UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E APLICADAS DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Conversor c.c.-c.c. Bidirecional Atuando como Controlador de Carga de Baterias em uma Nanorrede.

Lucas Piero de Oliveira

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO JOÃO MONLEVADE, MG 2016 Universidade Federal de Ouro Preto Departamento de Engenharia Elétrica

Conversor c.c.-c.c. Bidirecional Atuando como Controlador de Carga de Baterias em uma Nanorrede.

Lucas Piero de Oliveira

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Welbert Alves Rodrigues, MSc. Co-orientador: Prof. Waner W.A.G. Silva, MSc.

João Monlevade, MG 2016





ANEXO IV - ATA DE DEFESA

Aos doze dias do mês de agosto de 2016, às 17 horas, no bloco B deste instituto, foi realizada a defesa de monografia pelo (a) formando (a) Lucas Piero de Oliveira sendo a comissão examinadora constituída pelos professores: Welbert Alves Rodrigues, Waner W.A.G. Silva, Aline Rocha de Assis e Victor Costa da Silva Campos.

O (a) candidato (a) apresentou a monografia intitulada: Conversor c.c.-c.c. Bidirecional Atuando como Controlador de Carga de Baterias em uma Nanorrede. A comissão examinadora deliberou, por unanimidade, pela $\underline{Aprovação}$ do(a) candidato(a), com a nota média $\underline{R,25}$, de acordo com a tabela 1. Na forma regulamentar foi lavrada a presente ata que é assinada pelos membros da comissão examinadora e pelo (a) formando(a).

Tabela 1	 – Notas de 	avaliação	da	banca	examinadora
----------	--------------------------------	-----------	----	-------	-------------

Banca Examinadora	Nota
Welbert Alves Rodrigues	8.5
Waner W.A.G. Silva	8,5
Aline Rocha de Assis	8,0
Victor Costa da Silva Campos	8,0
Média	8,25

João Monlevade, 12 de Agosto de 2016.

Professor Orientador

Professor Co-Orientador

Professora Convidada

Professor Convidado

Aluno





ANEXO X - TERMO DE RESPONSABILIDADE

O texto do trabalho de conclusão de curso intitulado "Conversor c.c.- c.c. Bidirecional Atuando como Controlador de Carga de Baterias em uma Nanorrede." é de minha inteira responsabilidade. Declaro que não há utilização indevida de texto, material fotográfico ou qualquer outro material pertencente a terceiros sem a devida citação ou consentimento dos referidos autores.

João Monlevade,

de

12

Agosto

de 2016 .

Nome completo do(a) aluno(a)

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus que por sua graça me concedeu tanto o querer quanto a capacidade de efetuar a conquista de mais essa jornada, e à minha familia que me instrui e apoia em todos os momentos da vida.

Agradeço também aos professores pelos ensinamentos e experiências transmitidas em sala de aula. Em especial ao orientador Prof. Welbert Alves Rodrigues e ao Co-orientador Prof. Waner W.A.G. Silva, que se empenharam comigo na busca por mais conhecimento.

Resumo

A crescente demanda de energia elétrica no planeta tem evidenciado a necessidade de se aumentar a participação de fontes renováveis de energia na matriz de geração elétrica atual. Dessa forma, novos conceitos como por exemplo as nanorredes tem ganhado notório destaque mundial, visto que possui sua geração baseada em fontes renováveis como a eólica e a solar. Junto com a necessidade de se gerar ocorre a necessidade de armazenar energia, por isso os acumuladores devem ser igualmente considerados no cenário de desenvolvimento energético.

Gastos com baterias podem representar cerca de 46% dos custos de manutenção em um sistema de fornecimento ininterrupto de energia. Por isso é de extrema importância que os carregadores de bateria e as técnicas de carga sejam aprimoradas. Tais aperfeiçoamentos geram a expectativa de reduções consideráveis nos custos de manutenção associado à esperança de elevação do tempo de vida útil dos acumuladores. O presente trabalho se propõe a elaborar um algoritmo para controle do método de carga *multi step* e, simular o algoritmo implementado. O modelo de controle adotado é o de pequenos sinais, sendo o conversor DAB modelado como fonte de corrente.

O objetivo principal é garantir que o conversor atue de forma a desempenhar um processo estável e seguro de carga/descarga, considerando as características químicas das baterias do tipo chumbo ácido. Para isso, foram simulados processos de carga em ambientes com e sem perturbação. O algoritmo de carga em 8 etapas defendido foi adequado ao ambiente de operação das nanorredes, considerando a inclusão de acumuladores em bom estado de conservação no banco de baterias.

Os testes e simulações realizados para validação do algoritmo de controle do método de carga *multi step* foram feitos em ambiente computacional PLECS[®]. As simulações realizadas comprovam a eficácia e eficiência do algoritmo, pois em ambos os casos, com e sem perturbação, o progresso do processo de carga ocorreu como o determinado.

Palavras-chave: conversor c.c.-c.c. bidirecional, dual active bridge, nanorrede, sistema de armazenamento de energia, bateria chumbo ácido.

Abstract

The increasing demand for electricity on the planet has shown the need to increase the share of renewable energy sources in the current electricity generation matrix. Thus, new concepts such as the nanogrid has gained remarkable global prominence, as has its generation based on renewable sources such as wind and solar. Along with the need to generate the need to store energy occurs, so the batteries should also be considered in the energy development scenario.

Spending on batteries can represent about 46% of maintenance costs in an uninterruptible power supply system. So it is extremely important that the battery chargers and charging techniques are improved. Such improvements generate the expectation of significant reductions in maintenance costs associated with the hope of raising the lifetime of the batteries. This study aims to develop an algorithm to control the multi step charging method and simulate the implemented algorithm. The adopted control model is the small signal, and the DAB converter modeled as current source.

The main objective is to ensure that the converter operates in order to play a stable and safe process of charging / discharging, considering the chemical characteristics of the batteries of lead acid type. To this were simulated load processes in environments with and without disturbance. The charge algorithm in 8 steps defended was adequate to the nanogrids operating environment, considering the inclusion of batteries in good condition in the battery bank.

The tests and simulations conducted to validate the control algorithm of multi step charging method were made in computing environment PLECS[®]. Simulations show carried effectiveness and efficiency of the algorithm, because in both cases with and without disturbance, the charging progress occurred as determined.

Keywords: c.c.-c.c. converter bidirectional, dual active bridge, nanogrid, energy storage system, lead acid battery.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Estrutura de uma nanorrede a nível residencial	5
Figura 2 – Barramento c.c interno da nanorrede	6
Figura 3 – Formas de onda na tensão e corrente do DAB	8
Figura 4 – Sinais de controle do modulador para as pontes H	9
Figura 5 – Formas de onda das correntes i_{i_avg} , i_{o_avg} e i_L – Fluxo de potência de	
A para B	11
Figura 6 – Etapas de operação do DAB em <i>phase-shift</i> a) Modo I. b)Modo II.	
c)Modo III. d)Modo IV. e)Modo V. f) Modo VI	12
Figura 7 – Custos de implementação de sistemas PV	15
Figura 8 – Associação de baterias em paralelo	16
Figura 9 – Associação baterias em série	16
Figura 10 – Formas de onda de tensão e corrente em carga pelo método de carre-	
gamento tensão constante	19
Figura 11 – Formas de onda de tensão e corrente em carga pelo método de carre-	
gamento corrente constante	20
Figura 12 – Formas de onda de tensão e corrente em carga por tensão constante e	
corrente constante	20
Figura 13 – Forma de onda de corrente em pulso de carga	21
Figura 14 – Forma de onda da corrente em carga <i>reflex</i>	22
Figura 15 – Formas de onda de tensão e corrente em carga $multi-step$ em corrente	
$\operatorname{constante}$	23
Figura 16 – Processo de carga em oito etapas	23
Figura 17 – Fluxograma método de carga dos 8 estados	26
Figura 18 – Diagrama esquemático do conversor DAB	29
Figura 19 – Modelo de uma bateria	30
Figura 20 – Modelo do DAB como fonte de corrente média e bateria como impedância	30
Figura 21 – Modelo em pequenos sinais do conversor DAB	32
Figura 22 – Diagrama de blocos da estrutura de controle	35
Figura 23 – Simulação do carregamento da bateria. Curva de tensão da bateria $\ .$.	37
Figura 24 – Simulação do carregamento da bateria. Curva de Corrente de carga	37
Figura 25 – Simulação do carregamento da bateria. Curva de Tensão de carga $\ .\ .\ .$	39
Figura 26 – Simulação do carregamento da bateria. Curva de Corrente de carga $\ .$.	40

Lista de tabelas

Tabela 1 –	Níveis de	tensão e	$\operatorname{corrente}$	para o	processo d	le carga				36
------------	-----------	----------	---------------------------	--------	------------	----------	--	--	--	----

Sumário

1	INTRODUÇÃO 1
1.1	Contextualização e Motivação
1.2	Objetivo geral da monografia $\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots 2$
1.3	Objetivos específicos da monografia $\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots 2$
1.4	Organização do Trabalho
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA
2.1	Componentes estruturais de uma nanorrede 4
2.1.1	Conclusões parciais
2.2	Conversor Isolado c.c-c.c Bidirecional
2.2.1	Análise de funcionamento do DAB
2.2.2	Modulação phase-shift \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots 11
2.2.3	Influência do tempo morto no phase-shift \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots 12
2.2.4	Conclusões parciais \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots 12
2.3	Baterias Chumbo Ácido
2.3.1	Gasto de implementação e manutenção das baterias 14
2.3.2	Banco de baterias
2.3.3	Associação das Baterias \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots 16
2.3.4	$Manuten \varphi \tilde{a} \circ \ldots \circ$
2.4	Reações de carga e descarga
2.4.1	Sulfatação
2.5	Processo de carga
2.5.1	Modos de carregamento
2.5.1.1	Carregamento tensão constante
2.5.1.2	Carregamento corrente constante \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots 19
2.5.1.3	Carregamento híbrido
2.5.1.4	Carregamento em pulsos \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots 21
2.5.1.5	Carregamento reflex \ldots \ldots \ldots 21
2.5.1.6	Carregamento <i>Multi Step</i>
2.6	Carregamento em 8 etapas
3	METODOLOGIA
3.1	Controle do DAB
3.2	Metodologia de Controle
3.3	Modelo de pequenos sinais
3.4	Estrutura de controle \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots 32

4	RESULTADOS	36
4.1	Simulação e resultado com o conversor DAB	36
4.1.1	Simulação de funcionamento do conversor DAB na ausência de perturbação	
	no barramento c.c	36
4.1.2	Simulação de funcionamento do conversor DAB com ocorrência de pertur-	
	bação no barramento c.c	39
4.2	Conclusões parciais	41
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	42
5.1	Conclusões	42
5.2	Trabalhos Futuros	44
	REFERÊNCIAS	45

Lista de Acrônimos

С	Taxa de descarga da bateria
C(Ah)	Capacidade ampère hora da bateria
c.c-c.a	Sistema em corrente alternada
c.c-c.c	Sistema em corrente contínua
C_A	Capacitor barramento c.c
C_B	Capacitor banco de baterias
CFP	Correção de fator de potência
CI	Circuito Integrado
$D_?$	Diodo
DAB	Dual active bridge
DSP	Processador de sinal digital
DSPIC	Controlador de sinal digital
F_s	Frequência de chaveamento
$G_{cA}(s)$	Compensador da malha de tensão do lado do barramento c.c.
$G_{cB}(s)$	Compensador da malha de tensão do lado do banco de baterias
$G_{i_B V_A}'(s)$	Função de transferência da corrente da bateria em função da tensão
	no barramento c.c.
$G_{i_BV_B}'(s)$	Função de transferência da corrente da bateria em função da tensão
	da bateria
$G_{iB\delta}(s)$	Função de transferência de corrente em função da defasagem angular
$G_{V_A i_B}(s)$	Função de transferência de tensão do barramento c.c. em relação a
	corrente da bateria
GD	Gerador distribuído
GE	Gerador eólico
\hat{i}_B	Corrente de carga da bateria em pequenos sinais
I_{Bref}	Corrente de referência da malha de corrente
i_{i_avg}	Corrente de entrada do conversor
I_{load}	Corrente de carga
i_{o_avg}	Corrente de saída do conversor
i_{refA}	Corrente de referência da malha A
i_{refB}	Corrente de referência da malha B
i_B	Corrente de carga da bateria
i_L	Corrente no indutor

L	Indutor
LA	Chumbo ácido
LED	Light emitting diode
η	Rendimento
N: 1	Relação de transformação do transformador
$ P_{max} $	Máxima potência transferida pelo conversor
P_O	Potência de saída do conversor
P_{ps}	Potência transferida do conversor com modulação phase-shift
ΡI	Proporcional integral
\mathbf{PV}	Célula fotovoltaica
PWM	Modulação por largura de pulso
R_D	Resistência que representa as perdas por auto descarga da bateria
R_I	Resistência interna da bateria
\mathbf{RC}	Resistivo capacitivo
Т	Tempo de um ciclo completo de chaveamento
t_{-}	Tempo pulso negativo
$T_{1/2}$	Metade de tempo de um ciclo de chaveamento
t_+	Tempo pulso positivo
UPS	Fonte ininterrupta de energia
$\hat{V_A}$	Perturbação na tensão no barramento
V_{acA}	Tensão alternada no terminal do transformador na ponte H do barramento c.c $$
V_{acB}	Tensão alternada no terminal do transformador na ponte H do banco de baterias
V_{anl}	Tensão de análise
V_{flut}	Tensão de flutuação
V_{load}	Tensão de carga da bateria
V_{off}	Tensão de corte da bateria
V_{rec}	Tensão de recondicionamento
V_A	Tensão no barramento c.c.
V_B	Tensão banco de baterias
Vcc	Tensão contínua
δ	Razão de defasagem ângular entre as tensões do transformador
φ	Defasagem angular entre as tensões nos terminais do transformador

1 Introdução

1.1 Contextualização e Motivação

Energia, em grego, significa operação, atividade, o conceito etimológico da palavra não se diverge da concepção física atribuída à mesma, a qual está associada à capacidade de produzir trabalho, ação ou movimento. Qualquer atividade diária realizada, um trabalho manual, uma locomoção, um pensamento, exige a utilização de energia (ORNELLAS, 2006).

De acordo com (SILVA, 2013), desde os primórdios aos dias atuais vivencia-se um aumento na demanda desta energia para atender às necessidades crescentes da sociedade devido ao desenvolvimento socio econômico em todo o mundo. Contudo, o mal planejamento na produção e utilização da mesma prejudica de forma acentuada o meio ambiente em geral, contribuindo para o aquecimento global e a poluição atmosférica. Grande parte da demanda de eletricidade é suprida por fontes fósseis, o que representa cerca de 80% do consumo de energia mundial (ZHONGCHENG; TONG, 2010). No entanto, segundo as conclusões do *World Energy Outlook*, a demanda primária de energia mundial e as emissões de carbono crescerão respectivamente 65% e 70% entre 1995 e 2020 e os combustíveis fósseis responderão por mais de 90% da demanda primária de energia em 2020 (SILVA et al., 2003).

Esforços têm sido feitos para a lenta introdução das energias renováveis no cenário energético futuro, tendo em vista a existência de uma mobilização internacional de combate ao aquecimento global e à poluição atmosférica. E para que essas metas sejam atingidas é imprescindível a adoção de matrizes energéticas limpas e renováveis, como por exemplo as energias, eólica, solar e biomassa. A diversificação das matrizes energéticas promovem mudanças no no país, pois propicia o regime de complementariedade entre fontes elétricas.

O Brasil, por exemplo, possui dimensões continentais e se beneficia intensamente dessa alternativa, pois caso venha a ocorrer escassez de determinado recurso natural em uma região, existirão outras matrizes energéticas aptas a compensar ou mesmo complementar a demanda de energia requerida. Ainda no quesito eficiência, outro importante fator a ser analisado se refere à perda de energia nas linhas de transmissão devido às grandes distâncias existentes entre geradores e consumidores, essas deficiências podem ser consideravelmente atenuadas com a instalação de GD (Geradores Distribuídos) à base de recursos limpos e renováveis nas proximidades dos centros consumidores. Junto com a necessidade de gerar, ocorre a necessidade de armazenar energia de forma eficiente. É sabido que a geração de energia a partir de painéis fotovoltaicos atinge a sua capacidade máxima durante o dia, pois corresponde ao momento de maior insolação. No entanto, a demanda máxima de consumo residencial não ocorre no mesmo período. Neste intervalo de tempo a energia excedente gerada pelos painéis fotovoltaicos seria parcialmente perdida. Uma alternativa promissora é o armazenamento de energia em baterias elétricas, pois trata-se de uma tecnologia que vem sendo desenvolvida há algum tempo, e tem se mostrado uma fonte de energia elétrica que trará grandes benefícios em um futuro próximo, sendo capaz de alimentar circuitos residenciais, acionar motores elétricos em automóveis, podendo substituir motores a explosão, entre outras importantes finalidades (ORNELLAS, 2006). Além disso, as baterias mantêm estável a tensão na barra consumidora de uma rede c.c através de um conversor c.c bidirecional atuando como controlador de carga. A associação entre GDs baseadas em painéis fotovoltaicos e baterias elétricas se mostram uma alternativa viável em relação à produção e armazenamento de energia respectivamente.

Dessa forma, para melhor entendimento do presente trabalho, torna-se de extrema importância a compreensão da concepção de nanorredes. De acordo com (BRYAN; DUKE; ROUND, 2004) a nanorrede pode ser definida como um sistema de potência em pequena escala que consiste em duas ou mais fontes de geração distribuídas baseadas em energia limpas com pequenas cargas, sua potência é tipicamente menor que 25kW, sendo as cargas limitadas a uma distância máxima de 5km das fontes geradoras. Dentro da nanorrede encontra-se o barramento c.c que é responsável pelas interconexões dos dispositivos c.c existentes. Dentre estes dispositivos, encontram-se cargas, fontes de energia, como também o banco de baterias, responsável por garantir o fornecimento ininterrupto à nanorrede.

1.2 Objetivo geral da monografia

Este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo o estudo e simulação do processo de carga de baterias em 6 *step*, em um sistema de controle com conversor c.c bidirecional. Este fará o gerenciamento do fluxo de potência entre o barramento de uma nanorrede doméstica e um banco de baterias, de forma que o mesmo supra a energia na rede c.c e mantenha as baterias em carga.

1.3 Objetivos específicos da monografia

Com a finalidade de alcançar o objetivo geral deste trabalho propõem-se desenvolver as seguintes etapas:

- Revisão bibliográfica;
- Análise da técnica de controle do conversor utilizado;
- Propor uma estrutura de carregamento de baterias no controle do DAB para maximizar a vida útil das baterias;
- Validar a simulação do processo de carregamento das baterias.

1.4 Organização do Trabalho

- O presente trabalho está organizado na seguinte forma:
- Capítulo 1 Foi abordado o conceito básico de energia e toda a sua inferência no contexto mundial, foi salientado o aumento do consumo energético e as alternativas viáveis para o suprimento das mesmas bem como a exposição da necessidade de uma armazenamento de energia eficiente e limpo;
- Capítulo 2 Foi realizada uma breve explanação a respeito de nanorredes.
- **Capítulo 3** Tem como objetivo a apresentação do conversor c.c c.c bidirecional DAB tal como a explicação do seu funcionamento.
- Capítulo 4 Foram apresentados os acumuladores e sua relação com a eficiência em armazenamento de energia além do método de recarga utilizado abordando também o desenvolvimento do algoritmo capaz de gerenciar o processo de carga da bateria. Realização da simulação do conversor c.c – c.c bidirecional DAB.
- **Capítulo 5** Tem o objetivo de discutir o resultado e apresentar as conclusões obtidas no trabalho.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Componentes estruturais de uma nanorrede

A nanorrede, definida como sistema de potência em pequena escala, emprega controle descentralizado do fluxo de potência a fim de alcançar o balanço do mesmo. Nessa estratégia de controle, as fontes geradoras são capazes de controlar seu próprio fluxo de potência através de informações nos seus terminais de conexão (SILVA, 2013).

A conexão entre a rede elétrica da concessionária à nanorrede é feita por meio de conversores c.a - c.a Esses conversores além de controlar o fluxo de potência devem isolar os subsistemas de distúrbios da rede, o que acarreta em uma maior complexidade dos conversores (CVETKOVIC, 2010). Uma forma de minimizar a complexidade desses conversores é através da utilização do sistema em corrente contínua. A utilização de sistemas c.c dentro da nanorrede tem como vantagens:

- Aumento da densidade de potência;
- Eliminação de retificador e transformador das fontes de alimentação obtendo, assim, uma estrutura simplificada dos conversores;
- Aumento da estabilidade do sistema pelo desacoplamento entre sistemas e pela possibilidade de controle do fluxo de potência;
- Maior eficiência e facilidade de integração com as fontes renováveis de energia.(FRED; BOROYEVICH; MATTAVELLI PAOLO, 2010)

O sistema de distribuição c.c proposto para a nanorrede apresenta dois níveis de tensão: 380Vcc e 48Vcc. O nível de 380V foi escolhido para adequar-se ao nível de tensão de saída típicos de dispositivos de CFP (Correção de Fator de Potência) que são associados a aparelhos de potência igual ou maior que 70W. O nível de 48V é selecionado por ser um nível de tensão padrão em sistemas de telecomunicação e centros de processamento de dados. O barramento c.c de 48V alimentará equipamentos de baixa potência tais como computadores, televisores, rádios, sistema de iluminação predial baseados em LED's (Light Emitting Diode) (SILVA, 2013).

No sistema descentralizado, o banco de baterias é alocado fora do fluxo principal de energia, sendo interligado por um conversor com controle bidirecional do fluxo de energia. Esta topologia evita cargas e descargas desnecessárias do banco de baterias, possibilitando um prolongamento dos ciclos de vida do sistema de armazenamento (DAMASCENO, 2008).

A Figura 1 apresenta a estrutura de uma nanorrede em nível residencial onde a principal fonte de geração são os painéis fotovoltaicos e uma microturbina eólica.



Figura 1 – Estrutura de uma nanorrede a nível residencial.

Já a Figura 2 apresenta a estrutura do barramento c.c dentro da nanorrede, ilustrando a utilização do conversor bidirecional como integração entre o sistema de armazenamento e o barramento c.c.



Figura 2 – Barramento c.c interno da nanorrede.

2.1.1 Conclusões parciais

A nanorrede é definida como sistema de potência em pequena escala integrada a fontes renováveis de energia . O barramento c.c interno apresenta dois níveis de tensão, são eles 380 e 48Vcc. Dentre outras vantagens o sistema c.c traz como benefício o aumento da densidade de potência. O presente trabalho utiliza a topologia descentralizada, pois o banco de baterias é interligado ao barramento c.c por um conversor c.c-c.c bidirecional de energia.

2.2 Conversor Isolado c.c-c.c Bidirecional

Como salientado nos capítulos anteriores existe uma busca contínua pela introdução de fontes renovavéis na matriz elétrica atual bem como o aprimoramento de equipamentos elétricos no quesito eficiência energética. Atualmente há o interesse de reduzir tamanho, peso e custo dos conversores bidirecionais mantendo o alto desempenho operacional do fluxo bidirecional de energia. A maioria das pesquisas atuais relacionam-se a conversores bidirecionais simples aplicados à baixa potência (<1kW)(SEGARAN; HOLMES; MCGRATH, 2008). Para níveis de potência superior a 1KW são comumente adotados os conversores bidirecionais DAB (*Dual Active Bridge*), pois tais possuem as seguintes características.

Vantagens:

Pico de tensão bem próximo ao valor nominal da tensão c.c do barramento nos seus terminais, fazendo com que o estresse de tensão sobre as chaves semicondutoras fiquem limitadas ao nível c.c. Estresse de corrente igual em todas as chaves semicondutoras de cada ponte. Dispensação de elementos passivos ou ativos para alcance da comutação não dissipativa, facilidade de implementação de controle no modo corrente média ou pico além do transformador com estrutura simplificada que facilita a montagem.

Já as desvantagens se limitam a:

Alta ondulação de corrente através dos terminais do conversor, o que pode ser eliminado com circuitos de filtros. Pode apresentar perdas de comutação em condições de pouca carga além do controle ser sensível à variações do ângulo de defasagem (SILVA, 2013).

2.2.1 Análise de funcionamento do DAB

O conversor DAB (*Dual Active Bridge*) consiste em duas pontes H alimentadas por tensão, com interruptores ativos, interligadas por um transformador de alta frequência, permitindo que o fluxo de potência se dê nos dois sentidos e que o conversor funcione em modo *buck* ou *boost* (XAVIER, 2016).

A estrutura de controle dessa topologia é baseada no deslocamento angular entre as tensões alternadas, no primário e secundário do transformador, produzidas pelos pares de semicondutores diagonais. Tais pares de semicondutores quando acionados simultaneamente produzem uma forma de onda quadrada da tensão c.c. com o ciclo de trabalho de 50%. Cada braço da mesma ponte produz uma onda quadrada defasada em 180° do outro braço. A defasagem angular entre as tensões produzidas por cada ponte é o elemento de controle para essa estrutura. A máxima transferência de potência é alcançada quando a defasagem angular é $\pm 90^{\circ}$. A indutância de dispersão do transformador é o elemento

responsável pela transferência de potência entre as pontes. Dependendo da potência a ser transferida faz-se necessária a colocação de um indutor auxiliar em série nos terminais do transformador. A Figura 3 apresenta as formas de onda das tensões e corrente no primário e secundário do transformador. (SILVA, 2013).



Figura 3 – Formas de onda na tensão e corrente do DAB. Modificada (SILVA, 2013).

A Figura 4 apresenta os sinais de controle do modulador PWM (*Pulse Width Modu*lation) e os sinais de comando responsáveis por acionar as chaves semicondutoras. Cada ponte H possui uma portadora triangular, sendo que o atraso de tempo $\delta x T_{1/2}$ segundos entre as portadoras produz a defasagem angular δ entre as tensões no primário e secundário do transformador, onde $T_{1/2}$ é o tempo de um ciclo completo de chaveamento, metade do ciclo de chaveamento é δ a razão de defasagem entre as tensões do transformador definido por $\delta = \frac{\varphi}{180}$ sendo que $\varphi \in [-180^\circ, +180^\circ]$. Devido à simetria do circuito, esta análise é feita apenas em meio ciclo de chaveamento (SILVA, 2013).



Figura 4 – Sinais de controle do modulador para as pontes H. Modificada de (SILVA, 2013).

A corrente instantânea $i_{L(t)}$ sobre cada meio ciclo de chaveamento pode ser definida em (2.1):

$$i_{L(t)} = \begin{cases} i_{L(0)} - \frac{i_{L(0)}}{t_1} t & \text{se } 0 < t < t_1 \\ \frac{i_{L(\delta \times T_{1/2})}}{t_2} t & \text{se } t_1 < t < t_2 \\ i_{L(\delta \times T_{1/2})} + \frac{i_{L(T_{1/2})} - i_{L(\delta \times T_{1/2})}}{(1 - \delta)T_{1/2}} t & \text{se } t_2 < t < T_{1/2} \end{cases}$$
(2.1)

A corrente média i_{i_avg} que entra no conversor é definida pelo balanço de carga, através das áreas sob i_L no intervalo de tempo $T_{1/2}$, varia em função da tensão na bateria V_B e defasagem angular δ , L corresponde ao valor do indutor utilizado, conforme mostrado na Figura 5, e é calculada em (2.2):

$$i_{i_avg} = \frac{V_B T_{1/2} (\delta - \delta^2)}{L}$$
 (2.2)

Já a corrente média i_{o_avg} que sai do conversor é definida pelo balanço de carga, através das áreas sob i_L no intervalo de tempo $T_{1/2}$, varia em função da tensão no barramento c.c V_A e defasagem angular δ , conforme ilustrado na Figura 5, calculada em (2.3):

$$i_{o_avg} = \frac{V_A T_{1/2} (\delta - \delta^2)}{L}$$
(2.3)

A potência do conversor é definida em (2.4), como é possivel observar a variação do fluxo de potência do conversor está em função das variações de: tensão no barramento c.c V_A , tensão no banco de bateria V_B e variação angular δ entre as ondas do primário e secudário, sendo f_s a frequência de chaveamento e N a relação do número de espiras:

$$P_{ps} = \frac{V_A V_B N(\delta - \delta^2)}{2f_s L} \tag{2.4}$$

A máxima transferência de potência pode ser definida em (2.5):

$$|P_{max}| = \frac{V_A V_B N}{8f_s L} \tag{2.5}$$

O deslocamento de fase em função da potência requerida pelo conversor é expressa em (2.6):

$$\delta = \frac{1}{2} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{8f_s L \left| P_{ps} \right|}{NV_A V_B}} \right]$$
(2.6)



Figura 5 – Formas de onda das correntes i_{i_avg} , $i_{o_avg} \in i_L$ – Fluxo de potência de A para B. Modificada de (SILVA, 2013).

2.2.2 Modulação phase-shift

Na modulação phase shift a potência circula no sentido do barramento c.c ao banco de baterias quando $\delta > 0$ e do banco de baterias ao barramento c.c quando $\delta < 0$, é possível portanto obter a bidirecionalidade atuando somente na defasagem entre as duas ondas (XAVIER, 2016). A tensão no primário do transformador será definida por $V_{acA}[+V_A, -V_A]$ e no secundário por $V_{acB}[+V_B, -V_B]$.

O conversor DAB possui basicamente seis etapas de operação que serão descritas a seguir, com a finalidade de facilitar o entendimento de funcionamento. Será considerado que, em cada etapa, um determinado conjunto de semicondutores chaves e/ou diodos conduzirá em um intervalo de tempo.

A primeira etapa, Figura 6 letra a, que ocorre no intervalo $t = [0,t_1]$ a corrente circula nos diodos D_1 , D_4 , D_6 e D_7 . Entre $t = [t_1,t_2]$ inicia-se a segunda etapa, letra b, onde ocorre o bloqueio da condução dos diodos citados anteriormente e inicia-se a condução através das chaves S_1 , S_4 , S_6 e S_7 .

No intervalo de tempo da terceira etapa, ilustrado na Figura 6 letra c, t = $[t_2,t_{1/2}]$, ocorre o bloqueio das chaves S_6 e S_7 e simultaneamente, respeitando o tempo morto, inicia-se a condução de S_5 e S_8 . No entanto a corrente flui no sentido contrário à condução das chaves e a corrente é então conduzida pelos diodos D_5 e D_8 .

No intervalo de tempo t = $[T_{1/2}, T_{1/2}+t_1]$, que corresponde à quarta etapa conforme ilustrado na Figura 6 letra d, S_2 e S_3 são acionados e S_1 e S_4 bloqueados. Neste caso como nesse instante a corrente flui no sentido inverso à condução das chaves, o fluxo de corrente ocorre pelos diodos D_2 e D_3 enquanto que no lado B o fluxo de corrente ainda atravessa os diodos D_5 e D_8 .

Na quinta etapa, Figura 6 letra e, que ocorre no intervalo de tempo $t = [T_{1/2} + t_1, T_{1/2} + t_2]$, as chaves S_2 , S_3 , S_5 e S_8 entram em condução. Na última etapa, letra f, entre $t = [T_{1/2} + t_2, T]$ ocorre o acionamento das chaves S_6 e S_7 e o bloqueio de S_5 e S_8 .



Figura 6 – Etapas de operação do DAB em *phase-shift* a) Modo I. b)Modo II. c)Modo III. d)Modo IV. e)Modo V. f) Modo VI. Modificada de (SILVA, 2013)

2.2.3 Influência do tempo morto no phase-shift

Em aplicações práticas, para evitar curto-circuito de braço nos conversores pontecompleta ou meia-ponte, deve haver um tempo entre o completo desligamento da chave superior e o comando para entrada em condução da chave inferior do mesmo braço. Esse tempo, denominado de tempo morto, é tanto maior quanto maiores forem as correntes e tensões envolvidas (SANTOS, 2011).

2.2.4 Conclusões parciais

O conversor Bidirecional DAB é o mais indicado em aplicações onde o fluxo de potência é superior a 1KW. Na modulação *phase shift* a potência circula no sentido da ponte com a onda quadrada em avanço para a ponte com a onda quadrada em atraso. Para evitar o curto circuito o tempo morto deve ser respeitado em aplicações práticas e esse tempo é diretamente proporcional à magnitude do valor de corrente que flui pelas chaves.

2.3 Baterias Chumbo Ácido

A bateria é um dispositivo eletroquímico capaz de converter energia química em energia elétrica por meio de uma reação espontânea, bem como o inverso, converter energia elétrica em energia química através de uma reação não espontânea. Existem vários tipos de baterias recarregáveis, são elas as seguintes: baterias de chumbo ácido, baterias de níquel-cádimo, baterias de hidreto metálico de níquel e, por fim, baterias de íon-lítio. Cada tipo pode exigir especial dinâmica de carga, exigindo curvas e ajustes para fins de proteção. Caso a energia não seja devolvida à bateria de forma compatível com a química e a especificação do fabricante a mesma pode sofrer danos além da possibilidade de causar adversidades, tais como: contaminação ambiental, danos em equipamentos e comprometimento da segurança de pessoas.

As baterias de chumbo ácido LA (*Lead Acid*) foram inventadas por Gastón Plante, 1860. Suas vendas representam cerca de 40 a 45% do valor das vendas de todas as baterias no mundo. Um fator chave para a popularidade e a posição dominante das baterias de chumbo ácido é o seu baixo custo aliado à boa performance de carga e descarga, ciclo de vida, além de possuir alto índice de eficiência energética, cerca de 75 a 80%. Em geral é a bateria de armazenamento menos dispendiosa para qualquer aplicação, enquanto continua a fornecer bom desempenho e vida características (DAVID, 2001).

Alguns parâmetros das baterias são essenciais para o projeto dos controladores de carga. Os acumuladores do tipo chumbo-ácido são usados como baterias de arranque e iluminação em automóveis; em sistemas de tração para veículos, máquinas elétricas e fontes alternativas em *No Breaks*, provendo energia em casos de falha em dispositivos críticos.

A Capacidade (C) de uma bateria indica a quantidade total de carga disponível e normalmente é expressa em Ampère-hora (Ah). A corrente de carga ou descarga da bateria é comercialmente especificada em termos da taxa de descarga C. A capacidade da bateria indicada na folha de dados, normalmente, corresponde à medição da capacidade para uma taxa de descarga de C/10, pois a capacidade varia de forma inversa à taxa de descarga, ou seja, elevadas correntes de descarga resultam em menor capacidade. Especificações de níveis de corrente e tensão estipulados pelos fabricantes devem ser respeitados no processo de recarga (DAMASCENO, 2008).

2.3.1 Gasto de implementação e manutenção das baterias

Como exemplo o caso dos sistemas PV (*Photovoltaic cells*) ilustrado na Figura 7, atualmente, os dispositivos de armazenamento usados possuem um custo relativo inicial de cerca de 13% do custo total da instalação do sistema. Contudo os custos operativos desses dispositivos podem chegar a 46% do custo total quando são considerados os custos de manutenção. Portanto deve-se dar prioridade no desenvolvimento de controladores de carga eficazes e confiáveis para reduzir os custos do sistema como um todo, que sejam capazes de aumentar a vida útil das baterias.

Os acumuladores podem ser conectados diretamente ao barramento c.c ou através de um conversor c.c-c.c bidirecional. Esses conversores representam somente 5% do custo total do sistema, por isso é de extrema importância que estes sejam melhorados. Essa afirmação é baseada no fato de que um aumento em 10% no custo dos controladores de carga pode levar a uma redução de 50% no custo do armazenamento, dobrando a vida útil das baterias. Assim o gerenciamento das baterias é um dos pontos mais importantes para diminuir os custos dos sistemas de geração PV como um todo.(DAMASCENO, 2008)



Figura 7 – Custos de implementação de sistemas PV. Modificada de (DAMASCENO, 2008).

232 Banco de baterias

Os métodos de armazenamento mais difundidos em sistemas de fornecimento ininterrupto de energia UPS (Uninterruptible Power Systems) são aqueles que utilizam baterias, no entanto a vida útil das mesmas se limitam a aproximadamente 4 anos, sendo ainda suscetíveis a elementos de depreciação que reduzem ainda mais o tempo de vida, tais fatores são: nível de profundidade de descarga, modo de carga e descarga, limite de ciclos, temperatura, ondulações de tensão e de corrente.

O sistema de armazenamento de energia utilizado é um banco de baterias de 48V composto de quatro baterias estacionárias de chumbo-ácido de 12V ligadas em série. O baixo nível de tensão permite ao usuário realizar manutenções no sistema sem correr o risco de se acidentar com choques fatais.

2.3.3 Associação das Baterias

É de fundamental importância que todas as baterias associadas possuam a mesma tensão nominal e capacidade de carga. Existem duas topologias possíveis, a associação em paralelo e em série. A associação em paralelo consiste na interligação dos terminais de mesma polaridade das baterias envolvidas. Essa configuração permite que a capacidade C(Ah) seja somada na proporção da quantidade de baterias agregadas ao sistema, mantendo a mesma tensão nominal. Tal associação é indicada na Figura 8.



Figura 8 – Associação de baterias em paralelo.

A topologia adotada no presente trabalho considera a associação em série de 4 baterias de 12 volts, 100Ah cada, conforme ilustrado na Figura 9. A associação consiste da interconexão dos terminais de polaridades opostas de baterias distintas. Tal configuração possibilita a soma das tensões na proporção da quantidade de baterias componentes do sistema, conservando a mesma capacidade C(Ah) disponível.



Figura 9 – Associação baterias em série.

As ligações em série possuem mais restrições do que as conexões paralelas, por isso é interessante que as baterias associadas tenham aproximadamente a mesma idade e que possuam relativamente a mesma condição geral. Se tais condições são satisfeitas, a eficiência do processo de carga aumenta.

2.3.4 Manutenção

A falta de manutenção, ou a manutenção inadequada, é a principal responsável pela curta duração da vida das baterias. Felizmente, as características físicas e químicas inerentes das baterias de chumbo-ácido tornam o controle de carga bastante simples em relação a outros tipos de baterias. Se a bateria for alimentada com energia c.c na tensão de carga apropriada, a bateria irá absorver apenas a quantidade de corrente que pode aceitar de forma eficiente, e esta corrente reduz gradualmente à medida que a bateria se aproxima da carga completa. A descarga de células abaixo da tensão específica reduz o eletrólito a uma baixa concentração, o que tem um efeito deletério sobre a estrutura de poros da bateria. A vida da bateria mostra ser uma função direta da profundidade de descarga sofrida.

2.4 Reações de carga e descarga

Durante a operação normal de carga, a água de uma bateria é perdida por consequência da evaporação H_2O e da formação do gás hidrogênio $2H^+$ que escapam para a atmosfera. A evaporação é uma parte relativamente pequena da perda, exceto em climas ou ambientes muito quentes e secos (DAVID, 2001).

Quando a bateria está fornecendo energia o processo é descrito como descarga, neste momento ocorre a liberação de elétrons e^- . A energia é produzida pelo ácido H_2SO_4 no eletrólito combinando gradualmente com o material ativo das placas do acumulador. Esta combinação produz sulfato de chumbo $PbSO_4$ em ambas as placas, sendo a negativa composta de dióxido de chumbo PbO_2 e a positiva de chumbo metálico Pb. Uma célula está completamente descarregada quando ambas as placas são totalmente sulfatadas, e como elas estão agora compostas de material idêntico, a tensão terminal entra em colapso. Na prática, a descarga seria interrompida naturalmente muito antes de as placas atingirem essa condição (T.R.CROMPTON, 2000). As equações que modelam as reações eletroquímicas que ocorrem nos elementos de uma bateria de chumbo ácido são apresentadas a seguir:

Eletrodo Positivo:
$$PbO_2 + H_2SO_4 + 2H^+ + 2e^- \Rightarrow PbSO_4 + 2H_2O$$
 (2.7)

Eletrodo Negativo: $Pb + H_2SO_4 \rightleftharpoons PbSO_4 + 2H^+ + 2e^-$ (2.8)

Reação Geral:
$$Pb + PbO_2 + 2H_2SO_4 \rightleftharpoons 2PbSO_4 + 2H_2O$$
 (2.9)Carga \rightleftharpoons Descarga

As reações (2.7), (2.8) e (2.9) ocorrem contínua e espontâneamente, mesmo a bateria

estando em circuito aberto. Até que a neutralidade elétrica seja atingida, as reações de descarga são obrigadas a avançar. Esta descarga espontânea é chamada de auto descarga, tal fenômeno irá drenar a energia armazenada na bateria, a corrente de descarga deve ser mais baixa o possível para a conservação do acumulador.

2.4.1 Sulfatação

Sulfatação significa a formação ou deposição de sulfato de chumbo na superfície e nos poros do material ativo das placas da bateria. O sulfato de chumbo é formado como uma parte natural do processo de descarga e auto descarga, nesse sentido, é uma parte necessária do funcionamento da bateria. O sulfato de chumbo tem estrutura finamente cristalina e é facilmente reduzido por uma corrente de carga. No entanto, quando a bateria é submetida à condições adversas, ocorre sulfatação excessiva, que por sua vez, pode causar dano permanente às placas prejudicando o seu real desempenho. A sulfatação é causada pelos seguintes fatores.

- 1. Baterias sem recarrega por longos períodos após descarga.
- 2. Armazenamento contínuo da bateria sob temperaturas excessivas.
- 3. Prolongados períodos a baixa carga.
- 4. Longo período sem recargas periódicas (auto-descarga).
- 5. Permitir descargas da bateria a tensões abaixo da tensão de corte recomendada.(RTA, 2005)

2.5 Processo de carga

O objetivo do carregamento é conduzir todo o ácido para fora das placas e devolvêlo ao eletrólito. A corrente contínua é passada através da célula na direção oposta à ocorrida durante a descarga, libertando o ácido das placas, isto é, a concentração de ácido no eletrólito aumenta. Isso inverte a ação da descarga e restaura a bateria a sua condição original de carga. Quando a célula está totalmente carregada, o material ativo das placas positivas é o dióxido de chumbo PbO_2 e das placas negativas é o chumbo metálico Pbna forma esponjosa. Nesta fase a concentração de ácido H_2SO_4 no eletrólito está no seu máximo(T.R.CROMPTON, 2000). A recarga adequada é importante para obter a eficiência máxima de qualquer bateria. Algumas regras para a carga adequada de baterias do tipo chumbo-ácido são:

1. Caso a bateria esteja abaixo da tensão crítica, a corrente no início da recarga não deve ultrapassar 3% de C(Ah).

- 2. Após a carga lenta, a corrente de carga deve ser limitada a no máximo 20% de C(Ah).
- 3. Quando 100% da capacidade tiver sido devolvida à bateria, a taxa de carga declinará à corrente de flutuação na taxa de 0.1% de C(Ah).

2.5.1 Modos de carregamento

Existem vários métodos de carga para baterias. São eles: tensão constante; corrente constante; híbrido; impulso; reflex e multi step. A partir da cobinação dessas técnicas é possível obter métodos variados de carga alterando as variáveis que se deseja controlar, respeitando os valores de carga da bateria. A base teórica dos métodos de carga são descritos a seguir:

2.5.1.1 Carregamento tensão constante

Método de baixo custo, requer uma fonte de tensão constante regulando a tensão sobre os terminas da bateria. A corrente de carregamento irá diminuir com o aumento do potencial da bateria, conforme ilustrado na Figura 10.



Figura 10 – Formas de onda de tensão e corrente em carga pelo método de carregamento tensão constante. Modificada de (MOO; HSIEH; TSAI, 2003)

2.5.1.2 Carregamento corrente constante

Método amplamente difundido que consiste na injeção de uma corrente invariável na bateria durante todo o período de carga, conforme demonstrado na Figura 11.



Figura 11 – Formas de onda de tensão e corrente em carga pelo método de carregamento corrente constante. Modificada de (MOO; HSIEH; TSAI, 2003)

Os dois métodos descritos anteriormente são de fácil implementação, no entanto possuem algumas desvantagens, como por exemplo a corrente inicial de carregamento pode ser demasiadamente alta para o caso da bateria estar com valores de tensão abaixo do potencial crítico. Nestas condições a alta corrente pode causar efeitos indesejáveis como o gaseificação excessiva do elétrolito e alta tensão sobre os eletrodos culminando na deformação dos mesmos.

2.5.1.3 Carregamento híbrido

Técnicas híbridas de carregamento combinam vários métodos. Por exemplo, uma corrente constante é inicialmente injetada até que a tensão da bateria alcance o valor previamente estabelecido. Neste momento ocorre a comutação para o carregamento em tensão constante, como demonstrado na Figura 12.



Figura 12 – Formas de onda de tensão e corrente em carga por tensão constante e corrente constante. Modificada de (MOO; HSIEH; TSAI, 2003)

2.5.1.4 Carregamento em pulsos

Polarizações são inevitáveis durante o processo de carga ou descarga. Para superar os efeitos de polarização a fonte de carga tem de fornecer uma quantidade extra de energia. A idéia da carga em pulso é fornecer um curto tempo de descanso entre um pulso e outro. Este tempo ocioso é utilizado para que os íons na bateria tenham mais tempo para se difundir pelo eletrólito afim de aliviar a polarização da concentração, conforme ilustrado na Figura 13.



Figura 13 – Forma de onda de corrente em pulso de carga. Modificada de (MOO; HSIEH; TSAI, 2003)

2.5.1.5 Carregamento reflex

No carregamento reflex além do pulso positivo e do tempo de descanso apresentado no carregamento em pulsos é fornecido à bateria um pulso negativo, tal medida tem o objetivo de acelerar o processo de difusão dos íons pelo eletrólito. Afim de mitigar o efeito de descarga o tempo do pulso negativo é ajustado para durar o mínimo possível, enquanto a magnitude do mesmo pulso é ampliada com o propósito de aumentar o efeito de aceleração de difusão dos íons. Esse método contribui também para a redução da temperatura da bateria durante o processo de carga (HUANG JEN CHIU et al., 2006). A duração dos pulsos pode ser estimada em $t_{+} = 50\%$ de T e $t_{-} = 25\%$ de T, como é demonstrado na Figura 14.



Figura 14 – Forma de onda da corrente em carga *reflex*. Modificada de (MOO; HSIEH; TSAI, 2003)

2.5.1.6 Carregamento Multi Step

Existem vários métodos de carga diferenciados conforme a característica de corrente e tensão. Estes métodos possuem um curso de carga dividida em etapas, nas quais são aplicadas tensões e/ou correntes constantes. Para isto é necessário a utilização de sensores de corrente, de tensão, de temperatura e de um algoritmo de carga implementado por microcontroladores, DSPICs (Controladores de sinais digitais), DSPs (Processadores de sinais digitais) ou CIs (Circuitos integrados) dedicados a esta função. Muitos carregadores de baterias chumbo ácido disponíveis no mercado utilizam métodos inadequados para carregá-las, resultando numa considerável diminuição da vida útil da mesma (FREITAS et al., 2016).

Por isso abordaremos as dinâmicas de carga *multi step*, ilustrado na Figura 15, visto que podem ser personalizadas através da reprogramação do algoritmo utilizado, adequando-se às especificações de dinâmica de carga de cada bateria. Basicamente é possível alterar as configurações de tensão e corrente de cada etapa individualmente. As técnicas de carga híbridas ou *multi step* são eficientes para superar problemas sofridos em métodos de carregamento tensão constante ou corrente constante.



Figura 15 – Formas de onda de tensão e corrente em carga *multi-step* em corrente constante. Modificada de (MOO; HSIEH; TSAI, 2003)

2.6 Carregamento em 8 etapas

O método de carga de oito estágios possibilita um eficiente diagnóstico do real estado das baterias, implicando em um processo de carga otimizado que, por consequência eleva a expectativa de vida útil do acumulador bem como sua capacidade de armazenamento. As etapas da carga são demonstradas na Figura 16.



Figura 16 – Processo de carga em oito etapas. Modificada de (CTEK, 2006).

O método 8 etapas mescla os métodos de carregamento citados anteriormente, combinando-os de forma a alcançar o máximo desempenho possível do processo de carga, respeitando contudo o progresso da dinâmica das reações químicas características das baterias. É importante ressaltar que o método de carga abordado no presente trabalho se refere à recarga de baterias do tipo chumbo ácido.

Etapa 1 - Desulfatação:

Essa etapa é dedicada à recuperação da bateria. Pulsos de corrente em alta frequência na faixa de 2-10Mhz são utilizados para reativar a bateria de chumbo ácido exausta por elevada quantidade de ciclos de carga/descarga; descarga profunda ou mesmo auto-descarga ocasionada pelo não uso da mesma. Esse estágio basicamente ajuda a restaurar as propriedades químicas normais. Geralmente os fabricantes de baterias determinam um intervalo de tempo máximo para aplicação desse procedimento, ficando em torno de uma média de 8 horas.

Etapa 2 – Carga Lenta:

Caso a tensão da bateria se encontre abaixo do valor crítico de tensão $V_{off} = 1,75v/cel$, a etapa de carga lenta será iniciada. Ou seja, um pequeno valor de corrente 3% de C(Ah) será injetado no banco de baterias até que a mesma alcance o valor critico de tensão V_{off} . Esse procedimento tem por objetivo evitar a gaseificação excessiva do eletrólito devido a ocorrência de hidrólise.

Etapa 3 – Carga rápida:

Este procedimento corresponde à etapa principal onde cerca de 80% da carga ocorre. A corrente máxima de carga permitida na bateria $I_{load} = 10\%$ de C(Ah) é mantida constante até que a tensão de carga $V_{load} = 2,48v/cel$ seja atingida, momento em que o carregador alterna automaticamente para o modo de absorção.

Etapa 4 – Absorção:

Este tempo é concedido à absorção final, culminando na maior capacidade de retenção de carga possível pela bateria, a tensão $V_{load} = 2,48v/cel$ é mantida constante pelo carregador sobre a bateria até que a corrente $I_r ef$ decrescente atinja o valor de corrente de 2% de C(Ah). Alcançado tal valor definido de corrente, o conversor comuta automaticamente para etapa de análise.

Etapa 5 – Análise:

Nessa etapa o carregamento é interrompido por um intervalo de 3 minutos afim de determinar a real condição do estado da bateria pela análise da capacidade de retenção de carga. Se ao final do tempo determinado a medição nos terminais da bateria estiverem abaixo de 2,2v/cel, a bateria é considerada inapta para o prosseguimento do processo e o carregamento é suspenso, caso contrário a bateria é aprovada e a etapa subsequente é ativada.

Etapa 6 – Recondicionamento:

O objetivo dessa etapa é alcançar através da injeção de corrente $I_{rec} = 1.8\%$ de C(Ah) o estado de gaseificação controlada que promoverá através da circulação gasosa a homogeneização do eletrólito da bateria. A injeção de corrente $I_{rec} = 1.8\%$ de C(Ah) elevará a tensão da bateria até alcançar a tensão de gaseificação ou $V_{rec} = 2,67v/cel$. Atingido tal valor, a corrente I_{Bref} começa a decrescer até o valor mínimo de corrente de 1.2% de C(Ah). Dinamicamente o recondicionamento é semelhante às etapas de fase de carga e absorção juntas, em um período de tempo comprimido e limite de tensão diferente. É importante salientar que essa etapa do processo de carga tem um prazo máximo de 30 minutos para ser concluído. Tal medida é adotada para evitar perda excessiva de água da bateria por hidrólise. A etapa consecutiva é acionada caso o prazo determinado esgote ou caso os valores de V_{rec} e $I_{Bref} = 2\%$ de C(Ah) sejam mutuamente satisfeitos.

Etapa 7 – Flutuação:

É a tensão responsável por manter o acumulador no estado de plena carga(LAZZARIN, 2006). Nessa etapa, a tensão constante de $V_{flut} = 2,26v/cel$ é imposta à bateria, tal processo tem duração máxima de 10 dias. Posteriormente ocorre a etapa carregamento em pulsos.

Etapa 8 – Pulsos:

Essa etapa é feita através do chaveamento de corrente quando a tensão da bateria atingir 2,0v/cel. A corrente de carga rápida é aplicada até atingir V_{load} e depois cessa a corrente. Esse ciclo é constante fazendo com que a tensão da bateria varie entre 2,0v/cel e 2,4v/cel durante a etapa de flutuação.

A operação de recarga em oito etapas é representada no fluxograma da Figura 17.



Figura 17 – Fluxograma método de carga dos 8 estados.

3 Metodologia

3.1 Controle do DAB

O circuito de controle tem como objetivo a regulação do valor do defasamento a atribuir ao circuito de comando do conversor. Esta regulação é realizada em função do valor de corrente ou de tensão que se pretende aplicar em determinado momento. Uma vez que o objetivo do conversor é gerir a carga e descarga de uma bateria, o controle do conversor deve ser tal que permita fornecer à bateria ou uma corrente ou uma tensão requerida, dependendo da situação de carga em que esta se encontre. Durante o descarregamento o controle deve ser feito em corrente com base numa corrente de referência definida pelo controlador em I_{Bref} (XAVIER, 2016). Durante o carregamento o controle é realizado em partes por corrente constante, seguido de períodos onde a corrente sofre alterações para manter a tensão na bateria constante. É assim necessário o desenvolvimento de um controlador de corrente e de um controlador de tensão.

Tanto o controle da corrente como o controle da tensão se realizam através de controladores do tipo PI (Proporcional integral). O controlador de tensão, assim como o algoritmo lógico que permite decidir quando carregar as baterias com tensão ou corrente constante são implementados. O desfasamento é obtido através do controlador de corrente que recebe o resultado da diferença entre as malhas de tensão A e B.

O resultado da diferença entre as malhas de tensão A e B é responsável por implementar o algoritmo que gerência o carregamento e o descarregamento da bateria. Quando se pretende descarregar a bateria é gerada uma referência de corrente negativa obtida na interação entre as malhas de tensão A e B. De modo semelhante quando se pretende carregar a bateria, a interação entre as malhas de tensão A e B começa por gerar uma referência de corrente positiva até o momento em que a tensão na bateria atinja o valor máximo admitido naquele momento. Obtém-se assim um controlador capaz de responder aos requisitos de carga e descarga das baterias.

3.2 Metodologia de Controle

Para evitar que as baterias do banco sofram descarga profunda foi implementada a seguinte medida de proteção. Quando a tensão no barramento for menor que 380Vcc e simultaneamente o banco de baterias apresentar um valor de tensão igual ou menor a V_{off} , o DAB não fornecerá energia ao barramento. Neste caso o conversor interligado à rede pública de energia elétrica será acionado afim de alimentá-lo. Tendo em vista que as baterias inseridas no banco foram previamente analisadas e consideradas aptas à integração ao UPS e que a medida de proteção supracitada isentará os acumuladores da deterioração por sulfatação excessiva, torna-se admissível a supressão da etapa de desulfatação, dado que a mesma é exclusivamente dedicada à reversão de tal fenômeno de degradação, lembrando que a deposição de sulfato de chumbo se forma como uma parte natural do processo seguro de descarga e que a estrutura finamente cristalina oriunda deste processo é facilmente reduzida pela corrente de carga.

A etapa de flutuação por tensão constante possui duração de 10 dias. Como a carga armazenada no acumulador será requisitada pelo sistema antes do término do tempo citado, a etapa subsequente de carregamento por pulsos não será ativada, visto que a etapa precedente desta não será concluída a tempo devido à dinâmica operacional da nanorrede. A solicitação de provimento energético do barramento aos acumuladores se deve à ocorrência de variação no fornecimento energético das fontes alternativas de energia elétrica integradas à nanorrede.

O presente trabalho adota o banco de baterias como uma carga quando o barramento c.c apresenta tensão de referência maior ou igual 380Vcc e, como fonte, quando o valor da tensão de barramento for inferior ao referido valor.

O controle do proposto conversor consiste basicamente da integração do controle de defasagem angular na modulação *phase shift* e do algoritmo de carga que configura o processo de carregamento em 8 etapas dos quais serão utilizados somente 6 etapas, devido à supressão das etapas de desulfatação e carregamento por pulsos, conforme informado anteriormente. Utilizando desse método o conversor deverá garantir a tensão de referência no barramento e a carga dos acumuladores, respeitando contudo as características elementares do processo de carga e descarga das baterias do tipo chumbo ácido. O conversor deverá promover também uma transição suave entre tais processos.

A regulação do barramento c.c se dará pelo controle de fluxo de potência entre o barramento c.c e o banco de baterias. O banco de baterias consiste de quatro baterias 12V cada e capacidade de 100Ah, associadas em série, culminando numa tensão de 48V mantendo a capacidade 100Ah disponível.

O sistema de controle atuará quando a tensão no barramento da nanorrede for maior ou igual a 380Vcc. Daí o fluxo de potência seguirá do barramento c.c para os acumuladores, o conversor drenará a corrente específica de cada etapa do barramento conforme requer o carregamento em 8 estágios. Quando a tensão no barramento c.c se tornar menor que 380Vcc, o fluxo de potência será invertido. A corrente de carga das baterias será gradualmente diminuída pelo conversor até que a mesma se torne negativa. A partir deste instante até que a corrente fique positiva novamente o banco de baterias passa a atuar como fonte de energia para a nanorrede. Afim de garantir a integridade dos acumuladores, uma medida de proteção implementada no conversor impede que o banco de baterias descarregue abaixo da tensão crítica V_{off} mesmo que a tensão de barramento seja inferior a 380Vcc. Neste caso, o conversor interligado à rede pública de energia elétrica será acionado com o objetivo de alimentar o barramento c.c.

Nos próximos sub capítulos serão apresentados a modelagem em pequenos sinais do conversor DAB e a implementação do sistema de controle mencionado anteriormente. O desenvolvimento terá como base a implementação do conversor DAB ilustrado na Figura 18.



Figura 18 – Diagrama esquemático do conversor DAB. Modificada de (SILVA, 2013)

3.3 Modelo de pequenos sinais

Para fins de controle, um modelo de pequenos sinais será desenvolvido com o objetivo de alcançar um controle mais ágil. O banco de baterias será modelado como um circuito RC mostrado na Figura 19 afim de reduzir o esforço computacional exigido na simulação. A resistência interna será definida como R_I , valor fornecido pelo fabricante, e R_D representará as perdas por auto descarga cujo valor pode ser estimado em (3.1), sendo I_{flut} a corrente de flutuação e C o capacitor definido por (3.2), sendo V_n a representação da tensão nominal da bateria.

$$R_D = \frac{V_{flut} - I_{flut} \times R_I}{I_{flut}} \tag{3.1}$$

$$C = \frac{C(Ah)}{V_n} \tag{3.2}$$



Figura 19 – Modelo de uma bateria.

Na base de tempo do sistema, a bateria comporta-se como uma impedância definida por (3.3) durante a carga e como uma fonte de corrente na descarga. O ponto quiescente de operação do circuito é $V_B = 48$ V e $I_{load} = 10\%$ de C(Ah).

$$Z_B = \frac{V_B}{I_{load}} \tag{3.3}$$

O conversor DAB será modelado neste trabalho como uma fonte de corrente, cujo valor se iguala à corrente média de saída do conversor definida na equação (3.3) de potência total transferida entre o primário e o secundário levando em conta a o fator de rendimento. O diagrama utilizado para a modelagem do sistema é apresentado na Figura 20, onde a bateria será modelada apenas como resistor.



Figura 20 – Modelo do DAB como fonte de corrente média e bateria como impedância. Modificada de (SILVA, 2013)

Para que este controle seja feito é necessário o desenvolvimento de um modelo matemático. O circuito da Figura 20 é o modelo DAB adotado para determinação da função de transferência no modo de carregamento. Aplicando a transformada de Laplace na corrente de carga i_B da bateria, temos:

$$i_B(s) = \frac{NV_A\delta(1-\delta)}{2Lf_s} \frac{1}{sZ_bC_B + 1}$$
(3.4)

$$\hat{i}_B(s) = \frac{\partial i_B}{\partial \delta} \left| \hat{\delta} + \frac{\partial i_B}{\partial V_A} \right| \hat{V}_A \to G_{i_B \delta}(s) \hat{\delta} + G_{i_B V_A}(s) \hat{V}_A \tag{3.5}$$

As funções de transferência (3.6) e (3.7) foram obtidas da variação de (3.4) em função da defesagem angular entre a onda do primário e secundário δ e em função da variação da tensão no barramento c.c V_A respectivamente

$$G_{i_B\delta}(s) = \frac{NV_A(1-2\Delta)}{2Lf_s} \frac{1}{sZ_bC_B+1}$$
(3.6)

$$G_{i_B V_A}(s) = \frac{N\Delta(1-\Delta)}{2Lf_s} \frac{1}{sZ_b C_B + 1}$$
(3.7)

Definindo $V_B(s)$ em (3.8) oriundo de (3.3)

$$V_B(s) = i_B(s)Z_B \tag{3.8}$$

Função de transferência (3.9) obtida da variação de V_B (3.8) em função da corrente de bateria i_B

$$\hat{V}_B(s) = \left. \frac{\partial V_B}{\partial i_B} \right| \hat{i}_B \to G_{V_B i_B}(s) \hat{i}_B \tag{3.9}$$

Por (3.8) e (3.9) pode-se deduzir (3.10)

$$G_{V_B i_B}(s) = Z_B \tag{3.10}$$

$$\left. \frac{\partial i_B}{\partial V_B} \right| \to G'_{i_B V_B}(s) \hat{V}_B \tag{3.11}$$

A função de transferência (3.12) obtida da variação de i_B (3.4) em função da tensão de bateria V_B

$$G'_{i_B V_B}(s) = \frac{N^2 \Delta (1 - \Delta)}{2L f_s} \frac{1}{s Z_b C_B + 1}$$
(3.12)

Definindo $V_A(s)$ em (3.13)

$$V_A(s) = \frac{R_L}{sR_LC_A + 1} \left[i_{bus} + \frac{i_B(s)}{N} \right]$$
(3.13)

$$\frac{\partial V_A}{\partial i_B} \left| \hat{i}_B = G'_{V_A i_B}(s) \hat{i}_B \right|$$
(3.14)

Função de transferência (3.15) obtida da variação da tensão de barramento c.c V_A (3.13) em função da corrente de bateria i_B

$$G'_{V_A i_B}(s) = \frac{R_L}{s N R_L C_A + N}$$
(3.15)

Baseados em (3.6), (3.7), (3.10), (3.12), (3.15) obtem-se o diagrama de blocos apresentado na figura 21, que representa o modelo do conversor para pequenos sinais.



Figura 21 – Modelo em pequenos sinais do conversor DAB. Modificada de (SILVA, 2013)

3.4 Estrutura de controle

A Figura 22 representa o diagrama de blocos do controlador implementado. A letra A denota a tensão no barramento e a letra B, a tensão no banco de baterias. A ideia de controle consiste nos valores resultantes entre as diferenças de tensão das malhas de tensão A e B. Tais valores definem o fluxo e a potência transferida do barramento c.c para as baterias ou vice versa, das baterias para o barramento c.c.

No início da carga, considerando que a tensão no barramento c.c V_A corresponda ao valor de referência de 380Vcc e a tensão do banco de baterias V_B se encontra abaixo do valor crítico, $V_{off} = 42v$, o valor de tensão aplicado à referência da malha de tensão V_B será o valor da tensão de carga $V_{load} = 59,6V$. Neste momento o compensador $G_{cB}(s)$ começa a impor um valor de corrente 3% de C(Ah). Como a dinâmica da corrente é mais ligeira que a dinâmica da tensão, $G_{cB}(s)$ irá saturar rapidamente atingindo o valor de máxima corrente segura para esta etapa da carga.

Quando a tensão crítica V_{off} for alcançada, o banco de baterias estará apto a ser submetido a uma carga com maior valor de corrente e o valor de saturação da corrente é alterado de 3% de C(Ah) para 10% de C(Ah). Semelhantemente ao processo anterior, a corrente I_{refB} atinge o novo valor de saturação antes que o banco de baterias alcance o valor de tensão de referência da malha de tensão V_B imposto no início do processo.

Alcançando o valor de referência da malha de tensão V_B , a corrente I_{refB} começa a ser diminuída afim de evitar que a tensão do banco de baterias ultrapasse o valor imposto na malha de referência de tensão B. Quando o valor da corrente atinge 2% de C (Ah) o conversor interrompe o processo de carga e deixa o banco de baterias sob análise. No mesmo momento da interrupção um contador é acionado e inicia a contagem de um tempo pré-determinado de 3 minutos. Após a contagem deste tempo, o valor da tensão do banco de baterias é medido. Se o valor for inferior a $V_{anl}=52,8V$, o processo de carga é abortado, caso contrário, o processo continua e a etapa de recondicionamento é acionada. Nesse estágio, o valor de saturação da corrente é alterado para 1,8% de C(Ah) e o valor de tensão aplicado à referência da malha de tensão V_B é modificado para $V_{rec}=62,4V$.

De acordo com as características das dinâmica de corrente e de tensão já descritas, a saturação da corrente I_{refB} ocorre antes que o valor da referência de tensão V_B seja alcançado no banco de baterias. Quando o valor de referência é alcançado, o valor da corrente decresce novamente até atingir o mínimo valor de corrente, 2% C(Ah). Tal valor aciona a próxima fase do carregamento.

A etapa de flutuação é acionada e a tensão aplicada à referência da malha de tensão B é o valor de flutuação V_{flut} = 54.4V, a partir do momento que tal tensão é imposta ao banco de baterias pelo conversor, a corrente I_{refB} decresce até atingir o seu valor mínimo, devido a lentidão da dinâmica de tensão o valor de referência B é alcançado no banco de baterias posteriormente.

Caso a tensão no barramento c.c fique abaixo da tensão de referência da malha A,

o compensador $G_{cA(s)}$ irá impor o valor de corrente I_{refA} , resultando numa corrente de carregamento do banco de baterias de forma a satisfazer $I_{Bref} = I_{refB} - I_{refA}$. Caso o valor de I_{refA} seja maior que o valor de I_{refB} , I_{Bref} torna-se negativo, consequentemente, inverte-se o fluxo de potência do conversor. Nessa condição o banco de baterias passa a alimentar o barramento c.c.

No processo de descarga da bateria o valor de máxima corrente de descarga deve ser respeitado, para isso o limite superior do compensador $G_{cA}(s)$ será calibrado de acordo com o seguinte procedimento. A máxima corrente permitida para descarga é somada à máxima corrente permitida para carga, 10%C(Ah) mais 20%C(Ah) respectivamente, totalizando em 30%C(Ah). A malha B possui três referencias de tensão: a primeira é V_{load} = 59,6V, configurada toda vez que o processo de descarga é iniciado, a segunda referência, a tensão de condicionamento V_{rec} = 62,4V, é aplicada após a etapa de análise da bateria e finalmente a tensão de flutuação V_{flut} = 54,4V que é utilizada assim que as baterias atingem a tensão de recondicionamento e a corrente for menor que 2% de C(Ah).

O valor da diferença entre as saídas dos controladores das malhas de tensão A e B são aplicados à malha interna de corrente. Dessa forma, se o valor da malha de tensão A for maior que o valor da malha de tensão B, o resultado será negativo e o fluxo de potência será invertido, visto que a saturação do compensador da malha A foi calculado justamente para sobrepor a saturação do compensador da malha B projetado de forma a garantir que o valor da corrente de descarga não comprometa a integridade das baterias.

O presente trabalho adota valores de componentes oriundos de (SILVA, 2013). Tais valores foram obtidos mediante cálculos do projeto de um conversor c.c-c.c bidirecional DAB com tensão de barramento 380Vcc e tensão no secundário de 48Vcc. Com um rendimento η de 0,9, a potência de saída P_o é 960W e a frequência de chaveamento F_s opera em 15Khz. O dimensionamento dos capacitores resultou nos valores de 880 μ F para o capacitor de barramento C_A e 6400 μ F para capacitor do banco de baterias C_B . O projeto do transformador atentou para que a indutância total de dispersão seja próxima do valor calculado de indutância L=1,1mH, afim de garantir a potência do conversor.

O banco de baterias adotado consiste de quatro baterias de 12V 100Ah ligadas em série, totalizando um banco de 48V 100Ah.



Figura 22 – Diagrama de blocos da estrutura de controle.

4 Resultados

4.1 Simulação e resultado com o conversor DAB

Como foi citado no capítulo anterior as etapas de desulfatação e carregamento em pulsos foram suprimidas do processo de carga devido às caracteristicas de operação da nanorrede. Para testar o sistema de carregamento foram realizadas simulações de carga em baterias com o objetivo de avaliar o desenvolvimento do processo utilizando o conversor DAB em 6 etapas. O conversor funciona como uma interface entre o barramento c.c e o banco de baterias. Os dois testes consistem da simulação do processo de carga em duas circunstâncias distintas sendo elas, carregamento na ausência de perturbação no barramento c.c e, carregamento com ocorrência de perturbação no barramento c.c. A simulação foi realizada utilizando o software PLECS[®] (Piecewise Linear Electrical Circuit Simulation), trata-se de uma ferramenta computacional desenvolvida pela Plexium designada especialmente para sistemas eletrônicos de potência, no entanto, pode ser aplicada nas mais diversas aplicações da área de elétrica.

4.1.1 Simulação de funcionamento do conversor DAB na ausência de perturbação no barramento c.c

Nesta simulação a tensão de barramento c.c foi considerado estável em 380Vcc durante todo o processo de carga, o banco de acumuladores possui 4 baterias de 12V 100Ah cada. A tensão do banco de baterias foi configurada com valor de tensão inicial igual a 35Vcc, o valor crítico de tensão especificado pelo fabricante corresponde a 42Vcc. Detalhes do carregamento são dados na Tabela 1. Os dados foram obtidos do manual de baterias Battery Tender[®]:

Estado	Tensão(V/cel)	Corrente
Descarga (V_{off})	1,75	3% de C(Ah)
$Carga(V_{load})$	2,48	10% de C(Ah)
Análise (V_{anl})	2,2	-
Recondicionamento (V_{rec})	2,67	1.8% de C(Ah)
Flutuação (V_{flut})	2,26	0.1% de C(Ah)

Tabela 1 – Níveis de tensão e corrente para o processo de carga.

As Figuras a seguir mostram o progresso do carregamento subdividido em 6 etapas, a figura 23 corresponde à dinâmica da tensão nos terminais das baterias, enquanto a figura





Figura 23 – Simulação do carregamento da bateria. Curva de tensão da bateria.



Figura 24 – Simulação do carregamento da bateria. Curva de Corrente de carga.

Inicialmente, conforme o intervalo de tempo 1 indicado na Figura 24, o processo de carga é iniciado em corrente constante. A tensão de carga 59,6V é a tensão de referência e a corrente de carregamento é limitada a 3% de C(Ah). Esta etapa corresponde à carga lenta. Tendo em vista que a tensão inicial do banco de baterias encontra-se em um

valor abaixo do valor crítico, nessa fase a corrente é limitada pela malha de tensão B. A medida que a bateria vai acumulando carga elétrica, a tensão nos terminais aumenta gradualmente até que seja alcançado o valor de tensão crítica, conforme demonstrado no final do intervalo de tempo 1 da Figura 23. Nesse momento ocorre o avanço para a etapa subsequente carga rápida.

Na fase de carga rápida a tensão de referência permanece a mesma, no entanto a corrente de carregamento é alterada para 10% de C(Ah) pela malha de tensão B, conforme o intervalo de tempo 2 ilustrado na Figura 24. Como consequência desse aumento de corrente a dinâmica da curva de tensão sofre alterações. É possível observar na Figura 23, no limiar dos intervalos de tempo 1 e 2, a ocorrência de um "degrau" no momento em que a comutação dos valores de corrente ocorre. Tal fenômeno se deve à rápida variação de corrente em um curto intervalo de tempo. Ainda na curva de tensão no intervalo de tempo 2 é perceptível que o ângulo de inclinação desta curva aumenta em relação ao ângulo de inclinação da curva da etapa anterior. Esse indicativo permite afirmar que a bateria está acumulando maior quantidade de carga elétrica em um menor intervalo de tempo. Após a comutação, a corrente de carregamento permanece constante até que a tensão de referência seja alcançada nas baterias.

Alcançada a tensão de referência de 59,6V nas baterias, a corrente começa a diminuir gradativamente, conforme ilustrado na Figura 24 intervalo 3, afim de que a tensão na bateria seja mantida constante no valor de referência, conforme ilustra Figura 23 intervalo 3. Quando, no mesmo intervalo de tempo a corrente em declínio atinge o valor de 2% de C(Ah), ocorre o acionamento da etapa de análise.

Como indicado na Figura 24, intervalo 4, o processo de carregamento das baterias é interrompido na etapa de análise e a corrente de carregamento vai a 0 A por um intervalo de 3 minutos. Nesse mesmo intervalo de tempo a tensão da bateria decai por auto descarga como indicado na Figura 23. Ao final do intervalo de 3 minutos, a carga retida na bateria é analisada. Caso o valor de tensão armazenado no acumulador permaneça superior a 2,2v/cel, o processo de carga prossegue, caso contrário, é suspenso.

Posterior à etapa de análise segue a etapa de recondicionamento, indicado no intervalo de tempo 5. Nessa fase, a tensão de referência é ajustada para 62,4V e a corrente de carregamento é limitada a 1.8% de C(Ah). A rápida variação de corrente em um curto intervalo de tempo produz um novo degrau na curva de tensão como indicado na Figura 23, na fronteira entre os intervalos 4 e 5. Na sequência a tensão das baterias aumenta gradativamente até que se atinja a tensão de referência. Quando esta é alcançada, a corrente começa a decrescer afim de manter constante a tensão nas baterias como demonstra Figura 24, no final do intervalo 5. O aspecto dinâmico das curvas de corrente e tensão desta etapa se assemelham ao aspecto dinâmico das etapas de carga rápida e absorção juntas, porém em um intervalo de tempo menor e valores de tensão e corrente diferentes.

Na etapa de recondicionamento qunado a corrente de carga em declínio atinge o valor de 1,2% de C(Ah), a etapa de flutuação é acionada e a tensão de referência nesse momento se torna a tensão de flutuação de 54,4V. Tal etapa corresponde ao intervalo de tempo 6. Até que a tensão nas baterias alcancem o valor de tensão de flutuação, a corrente de carregamento cessa. Uma vez alcançada a tensão de flutuação nas baterias, o conversor passa a injetar uma pequena corrente de flutuação de 0,1% de C(Ah) de forma a prevenir a ocorrência de auto descarga e evitar a redução da energia cinética dos eletrólitos, conforme ilustra a Figura 24.

4.1.2 Simulação de funcionamento do conversor DAB com ocorrência de perturbação no barramento c.c

Uma segunda simulação foi realizada considerando agora perturbações de potência no barramento c.c durante o processo de carga, levando o conversor DAB a funcionar como fonte durante o afundamento de tensão no barramento c.c ou como carregador enquanto a tensão do barramento permanecer entre 380 e 385Vcc.



Figura 25 – Simulação do carregamento da bateria. Curva de Tensão de carga.



Figura 26 – Simulação do carregamento da bateria. Curva de Corrente de carga.

O objetivo desta simulação é observar a atuação da malha de controle do carregador no caso do conversor fornecer energia ao barramento c.c durante o processo de carga. O controle deverá ser capaz de interromper o fornecimento de energia ao barramento caso a tensão crítica V_{off} seja atingida no banco de baterias além da capacidade de retomar o processo de carga levando em consideração a etapa adequada ao nível de tensão das baterias. O afundamento de tensão do barramento é simulado variando a tensão da fonte de 385Vcc para 375Vcc em curtos intervalos de tempo. Tais distúrbios serão simulados a partir da etapa de flutuação com tensão de 54,4V dos intervalos B ao C.

Inicialmente a tensão no barramento é um pouco superior a 380Vcc e o banco de baterias possui tensão de 35Vcc, tal valor é estipulado para melhor visualização grafica da etapa de carga lenta, a Figura 25 apresenta a tensão no banco de baterias durante todo o processo de carregamento. Observa-se que a partir do início do intervalo de tempo 6 o carregador encontra-se em etapa de flutuação. Até que a transição entre tensão de recondicionamento e tensão de flutuação seja alcançada nas baterias, a corrente de carga praticamente cessa tendo um pequeno acréscimo assim que a transição é concluída, conforme ilustrado a partir do intervalo de tempo A da etapa de flutuação. No intervalo de tempo B é simulado um afundamento de 385V para 375V no barramento c.c. Essa variação faz com que a malha de tensão A imponha a corrente de referência I_{refA} maior que I_{refB} , fazendo com que o DAB atue como fonte e o fluxo de energia seja do banco de baterias para o barramento c.c. Nesse momento, a tensão nos terminais da bateria começa a diminuir como demonstrado na Figura 25 e a corrente atinge o limite máximo de descarga permitido, conforme é demonstrado na Figura 26, no intervalo de tempo B. Quando a tensão crítica 42V é atingida nos acumuladores, o fornecimento de energia ao barramento c.c é interrompido. A descarga residual que ocorre após essa interrupção se dá por auto descarga.

Após o distúrbio, a tensão no barramento c.c é configurada ao valor inicial e o

conversor volta a atuar como carregador visto que a corrente de referência I_{refB} se torna maior do que a corrente I_{refA} . A interrupção do fornecimento de energia durante o processo de descarga preserva a tensão do banco de baterias em aproximadamente 42V. Nesse nível de tensão, a corrente de carga I_{load} se adequa aos parâmetros da etapa de carregamento em execução conforme ilustra a figura 26. A corrente de carga é injetada até que a tensão de flutuação seja alcançada no banco de baterias, figura 25. No intervalo de tempo C, ainda na etapa de flutuação, o barramento c.c é submetido a um novo distúrbio e o comportamento do conversor nesse intervalo é semelhante ao comportamento exibido no intervalo de tempo B, sendo demosntrada assim a estabilidade da malha de controle do conversor.

4.2 Conclusões parciais

Baterias são elementos capazes de converter energia química em energia elétrica. Alguns tipos suportam recarga e por meio de um processo de carga adequado, convertem energia elétrica em energia química potencial. As baterias do tipo chumbo ácido suportam recarga e foram escolhidas pois são as mais comumente utilizadas nas mais diversas aplicações devido à sua versatilidade e alta eficiência energética associadas ao baixo custo. No entanto, uma manutenção adequada é essencial para que as baterias forneçam o bom desempenho e vida características. O aprimoramento dos conversores, bem como dos métodos de carga são de extrema importância visto que a durabilidade dos acumuladores está diretamente relacionada à eficiência do processo de carga. O método de carregamento *multi step* é promissor pois nele há a possibilidade de personalizar o processo de carga de acordo com a necessidade específica de recarga da bateria. O controle foi desenvolvido utilizando um modelo de pequenos sinais e o banco de baterias foi modelado como um circuito RC pois o comportamento dinâmico do mesmo se assemelha ao de uma bateria.

5 Conclusões e Trabalhos Futuros

5.1 Conclusões

Inicialmente foi apresentada a definição de energia associado à influência da mesma no nosso dia a dia. Foi realizada uma análise do consumo energético no cenário atual, bem como uma projeção afim de estimar a demanda energética em um cenário futuro próximo. Estudos apontaram que caso não haja uma iniciativa de introdução de fontes renováveis de energia na matriz energética atual, em 2020 os combustíveis fósseis responderão por mais de 90% da demanda primária de energia no planeta. Com o intuido de mitigar essa tendência, alternativas de complementariedade energética vem sendo estudadas e implementadas como é o caso das nanorredes.

Nanorredes são sistemas de potência em pequena escala integrada a fontes renováveis de energia, um dos vários benefícios associados às nanorredes se deve ao fato de serem agregadas aos geradores distribuídos localizados próximo dos centros consumidores, dessa forma a perda de energia ao longo das linhas de transmissão é consideravelmente reduzida.

A nanorrede adotada no presente trabalho possui dois níveis de tensão 380 e 48Vcc, tais valores foram devidamente justificados, em seguida foi apresentado o conversor c.c – c.c bidirecional adotado, foi apresentada também a justificativa de escolha do mesmo além das especificações de vantagens e desvantagens do referido conversor.

A arquitetura do conversor DAB foi apresentada bem como o seu princípio de funcionamento, foi apresentado também o sinal de comando PWM, responsável por acionar as chaves semicondutoras do conversor. A modulação phase shift foi demonstrada em seguida com a explicação das seis etapas de funcionamento, foi salientado também a importância da existência do tempo morto em aplicações práticas, para que seja evitado o curto circuito nas pontes.

Em seguida foi exposto o princípio de funcionamento e as características de recarga das baterias do tipo chumbo ácido. Dados de performance e viabilidade foram exibidos justificando a popularidade da bateria. O custo de implantação e manutenção dos acumuladores foram expostos afim de evidenciar a necessidade de se desenvolver conversores mais eficientes. As reações químicas inerentes ao processo de carga e descarga da bateria tipo chumbo ácido foram explicadas com o propósito de que seja ampliada a capacidade de compreensão objetiva de todas as etapas do processo de recarga. Os métodos de recarga existentes foram enunciados com as respectivas análises de vantagens e desvantagens do método sendo empregado individualmente. A seguir foi exposta a proposta do método de recarga modelo em 8 etapas das quais 6 etapas seriam aproveitadas devido a adequação do método de carga às características operacionais da nanorrede. O método proposto combina vários métodos afim de alcançar maior eficiência de um processo de recarga em baterias do tipo chumbo ácido.

O método de controle responsável pelo controle de defasamento atribuída ao circuito de comando do conversor é desenvolvida, a metodologia adotada no presente trabalho com medidas de proteção e adequações ao sistema operacional da nanorrede é estruturada, o método de pequenos sinais utilizado é desenvolvido com base em dados obtidos em (SILVA, 2013), as variáveis de controle são desenvolvidas e explicitadas por meio de modelos matemáticos que irão determinar o controle operacional do conversor.

O modo de operação do método de recarga em 6 etapas desenvolvido no presente trabalho é apresentado, vindo posteriormente a simulação em duas situações distintas, a primeira situação se refere ao processo de carga na ausência de distúrbios no barramento c.c da nanorrede, o processo de carga ocorre completando todas as etapas pré-determinadas na etapa estrutural de controle do processo de carga em 6 etapas. A segunda simulação se desenvolve em um processo de carga com ocorrências de perturbações no barramento c.c durante a etapa de flutuação, o controle atuou conforme a especificação da estrutura de controle.

A eficiência do controle foi comprovada mediante simulação que resultou na reprodução eficaz da curva de carga proposta pela CTEK[®] conversores. A resposta gráfica obtida nas duas simulações permitiu verificar a precisão de operação do conversor. A arquitetura da malha de controle proporcionou agilidade e estabilidade nas transições bem como exatidão no regime permanente de cada etapa do processo. O ajuste fino realizado no PI e PD garantiu o bom funcionamento do conversor, visto que a operação satisfatória do mesmo está diretamente relacionada à correta regulagem desses parâmetros. Os saturadores empregados com limites compatíveis aos valores específicos de corrente de cada etapa permitiram o controle dos diversos níveis de corrente a serem injetados nas baterias ao decorrer do processo.

A perturbação no barramento c.c fez com que a corrente I_{Bref} se tornasse negativa, causando assim a inversão do fluxo de potência, a transição foi estável, vindo a corrente a alcançar o máximo valor de descarga permitido para a bateria.

A reestabilização do barramento c.c após o evento de perturbação retornou o processo de carga na etapa de flutuação, pois, o curto intervalo de perturbação associado a atuação dos dispositivos de proteção fez com que a tensão nas baterias se mantivesse proximo à tensão de corte V_{off} .

Com a simulação do conversor é possível constatar por meio dos resultados alcan-

çados a equiparação da dinâmica do processo de carga obtido à dinamica do processo de carga proposto, tendo em vista que parâmetros de tensão e corrente foram devidamente cumpridos ao decorrer do procedimento, em consonância com valores preestabelecidos de fábrica.

5.2 Trabalhos Futuros

Com base nos resultados obtidos neste trabalho, algumas propostas são sugeridas como possíveis trabalhos futuros.

- Desenvolver carregador de baterias utilizando o método de carregamento *multi-step* adequando-o de forma a promover um processo de carga eficaz em outros tipos de baterias.
- Desenvolver carregador com capacidade de monitoramento individual de bateria.
- Aprimorar a etapa de análise, utilizando dados como resistência interna e temperatura da bateria afim de traçar diagnósticos mais precisos dos acumuladores.

Referências

BRYAN, J.; DUKE, R.; ROUND, S. Decentralized generator scheduling in a nanogrid using dc bus signaling. In: *Power Engineering Society General Meeting*. [S.l.]: IEEE, 2004. v. 1.

CTEK. Battery Charger. [S.l.], 2006.

CVETKOVIC, I. Modeling, Analysis and Design of Renewable Energy Nanogrid Systems. Tese (Doutorado) — Virginia Polytechnic Institute and State University, 2010.

DAMASCENO, A. d. C. H. Controle Preditivo de corrente aplicado a um controlador de carga de. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Juiz de Fora, 2008.

DAVID, B. T. L. Types and characteristics of secondary batteries. In: *Handbook of batteries*. [S.l.: s.n.], 2001.

FRED, C. L.; BOROYEVICH, D.; MATTAVELLI PAOLO, K. N. Proposal for a Mini Consortium on Sustainable Buildings and Nanogrids. [S.l.], 2010.

FREITAS, D. C. C. et al. Battery charger lead-acid using ic bq2031. *IEEE Latin America Transactions*, v. 14, 1 2016.

HUANG JEN CHIU, M. I. et al. A novel rapid charger for lead-acid batteries with energy recovery. *IEEE transactions on power eletronics*, v. 21, 5 2006.

LAZZARIN, T. B. Estudo e implementação de um carregador de baterias com uma tecnica de avaliação de sua vida útil. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.

MOO, C. S.; HSIEH, Y. C.; TSAI, I. Charge equalization for series-connected batteries. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, IEEE, v. 39, n. 2, p. 704–710, 2003.

ORNELLAS, A. J. A Energia dos tempos antigos aos dias atuais. 2006.

RTA. Manual técnico baterias seladas estacionárias chumbo ácido reguladas por válvula (VRLA). [S.1.], 2005.

SANTOS, W. M. Estudo e Implementação do conversor TAB aplicado a sistemas renováveis solares fotovoltaicos. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2011.

SEGARAN, D.; HOLMES, D. G.; MCGRATH, B. P. Comparative analysis of single and three-phase dual active bridge bidirectional dc-dc converters. In: *Power Engineering Conference, 2008. AUPEC '08. Australasian Universities.* [S.l.: s.n.], 2008. p. 1–6.

SILVA, E. P. d. et al. Recursos energéticos, meio ambiente e desenvolvimento. MultiCiência: Revista Interdisciplinar dos Centros e Núcleos da Unicamp, 2003. SILVA, W. W. A. G. Estudo e implementação de um conversor bidirecional como interface na regulação de tensão em barramento cc e carregamento de baterias em um Sistema Nanorrede. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2013.

T.R.CROMPTON. Taper charging of lead-acid motive power batteries. In: *Battery* reference Book. [S.l.: s.n.], 2000.

XAVIER, R. M. J. Conversor c.c - c.c para central fotovoltaica com armazenamento de energia. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2016.

ZHONGCHENG, L.; TONG, Y. Renewable energy basing on smart grid. In: IEEE. Wireless Communications Networking and Mobile Computing (WiCOM), 2010 6th International Conference on. [S.l.], 2010. p. 1–4.