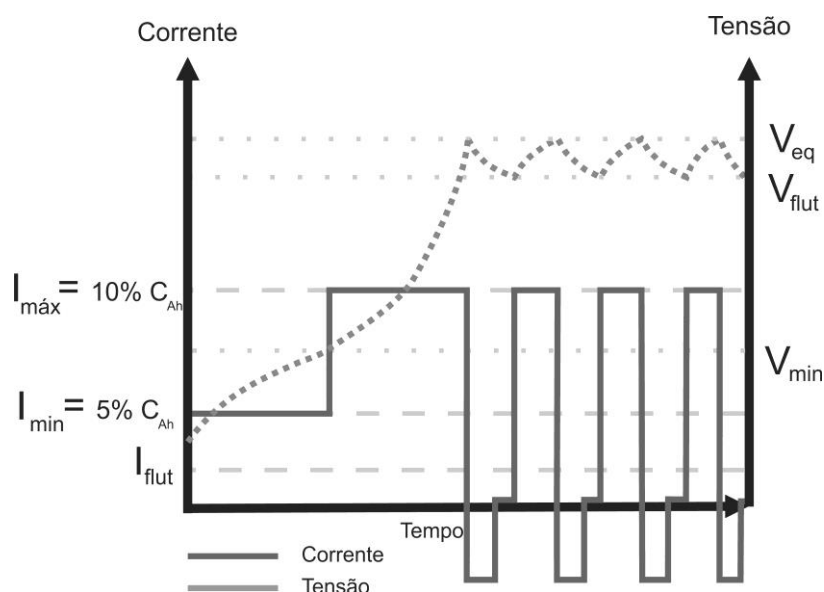


Figura 3.8 - Método de carga a corrente pulsada.

De uma maneira geral, a determinação dos tempos, positivo, negativo e de espera não é tarefa fácil de realizar, o que acarreta em um projeto pratico do carregador bastante complexo, pois os valores variam de acordo com cada diferente tecnologia de bateria e precisam ser obtidos através de ensaios práticos.

Algumas propostas fazem uso de elementos dissipativos para gerar o pulso negativo de corrente em cima da bateria, (KIM; HONG, 2000), porém, isto acarreta em uma perda em eficiência do conversor.

Já em (CHU et al., 2005) e (CHENG; CHEN, 2003) ambos com projetos de conversores distintos, mas com o mesmo foco em reutilizar a energia do pulso negativo, fazendo uma regeneração para o barramento que alimenta o sistema. Esta abordagem aumenta a eficiência do conversor, no entanto pode causar um aumento excessivo de tensão sobre o barramento.

3.4 Conclusão

Com base na análise dos métodos apresentados e nas características desejadas para maximização da vida útil das baterias, garantia da carga completa e na aplicação em questão (UPS), propõe-se a implementação e validação de um método de carga que apresente as seguintes características:

- Sempre que a bateria estiver totalmente descarregada deve-se utilizar uma corrente de condicionamento de valor reduzido (pré-definido) e regulada, até que a tensão da bateria atinja seu valor mínimo;
- A bateria deve ser carregada com corrente constante com valor próximo de 10% de C_{Ah} até que sua tensão atinja a tensão de equalização;
- Para garantir o estado de carga completa deve ser imposta uma corrente de carregamento pulsada.

Visando o custo e diminuir a complexidade de implementação do conversor, assim como eliminar os problemas inerentes do método de corrente pulsada, como: sobretensão no barramento ou perda de eficiência com o uso de elementos dissipativos, o método proposto tem por finalidade suprimir o estágio de pulso negativo.

A proposta do método segue com sua descrição e projeto assim como os resultados experimentais nos próximos capítulos.

4 SISTEMA DE CARGA IMPLEMENTADO

4.1 Introdução

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um método de carga de baterias de chumbo ácido que as contemplasse com final de carga completo, de forma rápida e que não abreviasse a vida útil das mesmas. Para tanto, tomou-se como base o método de carregamento com corrente pulsada, porém com a modificação de suprimir a etapa de pulso negativo (descarga curta da bateria) a fim de eliminar alguns problemas encontrados neste método como: sobretensão no barramento e/ou o uso de elementos dissipativos.

Existem muitos tipos de conversores de energia que podem ser implementados no esquema de carregamento pulsado (ERICKSON; MAKSIMOVIC, 2004; MOHAN; UNDELAND; ROBBINS, 2003), mas o conversor buck, por ser uma topologia com indutor em série conectado a carga, possui uma alta eficiência no controle da corrente de saída. No entanto, para que se tenha uma isolamento galvânica fez-se o uso de um conversor full-bridge com saída em fonte de corrente, garantindo assim a semelhança com o conversor buck no ponto de vista de controle.

Não somente por isso, a escolha pelo conversor full-bridge se deu pela possibilidade de ser utilizado em uma ampla faixa de potências, tornando-se atrativo para aplicação a uma família de UPS's que variam de 1kVA a 15kVA, para a qual é destinada este trabalho. As UPS's em questão são monofásicas com tensão de barramento em 400 V e um conjunto de 16 baterias de 12 V em série, totalizando 230,4V quando completamente carregadas.

4.2 Método de carga

O método proposto neste trabalho, Figura 4.1, consiste em monitorar a tensão nos terminais da bateria e conforme o valor medido é definida uma corrente de referência atribuída a um controlador de corrente. Os valores de tensões identificadas por um algoritmo são: $V_{eq}=2.4$ V/cel, $V_{flut}=2.23$ V/cel, $V_{min}=1.5$ V/cel, já as referências de corrente são dois valores, 5% ou 10% da capacidade total da bateria, denominadas como I_{min} e I_{max} , respectivamente, onde a capacidade da bateria é definida em Ah (Ampere x hora). Por

exemplo, se a bateria utilizada for de 7Ah, as correntes de referência serão de 350mA para I_{\min} e de 700mA para I_{\max} .

Seguindo a lógica da Figura 4.1, caso a bateria esteja descarregada, ou seja, com tensão abaixo do V_{\min} , a corrente de referência atribuída ao controlador de corrente será I_{\min} até que a tensão fique ligeiramente maior que V_{\min} e a referência muda para I_{\max} , desta forma evita-se que haja um aquecimento das placas internas da bateria.

Agora com a referência de corrente em I_{\max} , esta é atribuída constantemente até que a bateria atinja em seus terminais o valor de tensão V_{eq} . Cumprido este estágio, o conversor é então desligado, voltando a ser ligado com a referência em I_{\max} quando a tensão atingir o valor de V_{flut} .

Este estágio em que a bateria fica sem receber corrente e retorna a tensão de V_{flut} pela sua própria autodescarga, ocasiona uma acomodação da química da mesma, evitando um superaquecimento do eletrólito e garantindo uma recarga completa.

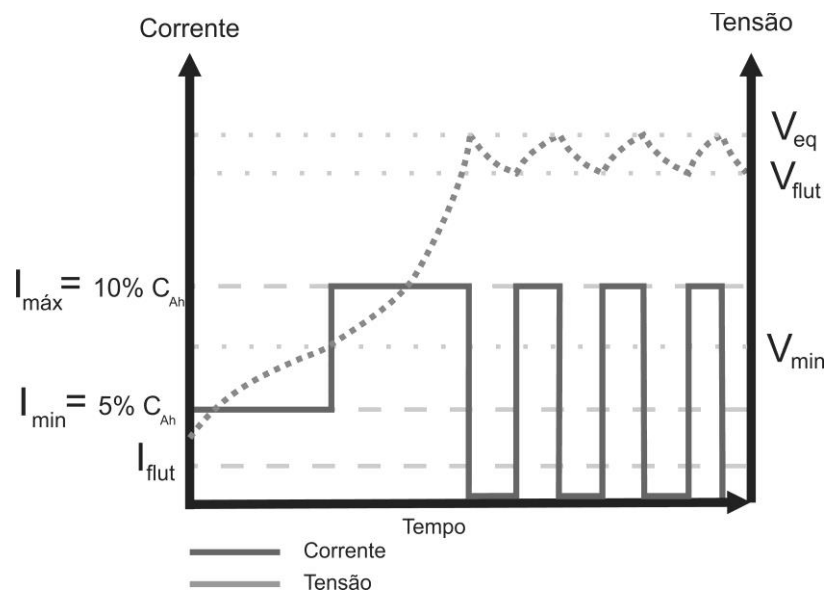


Figura 4.1 – Método de carga proposto.

4.3 Topologia escolhida

Para implementar o carregador de baterias utilizou-se um conversor Full Bridge isolado, como mostrado na Figura 4.2, onde a bateria é representada por um modelo elétrico equivalente simplificado de uma fonte E_m (valor de tensão nos terminais da bateria em circuito aberto) em série com uma resistência r_i (resistência interna da bateria). (MODULATOR, 1999).

Inúmeros autores propuseram trabalhos que analisam o comportamento dinâmico da bateria para diversas aplicações (ACHAIBOU; HADDADI; MALEK, 2008, 2012; LU; LIU; WU, 1995; RYNKIEWICZ, 1999; SALAMEH; CASACCA; LYNCH, 1992; THOTTUVELIL, 1997; VALVO et al., 1996), contudo, como o foco deste trabalho foi projetar um conversor que suprisse as características de potência exigidas pelos sistemas UPS's, fez-se o uso do modelo simplificado, como demonstrado na Figura 4.2.

O conversor escolhido possui diversas características que o destaca das outras topologias, sendo elas: i) capacidade de operação dos MOSFET em ZVS (Zero Voltage Switching), ii) alta eficiência, iii) isolamento galvânica, iv) utilização da modulação Phase-Shift, onde os interruptores operam sempre com duty cycle em 50%. A modulação garante também tensão média nula no primário do transformador evitando sua saturação.

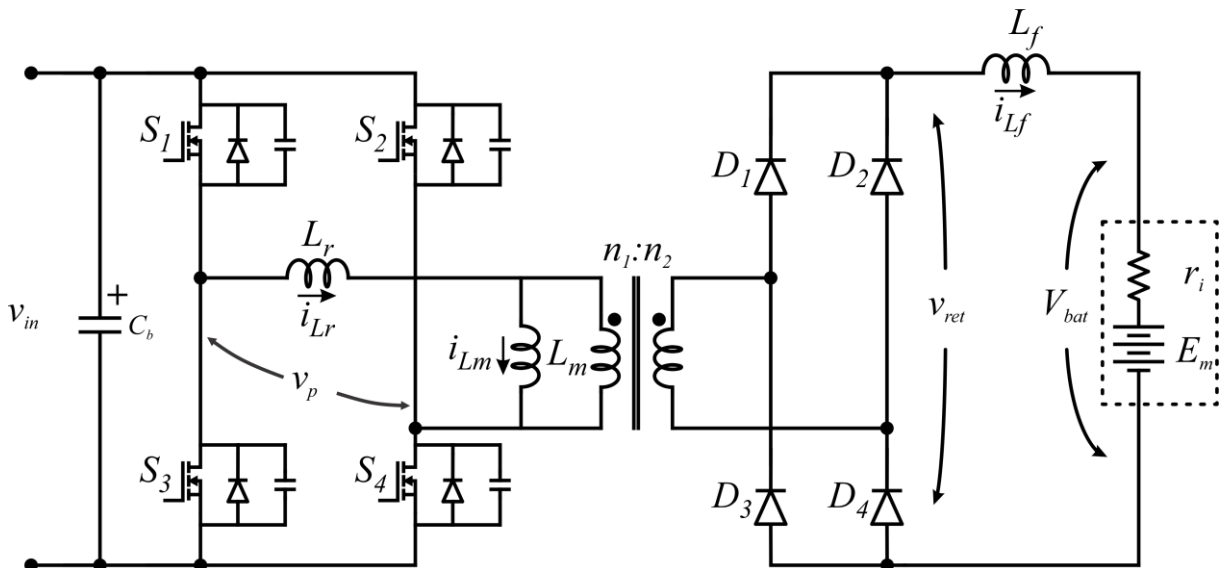


Figura 4.2 - Conversor implementado para gerenciar o método de carga.

4.4 Projeto do Conversor

4.4.1 Definições prévias de projeto

Foram utilizadas 16 baterias de 12V com capacidade de 7Ah (UNIPOWER, 2015) e para algumas definições de projeto utilizou-se do modelo matemático apresentado em (MODULATOR, 1999), os quais são descritos a seguir.

- Tensão de equalização por elemento: $E_{eq} = 2.4V$
- Tensão de flutuação por elemento: $E_{flut} = 2.23V$
- Tensão mínima por elemento: $E_{min} = 1.75V$
- Número de células por bateria: $n_{cel} = 6$
- Número de baterias: $n_{bat} = 16$
- Capacidade por bateria: $C_{bat} = 7Ah$
- Corrente média aplicada ao banco: $I_{med_bat} = 0.1 \times C_{bat} = 0.7A$
- Tensão máxima aplicada ao banco: $V_{bat_max} = n_{bat} \times n_{cel} \times E_{eq} = 230.4V$
- Tensão de média aplicada ao banco: $V_{bat_med} = n_{bat} \times n_{cel} \times E_{flut} = 214.08V$
- Tensão mínima do banco: $V_{bat_min} = n_{bat} \times n_{cel} \times E_{min} = 168V$

4.4.2 Definições de projeto do conversor

Depois de feita a escolha do conversor a ser utilizado, utilizou-se da metodologia de projeto definida por Mohan (MOHAN; UNDELAND; ROBBINS, 2003).

Na Tabela 4.1, define-se as grandezas básicas iniciais para o início do projeto do conversor Full Bridge isolado.

Tabela 4.1 - Definições do projeto do conversor.

Parâmetros	Valor
Tensão do primário	$V_{pri} = 400V$
Tensão do secundário	$V_{sec} = 400V$
Rendimento estimado	$\eta = 92\%$
Frequência de comutação	$f_s = 71kHz$
Corrente média do primário	$I_{pri} = I_{med_bat} = 0.7A$
Corrente média de saída	$I_{sec} = I_{med_bat} = 0.7A$
Potência útil de saída	$P_o = I_{sec} \times V_{sec} = 280W$
Potência média de entrada	$P_{in} = \frac{P_o}{\eta} = 304.348W$
Razão cíclica	$D = 0.5$

4.4.3 Projeto do transformador

Tabela 4.2 - Parâmetros de projeto do transformador.

Parâmetros	Valor
Rendimento do transformador	$\eta_{trafo} = 98\%$
Potência do transformador	$Pot_{trafo} = P_{in} = 304.348$
Fator de utilização do primário	$k_p = 0.415$

Fator de utilização do transformador	$k_{u_trafo} = 0.4$
Fator de topologia	$k_t = 1$
Densidade de corrente máxima	$J_{\max} = 450 \frac{A}{cm^2}$
Variação da densidade de fluxo magnético	$\Delta B = 0.4T$
Densidade de fluxo magnético do trafo	$B_{trafo} = 0.11T$
Densidade máxima de fluxo magnético	$B_{\max_trafo} = 0.15T$
Relação de transformação	$n = 1$
Tensão do primário	$V_{pri} = 400V$
Tensão do secundário	$V_{sec} = 400V$

4.4.4 Definição do núcleo

A definição do núcleo se fez pelo calculo do $A_e A_w$, conforme equação abaixo:

$$A_e A_w_{trafo} = \frac{Pot_{trafo}}{k_p \times k_{u_trafo} \times k_t \times J_{\max} \times B_{\max_trafo} \times f_s} = 1.435 cm^4 \quad (4.1)$$

O núcleo então é escolhido via tabela a seguir:

Tabela 4.3 - Tabela de núcleos EE, Fonte [Thornton].

Núcleo	A_e (cm ²)	A_w (cm ²)	l_e (cm)	l_t (cm)	V_e (cm ³)	$A_e A_w$ (cm ⁴)
EE-20/15	0,312	0,26	4,28	3,80	1,34	0,08
EE-30/07	0,600	0,80	6,70	5,60	4,00	0,48
EE-30/14	1,200	0,85	6,70	6,70	8,00	1,02
EE-42/15	1,810	1,57	9,70	8,70	17,60	2,84
EE-42/20	2,400	1,57	9,70	10,50	23,30	3,77
EE-55/21	3,540	2,50	12,00	11,60	42,50	8,85
EE-65/13	2,660	3,70	14,70	14,80	39,10	9,84
EE-65/26	5,320	3,70	14,70	14,80	78,20	19,68
EE-65/39	7,980	3,70	14,70	14,80	117,30	29,53

Analisando a coluna $AeAw$, definiu-se o núcleo EE-42/15 para a confecção do transformador de alta frequência do conversor, com devidas características:

- Área da perna central do núcleo: $Ae_{trafo} = 1.8cm^2$
- Área da janela: $Aw_{trafo} = 1.57cm^2$
- Volume efetivo: $Ve_{trafo} = 17.6cm^3$
- Produto das áreas: $AeAw_{trafo} = 3.77cm^2$

4.4.4.1 Cálculo do número de espiras

Primeiramente através de (4.2) encontra-se o número de espiras do enrolamento do primário do transformador. E com a definição de que a relação de transformação n será unitária, encontra-se pela equação (4.3) o número de espiras do enrolamento secundário.

$$Np_{trafo} = \left(\frac{V_p}{\Delta B \times Ae_{trafo} \times f_s} \right) = 78 \quad (4.2)$$

$$Ns_{trafo} = Np_{trafo} \times n = 78 \quad (4.3)$$

4.4.4.2 Cálculo das correntes eficazes

- Corrente eficaz do enrolamento primário

$$Ip_{rms_trafo} = \frac{Pot_{trafo}}{V_{pri}} = 0.761A \quad (4.4)$$

- Corrente eficaz do enrolamento secundário

$$Is_{rms_trafo} = \frac{Pot_{trafo}}{V_{sec}} = 0.761A \quad (4.5)$$

4.4.4.3 Escolha do condutor e a relação em paralelo

A escolha do condutor se fez considerando a corrente suportada e o número de fios que se deseja colocar em paralelo, condição que torna mais branda o efeito pelicular. Para tal decisão, torna-se como referência a Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Tabela de bitolas de fios AWG.

AWG	Diâmetro do cobre (cm)	Área do cobre (cm ²)	Diâmetro com isolamento (cm)	Área com isolamento (cm ²)	OHMS/cm (20°C)	OHMS/cm (100°C)	Corrente para J=450A/cm ² (A)
21	0,072	0,004105	0,080	0,005004	0,000420	0,000561	1,847
22	0,064	0,003255	0,071	0,004013	0,000530	0,000708	1,465
23	0,057	0,002582	0,064	0,003221	0,000668	0,000892	1,162
24	0,051	0,002047	0,057	0,002586	0,000842	0,001125	0,921
25	0,045	0,001624	0,051	0,002078	0,001062	0,001419	0,731
26	0,040	0,001287	0,046	0,001671	0,001339	0,001789	0,579
27	0,036	0,001021	0,041	0,001344	0,001689	0,002256	0,459
28	0,032	0,000810	0,037	0,001083	0,002129	0,002845	0,364

Para os cálculos a seguir será levada em consideração a corrente suportada pelo fio escolhido, AWG28, em relação à densidade de corrente por área do fio.

- Corrente suportada pelo fio para $J = 450\text{A}/\text{cm}^2$

$$I_{\text{fio_trafo}} = 0.364\text{A} \quad (4.6)$$

- Número de fios em paralelo

$$N_{\text{fp_trafo}} = \frac{I_{p_{\text{rms_trafo}}}}{I_{\text{fio_trafo}}} = 3 \quad (4.7)$$

Este número é usado para ambos os enrolamentos, já que a relação de transformação é unitária.

4.4.4.4 Área ocupada pelo cobre

- Área total do fio com isolamento

$$A_{total_{fio_trafo}} = 0.001083cm^2 \quad (4.8)$$

- Área do enrolamento primário

$$A_{pri_{fio_trafo}} = A_{total_{fio_trafo}} \times N_{fp_trafo} \times Np_{trafo} = 0.253cm^2 \quad (4.9)$$

Novamente, por consequência da relação de transformação ser unitária, a área dos enrolamentos são as mesmas. A metodologia desenvolvida para fazer os enrolamentos primário e secundário foi enrolar camadas sobrepostas com intercalação dos tipos, da seguinte forma: primeiro foi feita uma camada com condutores do enrolamento secundário; por seguinte, uma camada com os condutores referentes ao primário e, assim, por diante até a finalização do número de espiras, tomando sempre o devido cuidado para que as camadas fossem sempre iguais em número de espiras.

$$A_{sec_{fio_trafo}} = A_{total_{fio_trafo}} \times N_{fp_trafo} \times Ns_{trafo} = 0.253cm^2 \quad (4.10)$$

- Área total dos enrolamentos:

$$A_{total_{enr_trafo}} = A_{pri_{fio_trafo}} + A_{sec_{fio_trafo}} = 0.507cm^2 \quad (4.11)$$

4.4.4.5 Fator de execução

Este fator é um cálculo levado em consideração para parametrizar a possibilidade de execução do componente magnético. O resultado deste cálculo deve ser menor que 1, teoricamente, mas como temos na prática outros fatores, já que este transformador foi feito manualmente em laboratório, devemos considerar o resultado de possível execução de um valor abaixo de 0,7.

Este cálculo é uma relação feita entre área total de cobre ocupada pelos enrolamentos primário e secundário no carretel do núcleo escolhido e a área da janela eficaz do mesmo.

$$Fator_{\text{execução_trafo}} = \frac{A_{\text{total}}_{\text{enr_trafo}}}{A_{W_{\text{trafo}}}} = 0.323 \quad (4.12)$$

Temos com este resultado a possibilidade de execução garantida já que obtemos um valor menor que 0,7.

4.4.4.6 Comprimento dos condutores

Este cálculo é muito importante para determinar o comprimento do condutor para a execução de cada enrolamento, haja vista que os fios geralmente são vendidos em carretéis com grandes quantidades.

Para este cálculo utiliza-se de um parâmetro dado pelo fabricante do carretel que estipula um comprimento médio de fio em relação à área da janela, conforme a Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Tabela de referência de valores do núcleo escolhido para o transformador.

CÓDIGO DE ENCOMENDA	Nº DE SECÇÕES	JANELA [mm ²]	COMPRI. MÉD. [mm/esp]	PESO ~g [mm]	MATERIAL
CE-42/21/15-1/0-POM	1	157.00	87.00	4.50	Poliacetal

- Comprimento médio do fio para o núcleo EE42/15

$$l_{\text{med_EE4215}} = 87\text{mm} \quad (4.13)$$

- Comprimento do fio para cada enrolamento

Aqui o cálculo considera o número total de espiras paralelas, bastando dividir por 3 para limitar o comprimento para cada fio do conjunto paralelo.

$$l_{\text{med_enr_trafo}} = 1.15 \times l_{\text{med_EE4215}} \times N_{p_{\text{trafo}}} \times N_{fp_{\text{trafo}}} = 23.412\text{m} \quad (4.14)$$

- Comprimento total de fio a ser usado no carretel

$$l_{\text{total_fio_trafo}} = 2 \times l_{\text{med_enr_trafo}} = 46.823m \quad (4.15)$$

Após a confecção do transformador, encontramos através de medição em laboratório os valores da indutância magnetizante e de dispersão do transformador, conforme segue abaixo.

- Indutância magnetizante: $L_{\text{mag_trafo}} = 7.6mH$
- Indutância de dispersão: $L_{\text{dispersão_trafo}} = 7.6\mu H$

Na Tabela 4.6 consta o resumo do projeto do transformador com os valores encontrados.

Tabela 4.6 - Resumo do projeto do transformador.

RESUMO DO PROJETO DO TRANSFORMADOR		
Núcleo escolhido	NEE 42/15 – IP12 Thornton	
Fio escolhido	AWG28	
Número de espiras / fios em paralelo do primário	78	3
Número de espiras / fios em paralelo do secundário	78	3
Comprimento total de fio	46.823m	
Indutância magnetizante	7.6mH	
Indutância de dispersão	7.6uH	

4.4.4.7 Dimensionamento dos interruptores

a) Tensão máxima

A tensão máxima que os interruptores suportam em seu bloqueio é a mesma da fonte de entrada.

$$V_{\text{pk}_s} = V_{\text{pri}} = 400V \quad (4.16)$$

b) Corrente eficaz

$$V_{rms_s} = \sqrt{\left(\frac{1}{T_s}\right) \times \left[\int_0^{\frac{T_s}{4}} \left[\frac{(4 \times t \times I_{pri} \times n)}{T_s} \right]^2 dt + \int_0^{D \frac{T_s}{2}} (I_{pri} \times n)^2 dt + \int_0^{(1-D) \frac{T_s}{2}} (I_{pri} \times n)^2 dt \right]} = 0.581A \quad (4.17)$$

c) Corrente média

$$I_{med_s} = \frac{\frac{1}{2} n \times I_{pri}}{\eta} = 0.38A \quad (4.18)$$

d) Corrente de pico

$$I_{pk_s} = \frac{n \times I_{pri}}{\eta} = 0.761A \quad (4.19)$$

e) Interruptor escolhido

O interruptor foi escolhido considerando cálculos apresentados e o que havia disponível em estoque no almoxarifado do laboratório.

Especificação dos interruptores

- Mosfet: IRF840A
- Resistência de condução a 100°C: $R_{DS} = 0.8\Omega$
- Tempo de subida: $t_r = 23ns$
- Tempo de descida: $t_f = 19ns$
- Tempo para acionar: $t_{on} = 1ns$
- Tempo para desligar: $t_{off} = 26ns$

4.4.4.8 Dimensionamento dos diodos retificadores

a) **Tensão reversa máxima nos diodos**

$$V_{pk_ret} = V_{bat_max} = 230.4V \quad (4.20)$$

b) **Corrente média no diodo**

$$I_{med_ret} = 4 \frac{I_{sec}}{\pi^2 \eta} = 0.308A \quad (4.21)$$

c) **Corrente eficaz no diodo**

$$I_{rms_ret} = \left(\frac{I_{sec}}{\eta} \right) \times \sqrt{2 \frac{n}{\pi}} = 0.607A \quad (4.22)$$

d) **Corrente de pico no diodo**

$$I_{pk_ret} = 2 \left(n \frac{I_{sec}}{\eta} \right) = 1.522A \quad (4.23)$$

e) **Diodos escolhidos: 15ETH06S**Especificação dos diodos

- Diodos ultrarrápidos: 15ETH06S
- Queda de tensão máxima a 150°C: $V_{f_ret} = 2.2V$
- Corrente máxima de pico a 120°C não repetitiva: $I_{fsm_ret} = 120A$
- Corrente de pico repetitiva: $I_{fm} = 30A$
- Tensão reversa máxima: $V_{rm_ret} = 600V$
- Tempo de recuperação reversa: $t_{rr_ret} = 51ns$

4.4.4.9 Projeto do indutor de filtro

- Corrente média circulante no indutor

$$I_{L_med} = 0.7A \quad (4.24)$$

- Corrente de pico

$$I_{L_pk} = 1.05 \times I_{L_med} = 0.735A \quad (4.25)$$

- Variação de corrente aceitável

$$\Delta I = 0.5\% \quad (4.26)$$

4.4.4.9.1 Cálculo da indutância

$$L_f = \frac{\left(V_{bat_min} - \frac{V_{bat_min}}{V_p} \right)}{2f_s \times \Delta I \times I_{L_med}} = 20mH \quad (4.27)$$

4.4.4.9.2 Energia armazenada no núcleo

$$E_L = 10^3 \times L_f \times I_{L_pk} = 10.59J \quad (4.28)$$

4.4.4.10 Projeto físico do indutor

Para o projeto do indutor, optou-se pelo o uso de núcleo toroidal da fabricante *Powder* do tipo Kool M μ [®], cujo tamanho é selecionado mediante a análise do ábaco, Figura 4.3, (MAGNETICS, 2015) tomando como base a energia previamente calculada a ser armazenada pelo núcleo.

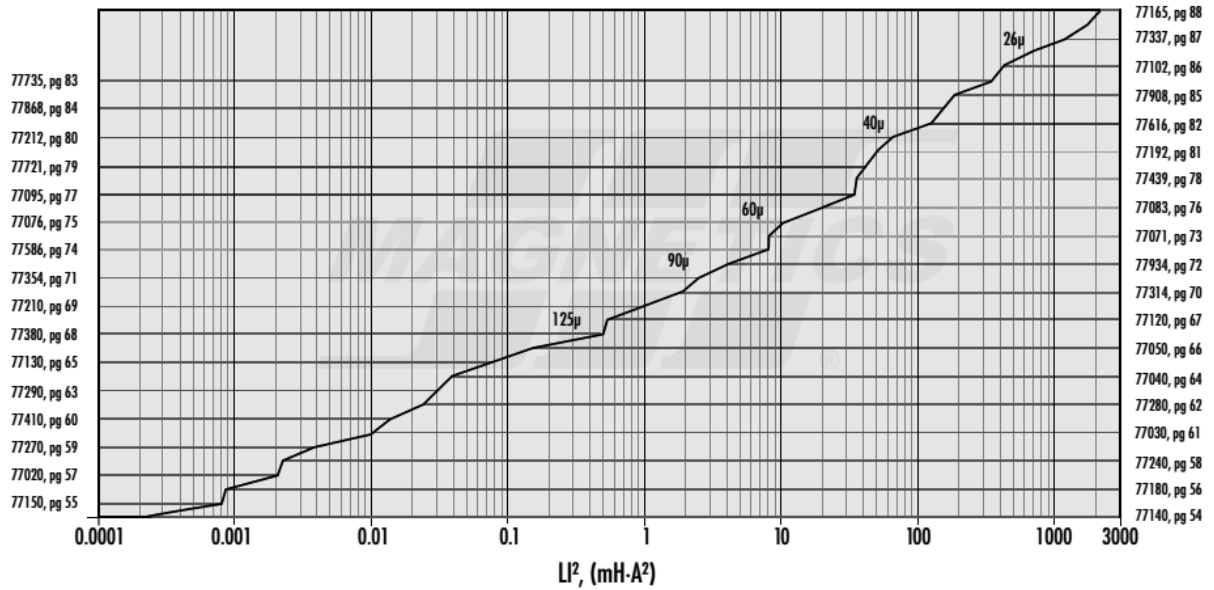


Figura 4.3 - Ábaco de seleção do núcleo toroidal do indutor de filtro. Fonte [Powder].

Desta forma foi feita a escolha do núcleo com permeabilidade inicial de 60μ , o que leva ao núcleo de número 77083 de características descritas a seguir.

- Área de seção transversal

$$Ae_L = 107\text{mm}^2 \quad (4.29)$$

- Comprimento do caminho magnético

$$le_L = 98.4\text{mm} \quad (4.30)$$

De posse disto, pode-se fazer o cálculo do número de espiras através da equação a seguir. No entanto, devido a este tipo de núcleo possuir uma saturação suave da curva BH , a indutância varia conforme a corrente varia gradativamente sobre o indutor projetado com este material, acarretando por consequência numa também variância do número de espiras.

$$N_{(k)} = \sqrt{\frac{L_f \times le_L \times 10^8}{0.4\pi \times \mu(k) \times Ae_L}} \quad (4.31)$$

Encontrado o valor inicial de espiras, ainda como segue em MAGNETICS, 2015 deve-se por seguinte encontrar a intensidade do campo magnético para o nível CC do indutor pela equação H_L , a fim de, através de um novo ábaco Figura A.2, encontrar o novo valor da permeabilidade relativa do núcleo ($\mu(k+1)$) em p.u..

$$H_L = \frac{N_{(k)} \times I_{L_pk}}{le_L} \quad (4.32)$$

O número final de espiras é encontrado pela equação (4.33) abaixo com tantas iterações necessárias forem até que o valor encontrado seja igual ao da equação (4.31).

$$N_{(k+1)} = \sqrt{\frac{L_f \times le_L \times 10^8}{0.4\pi \times \mu(k+1) \times Ae_L}} \quad (4.33)$$

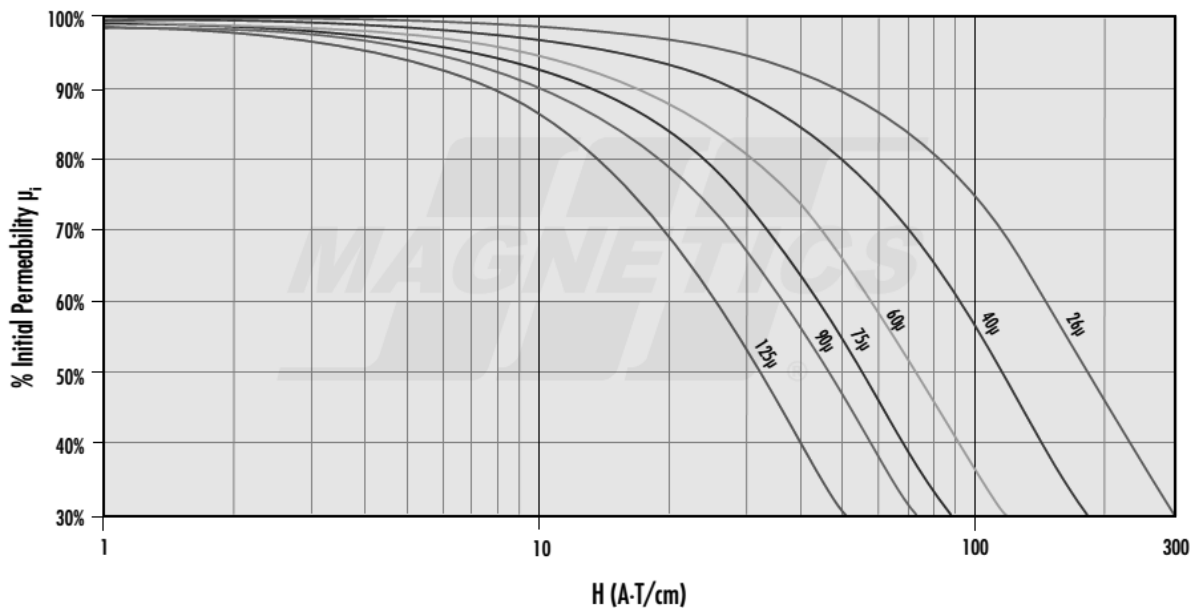


Figura 4.4 - Ábaco para escolha da nova permeabilidade via campo magnético, Fonte [Magnetics].

Considerando o já mencionado, que com o uso deste tipo de núcleo escolhido, a indutância é variante em relação à corrente circulante no indutor, leva a crer que sem corrente a indutância por consequência deve ser maior do que o esperado com a corrente máxima aplicada sobre o mesmo. Esta indutância inicial pode então ser calculada através da seguinte equação.

$$L_{vazio} = \frac{0.4\pi \times \mu(k+1) \times Ae_L \times N_{(k+1)}^2}{le_L 10^8} \quad (4.34)$$

Por fim, chegou-se ao número de 350 espiras com 3 fios AWG28 em paralelo, para um arranjo de dois núcleos 77083 empilhados.

Após as definições de projeto e a confecção do protótipo conforme valores encontrados acima, se segue com o projeto do controle do conversor. A Tabela 4.7 expõe um resumo dos parâmetros utilizados no projeto do conversor.

Tabela 4.7 - Parâmetros usados para a implementação do sistema proposto

Parâmetros	Símbolo	Valor
<i>Frequência de chaveamento</i>	f_s	71kHz
<i>Tensão de barramento</i>	V_{in}	400V
<i>Indutor de filtro</i>	L_f	20mH
<i>Relação de transformação</i>	n_1/n_2	1
<i>Resistência interna da bateria (banco)</i>	r_i	0.48Ω
<i>Tensão de circuito aberto da bateria (banco)</i>	E_m	230.4V
<i>Tensão de equalização da bateria (banco)</i>	V_{eq}	230.4V
<i>Tensão de flutuação da bateria (banco)</i>	V_{flut}	214.08V
<i>Tensão mínima da bateria (banco)</i>	V_{min}	168V

4.4.5 Projeto do controle do conversor

A obtenção da modulação Phase-Shift empregada no conversor é mostrada a seguir.

$$TPER = \frac{f_{timer}}{2f_s} \quad (4.35)$$

Onde, TPER corresponde ao valor máximo da triangular, $f_{timer} = 150 \text{e}6 \text{ Hz}$ é a frequência do timer do DSP (Digital Signal Processor), $f_s = 71 \text{e}3 \text{ Hz}$ é a frequência de amostragem. O controle da tensão imposta pelo conversor (V_{ret}) é obtido através da variação da fase entre as duas triangulares T_A e T_B . A variável de controle ϕ define a defasagem entre as portadoras onde: $\phi=0$ corresponde a defasagem mínima e conseqüentemente zero de tensão, e $\phi=1$ corresponde a tensão máxima na saída, igual a tensão de entrada refletida para o secundário, como mostrado na Figura 4.5.

Para exemplificar como a modulação Phase-Shift funciona também é apresentada uma variação na lei de controle de $\phi=0.33$ para $\phi=0.66$.

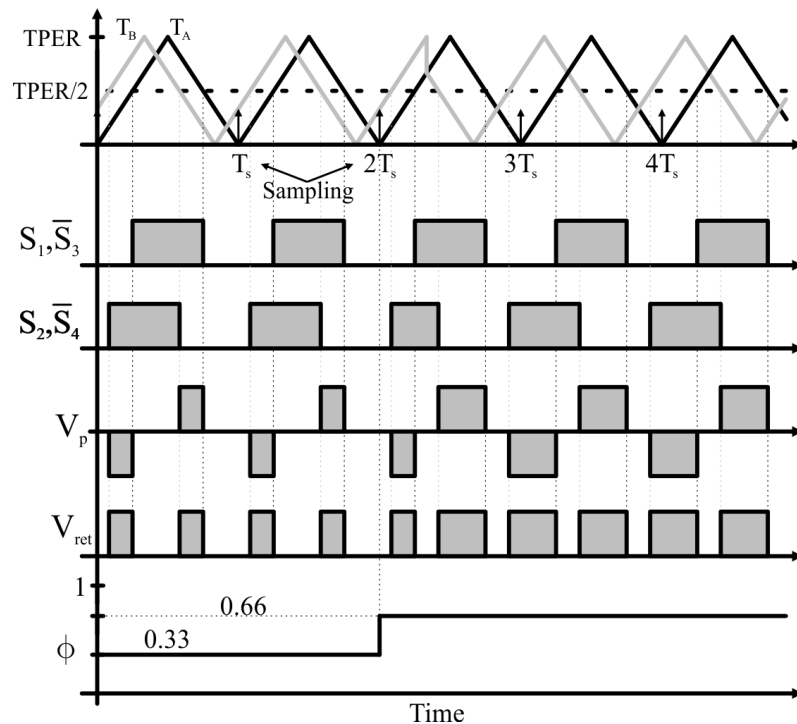


Figura 4.5 - Modulação empregada no conversor - Phase-Shift.

Como os conversores PWM geralmente produzem tensões descontínuas e de alta frequência, geralmente são utilizados filtros passa baixas para atenuar as harmônicas produzidas. Neste contexto tem-se interesse nos valores médios das variáveis envolvidas. (ERICKSON; MAKSIMOVIC, 2004). A tensão média produzida pelo inversor é expressada pela equação (4.36):

$$V_{ret}(\phi) = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} v_p(V_{in}, \phi, t) \frac{n_2}{n_1} dt = V_{in} \frac{n_2}{n_1} \frac{\phi}{180^\circ} \quad (4.36)$$

Onde as letras em maiúsculo significam valores médios. Considerando a tensão média, pode-se obter uma versão simplificada do modelo médio do sistema de carga, Figura 4.6:

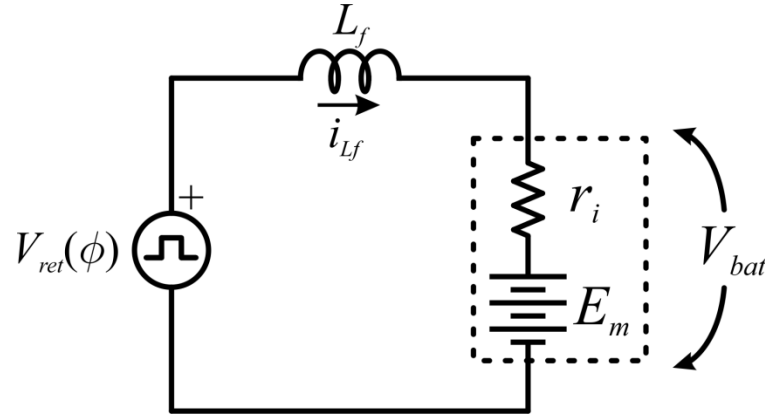


Figura 4.6 - Versão simplificada do modelo médio do sistema de carga implementado.

Desta forma analisando o modelo simplificado acima e desconsiderando a fonte de tensão E_m , pode-se encontrar a função de transferência $G_p(s)$, que relaciona a corrente de saída com a variável de controle ϕ :

$$G_p(s) = \frac{i_{L_f}(s)}{\phi(s)} = \frac{V_{in} \frac{n_2}{n_1}}{L_f s + r_i} = \frac{400}{0.02s + 0.48} \quad (4.37)$$

Ainda, como o controlador foi implementado na forma digital, é interessante, sob o ponto de vista de controle, obter o modelo discreto da planta. Como a ação de controle ϕ , é mantida constante durante todo o período de amostragem utiliza-se a discretização por *ZOH* (*Zero Order Holder*), com período de amostragem $T_s = 1/f_s$. Também é inserido um atraso de uma amostra correspondente à implementação digital, como mostrado em (4.38).

$$G_p(z) = \frac{0.2816}{z(z - 0.9997)} \quad (4.38)$$

4.4.6 Projeto do controlador de corrente

O controle de corrente do conversor é realizado através de um controlador proporcional integral (PI), que garante erro nulo em regime permanente para entradas do tipo degrau. O projeto do controlador é realizado no domínio Z baseado na frequência de corte e margem de fase desejada. Para o sistema em questão, concluiu-se que uma frequência de corte de $\omega_c = 2\pi 2500$ rad/s e uma margem de fase de $PM = 60^\circ$ garante um bom desempenho em termos de velocidade transitória, estabilidade e regime permanente. O controlador que garante tais requisitos de projeto é mostrado em (4.39):

$$PI(z) = 0.78593 \left(\frac{z - 0.9574}{z - 1} \right) \quad (4.39)$$

A Figura 4.7 mostra o diagrama de Bode do sistema em malha aberta, como pode ser visto o controlador acima atinge os requisitos de projeto desejado.

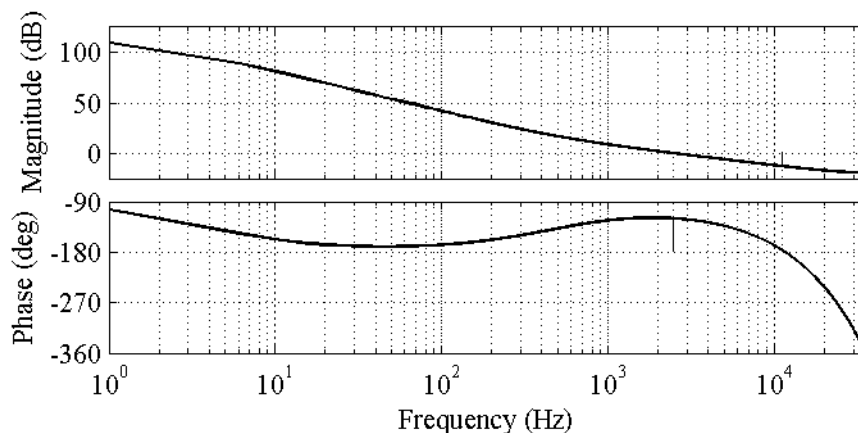


Figura 4.7 - Diagrama de BODE do sistema em malha aberta .

4.5 Resultados de simulação

Para validar o método de carga previamente exposto utilizou-se o software PSIM[®] onde o conversor da Figura 4.2 foi implementado, bem como o controlador de corrente da equação (4.39).

A fim de considerar a dinâmica das baterias e conseguir uma simulação com tempo reduzido, fez-se uma abordagem diferenciada no modelo elétrico da bateria, aproximando este por circuito RC paralelo.

Fazendo esta aproximação e considerando a bateria como descarregada, tem-se uma constante de tempo que o circuito leva para carregar tal bateria com a corrente de carga mínima, igual a 5% da capacidade. Com isso, através de equações que descrevem um circuito RC paralelo, estipulou-se os valores Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Parâmetros utilizados para simulação.

Parâmetros	Valor
V_{in}	400V
L_f	20mH
E_m	230.4V
r_i	0.48 Ω
f_s	71kHz
C	142.857 μ F
R	560 Ω

A Figura 4.8 representa o método de carga simulado com o conversor e controle propostos. Onde se tem a tensão na bateria durante a carga e descarga, bem como a corrente pulsada de referência ($i_{L_f}^*$) e a corrente da bateria (i_{L_f}). Também é mostrada a ação de controle ϕ durante o transitório de corrente de referência.

O controlador PI da equação (4.39) é implementado na forma de variáveis de estados no DSP e a variável x_{PI} representa o estado do mesmo. Quando a referência de corrente ($i_{L_f}^*$) é levada a zero pelo algoritmo proposto, o conversor é desligado e o estado do PI é forçado (setado) a zero para evitar transitórios de partida na próxima vez que o conversor seja acionado.

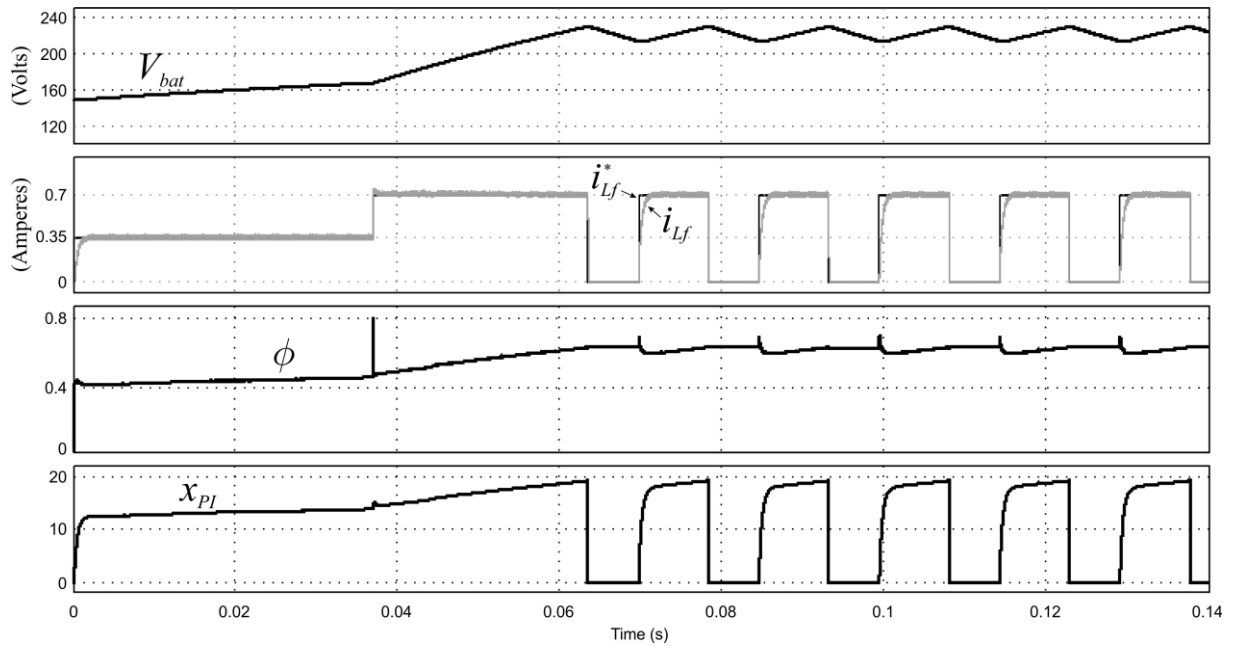


Figura 4.8 - Formas de onda do método de carga proposto. Tensão na bateria, Corrente na bateria e corrente da bateria de referência, ação de controle e estado interno do PI.

4.6 Conclusão

Neste capítulo apresentou-se o método de carregamento de bateria modificado baseado no método de carga pulsada utilizando o conversor Full-Bridge Phase-Shift isolado. Realizou-se a modelagem simplificada do conversor a qual foi utilizada para o projeto de um controlador PI de corrente. O método de carga proposto monitora a tensão da bateria e define a corrente de referência que é então aplicada ao controlador PI. Os resultados de simulação indicam que o método proposto garante a carga da bateria independente do estado inicial da mesma.

5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

5.1 Introdução

Os resultados experimentais foram obtidos a partir de um protótipo desenvolvido em laboratório, com controle digital implementado na plataforma *DSP* (Processador Digital de Sinais), TMS320F28335, da fabricante *Texas Instruments*®.

Para as medições de corrente e tensão foram utilizados ambos transdutores da fabricante LEM, modelo LA55-P para corrente e modelo LV25-P para tensão.

O conversor foi dimensionado para 400W de potência para ser capaz de recarregar com folga um banco de 16 baterias de 12V e capacidade de 7Ah, da fabricante Unipower, modelo UP1270SEG (UNIPOWER, 2015).

Como o projeto foi previsto para ser acoplado a um sistema já existente de uma UPS com barramento de 400V, para ser usado como fonte primária do carregador, se fez o uso de uma fonte regulada em tensão para a montagem do protótipo, configurada na mesma tensão de interesse. Desta forma, dispensando o projeto de um conversor pré-regulador de tensão. Os semicondutores utilizados são descritos na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Semicondutores usados na implementação prática do carregador.

Componente	Símbolo	R_{dson}	V_F
<i>IRF840A</i>	S_{1-4}	$0.85\Omega @ V_{GS} = 10V, I_D = 4.8A$	2.0V
<i>RHRP8120</i>	D_{1-4}	-	2.5V @ 8A

O tempo morto necessário para que não ocorresse um curto entre os braços complementares do conversor, foi configurado via software no valor de 300ns.

Para aquisição das formas de onda e análise dos sinais de funcionamento do conversor durante toda a etapa de acompanhamento no desenvolvimento do conversor, foi utilizado o osciloscópio eletrônico da fabricante *Tektronix*® de modelo DPO3054.

Demais parâmetros considerados para a implementação tanto em software, no DSP (modelagem digital), quanto para o dimensionamento dos componentes físicos e equipamentos utilizados, estão descritos na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Parâmetros usados para a implementação do sistema proposto.

Parâmetros	Símbolo	Valor
<i>Frequência de chaveamento</i>	f_s	71kHz
<i>Tensão de barramento</i>	V_{in}	400V
<i>Indutor de filtro</i>	L_f	20mH
<i>Relação de transformação</i>	n_1/n_2	1
<i>Resistência interna da bateria (banco)</i>	r_i	0.48 Ω
<i>Tensão de circuito aberto da bateria (banco)</i>	E_m	230.4V
<i>Tensão de equalização da bateria (banco)</i>	V_{eq}	230.4V
<i>Tensão de flutuação da bateria (banco)</i>	V_{flut}	214.08V
<i>Tensão mínima da bateria (banco)</i>	V_{min}	168V

A Figura 5.1 ilustra a implementação do sistema de carga proposto, enquanto a Figura 5.2 ilustra o sistema real de bancada em laboratório.

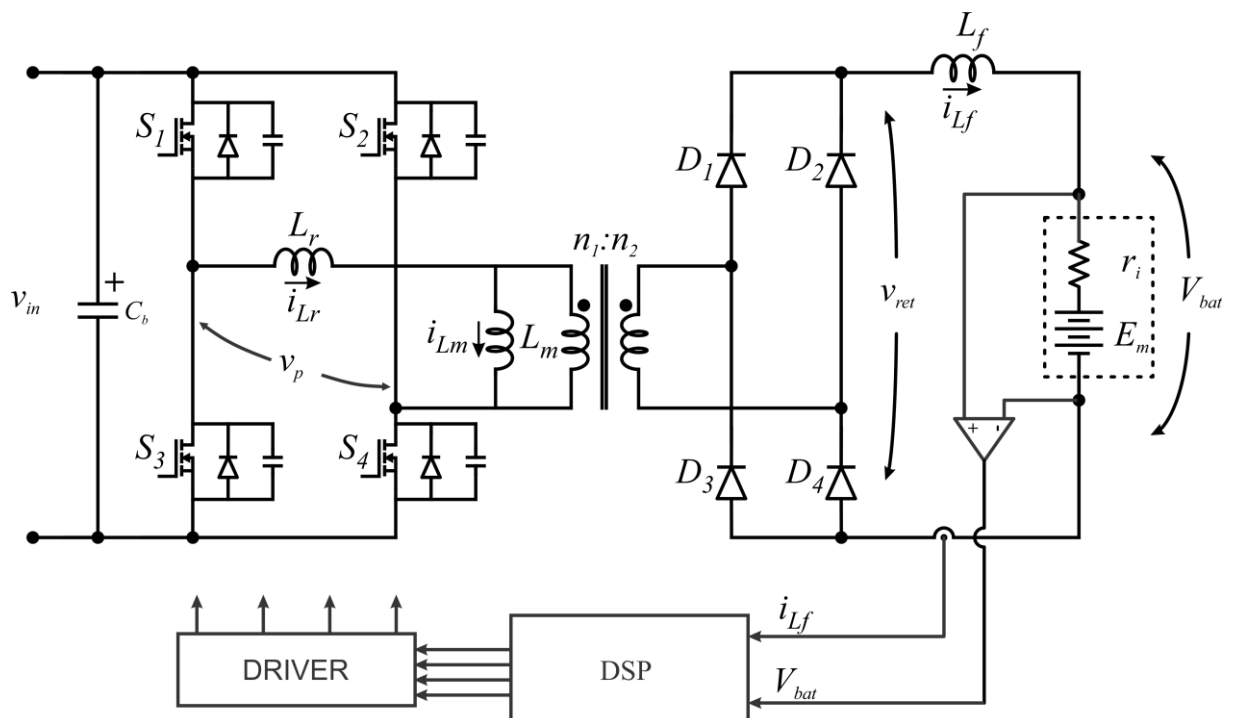


Figura 5.1 - Esquema utilizado para implementação do sistema de carga.

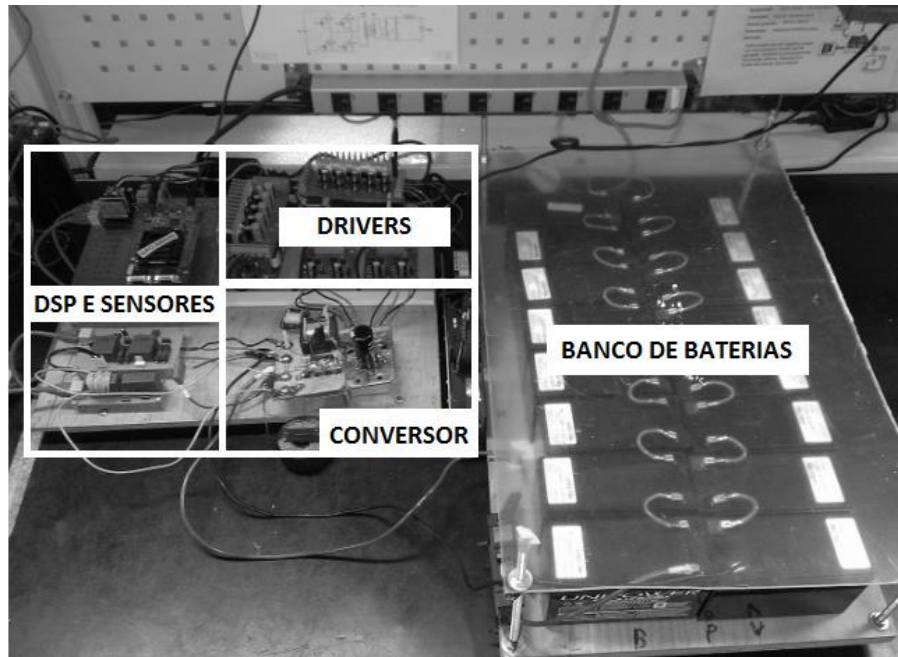


Figura 5.2 - Sistema implementado em bancada no laboratório.

5.2 Resultados e aquisições experimentais

Foram realizados vários ensaios cuidadosos para chegar ao funcionamento pleno do protótipo. Os quais serão descritos nas próximas seções.

5.2.1 Teste dos drivers e acionamento do conversor

Nesta fase do desenvolvimento fez-se o teste em malha aberta do acionamento do conversor com uma carga RC, com os mesmos parâmetros utilizados em simulação, atribuindo uma defasagem de 50% entre os braços do conversor.

Na Figura 5.3 foi feita a aquisição de um dos braços do conversor e da corrente entregue a carga, sendo que o CH1 (cor azul escuro) do equipamento de medição representa a tensão sobreposta às chaves semicondutoras, o CH2 (cor azul claro) a tensão de gate drive aplicado às chaves e o CH4 (cor verde) a corrente entregue a carga.

Nota-se que ocorre uma ressonância quando o braço complementar ao que está sendo medido é desacionado, gerando um pico na corrente de saída. Isto pode ser reduzido através de dispositivos auxiliares de comutação, mediante estudos da energia envolvida entre as

indutâncias e capacitâncias intrínsecas do conversor como um todo, principalmente das chaves condutoras e dos elementos magnéticos.

No entanto como o foco deste trabalho não é em específico o estudo do conversor e sim do método empregado para o carregamento das baterias, não foi dado ênfase neste possível problema, até por que, o conversor não estava operando em plena carga, tão pouco com as baterias, o que pode ser verificado a seguir com os ensaios com o conversor a pleno funcionamento, que este problema é reduzido.

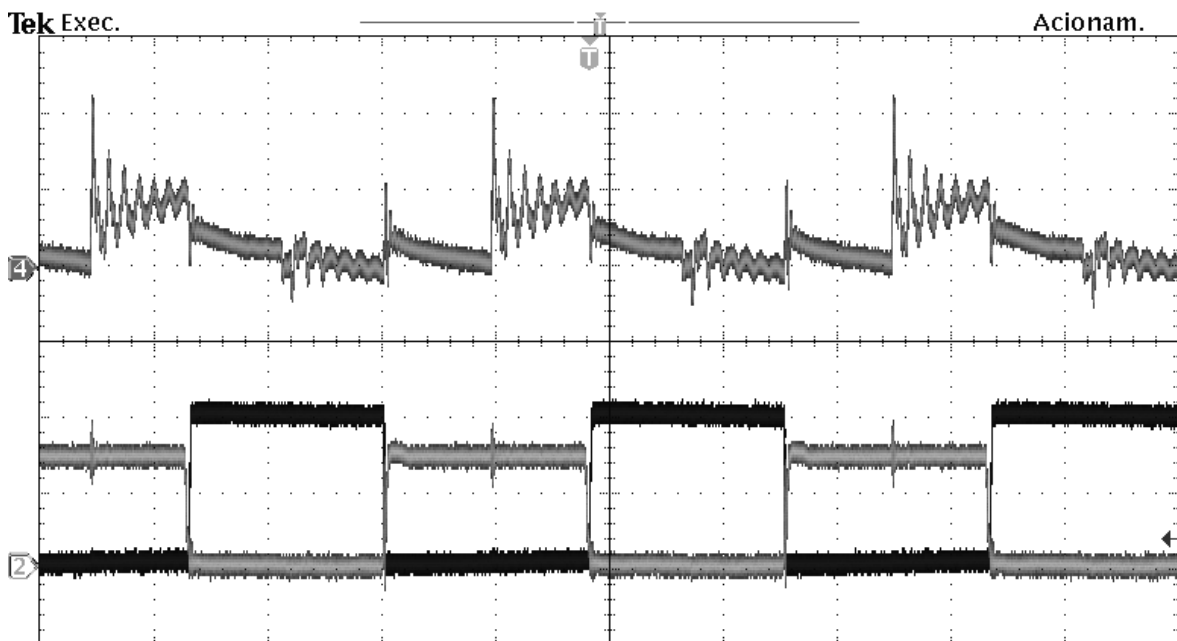


Figura 5.3 - Ensaio de teste do acionamento em malha aberta do conversor, com carga RC.

Na Figura 5.4 é ilustrado o momento exato do bloqueio de um dos braços do conversor e a ressonância envolvida.

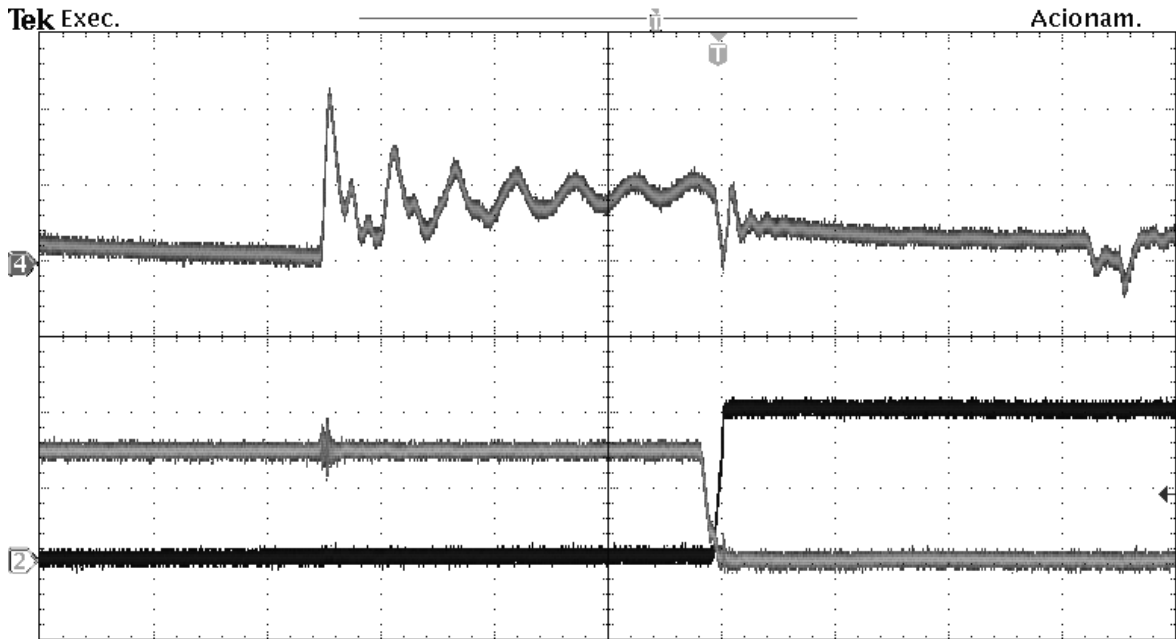


Figura 5.4 - Momento de bloqueio de um dos braços do conversor, operando em malha aberta e com carga RC.

Na Figura 5.5 temos a tensão de saída (CH2), tensão no primário do transformador (CH3) e a corrente de saída (CH4).

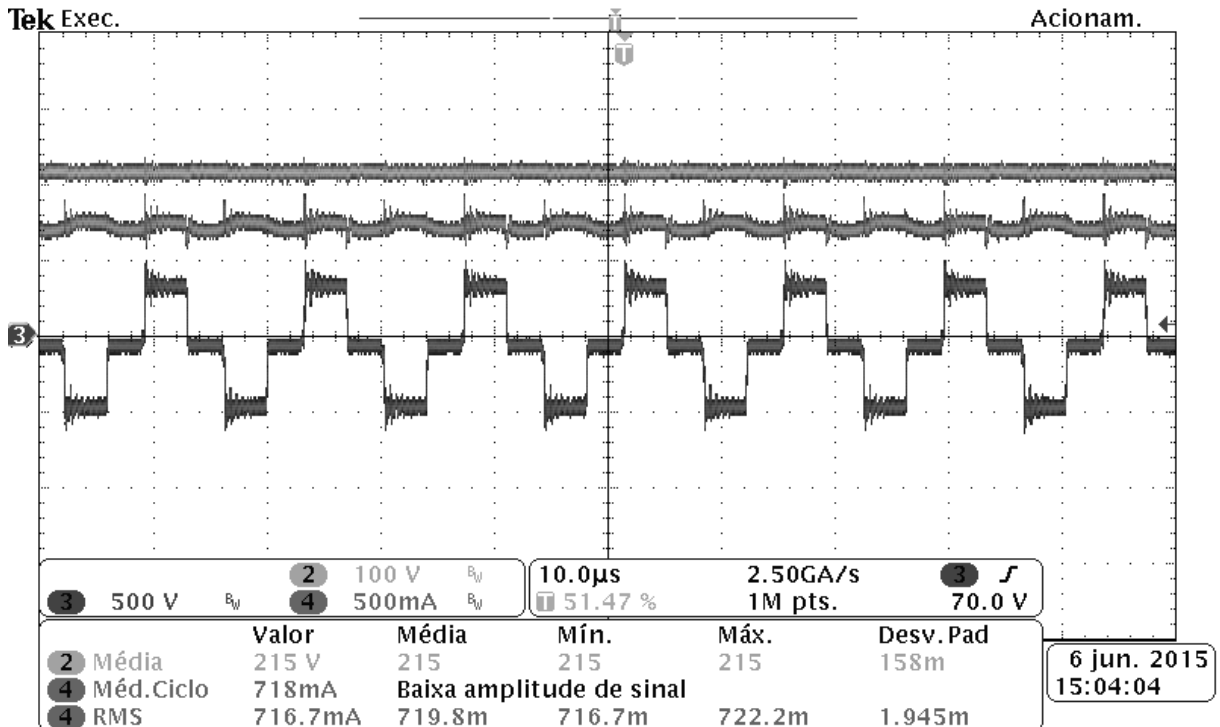


Figura 5.5 - Tensão de saída (CH2), tensão do primário do transformador (CH3) e corrente de saída (CH4), com carga RC.

5.2.2 Teste do controle em malha fechada

Ainda nos testes prévios, ou seja, sem colocar o conversor com suas plenas características em funcionamento, nesta seção é mostrado o comportamento do algoritmo e dos controladores programados digitalmente para a execução do devido método de carga proposto com uma carga RC.

Na Figura 5.6 tem-se a ilustração da operação do conversor em malha fechada, com carga RC, onde no CH1 há a representação da tensão de saída do conversor e no CH4 da corrente saída, esta com ambas as referências bem demarcadas pelo controle implementado, I_{\min} (350mA) quando a tensão está em zero, ocasionando uma pré-carga ao banco de baterias e, I_{\max} (700mA) quando a tensão atingi o patamar de V_{\min} . Nota-se também que quando a tensão atingi o seu valor de pico V_{eq} , a corrente vai a zero, ou seja, o controle de tensão informa que o conversor deve ser desligado.

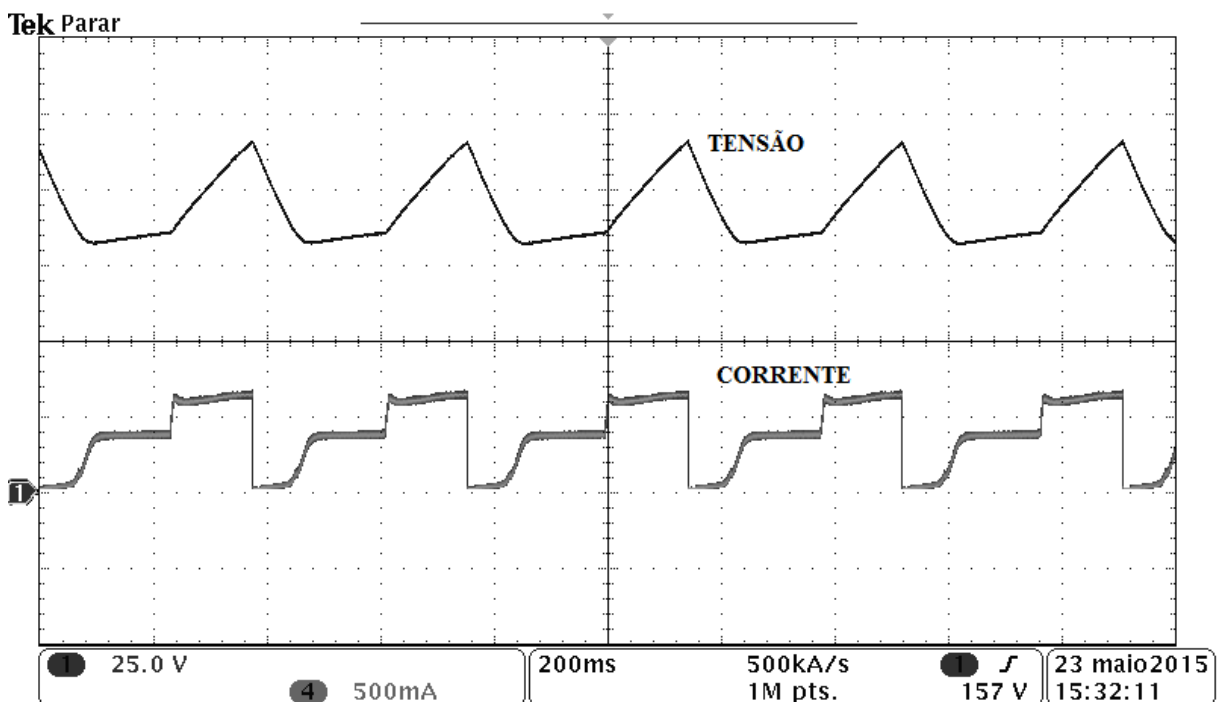


Figura 5.6 - Tensão de saída do conversor (CH1) e corrente de saída (CH4.) em malha fechada e carga RC.

5.2.3 Resultados de funcionamento do conversor com baterias e método proposto

Nesta seção são mostradas as aquisições do conversor operando com plenas características de projeto: 16 baterias e fonte de entrada a 400V.

Na Figura 5.7 são representas: tensão no primário do transformador no CH2, tensão nas baterias no CH3 e corrente entregue as baterias no CH4.

Nota-se que devido aos picos inerentes da energia envolvida entre os elementos reativos parasitas do conversor, á media da corrente sofre certo acréscimo aquele estipulado em projeto, porém o controlador de corrente consegue atuar de forma satisfatória e manter essa média constante.

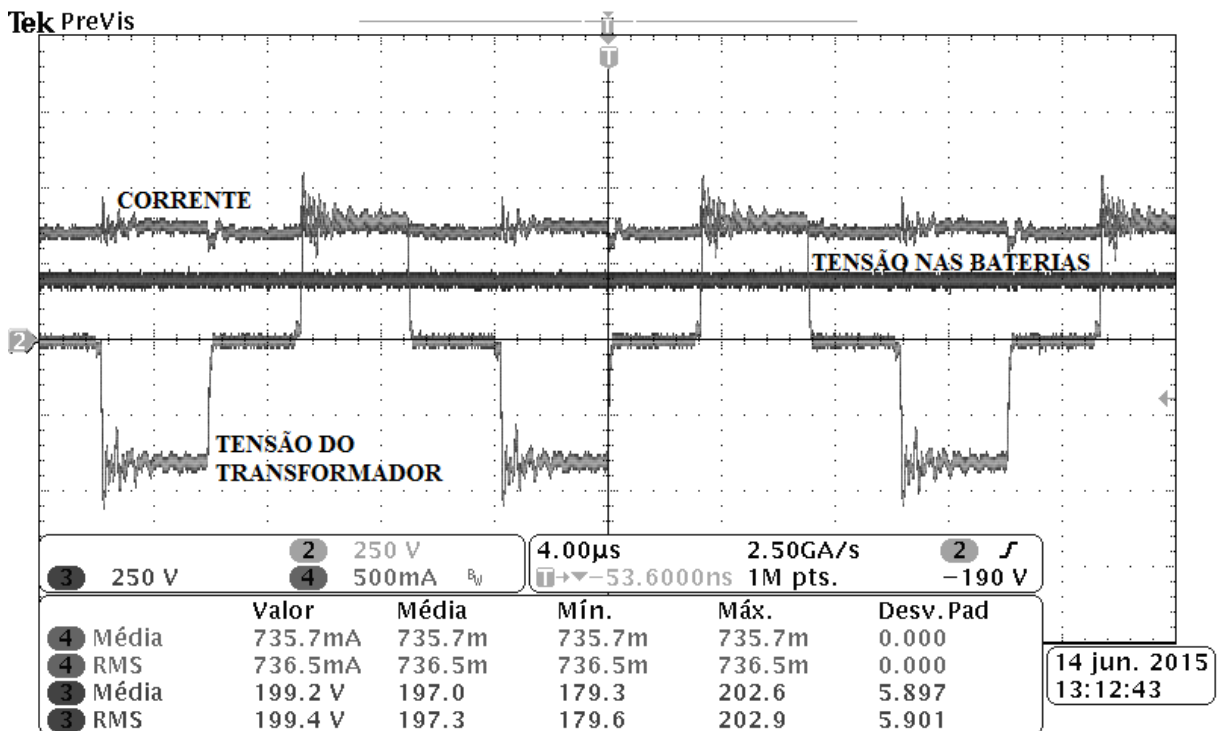


Figura 5.7 - Tensão do primário do transformador (CH2), tensão nas baterias (CH3) e corrente nas baterias (CH4), conversor em pleno funcionamento.

Na Figura 5.8 é demonstrada a tensão de entrada do conversor no CH2, a tensão nas baterias no CH3 e a corrente entregue as baterias no CH4.

Tanto nesta fase de carga quanto na anterior, tem-se as baterias drenando energia da fonte de entrada de 400V através do conversor, não sendo visto ainda o controle atuando de forma pulsada, pois as baterias ainda não atingiram o patamar de tensão de qualização.

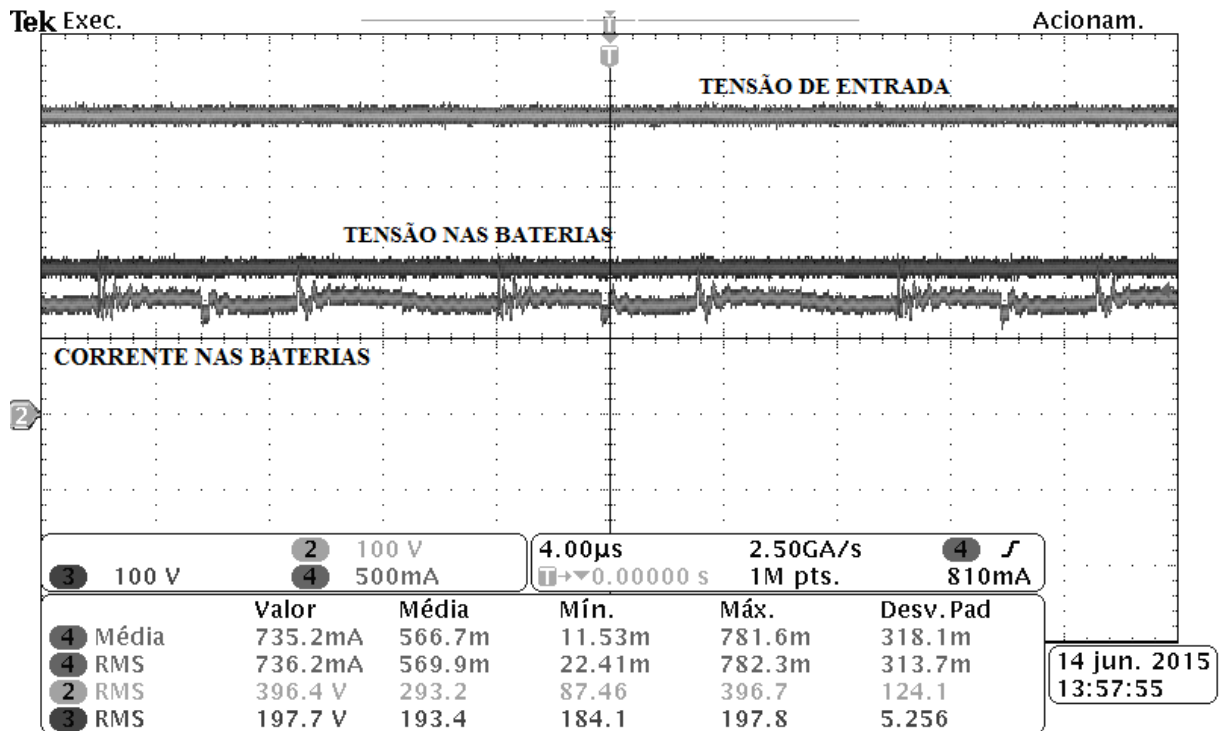


Figura 5.8 - Tensão de entrada do conversor (CH2), tensão nas baterias (CH3) e corrente nas baterias (CH4).

Tanto nesta fase de carga quanto na anterior, tem-se as baterias drenando energia da fonte de entrada de 400V através do conversor, não sendo visto ainda o controle atuando de forma pulsada, pois as baterias ainda não atingiram o patamar de tensão de qualização.

Na próxima figura, Figura 5.9, têm-se as mesmas formas de onda anteriores, porém com o acréscimo da tensão no primário do transformador no CH1. Nota-se pelo CH3, que representa a tensão nas baterias, já um acréscimo de tensão nelas, denotando que estão sendo carregadas.

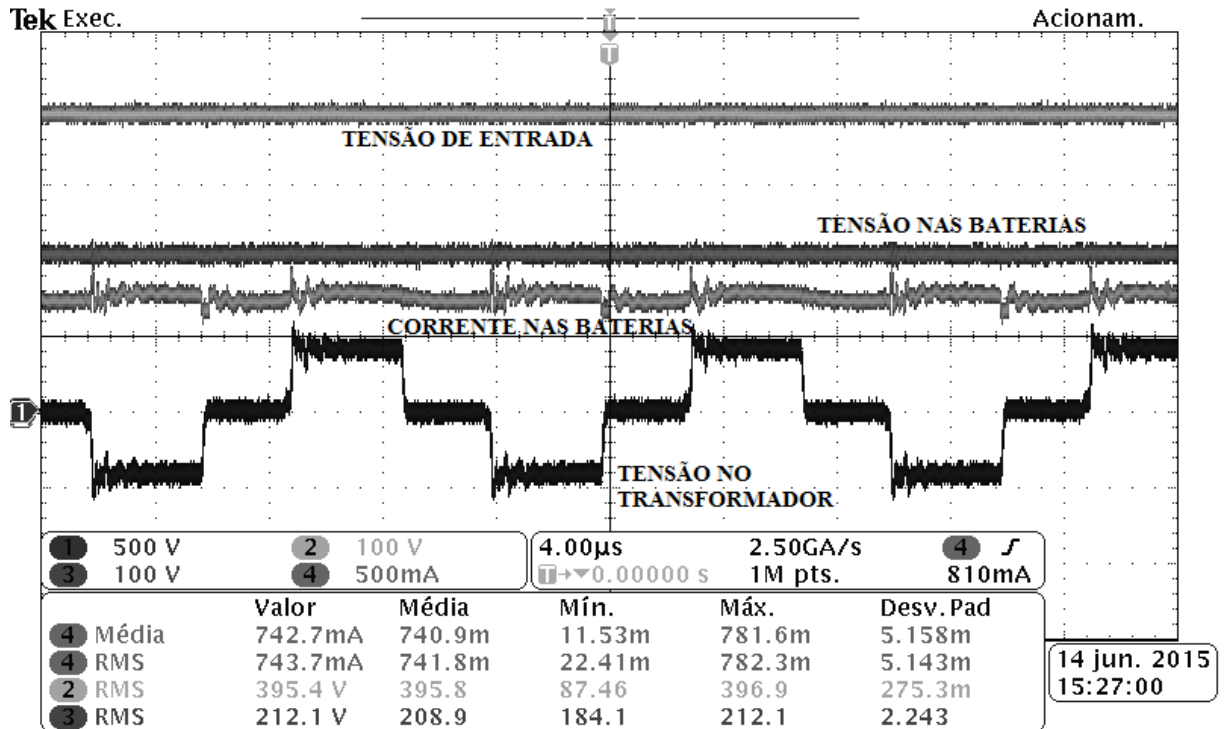


Figura 5.9 - Tensão no primário do transformador (CH1), tensão de entrada do conversor (CH2), tensão nas baterias (CH3) e corrente nas baterias (CH4).

Na Figura 5.10 há a ação do controle implementado demonstrando o método de carga proposto. Temos a tensão da fonte de entrada representada pelo CH2, a tensão nas baterias pelo CH3 e a corrente nas baterias pelo CH4.

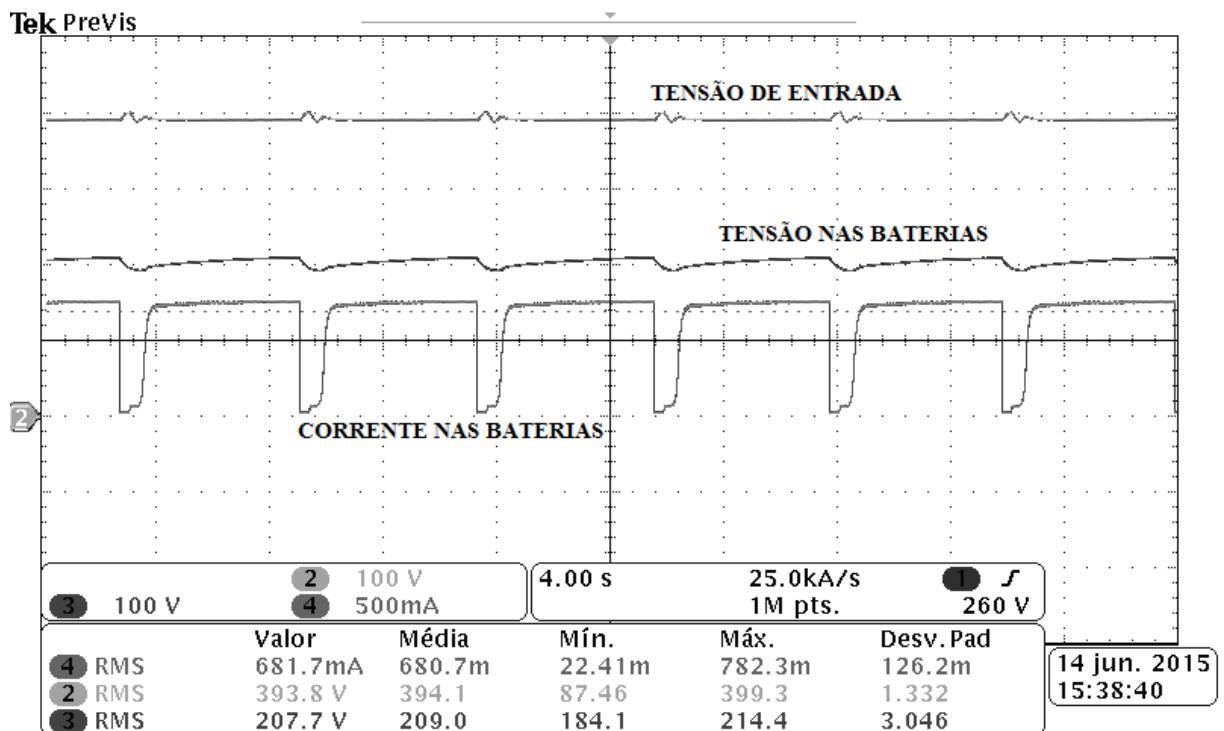


Figura 5.10 - Tensão de entrada do conversor (CH2), tensão nas baterias (CH3) e corrente nas baterias (CH4).

O tempo de carga das baterias com esta referência de 700mA de corrente foi de aproximadamente 1h30min até atingir a tensão de equalização.

5.2.4 Resultados do conversor em funcionamento com baterias e método corrente pulsada

O método de corrente pulsada foi implementado com o mesmo algoritmo desenvolvido para o método proposto, usando a tensão do banco de baterias como referência de tomada de decisão de quando o conversor deve ou não ser desligado.

No entanto, a fim de gerar o pulso negativo, utilizou-se uma resistência para dissipar a energia retirada da bateria.

Esta etapa de pulso negativo foi feita com o acionamento de um semiconductor extra durante 250ms, Figura 5.11, levando em consideração que o mesmo estaria sujeito à tensão de bloqueio de valor igual à tensão das baterias.

Também foi considerado um tempo morto entre o desligamento do conversor e o acionamento deste interruptor extra, de valor 10 μ s, como pode ser visto na Figura 5.12.

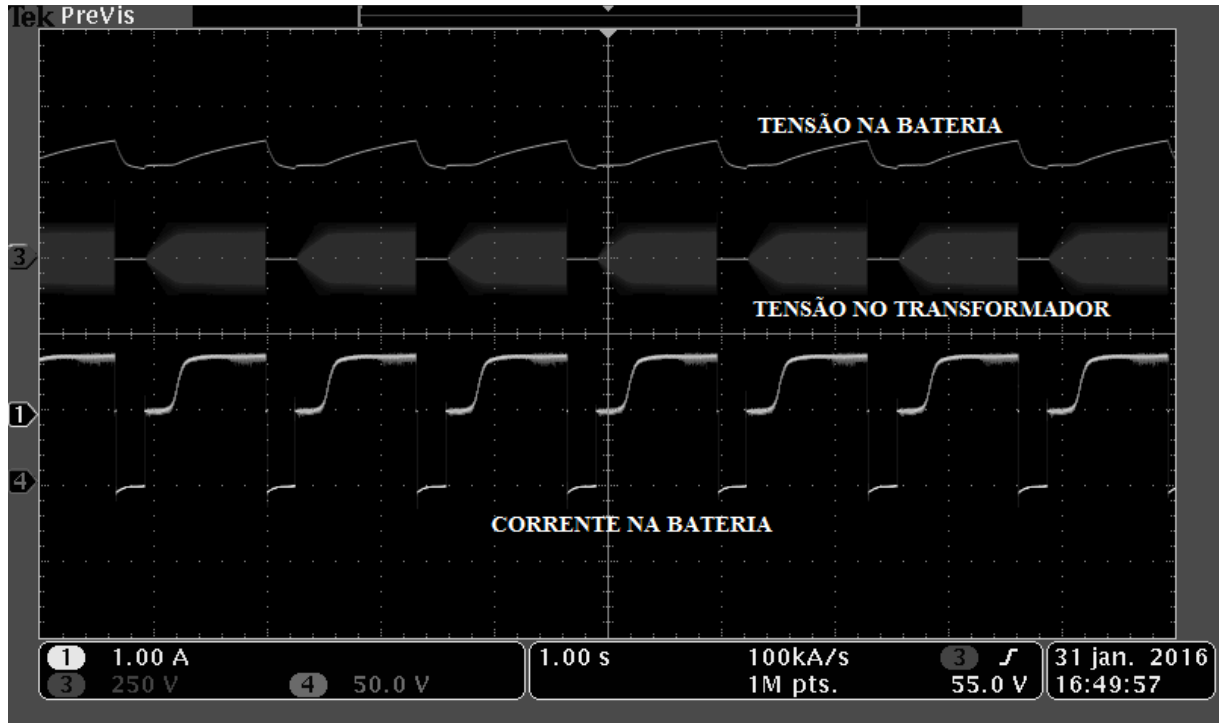


Figura 5.11 - Método de corrente pulsada implementado.

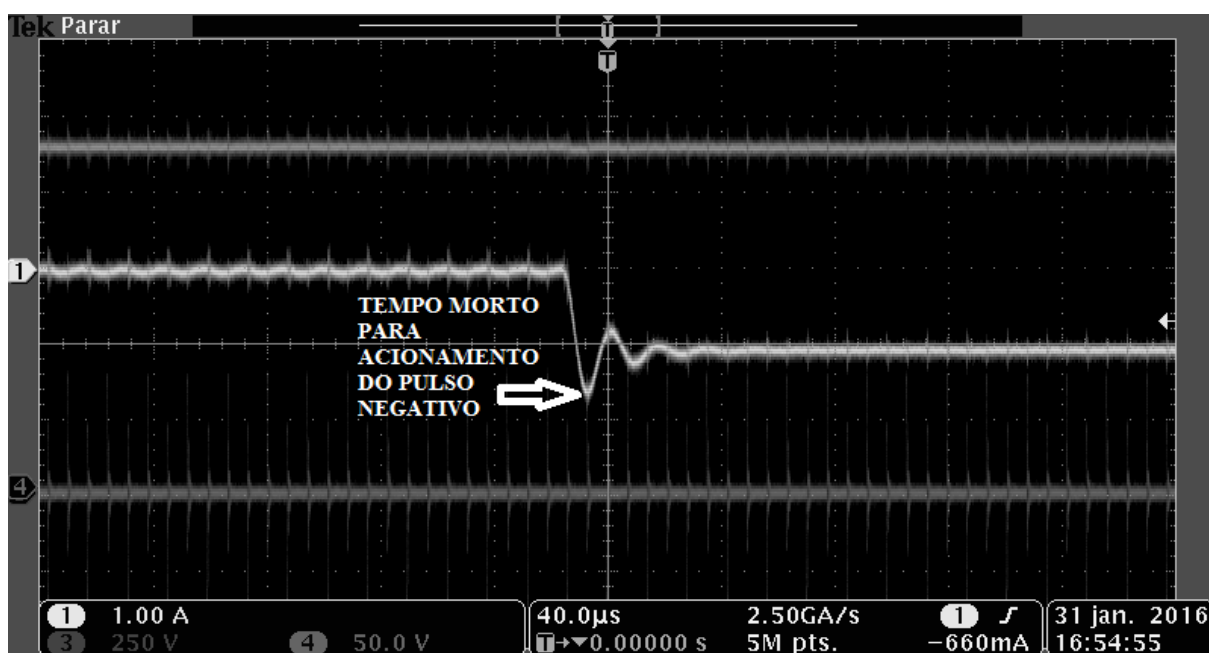


Figura 5.12 - Tempo morto inserido entre o desligamento do conversor e o acionamento do interruptor extra para gerar o pulso negativo.

5.2.5 Comparativo entre o método híbrido, o proposto e o de corrente pulsada

Para fins comparativos, fez-se uma metodologia de testes com o método híbrido (tensão e corrente constantes), com o método proposto e o de corrente pulsada.

Primeiramente, após verificar que o método proposto funcionava no que diz respeito ao controle e carga das baterias, deixou-se em operação por 4h contínuas. Após este tempo as baterias foram descarregadas a uma corrente de 5A, o que levou cerca de 40min para atingirem uma média de 10,5V por bateria, total de 168V do banco. O teste foi repetido por três vezes e o tempo se manteve na média dos 40min.

O mesmo foi feito pra o método de corrente pulsada e o tempo de descarga alcançado foi em média 37 minutos.

Já com a carga sendo feita com o método híbrido, considerando o tempo o estipulado pelo fabricante de 10h ininterruptas, para que as baterias atinjam o estado de carga completo, a descarga sob mesmas condições, 5A de corrente constante, levou cerca 29min.

5.3 Conclusão

Neste capítulo foram apresentados os resultados experimentais adquiridos em laboratório mediante protótipo implementado em bancada.

As comparações feitas com o método de um nível de tensão e corrente e com o de corrente pulsada, evidenciam que o método proposto é eficaz no que tange a capacidade de carregar rapidamente um banco de baterias.

Na comparação direta ao método de corrente pulsada, fica claro que é um sistema mais simples de ser implementado, pois não demanda tempo de testes para aferir o estágio de corrente pulsada negativa, podendo ser empregado em qualquer banco de baterias.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando o aumento da expectativa de vida como um fato global, tem-se um cenário do também aumento da demanda energética para que se tenha uma qualidade de vida.

Porém, a qualidade de vida não se pode definir apenas pela quantidade consumida, mas sim pelo uso sustentável desta quantidade, o que leva a uma duração maior dos recursos utilizados.

Neste contexto, há alguns anos, muitos esforços vêm sendo feitos pela comunidade acadêmica e corporativa para reduzir custos de produção e efluentes que poluam o meio ambiente. Na busca disto, tanto a criação de novas metodologias de produção e processamento de energia quanto a otimização de dispositivos eletrônicos que consumam menos são foco para que num futuro não tenhamos a falta de elementos básicos de sobrevivência.

Para tanto, este trabalho teve como proposta o estudo e desenvolvimento de um método de carga de um banco de baterias comumente utilizado em sistemas de *backup* que visam manter cargas críticas em operação constante, tais como: hospitais, estações de telecomunicações e bancos monetários, sistemas estes que já se tornaram indispensáveis nos dias atuais.

A fim de evitar o descarte prematuro das baterias, por consequência aumentando a poluição do meio ambiente e, mantê-las por mais tempo com a capacidade de carga plena, inúmeros estudos vêm sendo feitos para este objetivo no que diz respeito aos métodos de cargas empregados às baterias.

Alguns autores referenciados neste trabalho comprovam que o método a corrente pulsada é o mais eficaz dentre os outros, porém dependendo da aplicação a que se propõe, torna-se inviável, pois exige que um sistema complexo seja projetado a fim de contemplar o tempo necessário de descarga da bateria para gerar o pulso negativo.

Pensando nisto o presente trabalho propôs uma modificação deste método, suprimindo a etapa de descarga curta relacionada ao pulso negativo, desta forma tornando o dispositivo de carga com implementação mais simples com custos reduzidos.

Para controlar a operação do conversor do sistema implementado foi feita a modelagem do mesmo e projetado um controlador de corrente do tipo PI. A tensão nas baterias então é monitorada e define correntes de referência que são aplicadas a este

controlador. Os resultados de simulação demonstraram que o método garante a carga do banco de baterias.

Nos resultados experimentais, verificou-se que o método segue o previsto em simulação e pode ser facilmente implementado, além de garantir um estado de carga completo antecipadamente se comparado tanto ao método tradicionalmente utilizado pelos fabricantes, quanto ao de corrente pulsada.

6.1 Propostas para trabalhos futuros

Uma abordagem de estudo do estado de carga e vida útil das baterias de forma *on-line* se torna um tema interessante, visto que existem inúmeros métodos de carga que podem ser empregados para a carga de baterias, no entanto, a estimativa do estado de carga mais confiável, ainda é o de descarga completa.

Este estudo levaria em consideração o desenvolvimento de um conversor que pudesse ser aplicado a vários tipos de baterias, sendo necessário apenas o correto dimensionamento para cada aplicação, no que se refere à potência.

Alguns pesquisadores já vêm propondo métodos de estimativa do estado de carga e vida útil através da predição da impedância interna da bateria, o que se torna uma abordagem interessante, haja vista que esta grandeza varia com envelhecimento do acumulador e também com a metodologia empregada na carga.

Neste contexto fica a proposta de trabalhos futuros, fazer um estudo aprofundado de como de forma eficaz e a custo acessível à indústria poder-se-ia desenvolver um sistema capaz de carregar as baterias e ao mesmo tempo aferir o estado de carga e vida útil das mesmas.

6.2 Artigos vinculados ao trabalho desenvolvido

- R. T. Cardoso, R. Piveta, L. Schuch, “Conversor Full-Bridge atuando como carregador de baterias com Método de Corrente Pulsada” Redes Elétricas Inteligentes – 8º Seminário de Eletrônica de Potência e Controle e 2º Seminário de Energia e Sistemas de Potência, Santa Maria, Brasil, 2014.
- R. T. Cardoso, J. R. Tibola, M. Dall Pai, M. L. Martins, A. Spencer, L. Schuch, “Modified current pulse charging method for lead-acid batteries based on phase-shift

full-bridge converter in UPSs family applications” IEEE Conference Publications on 17th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE '15-ECCE Europe), Geneva, Switzerland, 2015.

- R. T. Cardoso, J. R. Tibola, M. Dall Pai, M. L. Martins, A. Spencer, L. Schuch, “Modified Current Pulse Charging Method For Lead-Acid Batteries Applied In Ups’s Family Applications” 13th Brazilian Power Electronics Conference - COBEP and 1st Southern Power Electronics Conference – SPEC, Fortaleza, Brasil, 2015.

BIBLIOGRAFIA

ACHAIBOU, N.; HADDADI, M.; MALEK, A. Lead acid batteries simulation including experimental validation. **Journal of Power Sources**, v. 185, n. 2, p. 1484–1491, 2008.

ACHAIBOU, N.; HADDADI, M.; MALEK, A. **Modeling of lead acid batteries in PV systems**Energy Procedia. **Anais...Elsevier BV**, 2012

AGARWAL, V. et al. Development and validation of a battery model useful for discharging and charging power control and lifetime estimation. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 25, n. 3, p. 821–835, 2010.

ANUPHAPPHARADORN, S. et al. Comparison the Economic Analysis of the Battery between Lithium-ion and Lead-acid in PV Stand-alone Application. **Energy Procedia**, v. 56, p. 352–358, 2014.

ATWATER, T. B. State-of-charge indicators [batteries]. **Proceedings of MILCOM '94**, 1994.

BAO, Z.; HU, J.; WANG, M. Low input current ripple battery charging regulator based on coupled-inductor. **2010 International Conference on Power System Technology: Technological Innovations Making Power Grid Smarter, POWERCON2010**, p. 7–10, 2010.

BATTERIES, H. O. F.; LIBRARY, D. E.; COMPANIES, T. M. **Source : HANDBOOK OF BATTERIES**. [s.l: s.n.].

BONDUELLE, G.; COLDRICK, W.; POPE, M. Telecom hybrid power battery management in full and partial state of charge. **INTELEC, International Telecommunications Energy Conference (Proceedings)**, 2011.

BOSE, C. S. C. Water loss in valve regulated batteries. **INTELEC - Twentieth International Telecommunications Energy Conference (Cat. No.98CH36263)**, 1998.

CHENG, P.-H.; CHEN, C.-L. **High efficiency and nondissipative fast charging strategy**IEE Proceedings - Electric Power Applications, 2003.

CHU, Y. S. et al. Positive/negative pulse battery charger with energy feedback and power factor correction. **Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC**, v. 2, p. 986–990, 2005.

COLEMAN, M.; LEE, C. K.; HURLEY, W. G. State of health determination: Two pulse load test for a VRLA battery. **PESC Record - IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference**, n. 1, 2006.

CULPIN, B.; PETERS, K. Study of transport of oxygen and water vapour between cells in valve regulated lead-acid batteries. **Journal of Power Sources**, v. 158, n. 2 SPEC. ISS., p. 1077–1083, 2006.

- DICKINSON, E. **BATTERIES | Partial-State-of-Charge**. [s.l.] Elsevier, 2009.
- ERICKSON, R. W.; MAKSIMOVIC, D. Controller Design. **Fundamentals of Power Electronics**, p. 331–375, 2004.
- ESSIG, B.; BRAUN, G. Selecting batteries for uninterruptible power supply systems. [Proceedings] **APEC '91: Sixth Annual Applied Power Electronics Conference and Exhibition**, 1991.
- FAIRWEATHER, A. J.; FOSTER, M. P.; STONE, D. A. **State-of-charge indicators for VRLA batteries utilising pseudo random binary sequences (PRBS)** International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Power Quality. PCIM Europe 2011, 17-19 May 2011. **Anais...**: International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Power Quality. PCIM Europe 2011. Mesago PCIM GmbH, 2011
- FREEMAN, D.; HEACOCK, D. Advanced charger designs address modern battery technologies. **Proceedings of WESCON '93**, 1993.
- GIACCHETTA, G.; LEPORINI, M.; MARCHETTI, B. Economic and environmental analysis of a Steam Assisted Gravity Drainage (SAGD) facility for oil recovery from Canadian oil sands. **Applied Energy**, v. 142, p. 1–9, mar. 2015.
- HADIAN, S.; MADANI, K. A system of systems approach to energy sustainability assessment: Are all renewables really green? **Ecological Indicators**, v. 52, p. 194–206, maio 2015.
- HÄRING, P.; GIESS, H. **Performance of a VRLA battery in an arctic environment** Journal of Power Sources. **Anais...**2003
- HUA, C.-C. H. C.-C.; LIN, M.-Y. L. M.-Y. A study of charging control of lead-acid battery for electric vehicles. **ISIE'2000. Proceedings of the 2000 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (Cat. No.00TH8543)**, v. 1, p. 135–140, 2000.
- HUNG, S. T.; HOPKINS, D. C.; MOSLING, C. R. Extension of battery life via charge equalization control. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 40, n. 1, p. 96–104, 1993.
- IEEE. IEEE Guide for the Selection and Sizing of Batteries for Uninterruptible Power Systems. **IEEE Std 1184-1994**, p. i, 1995.
- KARNJANAPIBOON, C.; JIRASEREEAMORNKUL, K.; MONYAKUL, V. The high efficiency charge equalized system for serially connected VRLA battery string using synchronous flyback converter. **2010 International Power Electronics Conference - ECCE Asia -, IPEC 2010**, p. 1185–1188, 2010.
- KARVE, S. Three of a kind. **IEEE review**, n. March, p. 27–32, 2000.
- KIM, S. C.; HONG, W. H. Fast-charging of a lead-acid cell: effect of rest period and depolarization pulse. 2000.
- KIM, W. et al. Analysis of the effects of inverter ripple current on a photovoltaic power

system by using an AC impedance model of the solar cell. **Renewable Energy**, v. 59, p. 150–157, 2013.

KURZWEIL, P. Gaston Planté and his invention of the lead-acid battery-The genesis of the first practical rechargeable battery. **Journal of Power Sources**, v. 195, n. 14, p. 4424–4434, 15 jul. 2010.

LIANG, T. J. et al. Implementation of a regenerative pulse charger using hybrid buck-boost converter. **4th IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems. IEEE PEDS 2001 - Indonesia. Proceedings (Cat. No.01TH8594)**, v. 2, p. 437–442, 2001.

LU, C. F.; LIU, C. C.; WU, C. J. Dynamic modelling of battery energy storage system and application to power system stability. **IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution**, v. 142, n. 4, p. 429–435, 1995.

MAGNETICS. Powder Cores. 2015.

MODULATOR, T. P. **Conversion Using the bq2031**, 1999.

MOHAN, N.; UNDELAND, T. M.; ROBBINS, W. P. Power Electronics Convertors, Applications, and Design. **John Wiley & Sons, Inc**, p. 172–178, 2003.

PASCUAL, C.; KREIN, P. T. Switched capacitor system for automatic series battery equalization. **Proceedings of APEC 97 - Applied Power Electronics Conference**, v. 2, p. 848–854, 1997.

PEREIRA, W.; FILHO, B. Geração Distribuída : Vantagens E Desvantagens. v. 1, p. 1–11, 2000.

POWER, E. N. Effects of AC Ripple Current on VRLA Battery Life. **A Technical Note from the Expert in Businnes-Critical Continuity**, p. 8, 2013.

RYNKIEWICZ, R. Discharge and charge modeling of lead acid batteries. **APEC '99. Fourteenth Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition. 1999 Conference Proceedings (Cat. No.99CH36285)**, v. 2, 1999.

SALAMEH, Z. M.; CASACCA, M. A.; LYNCH, W. A. A mathematical model for lead-acid batteries. **Energy Conversion, IEEE Transactions on**, v. 7, n. 1, p. 93–98, 1992.

SAUER, D. U. **SECONDARY BATTERIES – LEAD- ACID SYSTEMS | Lifetime Determining Processes**. [s.l.] Elsevier, 2009.

SHAHRIARI, M.; FARROKHI, M. Online state-of-health estimation of VRLA batteries using state of charge. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 60, n. 1, p. 191–202, 2013.

SUGUMARAN, N. et al. Lead acid battery performance and cycle life increased through addition of discrete carbon nanotubes to both electrodes. **Journal of Power Sources**, v. 279, p. 281–293, abr. 2015.

SUNITO, T. A novel method to ensure full recharge of a VRLA battery string. **INTELEC. Twenty-Second International Telecommunications Energy Conference (Cat.**

No.00CH37131), v. 00, p. 755–760, 2000.

SUNTIO, T.; GLAD, A. The batteries as a principal component in DC UPS systems. **12th International Conference on Telecommunications Energy**, 1990.

SVOBODA, V.; DOERING, H.; GARCHE, J. The influence of fast charging on the performance of VRLA batteries. **Journal of Power Sources**, v. 144, n. 1, p. 244–254, 2005.

TAKASAKI, T.; TAKANO, K.; ICHIMURA, M. Deterioration measuring method of VRLA battery used in UPS systems. **Proceedings of Intelec'96 - International Telecommunications Energy Conference**, 1996.

TANTICHANAKUL, T.; CHAILAPAKUL, O.; TANTAVICHET, N. Influence of fumed silica and additives on the gel formation and performance of gel valve-regulated lead-acid batteries. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 19, n. 6, p. 2085–2091, nov. 2013.

THOTTUVELIL, V. J. Modeling and analysis of power converter systems with batteries. **Proceedings of Power and Energy Systems in Converging Markets**, 1997.

UNIPOWER. **UP1270E**. Disponível em: <<http://www.unipower.com.br/index.php?/UP1270E.html>>. Acesso em: 1 mar. 2013.

UNITED NATIONS. **World population projected to reach 9.6 billion by 2050 – UN report**. Disponível em: <http://www.un.org/apps/news/story.asp?NewsID=45165&Cr=population&Cr1=#.VbbRT_1Vikr>. Acesso em: 27 jul. 2015.

VALERIOTE, E. M.; CHANG, T. G.; JOCHIM, D. M. Fast charging of lead-acid batteries. **Proceedings of 9th Annual Battery Conference on Applications and Advances**, 1994.

VALVO, M. et al. **Development and application of an improved equivalent circuit model of a lead acid battery** IECEC 96. Proceedings of the 31st Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. **Anais...IEEE**, 1996 Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=553872>>

VUTETAKIS, D. G.; WU, H. The effect of charge rate and depth of discharge on the cycle life of sealed lead-acid aircraft batteries. **IEEE 35th International Power Sources Symposium**, p. 1–3, 1992.

WALTARI, P. et al. The effects of intermittent charging on VRLA battery life expectancy in telecom applications. **24th Annual International Telecommunications Energy Conference**, 2002.

WANG, J. et al. **A high frequency battery model for current ripple analysis** Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC. **Anais...2010**

WANG, J. B.; CHUANG, C. Y. A multiphase battery charger with pulse charging scheme. **IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)**, v. 2005, n. 229, p. 1248–1253, 2005.

WENZL, H. **BATTERIES | Self-Discharge**. [s.l.] Elsevier, 2009.