



**UNIVERSIDADE DA INTEGRAÇÃO INTERNACIONAL DA LUSOFONIA AFRO-
BRASILEIRA
INSTITUTO DE ENGENHARIA E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL
CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIAS**

MAISE NATALIA SOARES DA SILVA

**PROJETO DE UM CONVERSOR *DUAL ACTIVE BRIDGE* (DAB) APLICADO À
SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA**

ACARAPE - CE

2018

MAISE NATALIA SOARES DA SILVA

**PROJETO DE UM CONVERSOR *DUAL ACTIVE BRIDGE* (DAB) APLICADO À
SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia de
Energias da UNILAB como parte dos
requisitos para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia de Energias.

Orientador (a): Prof. Dr. Hermínio
Miguel de Oliveira Filho

ACARAPE – CE

2018

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira
Sistema de Bibliotecas da UNILAB
Catalogação de Publicação na Fonte.

Silva, Maise Natalia Soares da.

S578p

Projeto de um conversor dual active bridge DAB aplicado à sistemas de armazenamento de energia / Maise Natalia Soares da Silva. - Redenção, 2018.

49 f: il.

Trabalho de Conclusão de Curso - Curso de Engenharia de Energias, Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção, 2018.

Orientador: Prof. Dr. Hermínio Miguel de Oliveira Filho.

1. Conversores. 2. Conversores bidirecionais. 3. Conversor DAB. 4. Energia - Armazenamento. I. Filho, Hermínio Miguel de Oliveira. II. Título.

CE/UF/Biblioteca Setorial dos Palmares

CDD 621.313

MAISE NATALIA SOARES DA SILVA

**PROJETO DE UM CONVERSOR DUAL ACTIVE BRIDGE (DAB) APLICADO
A SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia de Energias do Instituto de Engenharia e Desenvolvimento Sustentável da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, como requisito para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energias.

Aprovado em 11/07/2018.

BANCA EXAMINADORA

Herminio Miguel de O Filho

Prof. Dr. Herminio Miguel de Oliveira Filho

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)

Ranoyca Nayana Alencar Leão e Silva Aquino

Profa. Dra. Ranoyca Nayana Alencar Leão e Silva Aquino

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)

Gustavo Alves de Lima Henn

Prof. Dr. Gustavo Alves de Lima Henn

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)

Então, que seja doce. Repito todas as manhãs, ao abrir as janelas para deixar entrar o sol ou o cinza dos dias, bem assim, que seja doce. Quando há sol, e esse sol bate na minha cara amassada do sono ou da insônia, contemplando as partículas de poeira soltas no ar, feito um pequeno universo; repito sete vezes para dar sorte: que seja doce que seja doce que seja doce e assim por diante.

Caio F. Abreu

AGRADECIMENTOS

A Deus, todos os santos, orixás, ancestrais, bons espíritos, a toda fé que habita em mim, por ter me dado força para superar os desafios.

Aos meus pais, Antonio Nascimento da Silva e Maria do Carmo Soares da Silva pelo amor, incentivo, apoio incondicional, por acreditar em mim e com isso me fazerem acreditar que eu posso sempre mais.

Agradeço aos meus irmãos, Maria de Paula Soares da Silva e Antonio Henrique de Oliveira Silva pelo companheirismo, pelos bons conselhos e pelo bom exemplo.

Aos técnicos, corpo docente, coordenação e direção do Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável –IEDS pela troca de conhecimento e afetividade envolvidos no meu processo de formação acadêmica.

Ao meu orientador Prof. Dr. Hermínio Miguel de Oliveira Filho, pela oportunidade, pela confiança, pelo suporte e empenho dedicados à elaboração deste trabalho.

A todos aqueles envolvidos no dia a dia da Universidade, em especial ao Técnico em Assuntos Educacionais Fábio Paulino de Oliveira pela amizade, pela gentileza, pelo bom trabalho, pela vontade de ajudar e por fazer a diferença no serviço público desta Universidade.

Aos meus amigos Felipe Araújo, Valdécio Rodrigues, André Luiz, Caio Kerson, Lucas Alves, Isaquiel Ramos, Jeferson Justa, Isabela de Oliveira, Felizberto Bedana, Charles Alves, Bernalize do Rosário, Hiliene Carvalho, Wyara Maria, Cláudio Adriano, Carla Patrícia, Leila Delgado, companheiros e companheiras de insônia, irmãos e irmãs na amizade que compartilharam seus conhecimentos, suas dúvidas e que fizeram a caminhada acadêmica mais leve. Em especial aos colegas Rayane Paula do Nascimento, Caio Kerson e Gilmar Nunes pela imensa ajuda e incentivo na construção deste trabalho.

Aos meus “primos” Angerline de Lima, Assis Anderson e Pereira Panzo, por estar sempre na torcida, mesmo quando a distância é grande: O Atlântico não pode conosco!

Ao Clã Oliveira Moura, Geysa Moura, Fábio de Oliveira, Márcia Regina, Leandro Araújo, Thais Bernardo, Carla Brasil e Dimas Teixeira pela acolhida, por abrir as portas e o coração, por compartilhar madrugadas e por pedir sempre a cerveja mais gelada.

A churrascaria O Gatinha por parar de servir galetto e linguiça toscana, por fazer a melhor ova de peixe e a melhor tilápia na brasa da região, por ser bem frequentado e por vender cerveja de qualidade.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigada.

RESUMO

Este trabalho propõe o desenvolvimento e projeto de um conversor CC/CC bidirecional para realizar a interface entre redes de distribuição CC e sistemas de armazenamento de energia. A topologia escolhida para a aplicação supracitada é o conversor *Dual Active Bridge* – DAB e o mesmo é formado por duas pontes H interligadas através de um transformador de alta frequência, que confere isolamento elétrico ao circuito. Através de equacionamentos disponíveis na literatura é possível calcular os elementos constitutivos do conversor: o capacitor de acoplamento, o capacitor de carga e a indutância de transferência de energia do conversor. Considerando-se uma tensão de entrada e tensão de saída iguais a 380V e 48V, respectivamente, ciclo de trabalho de 50%, potência nominal de projeto 1440W, frequência de chaveamento igual a 20kHz e uma carga de saída formada por um conjunto de 4 baterias ligadas em série, cada uma com tensão igual a 12V, capacidade de carga de 150Ah cada e profundidade de descarga igual a 20% é realizado o projeto do conversor adotando-se valores e componentes comerciais. Resultados de simulação para o DAB projetado operando em condições nominais, além da curva de potência do mesmo, são discutidos e apresentados.

Palavras - chave: Modelagem, Conversores bidirecionais, Baterias, *Dual Active Bridge*.

ABSTRACT

This work proposes the development and design of a bidirectional DC / DC converter to realize the interface between DC distribution networks and energy storage systems. The topology chosen for the aforementioned application is the Dual Active Bridge - DAB converter and it is formed by two H bridges interconnected through a high frequency transformer, which confers electrical insulation to the circuit. By means of equations available in the literature it is possible to calculate the constituent elements of the converter: the coupling capacitor, the load capacitor and the energy transfer inductance of the converter. Considering an input voltage and output voltage equal to 380V and 48V, respectively, 50% duty cycle, 1440W design rated power, 20kHz switching frequency, and an output load consisting of a set of 4 batteries connected in series, each with voltage equal to 12V, load capacity of 150Ah each and depth of discharge equal to 20% is realized the design of the converter adopting values and commercial components. Simulation results for the DAB projected operating at nominal conditions, besides the power curve of the same, are discussed and presented.

Key words: Modelling. Bi-directional converters. Batteries. Dual Active Bridge.

LISTA DE SÍMBOLOS

SÍMBOLO	DESCRIÇÃO	UNIDADE
N	Razão de transformação	-
C_a	Capacitor de acoplamento	Faraday (F)
C_b	Capacitor de carga	Faraday (F)
$D_{1,2,3,4,5,6,7,8}$	Diodos semicondutores 1,2,3,4,5,6,7,8, respectivamente	-
f_o	Frequência de ressonância	Hertz (Hz)
f_r	Frequência relativa	Hertz (Hz)
f_s	Frequência de comutação	Hertz (Hz)
$i_L(0)$	Valor da corrente na indutância no instante $\omega t = 0$	Ampère (A)
$i_L(\phi)$	Valor da corrente na indutância no instante $\omega t = \phi$	Ampère (A)
$i_L(\pi)$	Valor da corrente na indutância no instante $\omega t = \pi$	Ampère (A)
L	Indutância total	Henry (H)
R	Resistência de carga	Ohm (Ω)
$S_{1,2,3,4,5,6,7,8}$	Chaves semicondutoras 1,2,3,4,5,6,7,8	-
T_s	Período de comutação	segundo (s)
ω	Frequência ou velocidade angular	radiano por segundo (rad/s)
ϕ	Ângulo de defasagem	radiano por segundo (rad/s)

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Circuito básico de um conversor Buck	14
Figura 2.2 - Circuito básico de um conversor Boost	14
Figura 2.3 - Circuito básico de um conversor Buck-Boost	15
Figura 2.4 – Conversor <i>Boost</i> bidirecional em corente	16
Figura 2.5 - Circuito básico de um conversor Flyback	17
Figura 2.6 - Circuito básico de um conversor <i>Forward</i>	18
Figura 2.7 - Circuito básico de um conversor <i>Push-Pull</i>	19
Figura 2.8 - Circuito básico de um conversor meia ponte	19
Figura 2.9 - Circuito básico de um conversor <i>Full Bridge</i> (Ponte completa).....	20
Figura 2.10 - Circuito básico de um conversor Dual Active Bridge (DAB)	21
Figura 2.10 – Possibilidade de ciclos de carga em função da profundidade de descarga da bateria Moura Clean.	22
Figura 2.11 - Possibilidade de ciclos de carga em função da profundidade de descarga da bateria Moura Clean Max.....	22
Figura 3.1 – Conversor Dual Active Bridge	24
Figura 3.2 – Sinais de controle do modulador para as chaves das pontes H	25
Figura 3.3 – Defasagem entre as tensões de entrada e saída – Fluxo de potência de A para B.....	25
Figura 3.4 – Formas de onda das correntes i_{i_avg} , i_{o_avg} e I_L – fluxo de potência de A para B.....	26
Figura 3.5 – Curva de potência em função do ângulo de defasagem ϕ	28
Figura 3.6 – Etapas de operação do DAB em <i>phase-shift</i> . Etapa 1 (a) e (b), Etapa 2 (c), Etapa 3 (d) e (e) Etapa 4 (f).....	28
Figura 4.1 – Circuito do conversor <i>dual active bridge</i>	34
Figura 4.2 – Circuito de chaveamento das pontes H.....	34
Figura 4.3 – Corrente de entrada e de corrente de saída de projeto	35
Figura 4.4 – Curvas de tensão no transformador com e corrente no indutor com <i>phase shift</i> de 45°.....	36
Figura 4.5 – Tensão de saída na carga.....	36

Figura 4.6 – Gráfico da transferência de potência do conversor em função do ângulo de defasagem φ 37

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1- Parâmetros de projeto do conversor DAB	29
Tabela 3.2 – Dados do conversor DAB utilizados nas simulações	30
Tabela 3.3 – Dados de projeto dos diodos e chaves semicondutoras	32
Tabela 3.4 – Especificação geral dos componentes.....	33
Tabela 4.1 – Correntes média e eficaz de entrada e saída e potência do circuito.....	35
Tabela A.1 – Especificações do fio AWG 21	43
Tabela A.1 – Especificações do fio AWG 21	45

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL	11
1.1	Problema e motivação do estudo	11
1.2	Objetivos	12
1.2.1	<i>Objetivo geral</i>	<i>12</i>
1.2.2	<i>Objetivos específicos</i>	<i>12</i>
1.3	Estrutura do texto	12
2	CONVERSORES CC-CC E ARMAZENADORES DE ENERGIA.....	13
2.1	Conversores CC-CC não isolados	13
2.1.1	<i>Conversor abaixador de tensão (Buck)</i>	<i>13</i>
2.1.2	<i>Conversor elevador de tensão (Boost)</i>	<i>14</i>
2.1.3	<i>Conversor abaixador – elevador de tensão (Buck-Boost).....</i>	<i>15</i>
2.1.4	<i>Conversor Boost bidirecional em corrente.....</i>	<i>15</i>
2.2	Conversores CC-CC isolados.....	16
2.2.1	<i>Conversor Flyback.....</i>	<i>16</i>
2.2.2	<i>Conversor Forward</i>	<i>17</i>
2.2.3	<i>Conversor Push Pull.....</i>	<i>18</i>
2.2.4	<i>Conversor meia ponte (Half Bridge)</i>	<i>19</i>
2.2.5	<i>Conversor ponte completa (Full Bridge).....</i>	<i>20</i>
2.2.6	<i>Conversor bidirecional Dual Active Bridge (DAB).....</i>	<i>20</i>
2.3	Armazenadores de Energia.....	21
2.3.1	<i>Baterias.....</i>	<i>21</i>
2.4	Considerações Finais	23
3	PROJETO DO CONVERSOR DAB	24
3.1	Modelo do Conversor DAB.....	24
3.2	Modulação <i>phase - shift</i>	27
3.3	Projeto do Conversor DAB	29
3.3.1	<i>Cálculo da Indutância Total e especificação dos capacitores de acoplamento e de carga</i>	<i>30</i>
3.3.2	<i>Cálculo dos esforços e especificações das chaves semicondutoras</i>	<i>31</i>
3.3.3	<i>Cálculo da resistência de carga</i>	<i>32</i>
3.4	Considerações Finais	32
4	SIMULAÇÃO	34
4.1	Simulação do conversor DAB	34
4.1.1	<i>Curva de potência do conversor em função de ϕ.....</i>	<i>37</i>
4.1	Considerações finais	37
5	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS.....	38
5.1	Conclusão final.....	38
5.2	Trabalhos futuros	39
	REFERÊNCIAS	40
	APÊNDICES.....	42
	APÊNDICE A – Projeto do Transformador.....	42
	APÊNDICE B – Projeto do Indutor	44

1 INTRODUÇÃO GERAL

1.1 Problema e motivação do estudo

O desenvolvimento econômico de um país está intimamente relacionado a sua capacidade de geração e ao consumo de energia elétrica. Tradicionalmente a geração de energia elétrica se dá de forma concentrada, em grandes empreendimentos, afastada do centro de consumo. Este distanciamento entre o local de geração e o local de consumo acarreta em perdas de transmissão indesejadas para o sistema elétrico.

Diante desta problemática, surge o conceito de geração distribuída que no Brasil é definida pelo Artigo 14º do Decreto de Lei n º 5163/2004:

Considera-se geração distribuída toda produção de energia elétrica proveniente de agentes concessionários, permissionários ou autorizados [...] conectados diretamente no sistema elétrico de distribuição do comprador, exceto aquela proveniente de: hidrelétrico com capacidade instalada superior a 30 MW; termelétrico, inclusive de cogeração, com eficiência energética inferior a 75%.

Fontes de energia renováveis têm ganhado ainda mais espaço com o advento do conceito de geração distribuída, sobretudo a energia solar fotovoltaica, quem dentre as renováveis teve o maior crescimento percentual. De acordo com o Balanço Energético Nacional 2017– (BEM, 2017) (Ano base 2016) a capacidade instalada de energia solar fotovoltaica na geração distribuída, cresceu de 13,3 MW em 2015 para 56,9 MW em 2016, o que representa um aumento de aproximadamente 428% em apenas um ano.

Os painéis fotovoltaicos ao serem instalados, por exemplo, na cobertura de residências e comércios, transformam o consumidor em agente gerador. Essa nova modalidade de geração torna necessário o uso de conversores, que tem por finalidade adequar a amplitude da tensão gerada nos painéis, e de armazenadores de energia, com os quais o excedente de energia produzida pode ser consumido posteriormente, quando as condições ambientais para geração não forem favoráveis ou quando houver falha na rede convencional.

Os conversores são compostos por dispositivos eletrônicos tais como chaves semicondutoras, capacitores, indutores e diodos, que tem por finalidade a transferência de potência entre a entrada e a saída do circuito com amplitude adequada. Conversores CC/CC bidirecionais permitem que tal fluxo ocorra em ambos os sentidos, desta forma o excedente de energia pode ser armazenado para posteriormente suprir uma carga.

Dentre os armazenadores de energia destacam-se as baterias que são dispositivos eletroquímicos capazes de acumular energia elétrica na forma de energia química. Quando uma

carga é ligada a seus terminais, corrente contínua é fornecida a carga devido a conversão de energia química em elétrica pela reação de oxirredução. Tal reação ocorre quando metais diferentes são colocados em contato com uma solução ácida, ocorrendo então a migração de elétrons de um metal para o outro. O número de vezes que esta reação ocorre bem como, o tempo de uso da bateria, determinam sua vida útil (CRESESB, 2014).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho consiste em projetar um conversor CC-CC bidirecional aplicado a sistemas de armazenamento de energia

1.2.2 Objetivos específicos

- Realizar revisão de literatura sobre conversores CC-CC básicos;
- Comparar as topologias e escolher o conversor mais adequado para sistemas de armazenamento de energia;
- Analisar as características do conversor escolhido;
- Projetar e simular o conversor escolhido.
- Comparar os dados obtidos através de ambiente de simulação com os dados da literatura

1.3 Estrutura do texto

Este trabalho está dividido em cinco capítulos. O capítulo inicial traz uma breve introdução sobre o assunto a ser tratado, bem como sua motivação e seus objetivos.

O segundo capítulo apresenta uma revisão de literatura sobre conversores CC-CC e sobre armazenadores de energia. Esta seção tem por finalidade fazer uma introdução às topologias básicas, bem como nortear a escolha da topologia a ser utilizada no projeto.

O capítulo três contempla o desenvolvimento do projeto do conversor escolhido, com os cálculos de seus componentes e os valores das grandezas definidas previamente.

O quarto capítulo apresenta os resultados de simulação do conversor projetado em forma de gráficos e tabelas.

A quinta e última parte do trabalho apresenta a conclusão geral e sugestões de trabalhos futuros.

2 CONVERSORES CC-CC E ARMAZENADORES DE ENERGIA

2.1 Conversores CC-CC não isolados

Os conversores CC-CC não isolados são sistemas compostos por semicondutores e elementos passivos, que controlam o fluxo de potência de uma fonte de entrada para uma carga na saída, sendo a potência fornecida na saída igual a potência de entrada.

O ganho estático dos conversores não isolados é representado matematicamente pela razão entre a tensão de saída e a tensão de entrada. Tal ganho representa se o conversor fornece potência com tensão superior ou inferior na saída, uma vez que pela lei de conservação de energia a potência de entrada deve ser a mesma que aquela verificada na saída.

Dentre as topologias básicas de conversores CC não isolados, destacam-se os conversores Buck ou abaixador, o conversor Boost ou elevador de tensão e o conversor Buck-Boost.

2.1.1 Conversor abaixador de tensão (Buck)

O conversor abaixador de tensão ou conversor Buck tem como princípio fornecer, na saída do conversor, um valor médio de tensão inferior a tensão média de entrada, enquanto o comportamento da corrente é o oposto, ou seja, a corrente média de saída maior que a corrente média de entrada, comportamento esse compatível com o princípio de conservação de energia. (HASHID, 2014)

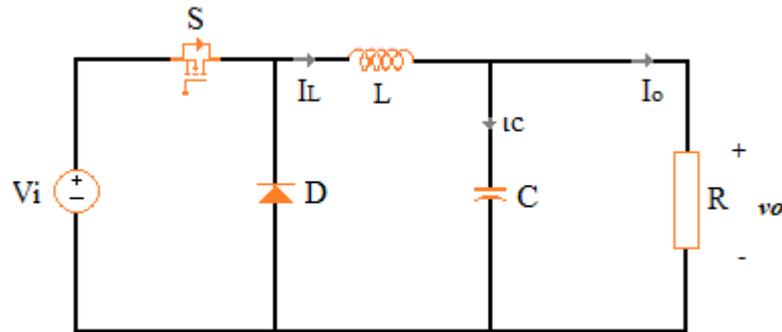
A tensão de saída do conversor é função da razão cíclica que representa o estado de comutação da chave S , ligada ou desligada. As relações entre a tensão de entrada V_i e tensão de saída v_o em função da razão cíclica D é demonstrada nas equações (2.1) e (2.2).

$$v_o = V_i \cdot D \quad (2.1)$$

$$D = \frac{t_{ligado}}{t_{ligado} + t_{desligado}} = \frac{t_{ligado}}{T} \quad (2.2)$$

O funcionamento do conversor Buck se dá em duas etapas. Na primeira etapa, com a chave S fechada, há transferência de energia direta entre a fonte de entrada V_i e a tensão de saída a qual está submetido a carga R , ao mesmo tempo que a indutância L é magnetizada. Na segunda etapa a chave é aberta, o diodo D passa a conduzir e a energia fornecida a saída é agora proveniente da desmagnetização do indutor. A Figura 2.1 representa o circuito básico de um conversor CC-CC do tipo Buck.

Figura 2.1- Circuito básico de um conversor Buck



Fonte: Adaptado de (HART, 2012)

2.1.2 Conversor elevador de tensão (Boost)

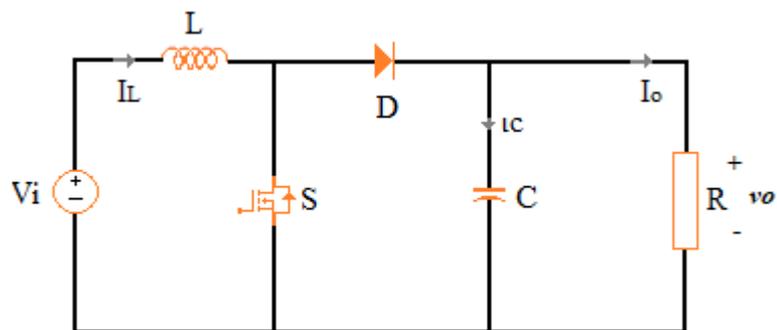
O conversor Boost ou elevador de tensão, como o nome sugere, tem como característica o fornecimento de tensão média na saída de valor superior ao valor médio de entrada. É constituído por elementos semelhantes ao conversor Buck, porém dispostos de maneira distinta, conforme representado na Figura 2.2.

O valor da tensão de saída v_o no conversor é função da tensão de entrada V_i e da razão cíclica D , conforme a equação (2.3).

$$v_o = \frac{V_i}{1 - D} \quad (2.3)$$

Seu funcionamento é também dividido em duas etapas. Na primeira etapa a chave S está conduzindo e, portanto, o indutor L é magnetizado, enquanto a carga R é alimentada pelo capacitor C . Na segunda etapa, iniciada com a abertura da chave, o diodo D entra em condução e a carga é alimentada pela desmagnetização da indutância e pela fonte de alimentação V_i .

Figura 2.2 - Circuito básico de um conversor Boost



Fonte: Adaptado de (HART, 2012)

2.1.3 Conversor abaixador – elevador de tensão (Buck-Boost)

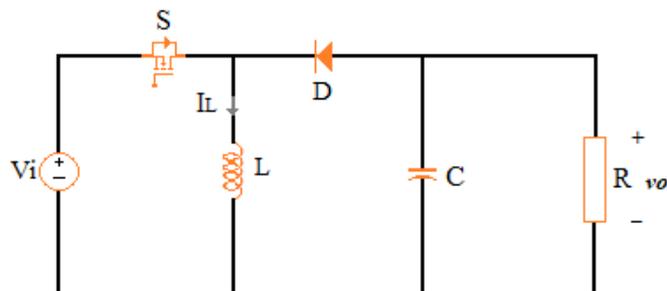
O conversor Buck-Boost, representado na Figura 2.3, é utilizado quando a entrada e a saída do conversor são elementos de mesma natureza e se quer controlar o fluxo de energia entre elas. Duas fontes de tensão de mesma natureza não são capazes de fornecer energia uma para a outra, logo, neste conversor um indutor é utilizado como componente armazenador de energia. (BARBI, 2011)

Na primeira etapa de funcionamento, com S em condução, ocorre a transferência de energia da fonte para o indutor L , o diodo D não conduz e a carga R é alimentada pelo capacitor C . A segunda etapa, iniciada quando S é desligado, a energia armazenada no indutor é entregue a carga e ao capacitor, uma vez que o diodo está agora conduzindo.

O conversor Buck-Boost caracteriza-se por fornecer na saída uma tensão com polaridade oposta à de entrada e a amplitude desta tensão depende da razão cíclica D da chave S . Na equação (2.4) é possível verificar que para valores de $D > 0,5$ a tensão de saída v_o é superior a tensão de entrada e para valores de $D < 0,5$ a tensão de saída assume valores inferiores a tensão de entrada.

$$v_o = -V_i \left(\frac{D}{1-D} \right) \quad (2.4)$$

Figura 2.3 - Circuito básico de um conversor Buck-Boost



Fonte: Adaptado de (HART, 2012)

2.1.4 Conversor Boost bidirecional em corrente

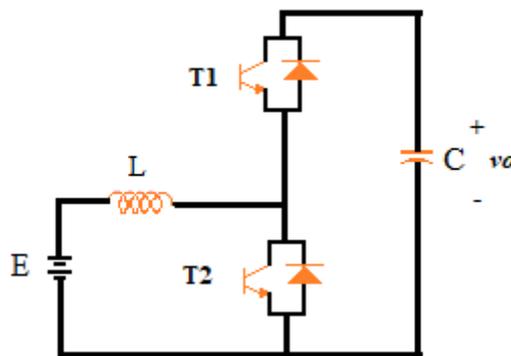
No conversor *Boost* bidirecional em corrente da Figura 2.4, o acionamento da chave $T1$ ocorre em complementariedade com $T2$, a relação de tensão de entrada e tensão de saída pode ser definida por meio da razão cíclica D , como demonstrado em (2.5):

$$V_i = \frac{v_o}{1-D} \quad (2.5)$$

Para que se altere o sentido da corrente, e com isso o fluxo de energia é necessária a mudança transitória da razão cíclica. O fluxo de corrente de E para v , corrente circulando por $T2$ e $D1$, o conversor está operando com corrente de entrada positiva.

A variação da largura de pulso em $T2$ acarreta um desequilíbrio na tensão média do indutor L . Se a razão cíclica for diminuída, a corrente também reduz e a depender do tempo que ocorre esta variação, ocorre a inversão de corrente. Na inversão de corrente, sentido negativo, há uma troca na condução e agora a corrente irá circular por $T1$ e $D2$.

Figura 2.4 – Conversor *Boost* bidirecional em corrente



Fonte: Adaptado de (POMILIO)

2.2 Conversores CC-CC isolados

Os conversores CC-CC isolados diferem dos não isolados por não apresentarem ligação elétrica entre entrada e saída. A conexão elétrica se configura como desvantagem, uma vez que ao aterrar a entrada, a saída também estará aterrada (HART, 2010).

O isolamento elétrico é realizado através de um transformador, com isolamento galvânico, de alta frequência. Esta característica do transformador resulta num equipamento de pequeno porte e, portanto, menor custo que os de baixa frequência. As topologias de conversores isolados têm como principais vantagens o elevado ganho de tensão entre primário e secundário do transformador, robustez, isolação galvânica, e no caso de algumas topologias bidirecionalidade. Conversores bidirecionais são aqueles que permitem o fluxo de potência em dois sentidos.

2.2.1 Conversor Flyback

O conversor Flyback, mostrado na Figura 2.5, é semelhante ao conversor Buck-Boost, no qual a indutância é substituída por um transformador que tem por função acumular energia

através de sua indutância de magnetização, obter tensão de saída no nível desejado e isolar primário e secundário não permitindo fluxo de energia pelo primário e pelo secundário simultaneamente.

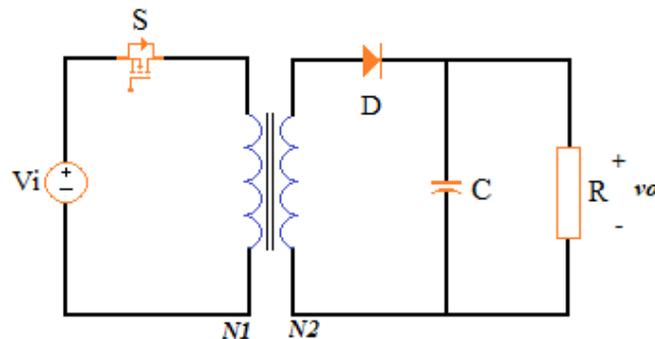
Na primeira etapa de funcionamento, com a chave S fechada, a fonte de tensão V_i fornece energia de magnetização para o enrolamento do primário do transformador, o diodo D está polarizado reversamente, uma vez que a tensão induzida no secundário tem sinal negativo. Na segunda etapa, para o modo de condução contínua, iniciada com a abertura da chave, a tensão do secundário é positiva e, portanto, o diodo está polarizado diretamente, permitindo o fluxo de energia armazenada no enrolamento do transformador para a carga R .

Para o modo de condução descontínua, quando a chave S é aberta a corrente armazenada no indutor cai até zero antes do início do ciclo de chaveamento seguinte. Assim se o conversor opera em modo contínuo a tensão de saída é dada pela equação (2.6) enquanto, no modo descontínuo a tensão de saída é dada pela equação (2.7).

$$v_o = V_i \left(\frac{D}{1-D} \right) \left(\frac{N_2}{N_1} \right) \quad (2.6)$$

$$v_o = V_i D \sqrt{\frac{T \cdot R}{2L}} \quad (2.7)$$

Figura 2.5 - Circuito básico de um conversor Flyback



Fonte: Adaptado de (HART, 2012)

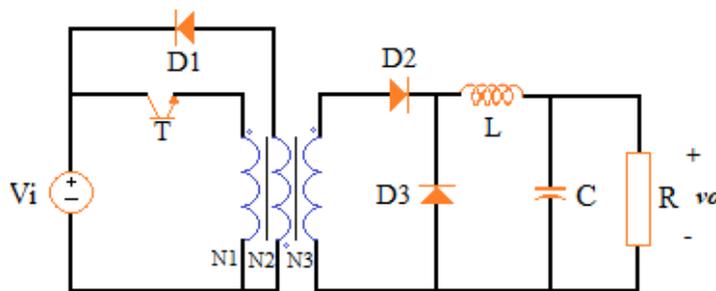
2.2.2 Conversor Forward

O conversor Forward da Figura 2.6, derivado do conversor Buck, tem isolamento galvânico através de um transformador com derivação central no primário. Apresenta duas etapas de funcionamento. Um referente ao momento em que a chave T está conduzindo e outra etapa referente ao momento em que a chave está bloqueada.

Na primeira etapa, a fonte do primário fornece energia à carga através do transformador. Já na segunda etapa, com os diodos D_1 e D_3 polarizados diretamente, o transformador é desmagnetizado através de D_3 e a carga é alimentada através da energia acumulada na indutância L . No conversor Forward, a tensão de saída é demonstrado na equação (2.8).

$$v_o = V_s \cdot D \left(\frac{N_2}{N_1} \right) \quad (2.8)$$

Figura 2.6 - Circuito básico de um conversor *Forward*



Fonte: Adaptado de (HART, 2012)

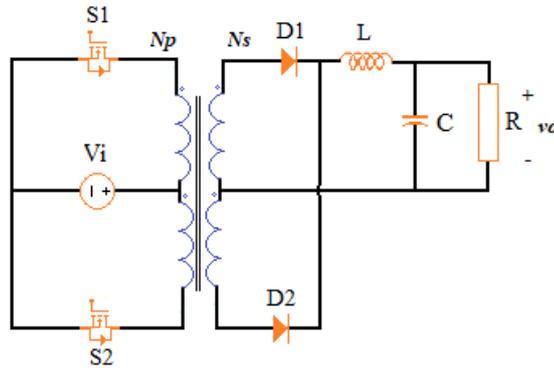
2.2.3 Conversor Push Pull

O conversor *Push-Pull*, mostrado na Figura 2.7, é derivado do conversor *Forward*. Consiste num arranjo de dois conversores *Forward's* ligados em contra fase, ou seja, quando a chave S_1 é ligada a tensão de entrada V_i aparece sobre metade do enrolamento do transformador. Por outro lado, quando S_2 é ligada $-V_i$ é aplicada na outra metade do enrolamento do primário. As chaves operam com ciclo de trabalho de 50%.

Em circuito aberto, as chaves estão submetidas a uma tensão igual ao dobro da tensão de entrada V_i , logo este conversor é ideal para aplicações de baixa potência. A tensão de saída do indutor Push-Pull é demonstrada na equação (2.9).

$$v_o = 2V_i \left(\frac{N_s}{N_p} \right) D \quad (2.9)$$

Figura 2.7 - Circuito básico de um conversor *Push-Pull*



Fonte: Adaptado de (HART, 2012)

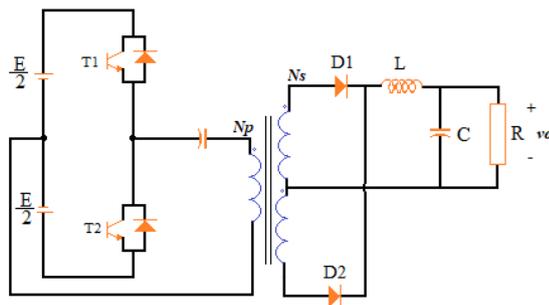
2.2.4 *Conversor meia ponte (Half Bridge)*

O conversor Half Bridge, da Figura 2.8, também é considerado uma derivação do conversor Forward, consistindo em um arranjo de dois conversores conectados *back-to-back*, alimentados pela mesma tensão de alimentação. Cada conversor transfere potência a carga por metade do ciclo. Logo, a tensão na carga é controlada pela razão cíclica, o tempo de condução das chaves. (HASHID, 2014)

O funcionamento deste conversor é dividido em quatro etapas: S_1 ligada e S_2 desligada; S_1 e S_2 desligadas; S_1 desligada e S_2 ligada; e S_1 e S_2 ambas desligadas. Estas etapas fazem surgir uma onda quadrada alternada, no primário do transformador, que é abaixada ou elevada, de acordo com a relação de espiras do transformador, retificadas pelos diodos D_1 e D_2 e por fim filtrada para ser entregue a carga. A tensão de saída do conversor meia ponte é metade da tensão de saída do conversor *Push-Pull*, ficando como mostra a equação (2.10)

$$v_o = V_i \left(\frac{N_s}{N_p} \right) D \tag{2.10}$$

Figura 2.8 - Circuito básico de um conversor meia ponte



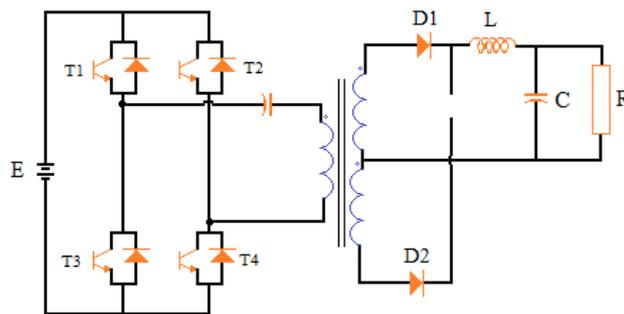
Fonte: Adaptado de (HART, 2012)

2.2.5 Conversor ponte completa (Full Bridge)

O conversor Full Bridge é constituído por uma ponte H, conforme mostrado na Figura 2.9, no primário do transformador, formada por quatro chaves e potência. É mais complexa e mais onerosa que a Half Bridge, em contrapartida é indicado para aplicações de alta potência, aproveita melhor as chaves semicondutoras e tem maior eficiência que o anterior.

Seu funcionamento está dividido também em quatro etapas: S_1 e S_4 conduzindo, enquanto S_2 e S_3 estão abertas; todas as chaves desligadas; S_1 e S_4 em corte, enquanto S_2 e S_3 estão em condução; e novamente todas as chaves desligadas. A onda quadrada alternada formada por estas etapas é elevada ou abaixada, retificada e filtrada, para então ser entregue a carga. A tensão de saída desta topologia é semelhante àquela encontrada na equação (2.9).

Figura 2.9 - Circuito básico de um conversor *Full Bridge* (Ponte completa)



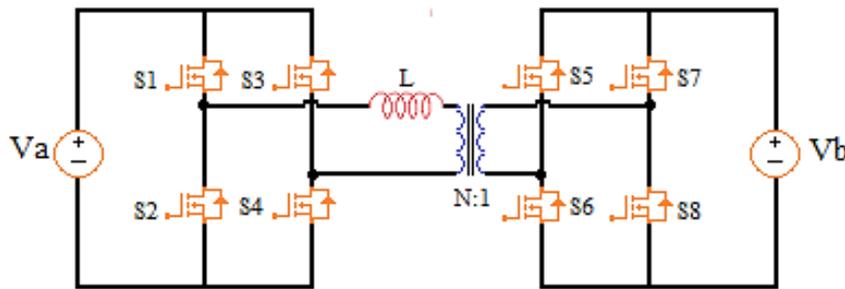
Fonte: Adaptado de (HART, 2012)

2.2.6 Conversor bidirecional Dual Active Bridge (DAB)

O conversor Dual Active Bridge, mostrado na Figura 2.10, é um conversor CC-CC isolado bidirecional constituído por duas pontes H interligadas por um transformador de alta frequência, através do qual ocorre a transferência de potência nos dois sentidos, de acordo com as necessidades do sistema. O controle do chaveamento é realizado através da razão cíclica constante de 0,5 o que permite gerar uma onda quadrada de alta frequência.

O fluxo de potência é controlado utilizando-se a técnica de *phase-shift*, que consiste no controle do defasamento entre as ondas quadradas. A energia é transferida do lado no qual a onda está adiantada para o lado no qual a onda está atrasada.

Figura 2.10 - Circuito básico de um conversor Dual Active Bridge (DAB)



Fonte: Adaptado de (SANTOS, 2011)

2.3 Armazenadores de Energia

Redes CC baseadas em fontes de energia renovável sofrem com a intermitência deste tipo de fonte. Questões ambientais e climáticas fazem variar a quantidade de energia disponível, logo são necessários dispositivos que garantam um fornecimento estável e confiável as cargas conectadas ao barramento destas redes, daí a importância do uso de sistemas de armazenamento de energia.

Dentre os equipamentos utilizados para armazenar energia, destacam-se as baterias devido sua tecnologia consolidada e pela relação custo benefício. Ao armazenar energia elétrica na forma de energia química, certos parâmetros devem ser respeitados e observados com a finalidade de prolongar sua vida útil. Grandezas tais como tensão e corrente de carga, capacidade da bateria e profundidade de carga, definem qual bateria deve ser utilizada para suprir uma dada carga. (COELHO, 2001)

2.3.1 Baterias

Baterias tem por finalidade armazenar energia e disponibilizá-la de forma gradual e controlada de acordo com as necessidades da carga. Entretanto, a capacidade de armazenamento de energia não pode ser confundida com a capacidade de suprir a demanda da carga.

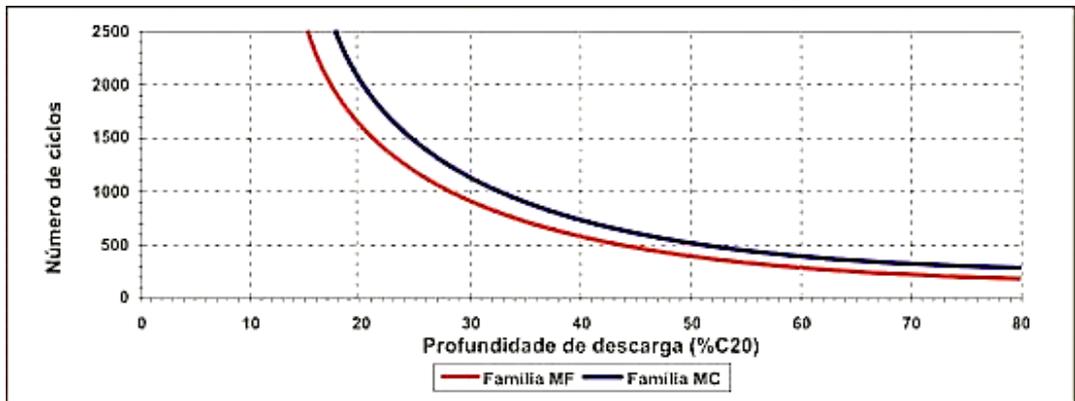
A capacidade de armazenamento de uma bateria relaciona corrente e tempo, sendo expressa em Ampere-hora (Ah). A capacidade de suprir a demanda da carga refere-se a quantidade de corrente que será fornecida a carga de forma constante ao longo do tempo e tal capacidade é variável. Assim, uma bateria com capacidade de armazenamento de 1Ah é capaz de fornecer 1 Ampere durante uma hora, 0,5 Ampere durante duas horas ou 0,2 Ampere durante cinco horas.

Baterias recarregáveis tem a capacidade de suprir energia por repetidas vezes, porém estes ciclos de carga e descarga acabam por causar o desgaste desse equipamento. Para que este

problema seja reduzido o ideal é fornecer apenas uma parte da energia armazenada, prolongando assim a vida útil da bateria. O fornecimento parcial desta energia chama-se profundidade de descarga. (BASTOS, 2013)

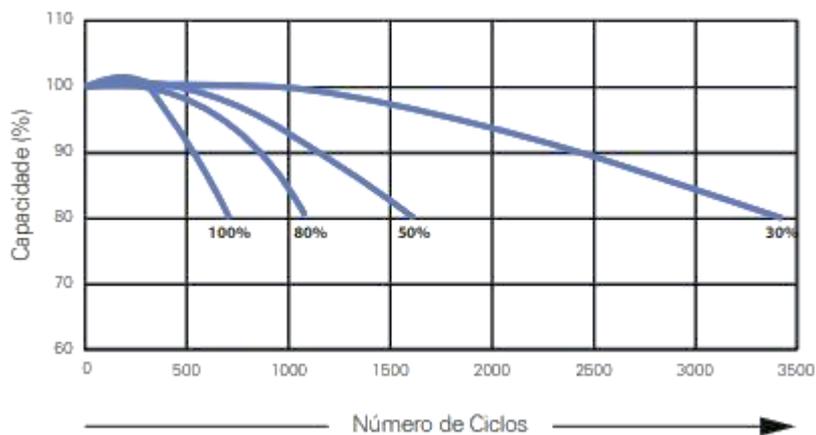
Encontra-se no mercado baterias projetadas para 2000 ciclos de carga operando a uma profundidade de descarga de 20%, conforme mostrado na Figura 2.10. Podem ainda ser encontradas baterias aplicadas aos sistemas de energia renovável com mais de 3000 ciclos de carga, para uma profundidade de descarga de 25% a 30%, conforme observado na Figura 2.11.

Figura 2.10 – Possibilidade de ciclos de carga em função da profundidade de descarga da bateria Moura Clean.



Fonte: Moura (2001)

Figura 2.11 - Possibilidade de ciclos de carga em função da profundidade de descarga da bateria Moura Clean Max



Fonte: Moura (2010 ?)

2.4 Considerações Finais

Dentre as diversas topologias básicas de conversores não isolados e isolados apresentadas, para a aplicação pretendida, deve-se escolher aquela que reúne as melhores características para utilização num sistema de armazenamento de energia.

Uma vez que o sistema proposto será monofásico e que futuramente pode ser utilizado para o carregamento de baterias, optou-se por escolher um conversor isolado bidirecional.

Entre as topologias previamente apresentadas, o DAB configura-se como uma opção viável devido seu funcionamento em modo *buck-boost*, o isolamento galvânico do transformador e a transferência bidirecional de energia. Neste sentido, este trabalho propõe-se a modelar e simular o conversor DAB a ser aplicado em um sistema de armazenamento de energia.

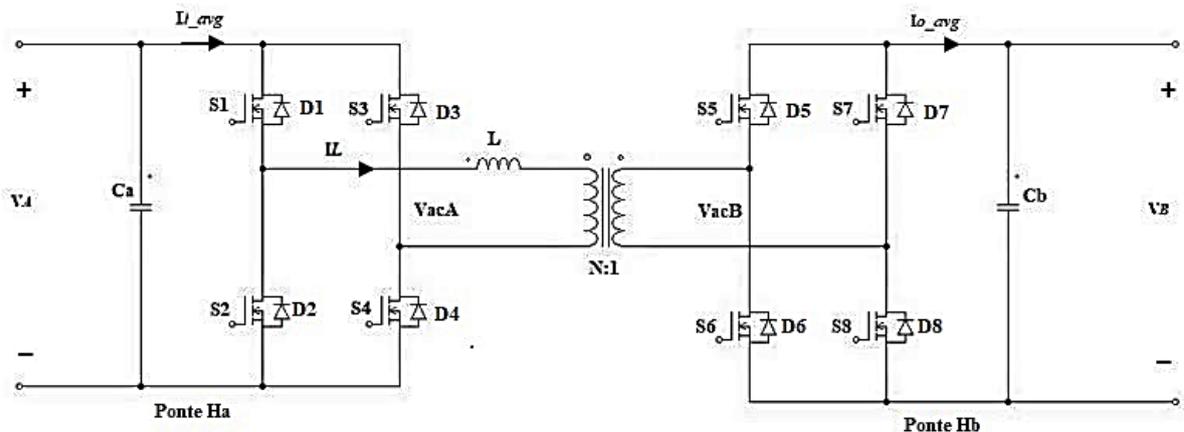
Considerando o recomendado por fabricantes em razão do prolongamento da vida útil da bateria, neste trabalho será considerada uma profundidade de descarga de 20% para um conjunto de 4 baterias de 12 V cada em série, totalizando 48V, com capacidade total de 150Ah.

3 PROJETO DO CONVERSOR DAB

3.1 Modelo do Conversor DAB

O conversor DAB, observado na Figura 3.1, é constituído por duas pontes H interligadas por meio de um transformador operando em elevada frequência. Cada ponte H é composta por quatro chaves semicondutoras acionadas em diagonal que entram em condução por 50% do tempo do ciclo de trabalho, cada par.

Figura 3.1 – Conversor Dual Active Bridge

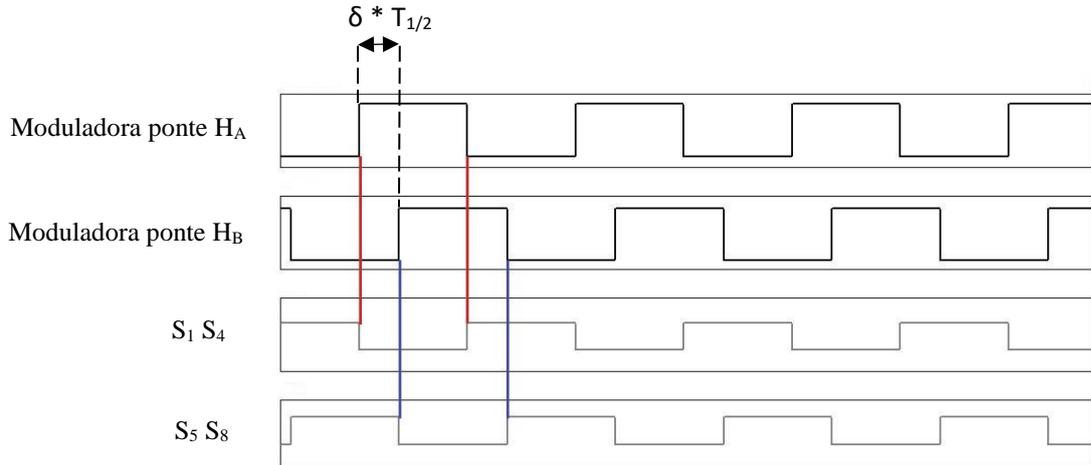


Fonte: Próprio autor.

O acionamento dos pares de chaves semicondutoras é feito através de sinais de comando chamados de moduladoras. As moduladoras são ondas que possuem atraso de $\delta * T_{1/2}$ segundos, uma em relação a outra, o que provoca uma defasagem angular entre as tensões do primário e do secundário do transformador de ϕ , sendo T o tempo de chaveamento, $T_{1/2}$ a metade do tempo de chaveamento, δ a razão de defasagem angular entre a tensão do primário e do secundário do transformador ($\delta = \phi / 180^\circ$). (XAVIER, 2016)

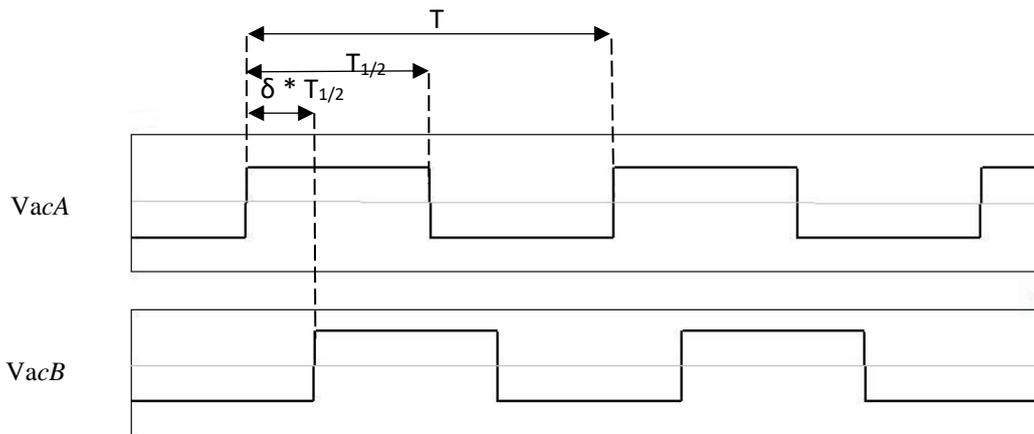
As moduladoras podem ser ondas quadradas, que geram o deslocamento ϕ entre as ondas de entrada e saída do transformador. Na Figura 3.2 observa-se o chaveamento dos pares diagonais dos semicondutores das pontes H que geram a defasagem angular $\delta * T_{1/2}$. Já na figura 3.3 observa-se o resultado do chaveamento nas formas de onda de entrada e saída de tensão,

Figura 3.2 – Sinais de controle do modulador para as chaves das pontes H



Fonte: Próprio autor.

Figura 3.3 – Defasagem entre as tensões de entrada e saída – Fluxo de potência de A para B



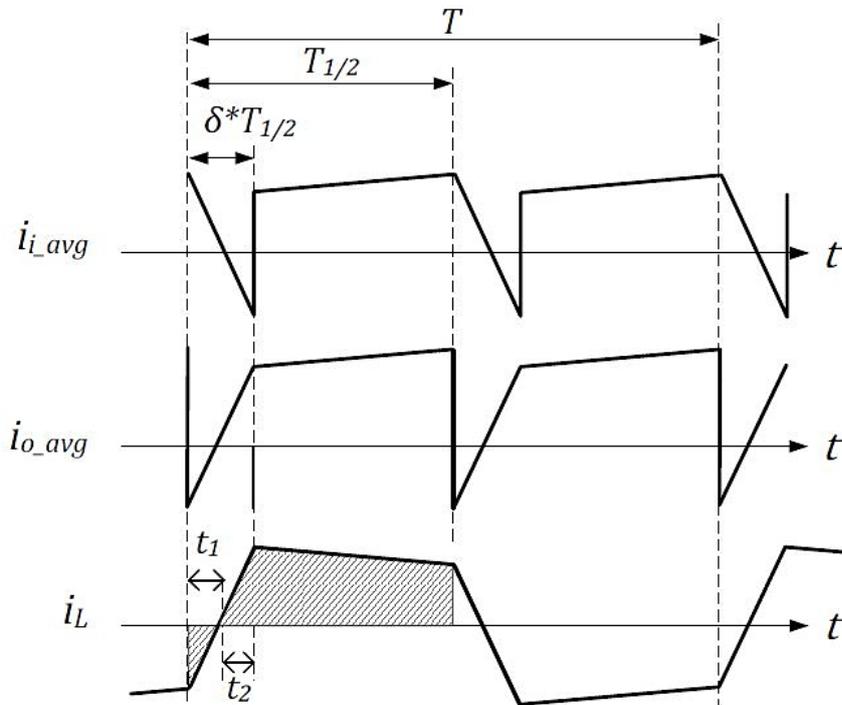
Fonte: Adaptada de (SILVA, 2013).

A análise do conversor DAB é feita geralmente levando-se em consideração apenas meio ciclo de chaveamento. SILVA (2013) divide este meio ciclo de chaveamento em 3 etapas definindo a corrente instantânea no indutor em (3.1).

$$i_L = \begin{cases} i_L(0) - \frac{i_L(0)}{t_1} t & \text{se } 0 < t < t_1 \\ \frac{i_L(\delta \cdot T_{1/2})}{t_2} t & \text{se } t_1 < t < t_2 \\ i_L(\delta * T_{1/2}) + \frac{i_L(T_{1/2}) - i_L(\delta * T_{1/2})}{(1 - \delta)T_{1/2}} t & \text{se } t_2 < t < T_{1/2} \end{cases} \quad (3.1)$$

Os instantes t_1 , t_2 , e $T_{1/2}$ podem ser observados nas formas de onda das correntes do conversor na Figura 3.4 .

Figura 3.4 – Formas de onda das correntes i_{i_avg} , i_{o_avg} e i_L – fluxo de potência de A para B



Fonte: (SILVA, 2013).

A corrente média de entrada I_{i_avg} , definida em (3.2), é calculada em função da tensão secundária refletida no primário ($V'_b = V_b N$), da razão de defasagem angular entre das tensões δ , e do valor da indutância L . É definida pelo balanço de carga através da área sob a corrente do indutor i_L , até o intervalo $T_{1/2}$.

$$i_{i_avg} = \frac{V'_b T_{1/2} (\delta - \delta^2)}{L} \quad (3.2)$$

A corrente média de saída I_{o_avg} , definida em (3.3) é calculada em função das mesmas grandezas da corrente média de entrada exceto pela tensão, pois agora deve ser considerada a tensão de entrada V_a .

$$i_{o_avg} = \frac{V_a T_{1/2} (\delta - \delta^2)}{L} \quad (3.3)$$

A potência do conversor, definida em (3.4), é dada pelo produto entre a tensão de entrada V_a e a corrente média de entrada I_{i_avg} . Considerando $T = 2T_{1/2} = 1/f_s$ e substituindo em (3.2) tem-se:

$$P_{ps} = \frac{V_a V'_b (\delta - \delta^2)}{2f_s L} = \frac{V_a V_b N (\delta - \delta^2)}{2f_s L} \quad (3.4)$$

O sinal da potência do conversor demonstra em qual sentido está ocorrendo a transferência de energia. Sinal positivo denota transferência de potência de A para B e sinal negativo denota transferência de potência de B para A.

Para o cálculo da indutância máxima do transformador, deve-se considerar a máxima transferência de potência, que ocorre quando $\partial P / \partial \delta = 0$ e, portanto, $\phi = \pm \pi/2$, como observado na Figura 16, sendo considerada para tal cálculo a equação (3.5). (XAVIER, 2016)

$$|P_{m\acute{a}x}| = \frac{V_a V_b N}{8f_s L} \quad (3.5)$$

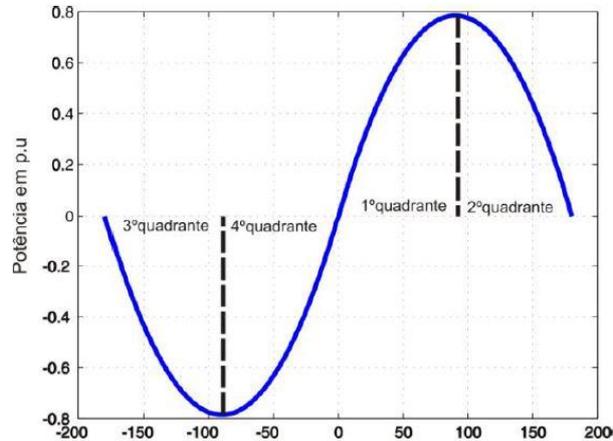
A transferência de potência em função do ângulo de defasem ϕ é observada no gráfico da Figura 3.5. A máxima transferência de potência ocorre quando $\phi = \pi/2$, porém nesta defasagem altas correntes e o fluxo de reativos circulam nas chaves semicondutoras, por isso sua adoção não é aconselhável, na literatura recomenda-se adotar o ângulos de defasagem variando de 15° a 45° , sendo 45° o ângulo ótimo, no qual os reativos não interferem tanto o funcionamento do conversor (SANTOS, 2011).

3.2 Modulação *phase - shift*

A operação do conversor DAB pode ser regida pela modulação *phase-shift*, representada na Figura 3.6. Trata-se de uma modulação simples no qual o controle depende da defasagem δ entre as ondas do sinal de modulação. O fato de apenas uma variável ser considerada no controle do chaveamento, torna esta técnica de fácil implementação. (KIRSTEN, 2014)

Pode-se considerar quatro etapas de operação do método *phase – shift*, que ocorrem quando há mudança no estado de condução das chaves diagonais. A figura 3.5 demonstra a curva de potência em função da variação do ângulo de defasagem nos 4 quadrantes.

Figura 3.5 – Curva de potência em função do ângulo de defasagem ϕ

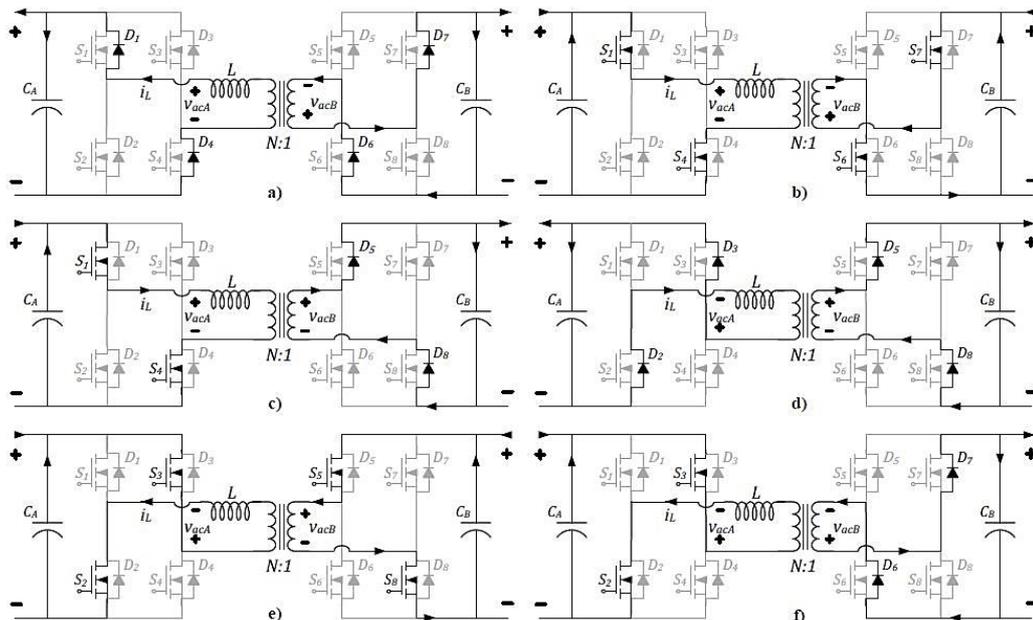


Fonte: (XAVIER, 2016).

Na primeira etapa, entre $t = [0, \phi]$, inicialmente as correntes circulam nos diodos $D1$, $D4$ da ponte H do primário e nos diodos $D6$ e $D7$ no secundário. No final da primeira etapa há o bloqueio dos diodos e ocorre a condução das chaves $S1$, $S4$, $S6$ e $S7$.

Na segunda etapa, entre $t = [\phi, \pi]$, ocorre o bloqueio das chaves $S6$ e $S7$ e a condução de $S5$ e $S8$, que devido o sentido da corrente é feita pelos diodos $D5$ e $D8$.

Figura 3.6 – Etapas de operação do DAB em *phase-shift*. Etapa 1 (a) e (b), Etapa 2 (c), Etapa 3 (d) e (e) Etapa 4 (f).



Fonte: (SILVA, 2013).

Na terceira etapa, entre $t = [\pi, \pi + \phi]$, inicialmente ocorre a condução pelos diodos $D2$ e $D3$ no primário e no final pelas chaves $S2$ e $S3$, enquanto os diodos $D5$ e $D8$ continuam conduzindo.

A quarta e última etapa, entre $t = [\pi + \phi, 2\pi]$, inicia com o bloqueio das chaves $S5$ e $S8$ e com o acionamento de $S6$ e $S7$, que devido o sentido, a corrente circula através dos diodos $D6$ e $D7$.

3.3 Projeto do Conversor DAB

O conversor DAB tem por finalidade interligar o barramento CC da fonte de energia renovável a um banco de baterias. Ele deve ser projetado segundo as especificações de tensão, corrente e potência de projeto. O projeto será realizado de acordo com as seguintes considerações iniciais

- Uma fonte de tensão ideal representará o barramento CC da fonte de energia renovável;
- A saída do conversor será representada por uma carga resistiva;
- O transformador é ideal e tem relação de transformação igual a $V_a/V_b = 7.92$.

Feitas as considerações iniciais, serão calculados os valores de indutância auxiliar L , do primário do transformador, dos capacitores C_a e C_b de entrada e saída e ainda da resistência de carga que representa o barramento CC das baterias. Para o cálculo dos componentes do conversor foram consideradas os parâmetros contidos na Tabela 1.

Tabela 3.1- Parâmetros de projeto do conversor DAB

Descrição	Símbolo	Valor
Tensão no barramento primário	V_a	380V
4 baterias em série, 12V cada	<i>Capacidade</i>	150Ah
Profundidade de descarga	-	20%
Tensão de carga do conjunto de baterias	V_b	48V
Frequência de chaveamento	f_s	20kHz
Frequência relativa	f_r	10
Ciclo de trabalho	D	0,5
Defasagem angular entre as tensões nos terminais do transformador	ϕ	45°

A potência do circuito foi determinada de acordo com a capacidade do conjunto de baterias, com a profundidade de descarga de 20% recomendada pelo fabricante e com a tensão de carga do conjunto. A corrente de carga da bateria é encontrada pelo produto da profundidade de descarga pela capacidade da bateria, resultando numa corrente $I = 30A$. O produto da tensão de saída, 48V, pela corrente de carga resulta na potência nominal do conversor.

$$P = V_b \cdot I = 1440W$$

3.3.1 Cálculo da Indutância Total e especificação dos capacitores de acoplamento e de carga

A indutância L , que permite a transferência de energia do lado primário para o secundário do transformador representa a soma das indutâncias de dispersão e as indutâncias externas em série dos dois lados do transformador, sendo calculada através da equação (3.6).

$$L = \frac{V_a^2}{N^2 \pi f_s P} \phi \left(1 - \frac{|\phi|}{\pi}\right) \quad (3.6)$$

A partir do cálculo do indutor total é possível calcular o valor do capacitor de acoplamento C_a . A frequência de ressonância f_o , é um outro critério para o cálculo de C_a e relaciona-se com a frequência de chaveamento f_s , através da frequência relativa f_r , definida como $f_r = f_s / f_o \gg 1$, sendo 10 considerado um valor aceitável. (SANTOS, 2011)

$$C_a = \left[\frac{f_r^2}{f_s^2} \right] \frac{1}{4\pi^2 L} \quad (3.7)$$

O capacitor de carga é calculado de acordo com a equação (3.8), na qual foi considerado a ondulação da tensão de saída $\Delta v_c = 5\% V_b$.

$$C_b = \frac{I_2 D}{\Delta v_c f} \quad (3.8)$$

Os valores dos componentes de projeto calculados em função do ângulo de defasamento $\phi = 45^\circ$, estão listados na Tabela 2.

Tabela 3.2 – Dados do conversor DAB utilizados nas simulações

Descrição	Símbolo	$\phi = 45^\circ$
Indutor total do circuito	L	$470 \mu H$
Capacitor de acoplamento	C_a	$13,40 \mu F$
Capacitor de carga	C_b	$312,5 \mu F$

No projeto deve-se escolher capacitores disponíveis no mercado que atendam às necessidades e que suportem a corrente eficaz de projeto. Sabendo que capacitores ligados em paralelo, tem suas capacitâncias somadas e a corrente total é dividida por cada unidade, serão utilizados 14 capacitores de polipropileno em paralelo com capacitância de $1\mu F$ cada, totalizando $14\mu F$, do fabricante EPCOS, modelo P614X124, e tensão nominal de 400V, como capacitor de acoplamento. Já para o capacitor de carga serão utilizados 10 capacitores, em paralelo, de $5600\mu F$, totalizando $5,6mF$, da fabricante TDK, modelo B43630E2567M0, com tensão nominal de 250V e corrente máxima de 4,3A cada. Os projetos físicos do transformador e do indutor estão demonstrados dos Apêndices A e B.

3.3.2 Cálculo dos esforços e especificações das chaves semicondutoras

O dimensionamento das chaves semicondutoras e dos diodos foi feito considerando-se os tempos de condução de cada elemento. As correntes no indutor para $\theta=0^\circ$ e $\theta=\varphi$ são dadas em (3.9) e (3.10). (SANTOS, 2011)

$$i_l(0) = -\left(\frac{V_1 - V_2 N}{2\omega L}\right)(\pi - \varphi) - \left(\frac{V_1 + V_2 N}{2\omega L}\right)\varphi \quad (3.9)$$

$$i_l(\varphi) = \left(\frac{V_1 + V_2 N}{2\omega L}\right)\varphi - \left(\frac{V_1 - V_2 N}{2\omega L}\right)(\pi - \varphi) \quad (3.10)$$

Os valores de corrente média e eficaz das chaves semicondutoras e dos diodos foram calculados, analisando a área sob a curva, mostrada na Figura 3.4, utilizando a definição de valores médio e eficaz de uma função qualquer, considerando-se o período $T = 2\pi$, mostrados respectivamente em (3.11) e (3.12).

$$i_{med} = \frac{1}{T} \int_0^\theta i_l(\theta) d\theta \quad (3.11)$$

$$i_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^\theta i_l^2(\theta) d\theta} \quad (3.12)$$

O limite de integração para o cálculo das correntes nos diodos foi $\theta = [0, \pi/8]$, já para o cálculo das correntes nas chaves semicondutoras o limite de integração foi de $\theta = [\pi/8, \pi]$.

Neste cálculo utilizou-se como função a corrente média na de entrada e corrente média de saída, considerando-se corrente média de entrada igual a 3,78A e corrente média na saída igual a 30A.

Tabela 3.3 – Dados de projeto dos diodos e chaves semicondutoras

Porta	Descrição	I_{med}	I_{ef}
<i>Ponte H primário</i>	<i>Diodos D1, D2, D3, D4</i>	<i>0,47 A</i>	<i>0,89A</i>
	<i>Chaves semicondutoras</i>	<i>1,42A</i>	<i>2,49A</i>
<i>Ponte H secundário</i>	<i>Diodos D1, D2, D3, D4</i>	<i>1,87A</i>	<i>7,5A</i>
	<i>Chaves semicondutoras</i>	<i>13,12A</i>	<i>19,84A</i>

As chaves semicondutoras do primário devem suportar uma tensão de trabalho $V = 380 \text{ V}$ e uma alta frequência de chaveamento, por isso optou-se por utilizar 4 IGBT's do fabricante International Rectifier, modelo IRGP50B60PD, com máxima tensão coletor-emissor de 600V, máxima corrente de coletor de 33A resistência do diodo igual a 250m Ω e resistência coletor emissor de 61 m Ω .

No secundário do transformador serão utilizados 4 MOSFET's do fabricante International Rectifier, modelo IRFP4321PbF, com máxima tensão de dreno-fonte de 150V, máxima corrente de dreno igual a 78A e resistência de condução de 12m Ω .

3.3.3 Cálculo da resistência de carga

A resistência de carga foi definida considerando-se um conjunto de 4 baterias Moura Clean 12MF150 12V 150Ah, ligadas em série, totalizando 48V de tensão nominal e 150 Ah de capacidade. A corrente de carga da bateria é encontrada pelo produto da profundidade de descarga pela capacidade da bateria, logo a corrente de carga é de 30A. O produto da tensão de saída pela corrente de carga resulta na potência nominal de saída igual a 1440W. O cálculo do resistor que representa o conjunto de baterias é observado em (3.13)

$$R = \frac{V_b^2}{P_o} = \frac{48^2}{1440} = 1,6\Omega \quad (3.13)$$

3.4 Considerações Finais

De acordo com o princípio de funcionamento do conversor DAB e com o equacionamento matemático que descreve tal funcionamento, foram calculados os componentes que constituem o conversor. Os parâmetros de projeto escolhidos resultarão num conversor DAB com relação de transformação $N=7,92$, no qual pretende-se manter estável o valor da tensão e potência na saída. Foram ainda calculados ainda os esforços das chaves semicondutoras. Na Tabela 4, estão listados todos os componentes especificados para o projeto.

Tabela 3.4 – Especificação geral dos componentes

Descrição	Especificações do componente
<i>Capacitor de acoplamento</i>	14 capacitores de polipropileno, 1 μ F cada, EPCOS, modelo P614X124, $V_{m\acute{a}x} = 400V$
<i>Capacitor de carga</i>	10 capacitores eletrolíticos, 5600 μF cada, TDK, modelo B43630E2567M0, $V_{m\acute{a}x} = 250V$, $I_{m\acute{a}x} = 4,3A$
<i>Chaves semicondutoras da ponte Ha</i>	4 IGBT's, International Rectifier, modelo IRGP50B60PD, $V_{ce_m\acute{a}x} = 600V$, $I_{c_m\acute{a}x} = 33A$ $R_d = 250m\Omega$, $R_{ce} = 61 m\Omega$.
<i>Chaves semicondutoras da ponte Hb</i>	4 MOSFET's, International Rectifier, modelo IRFP4321PbF, $V_{m\acute{a}x} = 150V$, $I_{m\acute{a}x} = 78^a$, $R_c = 12m\Omega$

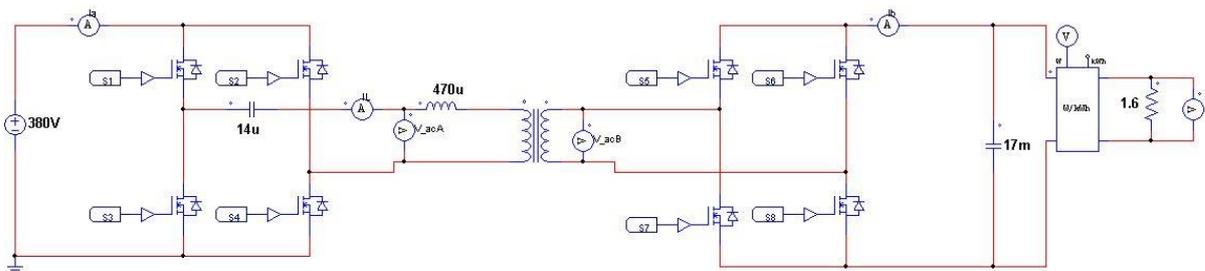
4 SIMULAÇÃO

4.1 Simulação do conversor DAB

A simulação do conversor DAB proposto, tem por objetivo validar o funcionamento do conversor e ainda identificar as possíveis discrepâncias encontradas entre os valores modelados matematicamente e a simulação. O uso de ferramentas computacionais permite a realização de um estudo mais detalhado dos conversores. A ferramenta computacional utilizada neste estudo foi o PSIM®, *software* destinado principalmente a simulação de circuitos de eletrônica de potência.

A Figura 4.1 apresenta o circuito de potência do conversor DAB, na qual os valores de L , C_a , C_b e R estão calculados especificados na seção 3.3.1.

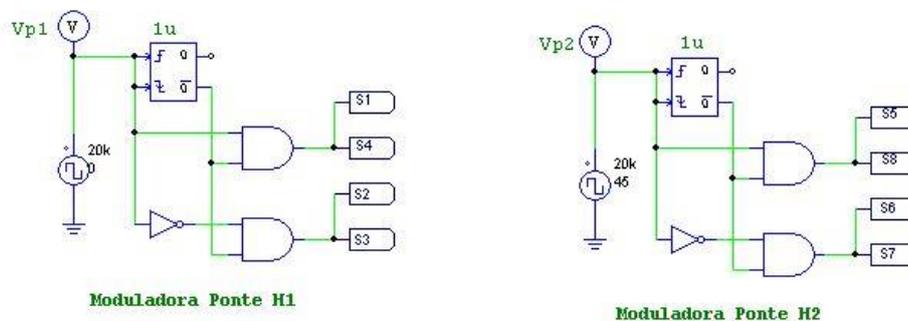
Figura 4.1 – Circuito do conversor *dual active bridge*



Fonte: Adaptado de (SANTOS, 2011)

O circuito de chaveamento responsável por gerar as moduladoras com atraso φ está representada na Figura 4.2.

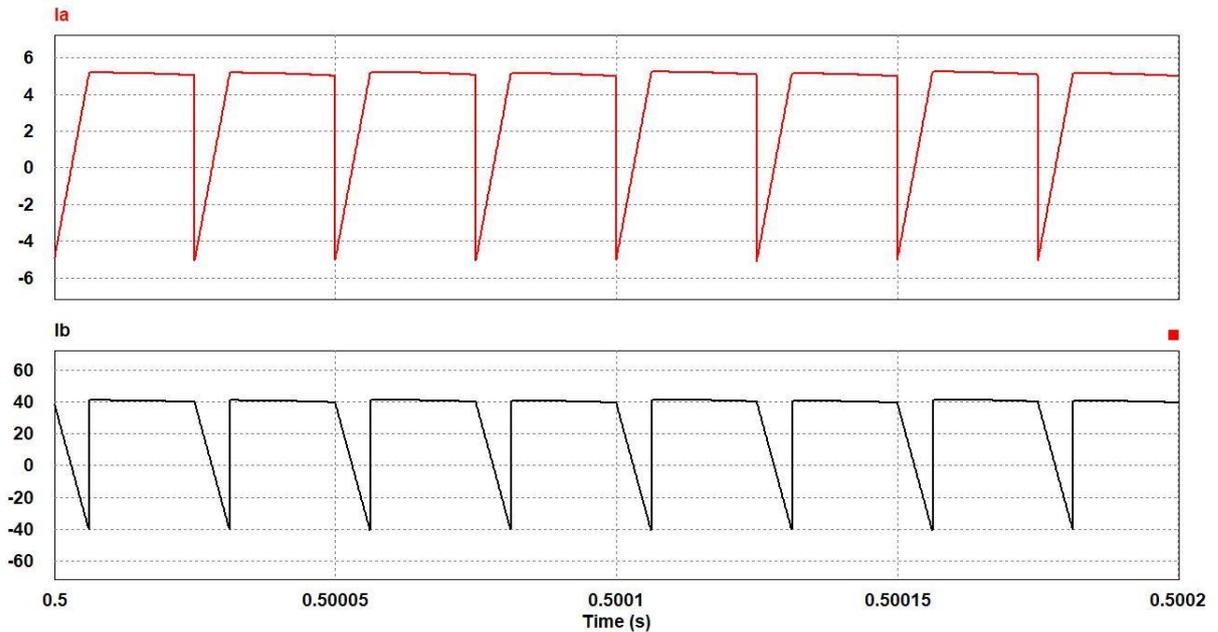
Figura 4.2 – Circuito de chaveamento das pontes H



Fonte: Adaptado de (SANTOS, 2011).

Os valores de corrente média de entrada, corrente média de saída e potência do conversor, descritas matematicamente em (3.2), (3.3) e (3.4) quando medidos no projeto resultam em valores e formas aproximados daqueles medidos, conforme mostrado na Figura 4.3. Tais valores são observados na Tabela 4, bem como os valores simulados de corrente eficaz.

Figura 4.3 – Corrente de entrada e de corrente de saída de projeto



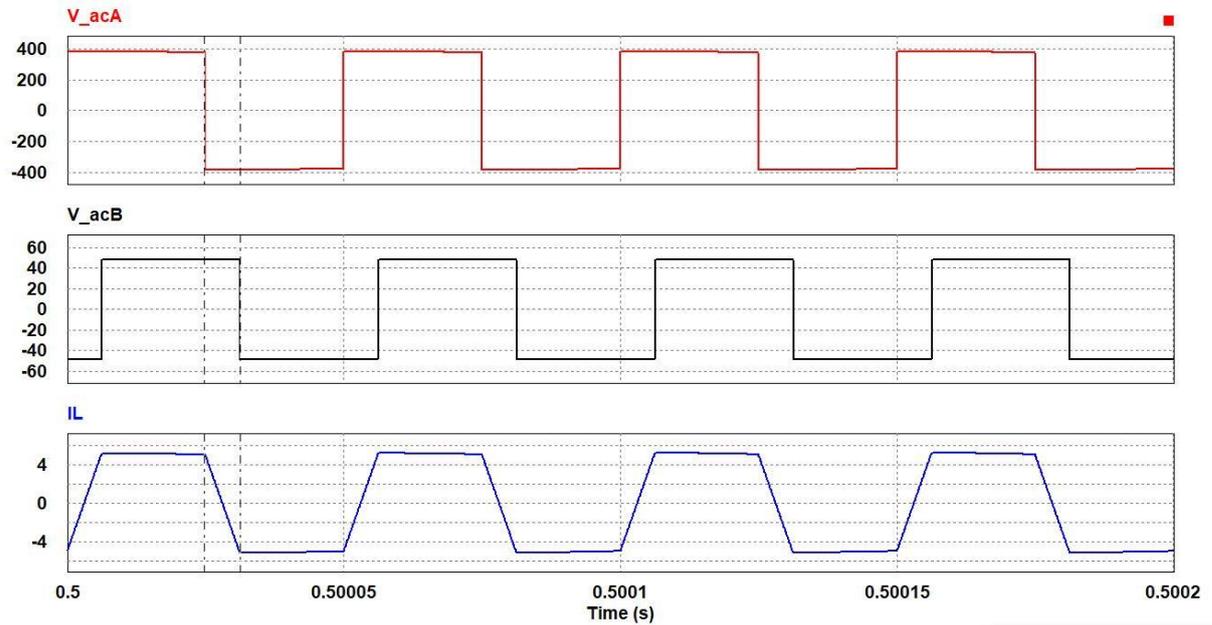
Fonte: Próprio autor.

Tabela 4.1 – Correntes média e eficaz de entrada e saída e potência do circuito

Grandeza	Calculada	Simulada
I_{i_avg}	3,78 A	3,82 A
I_{o_avg}	30A	30,21 A
I_{i_ef}	4,61A	4,66A
I_{b_ef}	36,03A	36,29A
P_{ps}	1440W	1468,9 W

Comparando-se as ondas de tensão no primário e tensão no secundário do transformador, pode-se observar o *phase shift*, com ângulo de defasagem entre as tensões igual a 45°, conforme representado na Figura 4.4.

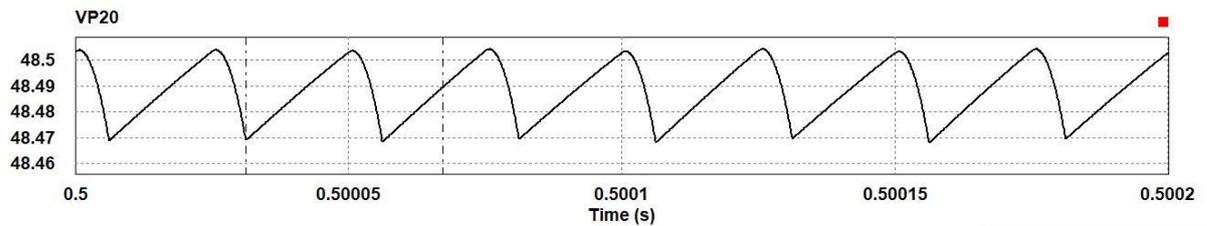
Figura 4.4 – Curvas de tensão no transformador com e corrente no indutor com *phase shift* de 45°



Fonte: Próprio autor.

Com a adição das resistências internas nos capacitores e das chaves semicondutoras tensão de saída na carga, observada na Figura 4.5, tem valor médio igual a 48,47 V.

Figura 4.5 – Tensão de saída na carga



Fonte: Próprio autor.

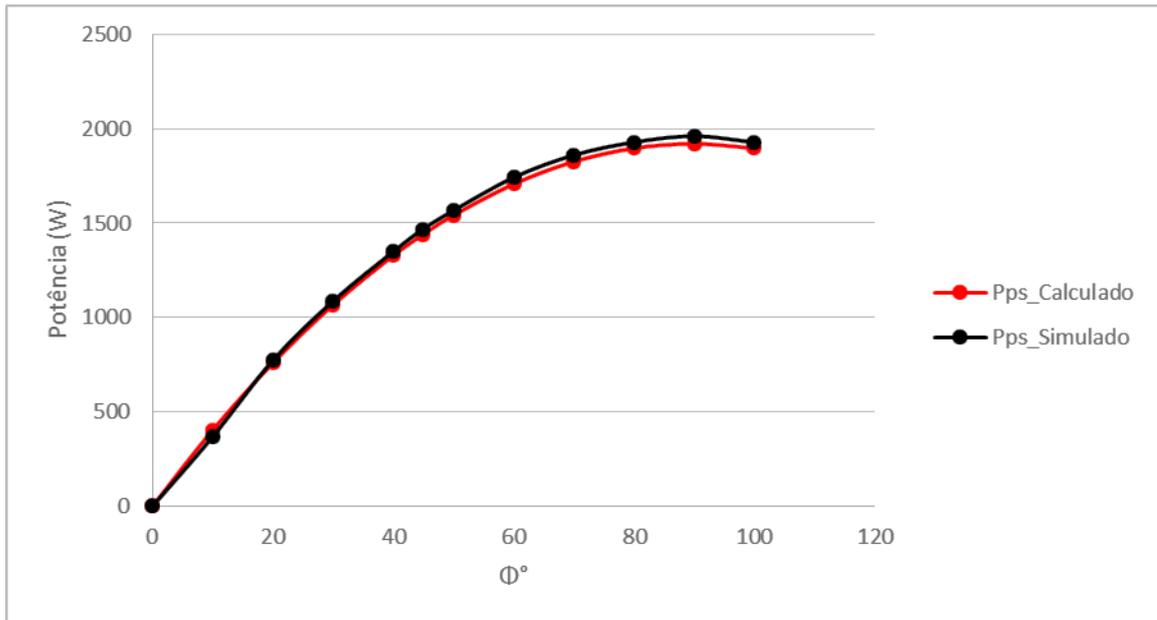
O cálculo da saída de tensão do conversor pode ser calculado como na equação (4.1).

$$Erro = \frac{(V_{med_Calculada} - V_{simulada})}{V_{medida}} \cdot 100 = \frac{48 - 48,48}{48} = -1\% \quad (4.1)$$

4.1.1 Curva de potência do conversor em função de ϕ

A curva de transferência de potência em função do ângulo ϕ , pode ser observado na Figura 4.6. Percebe-se que os valores medidos e calculados se aproximam e que a transferência de potência máxima do conversor é atingida, no segundo quadrante quando $\phi = 90^\circ$.

Figura 4.6 – Gráfico da transferência de potência do conversor em função do ângulo de defasagem ϕ



Fonte: Próprio autor.

4.1 Considerações finais

Foram apresentadas neste capítulo os resultados das simulações para a realização do estudo do conversor DAB proposto. De acordo com os valores calculados dos componentes verificou-se coerência com os resultados das simulações. Com a adição das resistências internas dos componentes o projeto apresentou um erro máximo de tensão de saída de -1%.

5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusão final

A diversificação da matriz energética e a introdução de fontes de energia renovável intermitentes fez surgir a necessidade de aprofundamento em estudos sobre o conceito de geração distribuída e todos os sistemas nela presentes, como é o caso dos sistemas de armazenamento de energia. O armazenamento de energia através de baterias é bastante difundido e consolidado nos mais variados usos. Baterias específicas para sistemas de geração tem sido desenvolvida, daí a necessidade de estudar as interfaces entre o sistema de geração e o sistema de armazenamento.

Os conversores CC básicos são topologias amplamente estudadas, com literatura vasta e a partir deles é possível se chegar a novas topologias ou ainda melhorar as existentes. Os conversores bidirecionais caracterizam-se por permitir fluxo de potência em ambos os sentidos: da rede para o sistema de armazenamento e do sistema de armazenamento para a rede, havendo conexão elétrica através de um transformador, garantindo segurança nessa transmissão de energia.

O conversor *Dual Active Bridge* (DAB), dentre as topologias básicas de conversores isolados, configura-se como opção viável como interface num sistema de armazenamento de energia, devido seu funcionamento *buck-boost*, seu isolamento galvânico através de transformador de alta frequência e bidirecionalidade.

A partir do estudo da topologia do conversor, da análise de sua modelagem matemática e de seu princípio de funcionamento foram calculados os componentes que o constituem. Para isso foram arbitrados alguns parâmetros de projeto como tensão de entrada, relação de transformação, potência de saída, ângulo de defasagem entre as tensões, frequência de chaveamento e frequência de referência.

Para aproximar o projeto do conversor ao funcionamento real foram especificados componentes disponíveis no mercado e suas respectivas resistências internas. A especificação dos capacitores e chaves semicondutoras foram feitas com base no cálculo de seus esforços.

Em posse dos valores dos componentes calculados, fez-se a simulação do conversor utilizando a ferramenta computacional PSIM, encontrando formas de onda de entrada e saída coerentes com a forma e os valores encontrados na literatura.

Fez-se ainda a comparação das grandezas calculadas e medidas a fim de verificar o erro máximo de tensão de saída do conversor, que ficou em torno de 1%.

Com o projeto e a simulação e especificação do conversor é possível inferir, por meio dos resultados alcançados que o conversor DAB configura-se como uma opção viável para sistemas de armazenamento de energia.

5.2 Trabalhos futuros

Baseando-se nos resultados obtidos, são feitas propostas de trabalhos futuros:

- Revisão bibliográfica sobre métodos de carga de baterias;
- Análise de viabilidade técnica da implementação do conversor DAB para sistemas de armazenamento de energia;
- Desenvolver um sistema de controle para gerenciar o fluxo de energia no conversor;
- Validar experimentalmente o sistema de carga utilizando o conversor DAB projetado.

REFERÊNCIAS

- Barbi, I., **Eletrônica de potência: projetos de fontes chaveadas**, I. Barbi , Florianópolis, Brasil, 2007.
- BASTOS, R. F. **Sistema de Gerenciamento de Carga e descarga de Baterias (Chumbo-ácido) e para Busca de Ponto de Máxima Potência Gerada em Painéis Fotovoltaicos Empregados em Sistemas de Geração Distribuída**. Dissertação de Mestrado, USP. São Carlos. 2013.
- Brasil, Decreto nº 5.163 de 30 de julho de 2004. **Regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica, e dá outras providências**, Brasília, DF, Julho de 2004
- COELHO, K. D. **Estudo de uma Fonte Ininterrupta de Corrente Contínua de Baixa Potência Gerenciada por um Microcontrolador**. Dissertação de Mestrado, UFSC. Florianópolis. 2001.
- CRESESB. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. CEPEL, CRESESB. Rio de Janeiro, 2014.
- FILHO, H. M. D. O. **Conversor CC-CC Trifásico Isolado Bidirecional com Comutação Suave Utilizando Dual Phase-shift e Razão Cíclica Variável**. Dissertação de Mestrado Universidade Federal do Ceará. Fortaleza. 2015.
- FILHO, H. M. D. O. **Conversor CC-CC trifásico isolado bidirecional com comutação suave utilizando dual phase-shift e razão cíclica variável**. Tese de doutorado, UFC, Fortaleza, 2015.
- HART, D. W. **Eletrônica de Potência: análise e projetos de circuitos**. AMGH Editora Ltda. Porto Alegre. 2012.
- HATZIARGYRIOU, N.; ASANO, H.; IRAVANI, R.; MARNAY, C. **Microgrids: An Overview of Ongoing Research, Development, and Demonstration Projects**. Power and Energy Magazine, IEEE, v. 5, n. 4, 2007.
- Moura, **Moura Clean: A bateria para todas as estações**. Catálogo técnico. 2001
- Moura, **Clean Max: Baterias estacionárias ventiladas**. Catálogo técnico. 201?
- KIRSTEN, A. L. **Metodologia de projeto do conversor DAB aplicado a transformadores de estado sólido**. Tese de doutorado. Santa Maria, SC, 2011
- POMILIO, J.A. **Conversor Boost bidirecional em corrente: Complemento ao CAP1**. Unicamp, Campinas, 2010
- RASHID. M.H. **Eletrônica de Potência: Dispositivos circuitos e aplicações**. Pearson. 4 ed, 541-572 p. 2014.

SANTOS, W. M. Estudo e implementação do conversor TAB (Triple Active Bridge) aplicado a sistemas renováveis solares fotovoltaicos. Dissertação de mestrado. Florianópolis, SC, 2011

SILVA, W. W. A. G. Estudo e implementação de conversor bidirecional como interface na regulação de tensão em barramento c.c. e carregamento de baterias em um sistema nanorrede. Dissertação de mestrado. Belo Horizonte, MG, 2013

XAVIER, R. M. J. Conversor CC/CC para central fotovoltaica com armazenamento de energia. Dissertação de mestrado, Porto, Portugal, 2016

APÊNDICES

APÊNDICE A – Projeto do Transformador

No projeto físico do transformador apresentam-se o dimensionamento do núcleo, o número de espiras no primário e do secundário e a quantidade e número de condutores de cada lado.

A.1 Escolha do núcleo

O estágio de isolamento do projeto é feito a partir de um transformador monofásico com 1440W no primário e mesmo valor no secundário, logo:

$$P_{tr} = 2P_o \quad (A.1)$$

Será admitido um fator de utilização de:

$$K_w = 0,4 \quad (A.2)$$

Sendo retangular a forma de onda que passa pelo transformador, o valor da constante de ajuste adotado será de:

$$K_f = 4 \quad (A.3)$$

Outro fator de ajuste utilizado tem relação com o tipo de núcleo utilizado no projeto. Por ser do tipo núcleo-E laminado, o fator de ajuste adotado será de:

$$K_j = 366 \quad (A.4)$$

Adotando uma densidade de fluxo magnético de $B_m=0,3$, pode calcular o valor de A_p em função da densidade de fluxo B_m escolhida, portanto:

$$A_p = \left(\frac{P_{tr} \cdot 10^4}{K_f \cdot K_w \cdot K_j \cdot B_m \cdot f_s} \right)^{1,14} \quad (A.5)$$

O núcleo escolhido que satisfaz a especificação é o MMT140EE6527 da Magmatec com $A_p=15,85 \text{ cm}^4$.

A.2 Números de espiras e dimensionamento de fios

O número de espiras do primário do transformador é obtido pela expressão (A.6) enquanto no secundário, está demonstrada em (A.7).

$$N_{ep} = \frac{2 \cdot V_i \cdot 10^4}{K_f \cdot B_m \cdot f_s \cdot A_e} = 59,52 \approx 60 \quad (A.6)$$

$$N_{es} = \frac{N_p}{V_i} V_o = 7,52 \approx 8 \quad (A.7)$$

É necessário que se calcule a profundidade de penetração do condutor, com a finalidade de se evitar o efeito *skin* no condutor escolhido. Para uma temperatura de 100°C têm-se:

$$\delta = \frac{7,5}{\sqrt{fs}} = 0,053 \text{ cm} \quad (\text{A.8})$$

O condutor especificado deve ter diâmetro máximo conforme o valor calculado em (A.8), desta forma:

$$D_{fio} \leq 2\delta = 0,106 \text{ cm} \quad (\text{A.9})$$

Com o valor do diâmetro do fio, escolheu-se o fio AWG 21, sendo a máxima densidade de corrente $J_{max_1}=450\text{A}/\text{cm}^2$. A partir da razão entre densidade máxima de corrente e a corrente eficaz de projeto no primário encontra-se a área de cobre necessária, conforme a expressão (A.10).

$$Scp = \frac{I_{ef_i}}{J_{max_1}} = 0,0102\text{cm}^2 \quad (\text{A.10})$$

Decidiu-se manter o fio AWG 21, anteriormente escolhido, cujas características podem ser observadas na Tabela A.1.

Tabela A.1 – Especificações do fio AWG 21

<i>Tipo</i>	<i>Esmaltado</i>
<i>Referência</i>	AWG21
<i>Diâmetro (Dc)</i>	0,072 cm
<i>Diâmetro esmaltado (Dfio)</i>	0,080 cm
<i>Secção (Ac)</i>	0,004105 cm ²
<i>Secção esmaltada (Afio)</i>	0,005004 cm ²
<i>Densidade resistiva linear (dR)</i>	0,000420 Ω/cm

Para suprir a corrente eficaz de entrada do projeto será necessário utilizar condutores em paralelo. Assim:

$$N_{fios_p} = \frac{Scp}{Ac} \approx 3 \text{ fios} \quad (\text{A.11})$$

Faz-se necessário calcular o número de fios para o secundário do capacitor, considerando, para o cálculo da área de cobre necessária, a corrente eficaz no secundário, conforme a equação (A.12).

$$Scs = \frac{I_{ef_o}}{J_{max_1}} = 0,08\text{cm}^2 \quad (\text{A.12})$$

Para suprir a corrente eficaz de saída do projeto será necessário utilizar condutores em paralelo. Assim:

$$Nfios_s = \frac{Scs}{Ac} \approx 20fios \quad (A.13)$$

Para verificar se o projeto é executável, calcula-se o fator de utilização através da equação (A.14), sendo este menor que o fator de utilização de referência 0,4, o projeto do transformador é executável. (FILHO, 2015)

$$fu = \frac{Nep.Bm.Afio.Nfios_p + Nes.Bm.Afio.Nfios_s}{Aw} \approx 0,10 \quad (A.14)$$

APÊNDICE B – Projeto do Indutor

No projeto físico do indutor apresentam-se o dimensionamento do núcleo, o número de espiras necessárias, quantidade e tipo de fio utilizado.

B.1 Escolha do núcleo

O estágio de isolamento do projeto é feito a partir de um transformador monofásico com 1440W no primário e mesmo valor no secundário, logo:

$$Ptr = P_o = 1440 \quad (B.1)$$

Será admitido um fator de utilização de:

$$K_w = 0,4 \quad (B.2)$$

Sendo retangular a forma de onda que atravessa o indutor é do tipo retangular, o valor da constante de ajuste adotado será de:

$$K_f = 4 \quad (B.3)$$

Outro fator de ajuste utilizado tem relação com o tipo de núcleo utilizado no projeto. Por ser do tipo núcleo-E laminado, o fator de ajuste adotado será de:

$$K_j = 366 \quad (B.4)$$

Adotando uma densidade de fluxo magnético de $Bm=0,3$, pode-se calcular o valor de Ap em função da densidade de fluxo Bm escolhida, portanto:

$$Ap = \left(\frac{Ptr \cdot 10^4}{K_f \cdot K_w \cdot K_j \cdot Bm \cdot fs} \right)^{1,14} \quad (B.5)$$

O núcleo escolhido deve apresentar um valor de A_p superior ao valor calculado em função de B_m . Desta forma, o núcleo escolhido que satisfaz a especificação é o MMT140EE4220 da Magmatec com $A_p = 6,144 \text{ cm}^4$.

B.2 Números de espiras e dimensionamento de fios

O número de espiras do primário do indutor é obtido pela expressão (B.6)

$$N_{el} = \frac{2 \cdot V_l \cdot 10^4}{K_f \cdot B_m \cdot f_s \cdot A_e} \approx 134 \quad (\text{B.6})$$

Considerando-se a profundidade de penetração do condutor calculada em (A.8), calcula-se o diâmetro máximo do condutor do indutor, na equação (B.7)

$$D_{fio} \leq 2\delta = 0,106 \text{ cm} \quad (\text{B.7})$$

Com o valor do diâmetro do fio, escolheu-se o fio AWG 27, sendo a máxima densidade de corrente $J_{max_1} = 450 \text{ A/cm}^2$. A partir da razão entre densidade máxima de corrente e a corrente eficaz do indutor encontra-se a área de cobre necessária, conforme a expressão (B.10).

$$S_{cl} = \frac{I_{ef_l}}{J_{max_1}} = 0,0102 \text{ cm}^2 \quad (\text{B.10})$$

Decidiu-se manter o fio AWG 27, anteriormente escolhido, cujas características podem ser observadas na Tabela B.1.

Tabela B.1 – Especificações do fio AWG 27

<i>Tipo</i>	<i>Esmaltado</i>
<i>Referência</i>	AWG27
<i>Diâmetro (Dc)</i>	0,036 cm
<i>Diâmetro esmaltado (Dfio)</i>	0,041 cm
<i>Secção (Ac)</i>	0,001021 cm ²
<i>Secção esmaltada (Afio)</i>	0,001344 cm ²
<i>Densidade resistiva linear (dR)</i>	0,002256 Ω/cm

Para suprir a corrente eficaz do indutor será necessário utilizar condutores em paralelo.

Assim:

$$N_{fios_l} = \frac{S_{cl}}{A_c} \approx 10 \text{ fios} \quad (\text{B.11})$$

Para verificar se o projeto é executável, calcula-se o fator de utilização através da equação (B.12), sendo este menor que o fator de utilização de referência 0,4, o projeto do indutor é executável. (FILHO, 2015)

$$fu = \frac{Nel.Bm.Afio.Nfios_l}{Aw} = 0,21 \quad (\text{B.12})$$