

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

KAMILA MAIA BARRETO

**ESTUDO DE TOPOLOGIAS MONOFÁSICAS PARA SISTEMAS
FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA SEM
TRANSFORMADOR**

JOÃO PESSOA, JUNHO DE 2016

KAMILLA MAIA BARRETO

**ESTUDO DE TOPOLOGIAS MONOFÁSICAS PARA
SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À
REDE ELÉTRICA SEM TRANSFORMADOR**

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica
da Universidade Federal da Paraíba como
parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharela em
Engenharia Elétrica.*

Área de concentração: Sistemas de Energia

Orientador:

Professor Dr. Kleber Carneiro de Oliveira

João Pessoa, Junho de 2016

B237eBarreto, Kamilla Maia
Estudo de topologias monofásicas para sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica sem transformador./ Kamilla Maia Barreto./ - João Pessoa, 2016.

57f. il.:

Orientador: Dr. Kleber Carneiro de Oliveira

Monografia (Curso de Graduação em Engenharia Elétrica) CGEE./
Centro de Energias Alternativas e Renováveis / Campus I /
Universidade Federal da Paraíba

1.Energia fotovoltaica2.Convertidores CC-CA. 3. Corrente de dispersão.I .Título.

BS/CT/UFPB CDU:2ed.621.3(043)

KAMILLA MAIA BARRETO

**ESTUDO DE TOPOLOGIAS MONOFÁSICAS PARA
SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À
REDE ELÉTRICA SEM TRANSFORMADOR**

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica
da Universidade Federal da Paraíba como
parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharela em
Engenharia Elétrica.*

DATA DA APROVAÇÃO: ____/____/____

NOTA: ____

APROVADO POR:

Prof. Dr. Kleber Carneiro de Oliveira (Orientador)
Universidade Federal da Paraíba

Prof. Dr. Darlan Alexandria Fernandes
Universidade Federal da Paraíba

Prof. Dr. Romero Leandro Andersen
Universidade Federal da Paraíba

João Pessoa, Junho de 2016

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por todas as oportunidades que tive durante esses anos e por ter me dado saúde e força para superar qualquer desafio.

Aos meus pais, os principais torcedores, que sempre me disseram que eu poderia ser o que quisesse. Por serem fonte de amor, carinho e cuidado e por sempre me incentivarem a seguir em frente, mesmo nas dificuldades.

Aos meus irmãos, pelo amor disfarçado de arengas e *bullying*. Por aguentarem os piores momentos de aperreios, inseguranças, mau humor e luzes acesas na madrugada.

Ao meu esposo, companheiro de tantos anos e melhor amigo, por acreditar tanto em mim e sempre me apoiar.

Ao professor e orientador Kleber, pelos ensinamentos, atenção e paciência. Aos demais professores pelo conhecimento compartilhado.

Aos amigos, pelo carinho e torcida.

BARRETO, Kamilla Maia. **Estudo de topologias monofásicas para sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica sem transformador**. Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica. Universidade Federal da Paraíba. Departamento de Engenharia Elétrica, João Pessoa, 2016.

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo fazer uma pesquisa relacionada aos sistemas fotovoltaicos conectados à rede sem uso de transformador. Mais especificamente, uma avaliação da utilização desses sistemas é feita do ponto de vista do que acontece quando não há a isolação galvânica proporcionada pelo transformador. Primeiramente, uma breve explanação sobre os sistemas fotovoltaicos é realizada. Em seguida comenta-se sobre os sistemas conectados à rede sem o uso de transformador e é explicitado o conceito de corrente de dispersão e tensão de modo comum. Depois são apresentadas diversas topologias de conversores monofásicos para sistemas fotovoltaicos e os circuitos específicos para a análise da corrente de dispersão e tensão de modo comum. Em seguida são apresentados os resultados de simulação desses circuitos. Por consequência, uma avaliação é feita para apresentar as topologias que apresentam os melhores resultados e que melhor atendem as normas técnicas relacionadas ao tema.

Palavras-chave: Sistemas Fotovoltaicos; Topologias de conversores; Corrente de dispersão.

BARRETO, Kamilla Maia. **Study of transformerless topologies for single-phase grid-connected photovoltaic systems.** Monograph for the Bachelor degree in Electrical Engineering. Federal University of Paraiba. Department of Electrical Engineering, João Pessoa, 2016.

ABSTRACT

This work presents a research about transformerless grid-connected photovoltaic systems. More specifically what happens when there is no galvanic isolation by transformer. At first, general aspects about photovoltaic systems are presented. Then explains about transformerless grid-connected photovoltaic systems and concepts of the leakage current and common-mode voltage. It will be present possible single-phase inverters topologies applied in transformerless photovoltaic systems and their influence on leakage current and common-mode voltage. Simulation results will also be shown. Then this research evaluates some of these topologies in order to define the best results in accordance with the Standards.

Key Words: Photovoltaic systems, Inverters topologies, Leakage current.

LISTA DE TABELAS

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|
| Tabela 1 – Valores médios de corrente de dispersão e os respectivos tempos de desconexão de acordo com a norma VDE-0126-1-1 [29]. | 8 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Comparação de sistemas PV com e sem transformador [20]. | 5 |
| Figura 2 – Estrutura de um módulo fotovoltaico e suas capacitâncias parasitas [22]. | 7 |
| Figura 3 - Comportamento da tensão de modo comum com e sem transformador [22]. | 10 |
| Figura 4 - Estrutura de um sistema PV monofásico sem transformador | 10 |
| Figura 5 - Modelo do inversor monofásico | 11 |
| Figura 6 - Modelo considerando as tensões de modo comum e diferencial. | 12 |
| Figura 7 - Modelo simplificado do inversor monofásico. | 13 |
| Figura 8 - Conversor em ponte completa monofásico. | 14 |
| Figura 9 - Modulação PWM senoidal bipolar. | 15 |
| Figura 10 – Tensão de saída do conversor para a modulação bipolar. | 16 |
| Figura 11 - Modulação PWM senoidal unipolar. | 16 |
| Figura 12 – Tensão de saída do conversor para a modulação unipolar. | 17 |
| Figura 13 - Conversor H5. | 18 |
| Figura 14 - Etapas de operação do conversor H5. Fonte: adaptado de [25]. | 19 |
| Figura 15 - Conversor HERIC. | 20 |
| Figura 16 - Etapas de operação do conversor HERIC. Fonte: adaptado de [25]. | 21 |
| Figura 17 - Conversor FBDC. | 22 |
| Figura 18 - Etapas de operação do conversor FBDC. Fonte: adaptado de [25]. | 23 |
| Figura 19 - Conversor REFU. | 24 |
| Figura 20 - Etapas de funcionamento do conversor REFU. Fonte: adaptado de [25]. | 25 |
| Figura 21 - Conversor proposto por Guo <i>et al.</i> | 26 |
| Figura 22 - Etapas de funcionamento do conversor proposto por Guo <i>et al.</i> | 27 |
| Figura 23 - Conversor NPC Monofásico. | 28 |
| Figura 24 - Conversor FC Monofásico. | 29 |
| Figura 25 - Circuito utilizado para a simulação do conversor em ponte completa monofásico. Fonte: adaptado de [25]. | 30 |
| Figura 26 - (a) Tensão e (b) corrente de dispersão no conversor em ponte completa com chaveamento bipolar. | 31 |
| Figura 27 - (a) Tensão e (b) corrente de dispersão no conversor em ponte completa com chaveamento unipolar. | 32 |
| Figura 28 - (a) Tensão e (b) corrente de dispersão no conversor H5. | 33 |
| Figura 29 - (a) Tensão e (b) corrente de dispersão no conversor HERIC. | 34 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 30 - (a) Tensão e (b) corrente de dispersão no conversor FBDC. | 35 |
| Figura 31 - (a) Tensão e (b) corrente de dispersão no conversor REFU..... | 36 |
| Figura 32 - (a) Tensão e (b) corrente de dispersão para o conversor proposto por Guo <i>et al.</i> .. | 37 |
| Figura 33 - (a) Tensão e (b) corrente de dispersão para o conversor NPC monofásico. | 38 |
| Figura 34 - (a) Tensão e (b) corrente de dispersão para o conversor FC monofásico. | 39 |

LISTA DE SIGLAS E ABREVIACOES

| | |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------|
| CA | Corrente alternada |
| CC | Corrente contínua |
| FC | <i>Flying capacitor</i> – Capacitor flutuante |
| FBDC | Ponte completa com <i>bypass</i> no lado CC |
| H5 | Ponte completa com chave extra no lado CC |
| H6D2 | Ponte completa com <i>bypass</i> no lado CC |
| HERIC | Ponte completa com chaves extras no lado CA |
| MPPT | <i>Maximum Power Point Tracking</i> – Rastreamento do ponto de máxima potência |
| NPC | <i>Neutral Point Clamped</i> – Ponto neutro grampeado |
| PV | <i>Photovoltaic</i> – Fotovoltaico |
| PWM | <i>Pulse Width Modulation</i> – Modulao por largura de pulso |
| REFU | Ponte completa com conexão no neutro |

SUMÁRIO

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA | 2 |
| 1.1.1 SISTEMAS CONECTADOS À REDE | 2 |
| 1.1.1 SISTEMAS SEM TRANSFORMADOR..... | 4 |
| 2 CORRENTE DE DISPERSÃO EM SISTEMAS PV MONOFÁSICOS SEM TRANSFORMADOR | 7 |
| 3 TENSÃO DE MODO COMUM EM SISTEMAS PV MONOFÁSICOS SEM TRANSFORMADOR | 10 |
| 4 CONVERSORES DERIVADOS DA TOPOLOGIA EM PONTE COMPLETA | 14 |
| 4.1 CONVERSOR EM PONTE COMPLETA MONOFÁSICO..... | 14 |
| 4.2 CONVERSOR H5 | 17 |
| 4.3 CONVERSOR HERIC | 19 |
| 4.4 CONVERSOR FBDC..... | 21 |
| 4.5 CONVERSOR REFU..... | 23 |
| 4.6 CONVERSOR PROPOSTO POR GUO ET AL..... | 25 |
| 5 CONVERSORES MULTINÍVEIS MONOFÁSICOS | 28 |
| 5.1 CONVERSOR NPC MONOFÁSICO | 28 |
| 5.2 CONVERSOR FC MONOFÁSICO..... | 29 |
| 6 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO | 30 |
| 6.1 CONVERSOR EM PONTE COMPLETA MONOFÁSICO..... | 30 |
| 6.2 CONVERSOR H5 | 33 |
| 6.3 CONVERSOR HERIC | 34 |
| 6.4 CONVERSOR FBDC..... | 35 |
| 6.5 CONVERSOR REFU..... | 36 |
| 6.6 CONVERSOR PROPOSTO POR GUO ET AL..... | 37 |
| 6.7 CONVERSOR NPC MONOFÁSICO | 38 |
| 6.8 CONVERSOR FC MONOFÁSICO..... | 39 |
| 7 CONCLUSÕES..... | 40 |
| 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 42 |

1 INTRODUÇÃO

Desde a revolução industrial e os consequentes avanços tecnológicos que ocorreram, a energia elétrica passou a ser fundamental para todos e sua necessidade é cada vez mais crescente.

Na matriz energética brasileira, a fonte de energia elétrica com maior participação é a de origem hídrica. Por ser uma fonte que depende da disponibilidade de água em rios e reservatórios, a hidroeletricidade pode nem sempre ser viável ou pode estar disponível em pequena escala. A utilização dessa fonte também exige um investimento pesado em infraestrutura, uma vez que há a necessidade de construção de grandes linhas de transmissão e distribuição de energia, além de inúmeros equipamentos para que o consumidor final seja abastecido.

Com o crescimento do consumo, aumenta-se a dependência por energia elétrica procedente de térmicas convencionais, que utilizam como fonte os combustíveis fósseis, uma vez que a fonte hídrica de energia não consegue atender a toda a demanda existente. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética [1], haverá um aumento de 3,2% ao ano no consumo total de energia elétrica entre os anos de 2013 e 2050, justificando ainda mais a necessidade de outras fontes de energia.

Analisando o potencial de fontes alternativas de energia, notamos que estas têm capacidade de suprir parte da demanda de energia existente e também atender comunidades mais isoladas que não são atendidas pelas linhas de transmissão.

As fontes de energia renovável, em particular a fotovoltaica, têm experimentado um grande desenvolvimento nos anos recentes, principalmente devido ao aumento do aquecimento global e também aos subsídios dados pelos governos mundiais a essas fontes de energia [2][3]. Em países como Alemanha e Espanha, projetos para aproveitamento da energia solar recebem grandes incentivos e são amplamente aceitos e difundidos.

Dentre as várias fontes de energia renovável existentes, a fotovoltaica (*photovoltaic* – PV) é prevista para ter a maior geração até o fim deste século, acima de 60% da energia total produzida por fontes renováveis [4] [5].

Com a diminuição dos custos dos módulos fotovoltaicos devido ao aumento em sua produção e participação de novos fabricantes chineses e taiwaneses, assim como resoluções e programas que estimulam o acesso de micro e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, houve uma grande expansão da energia fotovoltaica no Brasil nos últimos anos.

1.1 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

A energia solar fotovoltaica é obtida através da conversão direta da luz em eletricidade (efeito fotovoltaico), sendo a célula fotovoltaica, a unidade fundamental desse processo de conversão, um dispositivo fabricado com material semicondutor [6].

Inicialmente, o desenvolvimento da tecnologia apoiou-se na busca, por empresas do setor de telecomunicações, de fontes de energia para sistemas instalados em localidades remotas. O segundo agente impulsionador foi a chamada “corrida espacial”. A célula fotovoltaica era, e continua sendo, o meio mais adequado (menor custo, peso e maior segurança) para fornecer a quantidade de energia necessária para longos períodos de alimentação de equipamentos eletroeletrônicos no espaço [6].

A partir da primeira década dos anos 2000, a indústria fotovoltaica consolidou-se nos mercados desenvolvidos pelo aumento da demanda e da escala de produção, que, aliadas a desenvolvimentos tecnológicos específicos, viabilizaram a redução de preços e a consequente penetração maior no mercado. Esse desenvolvimento tecnológico sucedeu-se principalmente na Alemanha, nos Estados Unidos da América (EUA) e no Japão, com participação secundária de Itália, Espanha e Noruega [7].

Atualmente, os sistemas fotovoltaicos vêm sendo utilizados em instalações remotas possibilitando vários projetos sociais, agropastoris, de irrigação e comunicações. As facilidades de um sistema fotovoltaico tais como: baixo custo de manutenção e vida útil longa fazem com que sejam de grande importância para instalações em lugares desprovidos de rede elétrica [8].

Um sistema fotovoltaico pode ser classificado em três categorias distintas: sistema isolado, híbrido e conectado à rede [8] [9]. É de interesse para este trabalho os sistemas conectados à rede.

1.1.1 SISTEMAS CONECTADOS À REDE

Um sistema interligado à rede não utiliza armazenamento de energia, pois toda a geração é entregue diretamente à rede. Todo o arranjo é conectado a conversores que servem de elemento de interface entre o painel e a rede, de modo a adequar as formas de onda das grandezas elétricas em corrente contínua (c.c) do painel às formas de onda em corrente alternada (c.a) exigidas pela rede. Estes conversores devem satisfazer as exigências de qualidade e segurança para que a rede não seja afetada [10].

No processo de obtenção da energia fotovoltaica, os conversores são peças fundamentais, onde seu custo e eficiência são alguns dos pontos principais a serem considerados.

Devido aos valores baixos de tensão produzida no arranjo fotovoltaico, pode-se adicionar mais um estágio com um conversor c.c-c.c para elevar a tensão que irá passar pelo conversor c.c-c.a, também chamado de inversor, e pode-se utilizar também um transformador no sistema para elevar a tensão. Esse transformador pode operar em alta frequência ou na frequência da rede elétrica, se colocado após o conversor c.c-c.a.

No caso particular de sistemas conectados à rede, parte dos conversores para sistemas PV disponível comercialmente inclui um transformador operando em alta frequência ou baixa frequência, proporcionando a isolamento galvânica entre os painéis e a rede [11], ou seja, as duas partes do circuito são isoladas uma da outra, conferindo segurança ao sistema e evitando riscos de choques elétricos no momento da limpeza dos painéis, por exemplo. Porém, a presença de um transformador aumenta o custo e tamanho do sistema, assim como também diminui a sua eficiência, uma vez que as perdas existentes no transformador devem ser incluídas no processo.

Os primeiros conversores c.c-c.a comercializados ainda na atualidade, são baseados em isolamento galvânica com transformador conectado a sua saída, em baixa frequência (50Hz/60Hz). Esses transformadores possuem peso, volume e custos consideráveis. Como consequência, houve a evolução para conversores de dois estágios, com isolamento galvânica em alta frequência, reduzindo a quantidade de material utilizado na fabricação dos transformadores. Por fim, com os avanços, os transformadores podem ser completamente eliminados. O problema que surge nessa questão são as correntes parasitas [12].

A obrigatoriedade da presença de transformador em um sistema PV conectado à rede depende da legislação local. No Reino Unido e em alguns países, como a Itália, a isolamento galvânica é uma exigência e pode ser feita com uso de transformadores de baixa frequência ou de alta frequência [13]. Por outro lado, em países como Alemanha e Espanha, o transformador pode ser retirado [14].

Considerando o lado c.a, os conversores para sistemas PV conectados à rede devem possuir controles que efetuem a desconexão e o isolamento, ou seja, eles devem se desconectar da rede se os níveis de tensão e frequência não estiverem dentro de limites localmente estabelecidos. Sistemas de controle e proteção, que desconectam o conversor quando a rede elétrica da concessionária falha, também devem ser agregados ao equipamento, evitando a operação em condição de ilhamento. Desse modo, esse dispositivo é responsável

por todo o sistema de chaveamento e controle que sincroniza a forma de onda gerada na sua saída com os parâmetros elétricos da rede [15].

1.1.1.1 SISTEMAS SEM TRANSFORMADOR

Nos sistemas sem transformador, ou seja, em que não há a isolação galvânica entre os painéis PV e a rede, alguns problemas podem aparecer, como corrente de dispersão pelo painel e tensão de modo comum, e, com a existência de uma capacitância parasita entre as células fotovoltaicas e a terra, a corrente de dispersão pode alcançar valores elevados em certas condições de operação (umidade, poeira, modo de instalação, etc.) [11]. Essa corrente através da capacitância parasita pode ser grande o suficiente para provocar choque elétrico considerável em uma pessoa [16].

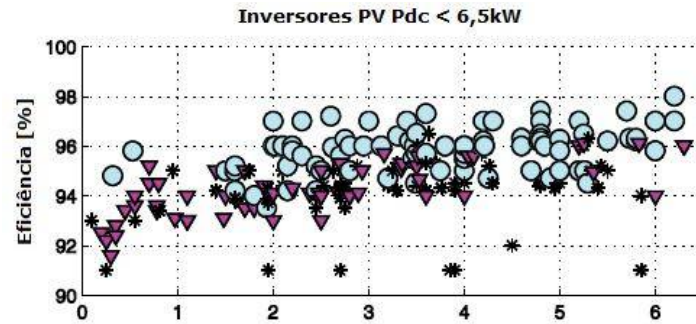
Para a proteção contra choque elétrico na carcaça metálica do painel, a isolação galvânica através do transformador é a melhor alternativa, pois, se a carcaça do módulo PV não está aterrada, a impedância da pessoa em contato fecha um circuito entre o módulo e o solo, mas a corrente que passaria pelo homem não circula devido ao isolamento provocado pelo transformador [17]. Em casos sem transformador, o painel deve ser aterrado.

Para aplicações de baixa potência, pode-se eliminar o transformador, excluindo-se correntes de magnetização, limite de saturação, etc.

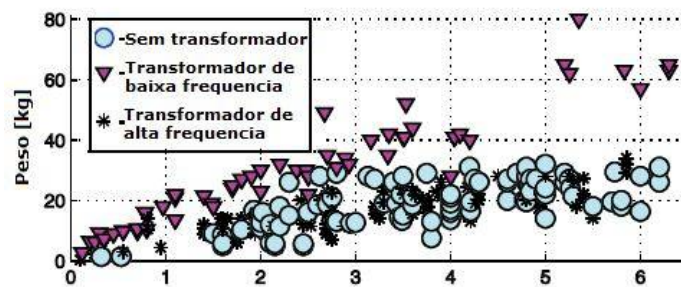
O comportamento da corrente de dispersão e também da tensão de modo comum é influenciado pela escolha da topologia de conversor e/ou da estratégia de modulação.

Porém, sistemas sem transformador também estão mais sujeitos a falhas devido a falta de proteção em caso de curtos, ocasionado o aumento da corrente e conseqüentemente a saturação dos núcleos dos componentes magnéticos dos transformadores de distribuição [18].

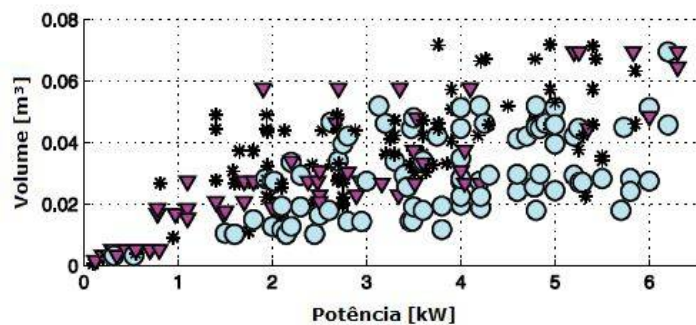
A Figura 1 apresenta uma base de dados de mais de 400 conversores para sistemas PV disponíveis comercialmente, com detalhes sobre a eficiência máxima, peso e tamanho para os diferentes conversores, com e sem transformador. Os dados foram obtidos de uma revista comercial sobre a indústria fotovoltaica [19].



(a)



(b)



(c)

Figura 1 - Comparação de sistemas PV com e sem transformador. Fonte: adaptado de [20].

Para os casos em que a potência é inferior a 6,5kW, sistemas sem transformador tem sua eficiência máxima em torno de 98%, enquanto que sistemas com isolamento galvânica possuem uma eficiência em torno de 96,5%. Assim, pode-se concluir também por meio do gráfico, que os sistemas sem transformador possuem uma eficiência maior, menor peso e tamanho que os sistemas com transformador [20].

Com essa contextualização, este trabalho apresenta uma introdução ao comportamento de sistemas fotovoltaicos conectados à rede sem transformador e um comparativo entre

diversas topologias de conversores monofásicos usadas nestes sistemas com relação ao comportamento da corrente de dispersão e tensão de modo comum.

2 CORRENTE DE DISPERSÃO EM SISTEMAS PV MONOFÁSICOS SEM TRANSFORMADOR

Um painel fotovoltaico é composto por várias células solares ligadas em série e em paralelo de forma que sejam obtidas a tensão e corrente desejadas. A acomodação dessas células é feita através da superfície de um material plástico. Sob elas é colocada uma placa de vidro e as laterais do conjunto são presas por placas de metal [21]. Uma capacitância é formada entre as superfícies em contato com a célula PV e a terra. Como essa capacitância ocorre a partir de um efeito indesejado, é chamada de capacitância parasita.

A Figura 2 apresenta as capacitâncias parasitas em um módulo fotovoltaico.

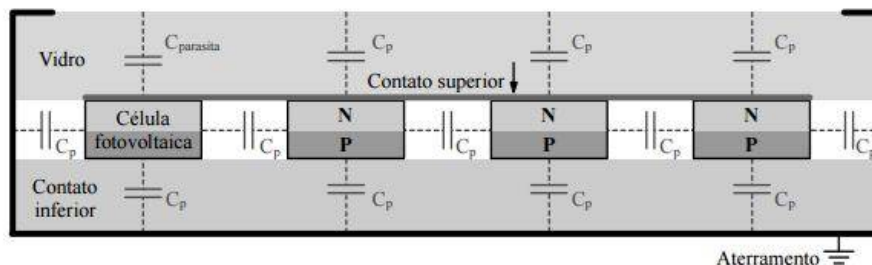


Figura 2 – Estrutura de um módulo fotovoltaico e suas capacitâncias parasitas. Fonte: [22].

A existência destas capacitâncias por si só não é um problema. Todavia, a carga armazenada nas capacitâncias pode fluir para o terminal de terra e, sem a presença de isolamento galvânica, existirá uma circulação de corrente entre os painéis e a rede através do circuito do inversor [22].

Mesmo que o arranjo não tenha um de seus terminais diretamente aterrado, poderá haver um caminho para a passagem de corrente através do acoplamento capacitivo entre as células e as molduras dos módulos. Como as molduras metálicas são normalmente aterradas, o resultado é a presença de uma capacitância parasita entre o gerador fotovoltaico e a terra [23].

O valor desta capacitância parasita depende de muitos fatores, tais como a estrutura do painel solar, das células, a distância entre elas, condições meteorológicas, umidade, poeira cobrindo a superfície dos painéis (que faz surgir um caminho condutivo), etc. [24] [21].

Seu valor varia de 100 a 400 pF entre um único módulo PV e a terra [25], podendo alcançar valores em torno de 200nF/kWp em ambientes úmidos ou nos dias de chuva [25]

[26]. Estima-se que a capacitância parasita varia entre 50nF e 100nF para cada kW de painéis PV instalados [17].

Por causa da capacitância entre os painéis e o solo, flutuações de potencial devidas às estratégias de chaveamento e também topologia do inversor resultam em um surgimento de uma corrente de dispersão capacitiva, também chamada de corrente parasita [27].

Dependendo da topologia do conversor, dos estados dos interruptores e as condições ambientais na qual o sistema está operando, a corrente de dispersão pode causar mais ou menos problemas, como: interferência eletromagnética, distorção na corrente da rede e perdas adicionais no sistema [28]. Também pode causar atuação indevida de proteções do circuito e problemas de segurança [12].

As correntes de dispersão estão limitadas pelas normas e durante o funcionamento podem atingir amplitudes bem acima dos níveis permitidos, incrementando desse modo o conteúdo harmônico da corrente da rede [14].

A norma alemã VDE-0126-1-1 [29] é a única norma que especifica sobre os níveis de amplitude da corrente de dispersão em sistemas fotovoltaicos sem transformador. De acordo com essa norma, o tempo de desconexão do inversor à rede deve ser de 0,3 segundos quando o valor de pico da corrente de dispersão é maior que 300 mA. Para os demais casos, os valores médios para a corrente de dispersão e os respectivos tempos de desconexão são apresentados na Tabela 2.1.

Tabela 1 – Valores médios de corrente de dispersão e os respectivos tempos de desconexão de acordo com a norma VDE-0126-1-1 [29].

| Valor da corrente de dispersão (mA) | Tempo de desconexão (s) |
|------------------------------------------------|------------------------------------|
| 30 | 0,3 |
| 60 | 0,15 |
| 100 | 0,04 |

Nos casos em que não há transformador, haverá o risco de choque elétrico se o painel não estiver aterrado. Aterrando o painel, há o aparecimento da corrente de dispersão. Para sistemas que utilizam transformador, o efeito dessa corrente é praticamente nulo.

Quando não existe a isolamento galvânica entre o sistema PV e a rede e o sistema é aterrado, cria-se um circuito ressonante entre a terra e os módulos PV, incluindo a capacitância parasita, o filtro de saída do inversor, o inversor e a impedância da rede. Esta

ressonância aumenta a corrente de dispersão através da capacitância parasita dos módulos e consequentemente, esta corrente pode alcançar níveis elevados [25].

Em sistemas PV sem transformador que usam a conexão entre o neutro da rede e o ponto central do barramento c.c, as correntes de dispersão têm níveis muito baixos porque o potencial entre os módulos PV e a terra é constante. Contudo, a conexão entre o neutro e o ponto central do barramento c.c é não ideal e uma pequena indutância tem que ser considerada [14]. Esta indutância pode fazer o potencial oscilar com alta frequência e as correntes de dispersão aumentam, tendo valores maiores que os recomendados em normas internacionais [25].

Dessa forma, o comportamento da corrente de dispersão é uma característica muito importante em aplicações PV sem transformador.

3 TENSÃO DE MODO COMUM EM SISTEMAS PV MONOFÁSICOS SEM TRANSFORMADOR

De acordo com o circuito do conversor utilizado, o potencial alternado da tensão da rede pode chegar aos terminais do painel quando o sistema está em funcionamento. Na maioria dos conversores sem transformador, uma tensão com a metade da amplitude da tensão da rede é transmitida ao módulo fotovoltaico. É a tensão de modo comum. Em inversores com transformador, a tensão transmitida ao painel fotovoltaico apresenta apenas uma ondulação de alguns poucos volts [22].

A Figura 3 mostra a tensão de modo comum (V_{CM}) quase constante com a utilização do transformador e a tensão V_{CM} variando quando não há a utilização de transformador.

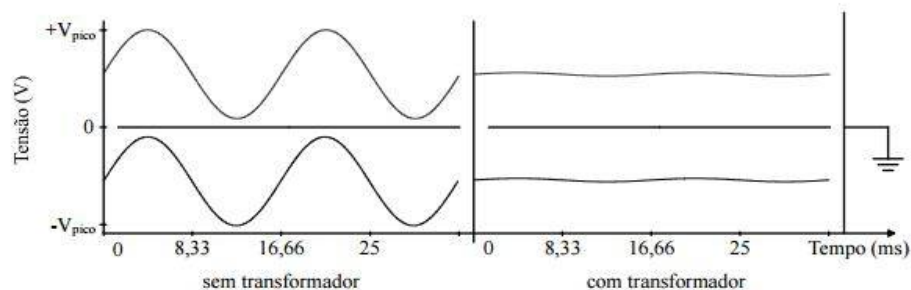


Figura 3 - Comportamento da tensão de modo comum com e sem transformador. Fonte: adaptado de [22].

A Figura 4 apresenta um exemplo de estrutura para um sistema PV monofásico sem transformador.

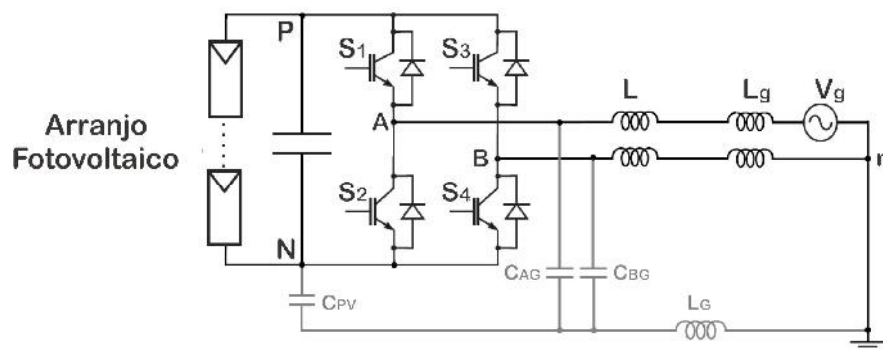


Figura 4 - Estrutura de um sistema PV monofásico sem transformador

Para estruturas como a da Fig. 4, se o módulo fotovoltaico é aterrado, um circuito ressonante é criado. Esse circuito ressonante inclui a capacitância parasita (C_{PV}), a indutância do filtro (L), a capacitância parasita das fases do inversor (C_{AG} e C_{BG}), a indutância da rede elétrica (L_g) e a indutância entre a conexão de terra do inversor e da rede elétrica (L_G). O valor da capacitância do arranjo PV depende de vários fatores, variando de nF a μ F. Desta forma, a corrente de dispersão pode chegar a valores elevados em sistemas PV sem transformador [25].

Considerando a tensão nos terminais do inversor como uma onda chaveada em alta frequência, o modelo do sistema PV é apresentado na Fig. 5.

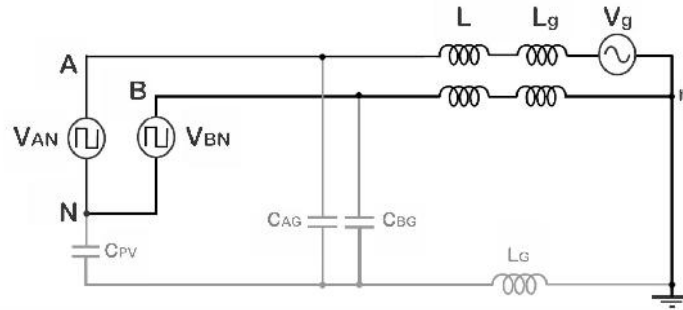


Figura 5 - Modelo do inversor monofásico

No caso de sistemas fotovoltaicos sem transformador, o comportamento da tensão de modo comum é bastante influenciado pela escolha da topologia ou da estratégia de modulação [20]. A tensão de modo comum é definida como a metade da soma das tensões entre as saídas e o terminal negativo do painel. Neste caso, para o sistema monofásico, a tensão de modo comum (V_{cm-AB}) e a tensão de modo diferencial (V_{dm-AB}) são definidas como em [14] por:

$$V_{cm-AB} = \frac{V_{AN} + V_{BN}}{2} \quad (1)$$

$$V_{dm-AB} = V_{AN} - V_{BN} \quad (2)$$

Escrevendo V_{AN} e V_{BN} em função de V_{cm-AB} e V_{dm-AB} , temos:

$$V_{AN} = \frac{V_{dm-AB}}{2} + V_{cm-AB} \quad (3)$$

$$V_{BN} = -\frac{V_{dm-AB}}{2} + V_{cm-AB} \quad (4)$$

Portanto, de acordo com as equações anteriores, o circuito considerando o modelo de tensão de modo comum é apresentado na Fig. 6.

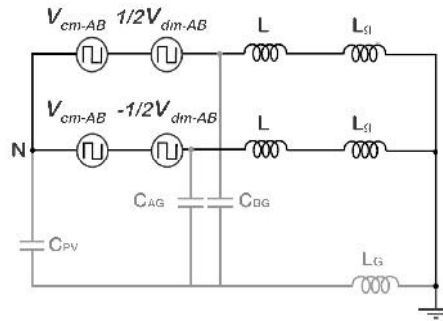


Figura 6 - Modelo considerando as tensões de modo comum e diferencial.

A tensão de modo comum carrega e descarrega a capacitância parasita (C_{PV}) e assim a corrente de dispersão flui por seu caminho. Portanto, a amplitude dessa corrente depende da frequência e amplitude de V_{AN} e V_{BN} , assim como do valor da capacitância parasita C_{PV} [20].

Como o circuito é linear, podem-se considerar os efeitos das tensões de modo-comum e das tensões de modo-diferencial em separado. Como as tensões de modo-diferencial não contribuem para a corrente de dispersão, o circuito de modo-comum pode ser usado para avaliar essa corrente. Na maioria das vezes as saídas do inversor são fisicamente idênticas, então pode-se assumir que as capacitâncias parasitas do inversor (C_{AG} e C_{BG}) são idênticas. Quando comparadas com C_{PV} , as capacitâncias parasitas da saída do inversor possuem baixo valor (na escala de dezenas a centenas de pF) e podem ser desprezadas [25].

Pode ser observado através do modelo na Fig. 7 que a corrente de dispersão pode ser atenuada ou eliminada pelo controle da tensão de modo comum.

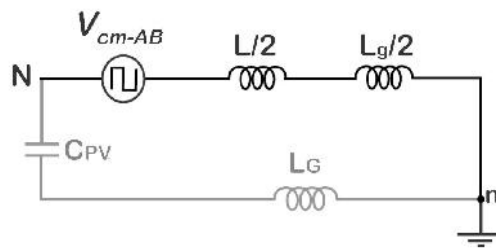


Figura 7 - Modelo simplificado do inversor monofásico.

Dessa forma, diversas topologias com circuitos auxiliares, e diferentes estratégias de modulação são empregadas para poder se obter um valor sempre constante para a tensão de modo comum, evitando assim os problemas relacionados à corrente de dispersão.

De um modo geral, quanto maior a variação da amplitude da tensão aplicada aos terminais do painel, maior será a amplitude da corrente de dispersão. Sem a isolamento galvânica, essa corrente irá circular por todo o sistema, e será injetada diretamente na rede elétrica provocando distorções na forma de onda da tensão [22].

4 CONVERSORES DERIVADOS DA TOPOLOGIA EM PONTE COMPLETA

Para grande parte das aplicações monofásicas comerciais e também residenciais de sistemas PV conectados à rede, é utilizado um conversor em ponte completa. Nesses sistemas de baixa potência, uma topologia sem a isolação galvânica entre os painéis PV e a rede elétrica pode ser adotada.

A seguir será apresentado o conversor em ponte completa monofásico e em seguida diversos outros que foram criados a partir de modificações deste conversor, através da adição de chaves e diodos.

4.1 CONVERSOR EM PONTE COMPLETA MONOFÁSICO

O conversor em ponte completa apresenta uma estrutura básica comum em várias outras topologias de conversores. A Figura 8 apresenta o conversor em ponte completa monofásico.

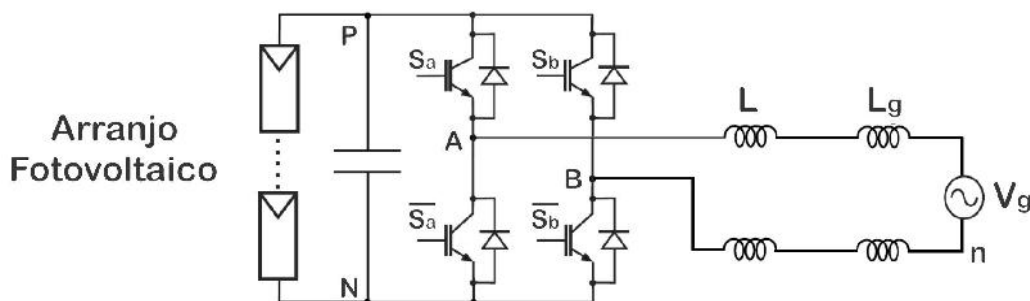


Figura 8 - Conversor em ponte completa monofásico.

Para o controle das chaves em um conversor ponte completa, pode ser utilizada a técnica PWM seno-triângulo. Nesta técnica, dois tipos de sinais são comparados e para este caso, o sinal de referência é senoidal e a portadora é uma onda triangular. A largura dos pulsos para as chaves é variada de acordo com a amplitude relativa da referência em comparação com a portadora.

Sendo o chaveamento bipolar, são necessários dois sinais: a referência senoidal na frequência da rede e a portadora triangular em alta frequência. As chaves superior e inferior de um mesmo braço do inversor são chaveadas em alta frequência de modo complementar, ou seja, quando uma está conduzindo, a outra não conduz. Os pulsos resultantes da comparação são aplicados nas chaves superiores, enquanto que as inferiores recebem o sinal complementar. Como a tensão de saída nos terminais do inversor é $V_{AN} - V_{BN}$, limitando-se entre $+V_{PN}$ e $-V_{PN}$, sem estados de tensão nula na saída, este chaveamento é chamado bipolar.

A Figura 9 mostra uma representação deste tipo de modulação bipolar, onde a frequência da portadora (sinal triangular) é muito maior que a da moduladora (sinal senoidal).

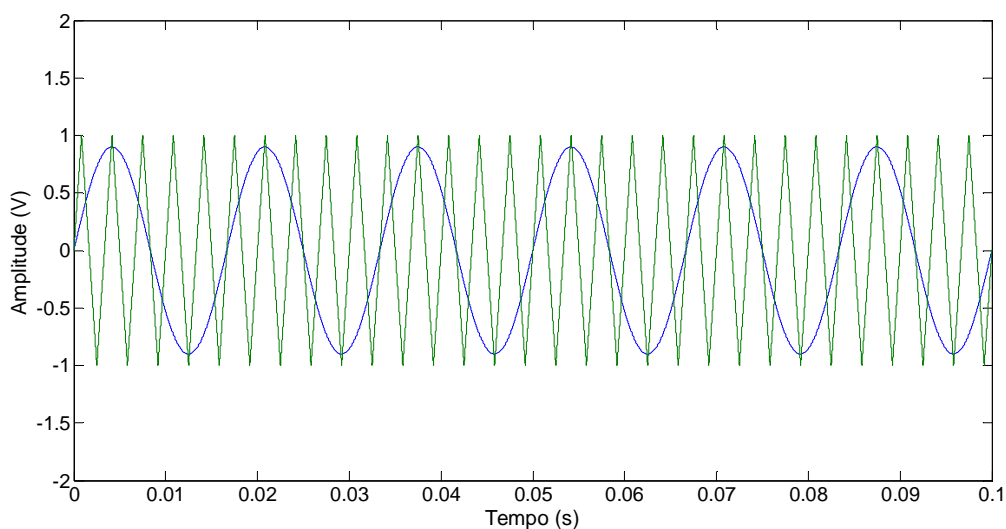


Figura 9 – Sinais para comparação na modulação PWM senoidal bipolar.

Na Figura 10, a tensão na saída do inversor é obtida pela comparação dos sinais acima. O sinal de saída varia entre $+V_{PN}$ e $-V_{PN}$, que é a tensão do barramento de entrada do inversor, com valor de 700V.

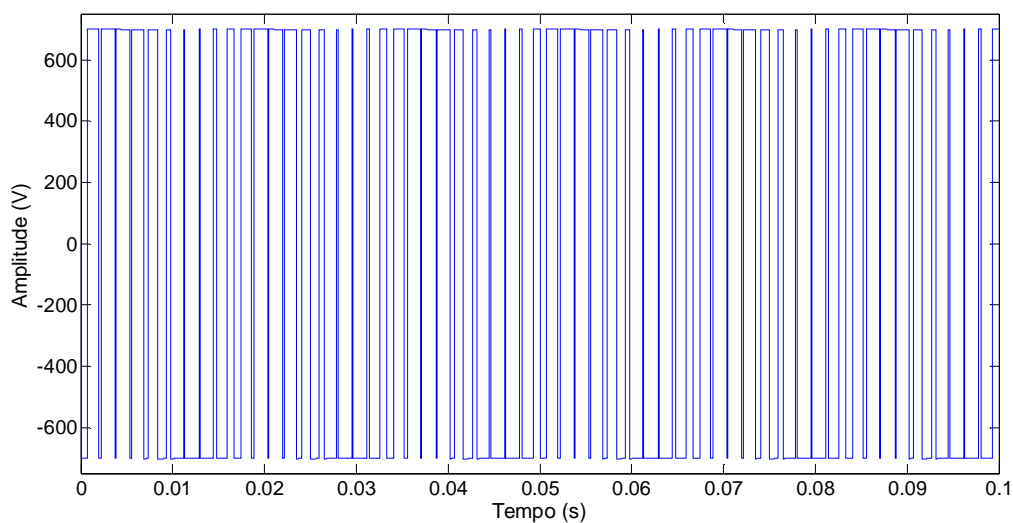


Figura 10 – Tensão de saída do conversor para a modulação bipolar.

A fim de reduzir as perdas no chaveamento, a técnica unipolar é mais utilizada [30]. Neste caso, há a comparação de uma portadora triangular em alta frequência com duas senóides na frequência da rede e de mesma amplitude, porém deslocadas entre si em 180° , ou a comparação de uma senóide na frequência da rede com duas triangulares em alta frequência defasadas.

Na modulação PWM seno-triângulo unipolar, são gerados dois pulsos para as chaves superiores do inversor, que não iniciam o chaveamento ao mesmo tempo, diferente do caso bipolar.

A Figura 11 apresenta um exemplo de representação da modulação unipolar.

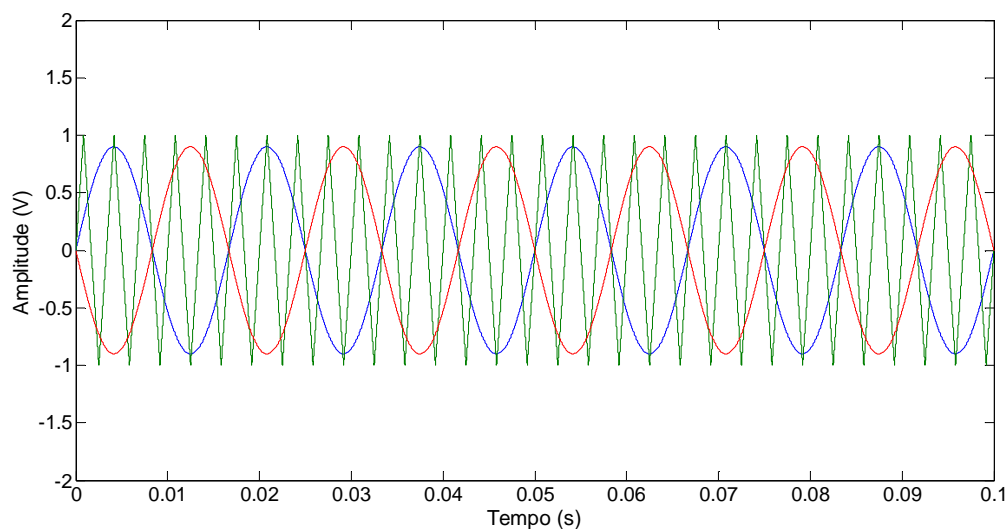


Figura 11 – Sinais para comparação na modulação PWM senoidal unipolar.

A saída do inversor apresenta três níveis de saída diferentes, variando entre $+V_{PN}$, zero e $-V_{PN}$, como apresentado na Fig. 12.

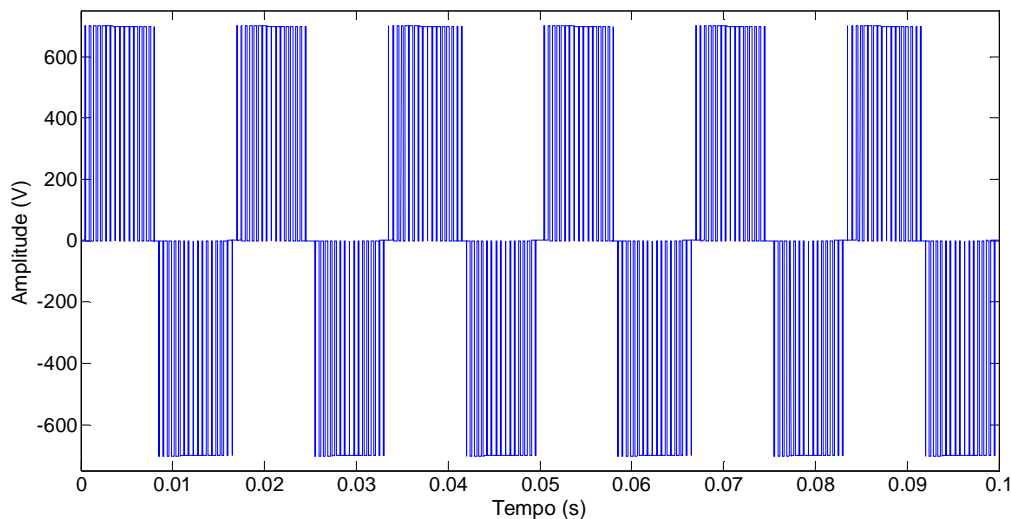


Figura 12 – Tensão de saída do conversor para a modulação unipolar.

4.2 CONVERSOR H5

Essa topologia é derivada do conversor em ponte completa monofásico, sendo adicionada uma chave extra em seu lado c.c. A chave extra desacopla os lados c.c e c.a durante os estados de tensão nula, impedindo o retorno da corrente de magnetização dos indutores de saída ao capacitor de entrada, assim como impede também o surgimento de saltos de tensão nos terminais do gerador fotovoltaico [31]. Isso possibilita, entre outras vantagens, a elevação da eficiência de conversão.

Essa topologia foi criada pela SMA, que é um dos grandes comercializadores de conversores para aplicações com painéis PV.

A Figura 13 apresenta o conversor H5.

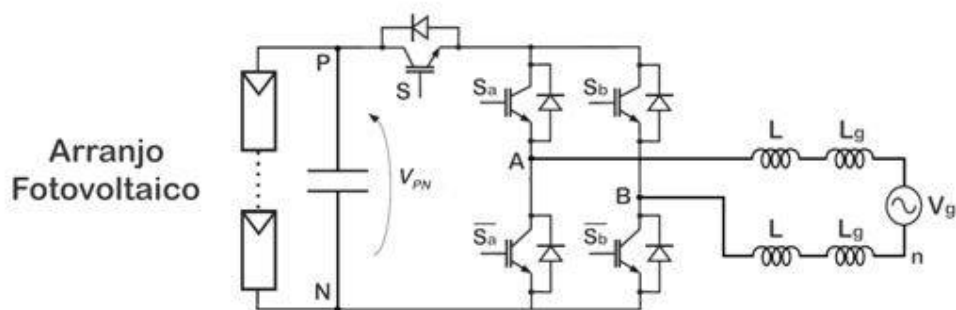
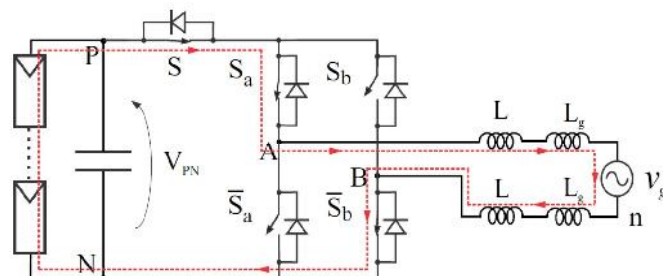


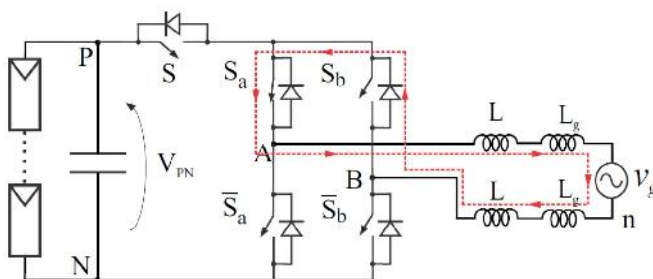
Figura 13 - Conversor H5.

Para este conversor, as chaves S_a e S_b operam na frequência da rede, enquanto que \bar{S}_a , \bar{S}_b e S operam em alta frequência. No semiciclo positivo da tensão da rede elétrica, S e \bar{S}_b são chaveadas em alta frequência enquanto S_a conduz a corrente que flui por S , S_a e \bar{S}_b . Durante o estado nulo da tensão da rede, S não conduz, desconectando os painéis da rede e fazendo com que a corrente circule por S_a e o diodo em paralelo com S_b . Por outro lado, no semiciclo negativo, S e \bar{S}_a são chaveadas em alta frequência enquanto S_b conduz e a corrente encontra um caminho por S , S_b e \bar{S}_a . No próximo estado nulo, S não conduz e a corrente circula por S_b e o diodo em paralelo com S_a [32].

A Figura 14 apresenta as etapas de funcionamento do conversor H5.



(a)



(b)

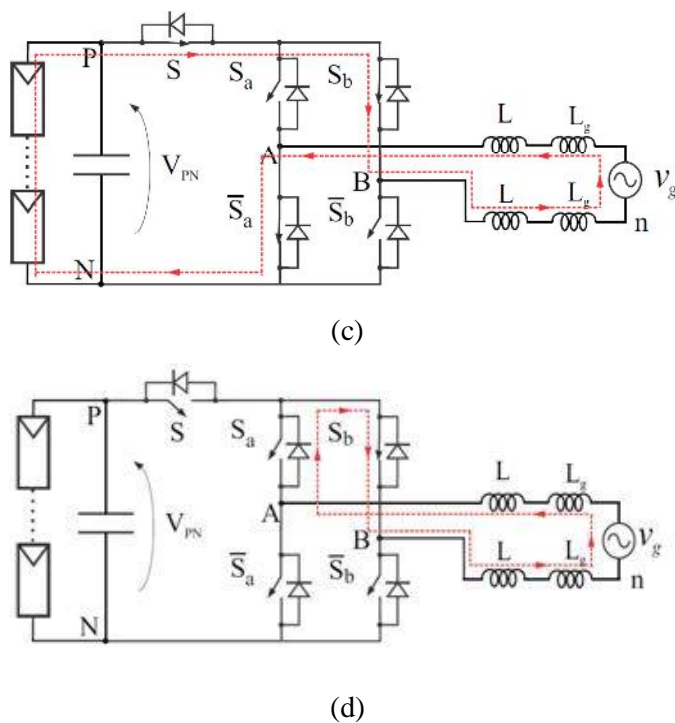


Figura 14 - Etapas de operação do conversor H5. (a) e (b) Semiciclo positivo; (c) e (d) Semiciclo negativo. Fonte: adaptado de [25].

O uso dessa topologia para aplicações monofásicas sem transformador possibilita uma alta eficiência [33], acima de 97,7% [32]. Porém, as perdas por condução aumentam devido à chave extra adicionada [11].

4.3 CONVERSOR HERIC

O conversor HERIC (*Highly Efficient and Reliable Inverter Concept*) é uma topologia lançada comercialmente pela SUNWAY [24], [32]. Este conversor é também derivado da topologia em ponte completa, com a adição de chaves de *by-pass* em seu lado c.a, que criam dois caminhos alternativos para a corrente de magnetização e são acionados de forma a manter a energia acumulada nos indutores no lado c.a [23].

A Figura 15 apresenta a estrutura do conversor HERIC.

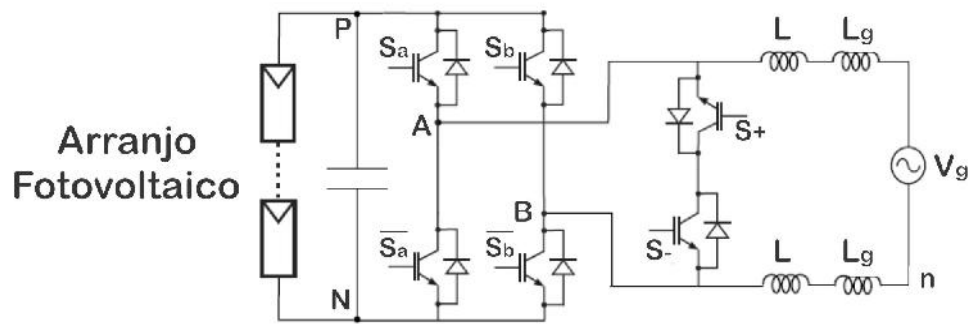


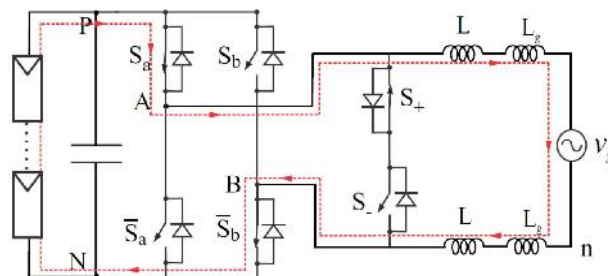
Figura 15 - Conversor HERIC.

Para este conversor, durante o semiciclo positivo da tensão da rede, as chaves S_a e \bar{S}_b estão conduzindo em alta frequência, enquanto que \bar{S}_a e S_b não conduzem. Quando essas chaves não conduzem, durante o estado nulo, a corrente circula pela chave S_+ e pelo diodo da chave S_- .

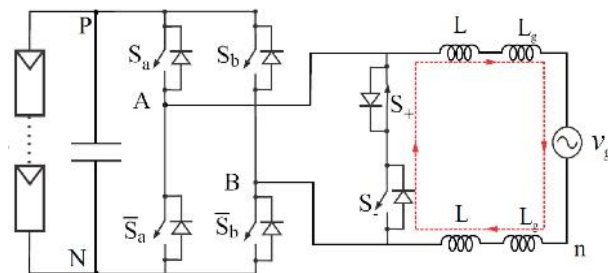
No semiciclo negativo, \bar{S}_a e S_b estão conduzindo em alta frequência, enquanto que S_a e \bar{S}_b não conduzem. Assim como durante o estado nulo, a chave S_- conduz e a corrente passa pelo diodo de S_+ .

As chaves S_+ e S_- são chaveadas na frequência da rede para minimizar as perdas [34].

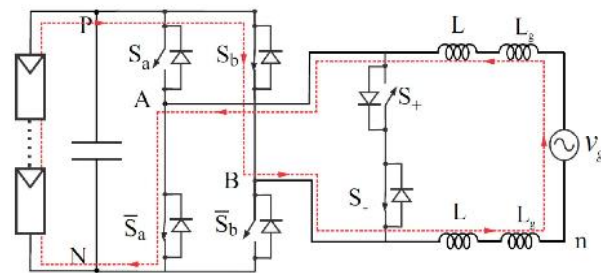
A Figura 16 apresenta as etapas de funcionamento do conversor HERIC.



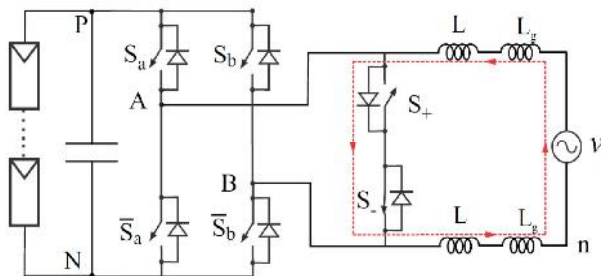
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 16 - Etapas de operação do conversor HERIC. (a) e (b) Semiciclo positivo; (c) e (d) Semiciclo negativo. Fonte: adaptado de [25].

O conversor HERIC é geralmente comercializado para valores de 2,7 a 5 kW com eficiência máxima de 95,6%. O inconveniente desta topologia é a adição de duas chaves extras [32], o que aumenta a sua complexidade.

4.4 CONVERSOR FBDC

O conversor FBDC (*Full-Bridge Direct Current*), também conhecida como H6D2, adiciona duas chaves e dois diodos a estrutura de ponte completa monofásica e foi proposta em [26].

A utilização de dois diodos em paralelo (com seu ponto médio ligado ao ponto médio de dois capacitores) garante que metade da tensão V_{PN} seja aplicada nos interruptores S_+ e S_- durante a etapa de roda livre, necessitando que os diodos também suportem metade da tensão V_{PN} [22].

A Figura 17 apresenta a estrutura do conversor FBDC.

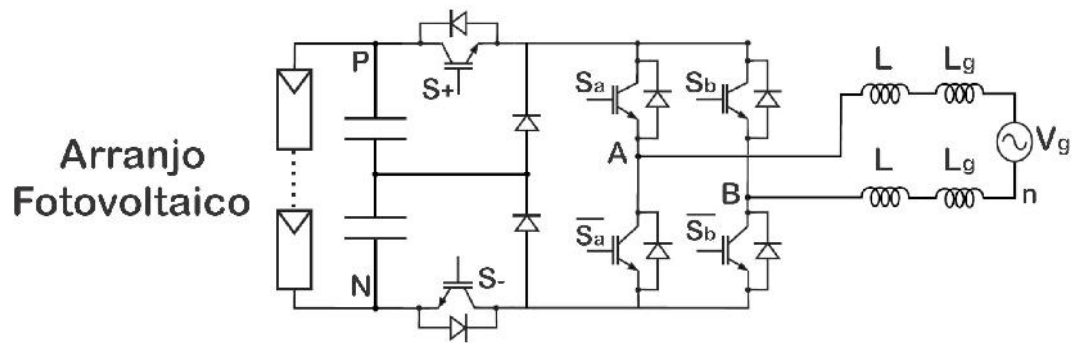
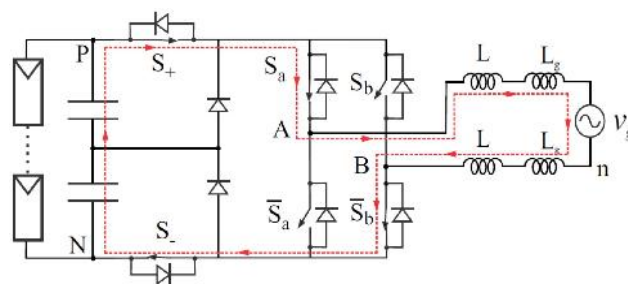


Figura 17 - Conversor FBDC.

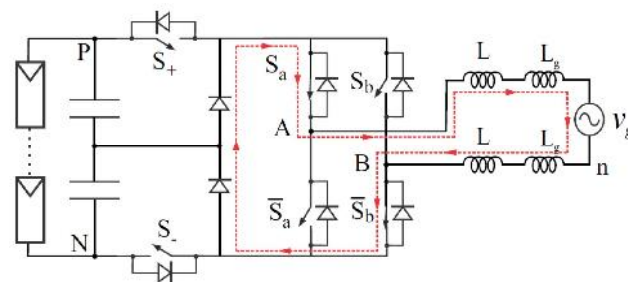
Para esse conversor, durante o semiciclo positivo, as chaves S_a e \bar{S}_b conduzem, juntamente com S_+ e S_- e a tensão V_{PN} é aplicada na saída do conversor. Em seguida, apenas S_a e \bar{S}_b estão ligadas com a corrente circulando também pelos diodos de *bypass* e tensão nula é aplicada na saída do conversor.

No semiciclo negativo da tensão da rede, as chaves S_b e \bar{S}_a conduzem, juntamente com S_+ e S_- e a tensão $-V_{PN}$ é aplicada na saída do conversor. Em seguida, apenas S_b e \bar{S}_a estão conduzindo com a corrente circulando pelos diodos de *bypass* e tensão nula é aplicada na saída do conversor.

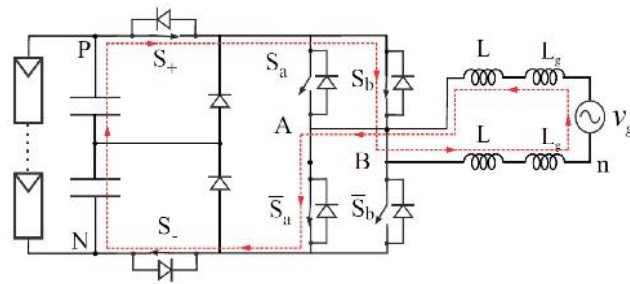
A Figura 18 apresenta as etapas de funcionamento do conversor FBDC.



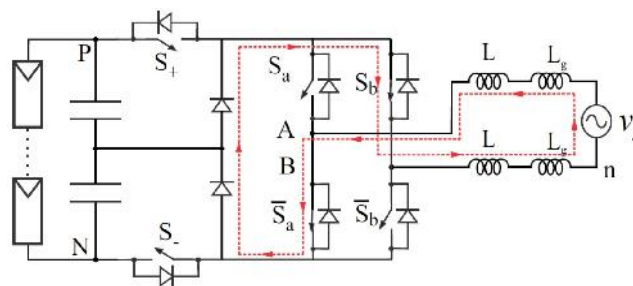
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 18 - Etapas de operação do conversor FBDC. (a) e (b) Semiciclo positivo; (c) e (d) Semiciclo negativo. Fonte: adaptado de [25].

Dessa forma, S_+ e S_- são chaveadas em alta frequência e S_a , \bar{S}_a , S_b e \bar{S}_b são chaveadas na frequência da rede.

A máxima eficiência já apresentada para um protótipo FBDC de 5 kW com tensão de entrada de 350 V_{PN} é de 97,4% [24].

4.5 CONVERSOR REFU

Essa topologia, como também a H5, HERIC e FB-DC, convertem os dois níveis do conversor em ponte completa em um conversor de três níveis.

A Figura 19 apresenta a estrutura do conversor em ponte completa com conexão no neutro - REFU.

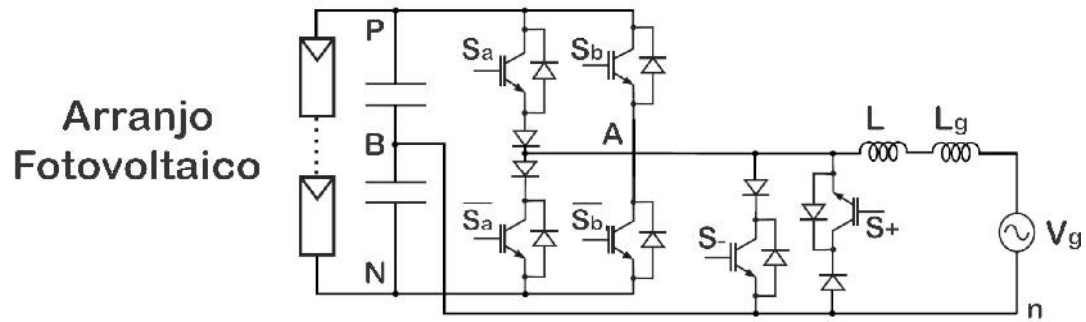


Figura 19 - Conversor REFU.

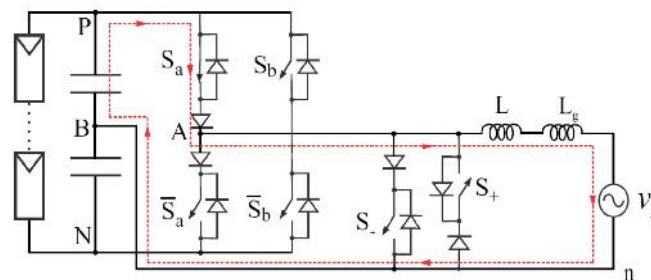
Para essa topologia, S_a e \bar{S}_a são chaveadas em alta frequência, enquanto que S_+ e S_- são chaveadas na frequência da rede.

Durante o semiciclo positivo da tensão, S_a e S_+ estão ligadas e a tensão $V_{PN}/2$ é aplicada na saída do inversor. Em seguida, apenas a chave S_+ conduz a corrente que circula pelo diodo em série com S_+ e uma tensão nula é aplicada na saída.

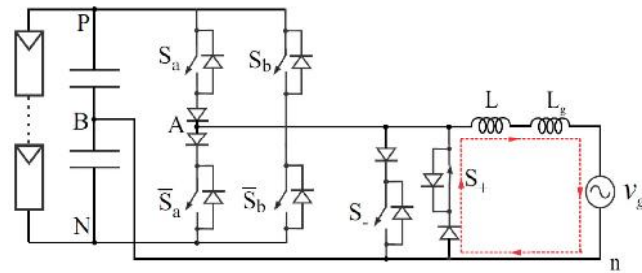
Durante o semiciclo negativo, \bar{S}_a e S_- conduzem e a tensão $-V_{PN}/2$ é aplicada na saída do inversor. Em seguida, apenas a chave S_- conduz a corrente que circula pelo diodo em série com S_+ e uma tensão nula é aplicada na saída.

As chaves S_b e \bar{S}_b só são chaveadas quando a tensão do arranjo PV é menor que a tensão da rede elétrica. Para este caso, existem conversores c.c-c.c elevadores de tensão que trabalham em conjunto com as chaves [25].

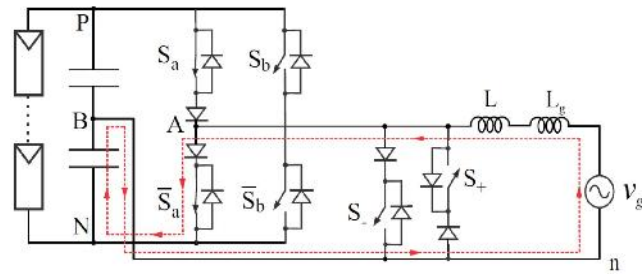
A Figura 20 apresenta as etapas de funcionamento do conversor REFU.



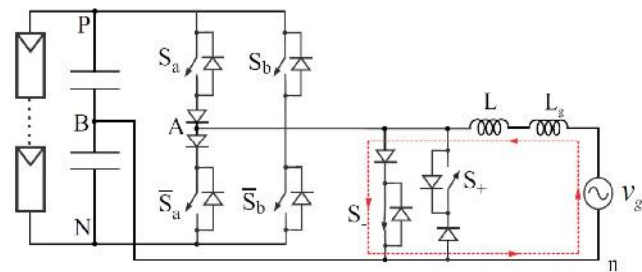
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 20 - Etapas de funcionamento do conversor REFU. (a) e (b) Semiciclo positivo; (c) e (d) Semiciclo negativo. Fonte: adaptado de [25].

Tanto o conversor REFU quanto o HERIC usam bypass c.a, mas HERIC usa duas chaves em série e REFU usa duas chaves em antiparalelo. Portanto, as perdas de condução no bypass c.a são menores para a topologia REFU. As topologias H5 e REFU têm eficiência um pouco maior porque eles têm apenas uma chave trabalhando em alta frequência enquanto HERIC e FB-DC têm duas [25].

4.6 CONVERSOR PROPOSTO POR GUO *et al*

Esta topologia foi proposta por [35] e é bastante parecida com o conversor ponte completa trifásico, mas modificado para possibilitar uma redução da corrente de dispersão.

A Figura 21 apresenta a estrutura deste conversor.

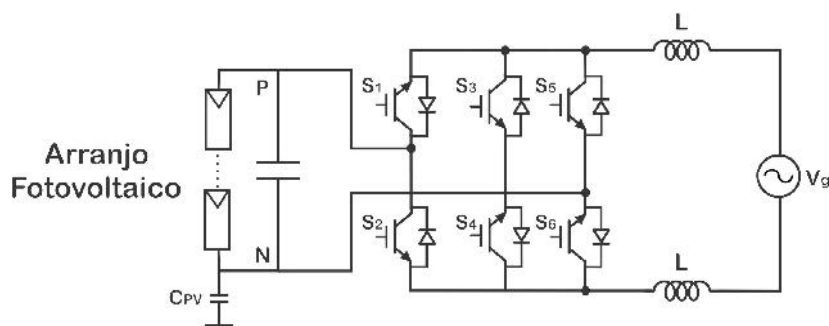


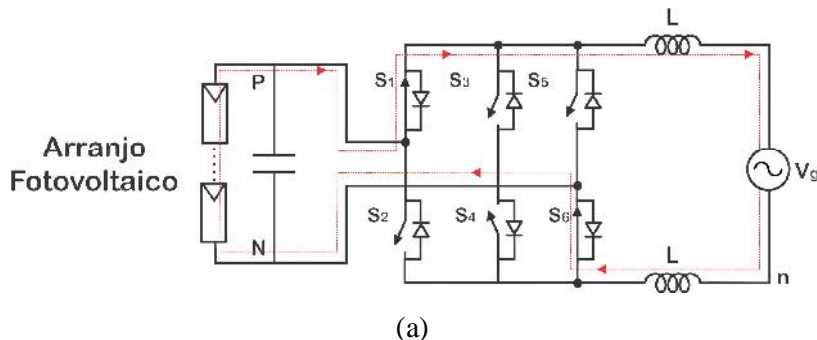
Figura 21 - Conversor proposto por Guo *et al*.

Para esta topologia, durante o semiciclo positivo da tensão, as chaves S_1 e S_6 estão ligadas e a tensão no capacitor parasita C_{PV} é igual a tensão na indutância L_2 , que é a metade da tensão de entrada ($V_{PN}/2$). Por outro lado, quando o diodo da chave S_3 e a chave S_4 estão conduzindo, a tensão no capacitor parasita incrementa a metade da tensão da rede V_g , até alcançar o valor de $(V_{PN}/2 - V_g/2)$.

Para o semiciclo negativo, as chaves S_5 e S_2 estão conduzindo e a tensão no capacitor parasita volta a ser igual a $V_{PN}/2$. Em seguida, apenas a chave S_3 e o diodo de S_4 conduzem e a tensão no capacitor parasita é $(V_{PN}/2 + V_g/2)$.

Como a tensão no capacitor parasita durante todas as etapas de operação está livre de componentes de alta frequência, a corrente de dispersão é reduzida.

A Figura 22 apresenta as etapas de funcionamento deste conversor.



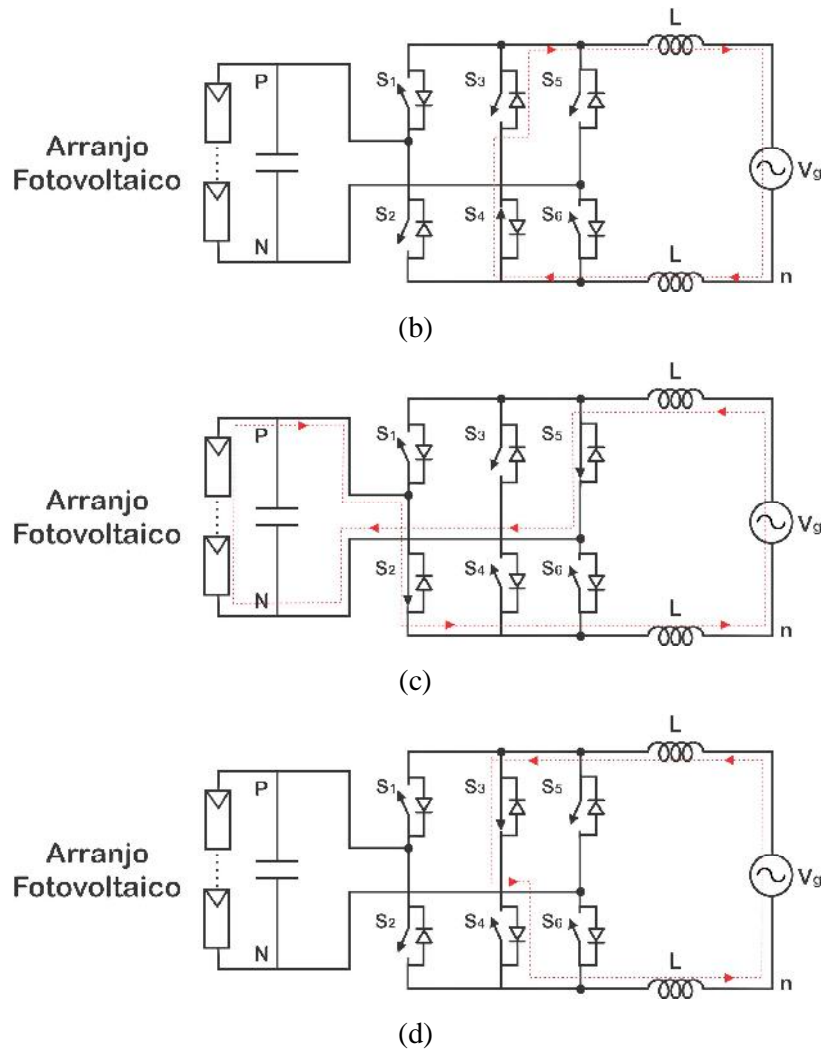


Figura 22 - Etapas de funcionamento do conversor proposto por Guo *et al.* (a) e (b) Semiciclo positivo; (c) e (d) Semiciclo negativo.

5 CONVERSORES MULTINÍVEIS MONOFÁSICOS

As topologias multiníveis são baseadas em um arranjo especial de semicondutores e componentes passivos de forma que três ou mais níveis discretos de tensão contínua são obtidos na saída do conversor [11].

Essas topologias têm sido intensamente utilizadas em aplicações de alta potência [36] e graças à redução de custos com relação aos semicondutores [37] [38], as topologias multiníveis têm sido recentemente utilizadas também em aplicações de baixa potência sem transformador [11].

Um inversor multinível traz muitas vantagens como, por exemplo, um controle com *Maximum Power Point Tracking* (Rastreamento do Ponto de Máxima Potência - MPPT) mais eficiente para os módulos PV, melhoramento da qualidade da onda de saída com menos componentes harmônicas e menos estresses nas chaves [17].

5.1 CONVERSOR NPC MONOFÁSICO

A topologia *Neutral Point Clamped* (NPC) foi desenvolvida no início da década de 1980 visando originalmente o acionamento de motores de indução [23].

Este conversor elimina problemas com correntes de dispersão, pois possibilita o aterramento do ponto central do arranjo fotovoltaico. Todavia, este arranjo deve ter o dobro de painéis de um inversor em ponte completa, além de drenar corrente por apenas meio ciclo de cada um dos conjuntos que compõem a metade do arranjo [22].

A Figura 23 apresenta o conversor NPC monofásico.

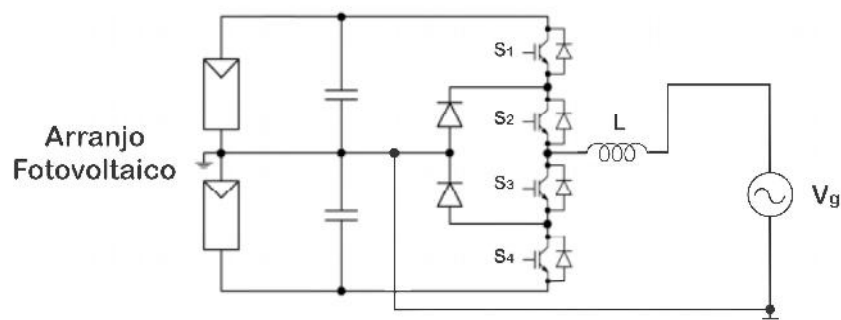


Figura 23 - Conversor NPC Monofásico.

Com o chaveamento simultâneo das chaves S_1 e S_2 , quem tem S_3 e S_4 como complementares, uma tensão positiva é criada na saída do inversor. Uma tensão nula é obtida através do chaveamento de S_2 e S_3 e uma tensão negativa é criada a partir do chaveamento de S_3 e S_4 , respectivamente. Os diodos têm a função de grampear a saída do inversor a terra durante os estados de tensão nula.

Para que a potência seja transferida dos painéis para a rede, as tensões em cada capacitor devem sempre ser maiores que o valor de amplitude da tensão da rede [21].

Uma vantagem desse sistema é a de que o ponto médio dos painéis fotovoltaicos pode ser aterrado, o que elimina as correntes de dispersão capacitivas e suas influências na compatibilidade eletromagnética do circuito [21] [30].

A este conversor podem ser acrescentados mais níveis na tensão de saída a partir da adição de mais chaves, diodos e fontes c.c.

5.2 CONVERSOR FC MONOFÁSICO

A topologia *Flying Capacitor* (FC) foi apresentada e desenvolvida ao longo da década de 90.

Assemelha-se ao conversor NPC, diferenciando através da troca dos diodos pelo capacitor de grampeamento. As chaves, como para o NPC, são pares complementares, dispostas diferentemente da topologia anterior.

A Figura 24 apresenta o conversor FC monofásico.

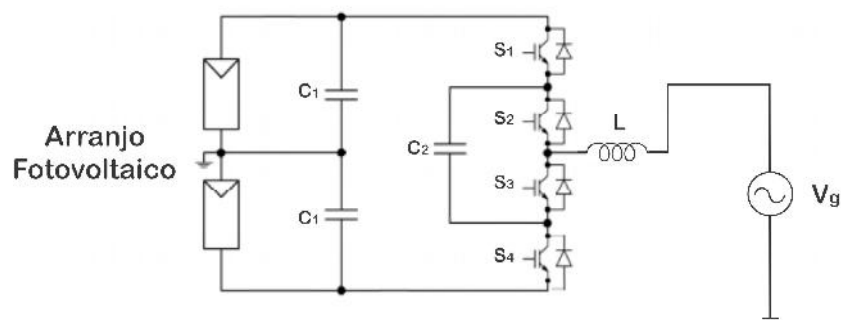


Figura 24 - Conversor FC Monofásico.

Para essa topologia, a tensão no capacitor C_2 deve ser menor ou igual a $V_{PN}/2$.

6 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Para a obtenção dos resultados, as simulações foram realizadas em ambiente Matlab/Simulink®. Foram utilizados os seguintes parâmetros de simulação:

- Fonte contínua de 700 V (V_{PN});
- Frequência de chaveamento: 10 kHz;
- Indutâncias do filtro e da rede: $L = 0,1$ mH e $L_g = 0,8$ mH;
- Frequência da rede elétrica: 60 Hz;
- Amplitude de tensão da rede elétrica: 220 V_{eficaz};
- Capacitância parasita dos módulos: $C_{PV} = 220$ nF;

6.1 CONVERSOR EM PONTE COMPLETA MONOFÁSICO

O circuito utilizado para a simulação deste conversor é apresentado na Fig. 25.

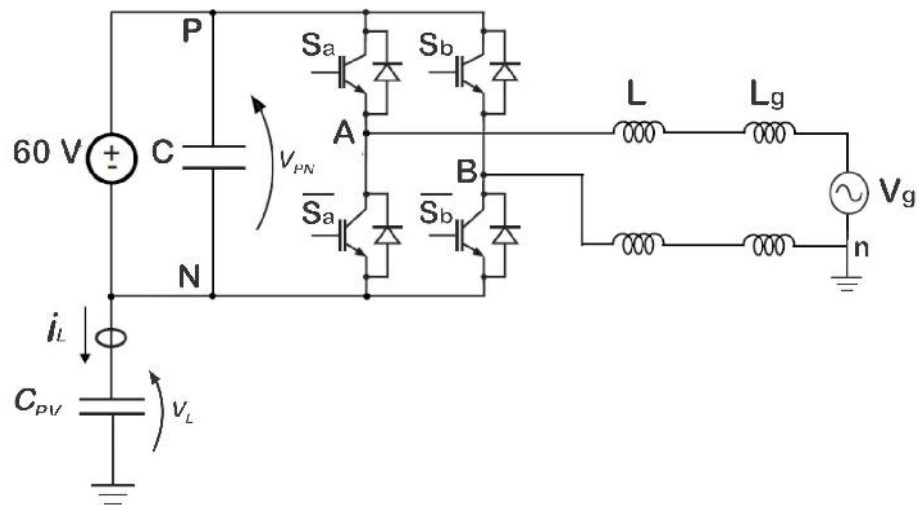
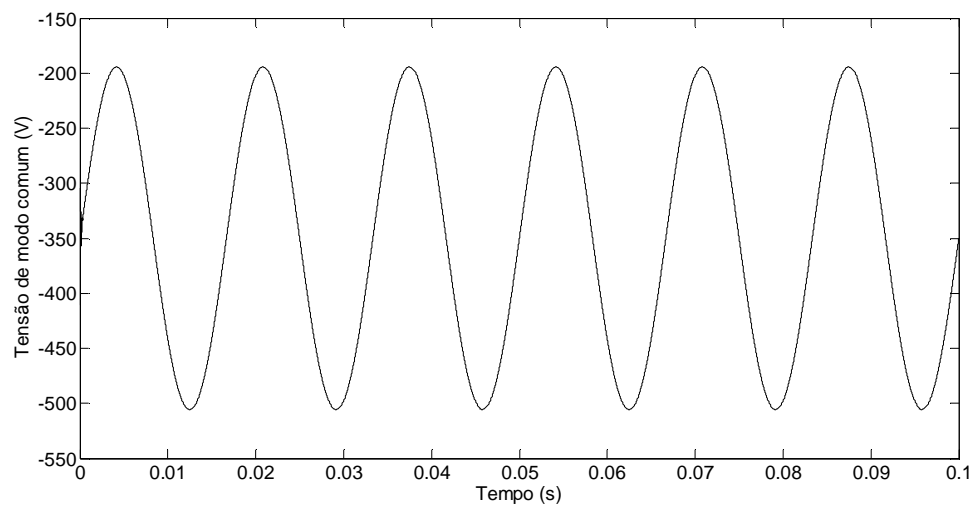
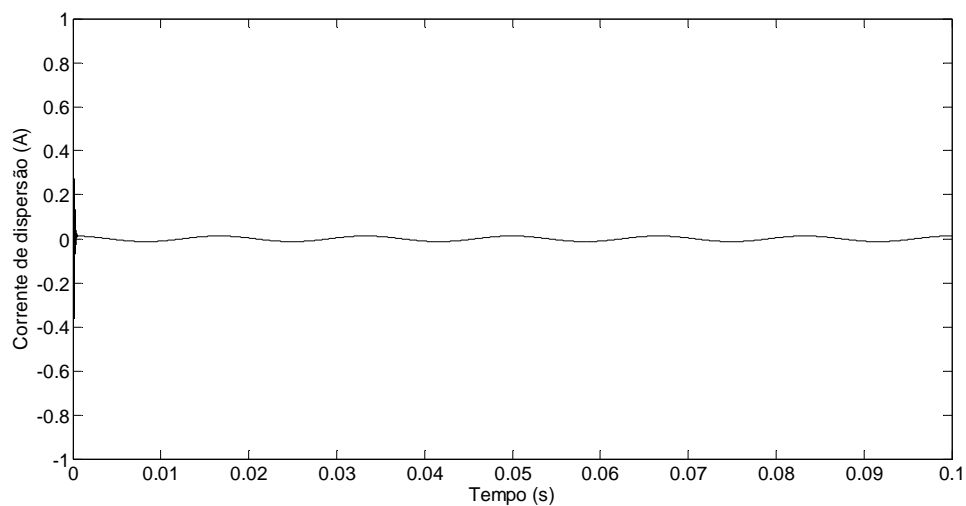


Figura 25 - Circuito utilizado para a simulação do conversor em ponte completa monofásico. Fonte: adaptado de [25].

Os resultados de simulação para o conversor em ponte completa monofásico operando com chaveamento bipolar e unipolar, respectivamente, são apresentados a na Fig. 26 e Fig. 27.

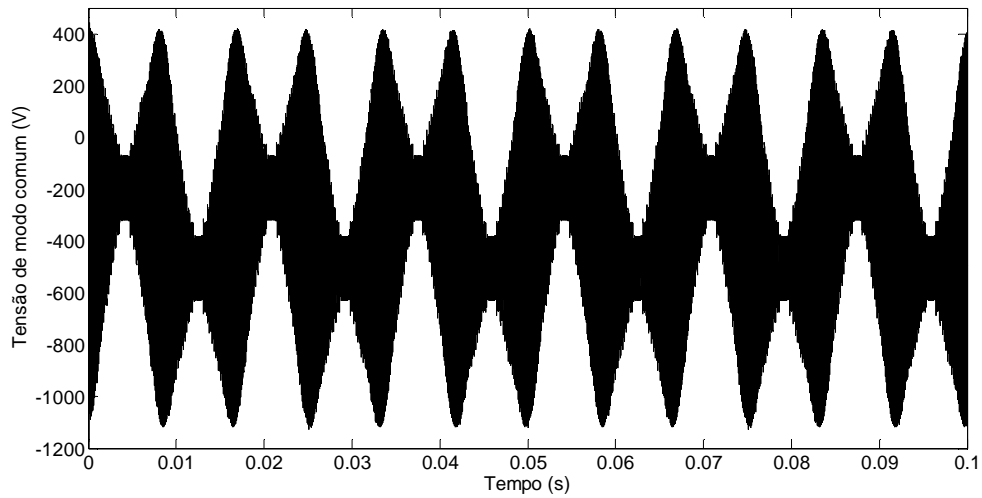


(a)

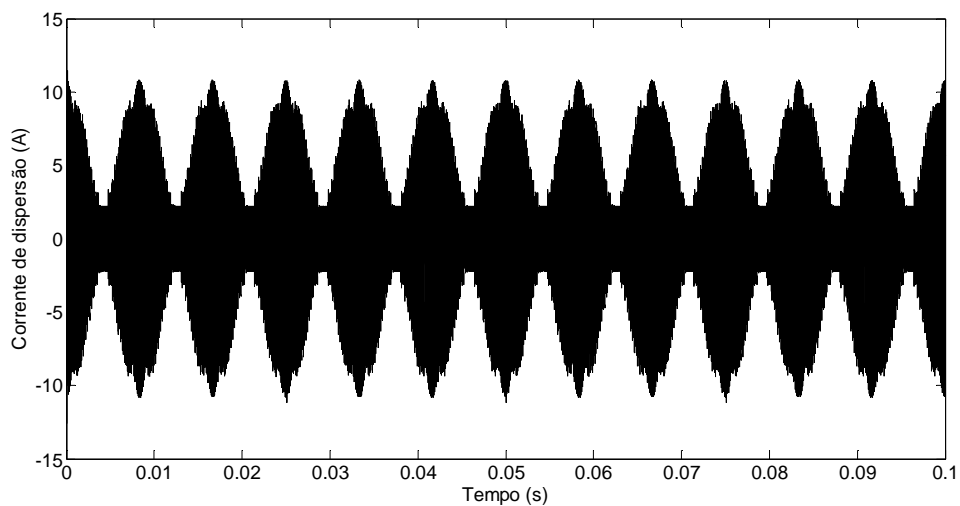


(b)

Figura 26 - (a) Tensão e (b) corrente de dispersão no conversor em ponte completa com chaveamento bipolar.



(a)



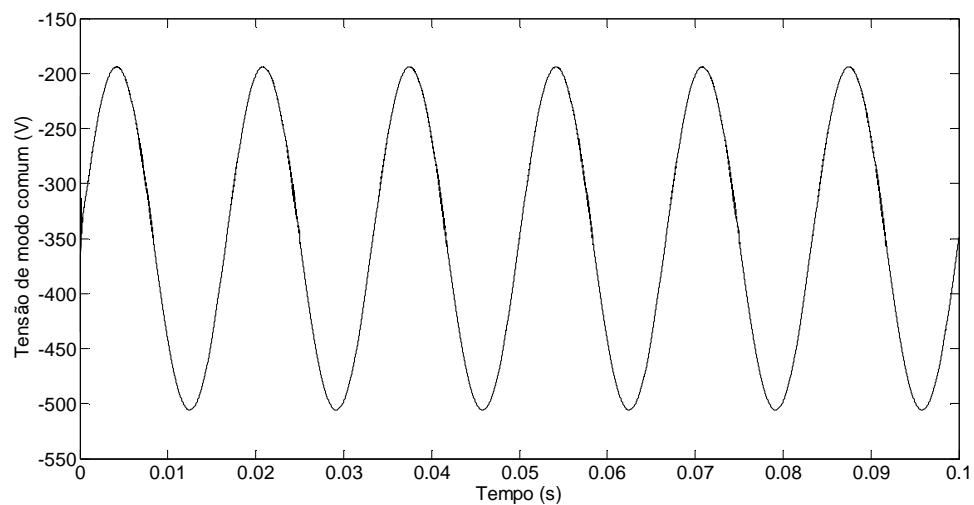
(b)

Figura 27 - (a) Tensão e (b) corrente de dispersão no conversor em ponte completa com chaveamento unipolar.

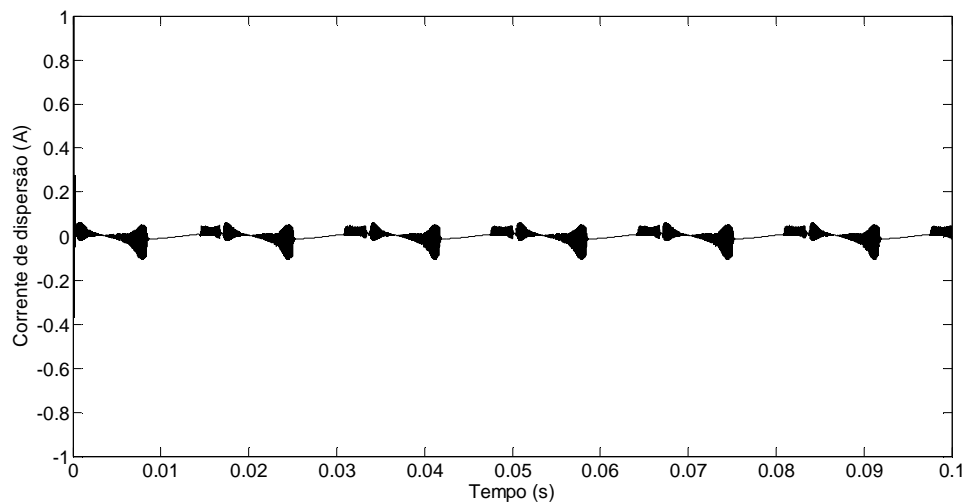
A estratégia de modulação utilizada nos inversores tem a principal influência na tensão do capacitor parasita e, portanto na corrente de dispersão. Em um estudo recente [21], foi observado que utilizando a modulação unipolar (três níveis) em comparação com a modulação bipolar (dois níveis), a amplitude da corrente parasita é mais elevada [14], ultrapassando os limites da norma VDE-0126-1-1. Os resultados expostos acima validam esse fato.

6.2 CONVERSOR H5

Os resultados de simulação para o conversor H5 referentes a tensão de modo comum e corrente de dispersão são apresentados na Fig. 28.



(a)



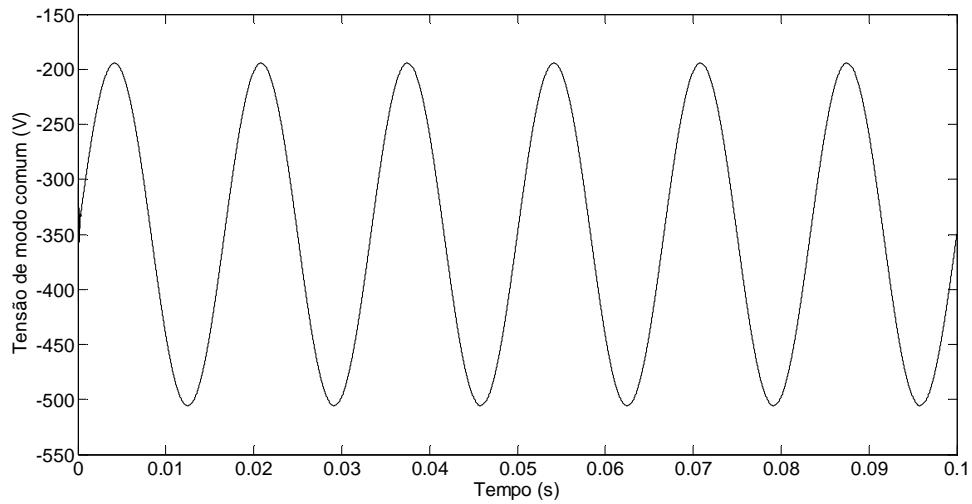
(b)

Figura 28 - (a) Tensão e (b) corrente de dispersão no conversor H5.

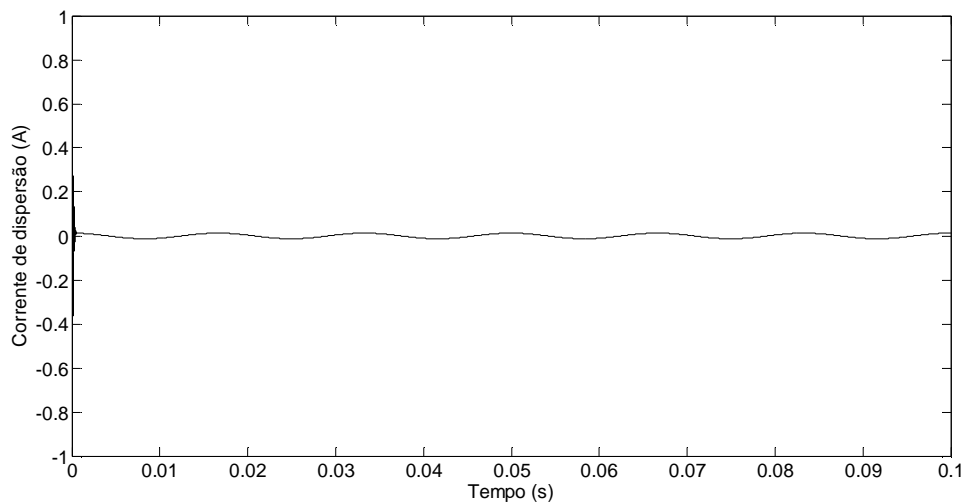
O conversor H5 apresentou tensão de modo comum senoidal e corrente de dispersão nula.

6.3 CONVERSOR HERIC

Os resultados de simulação para o conversor HERIC referentes a tensão de modo comum e corrente de dispersão são apresentados na Fig. 29.



(a)



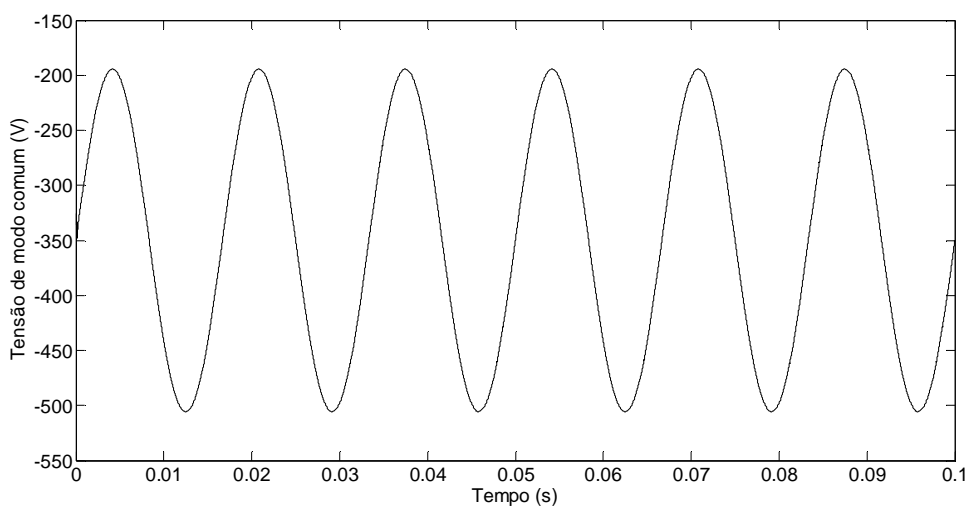
(b)

Figura 29 - (a) Tensão e (b) corrente de dispersão no conversor HERIC.

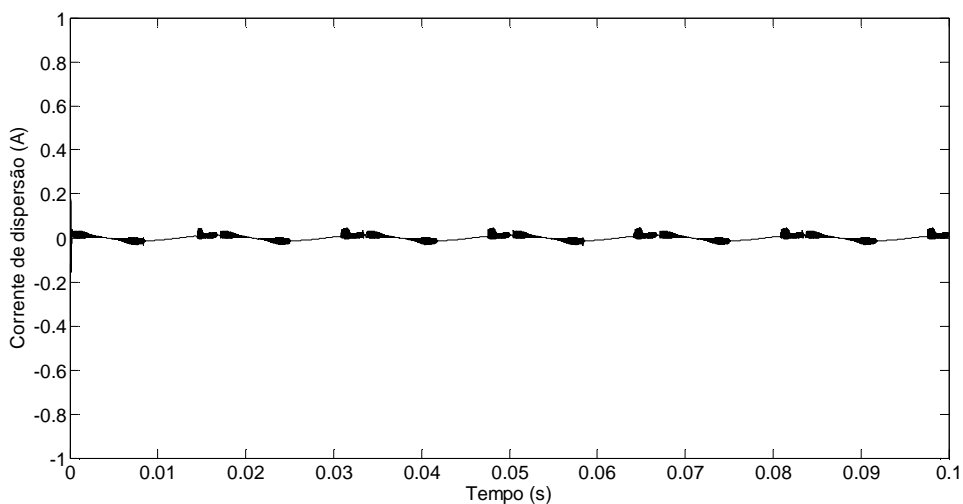
O conversor HERIC apresentou tensão de modo comum senoidal e corrente de dispersão nula.

6.4 CONVERSOR FBDC

Os resultados de simulação para o conversor FBDC referentes a tensão de modo comum e corrente de dispersão são apresentados na Fig. 30.



(a)



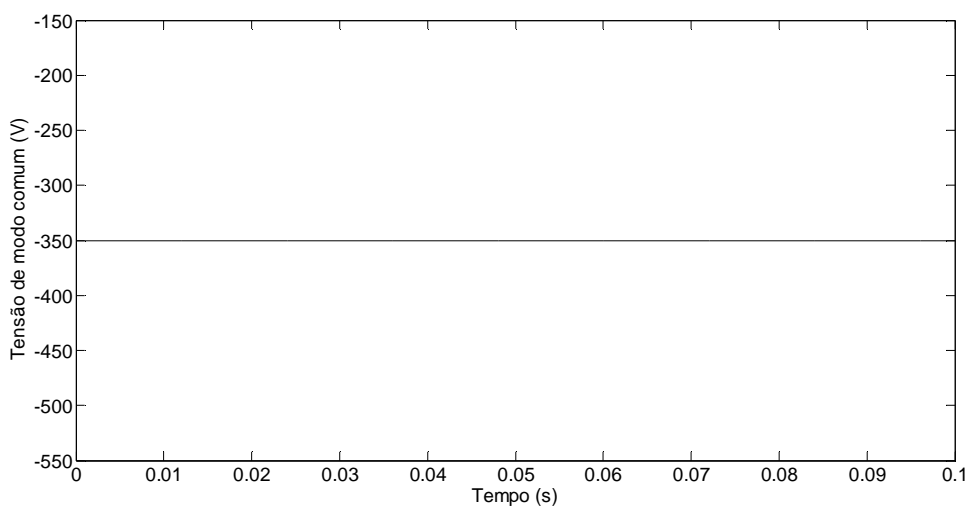
(b)

Figura 30 - (a) Tensão e (b) corrente de dispersão no conversor FBDC.

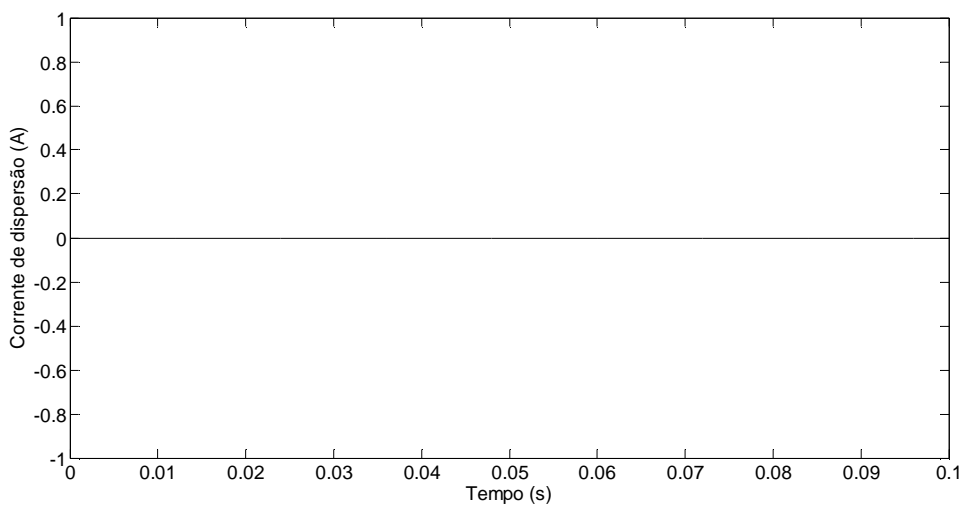
O conversor FBDC apresentou tensão de modo comum senoidal e corrente de dispersão nula.

6.5 CONVERSOR REFU

Os resultados de simulação para o conversor REFU referentes a tensão de modo comum e corrente de dispersão são apresentados na Fig. 31.



(a)



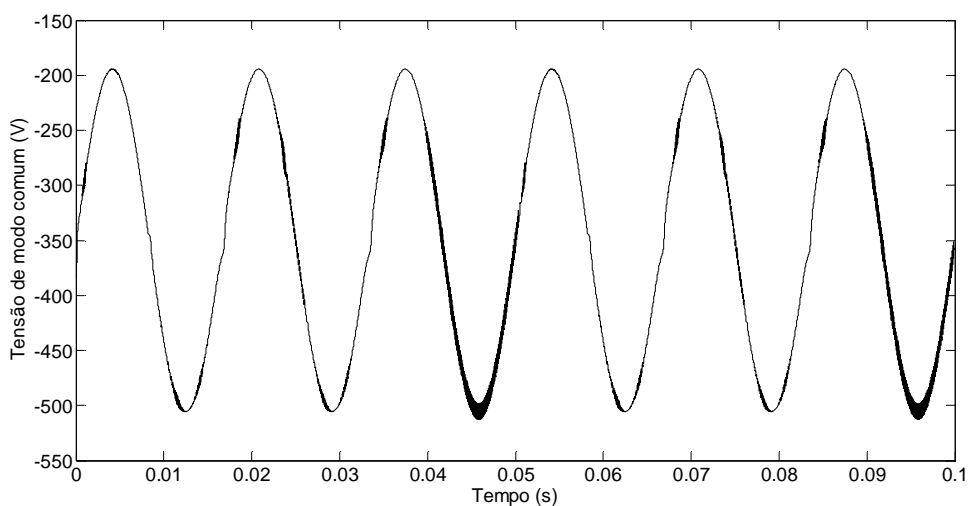
(b)

Figura 31 - (a) Tensão e (b) corrente de dispersão no conversor REFU.

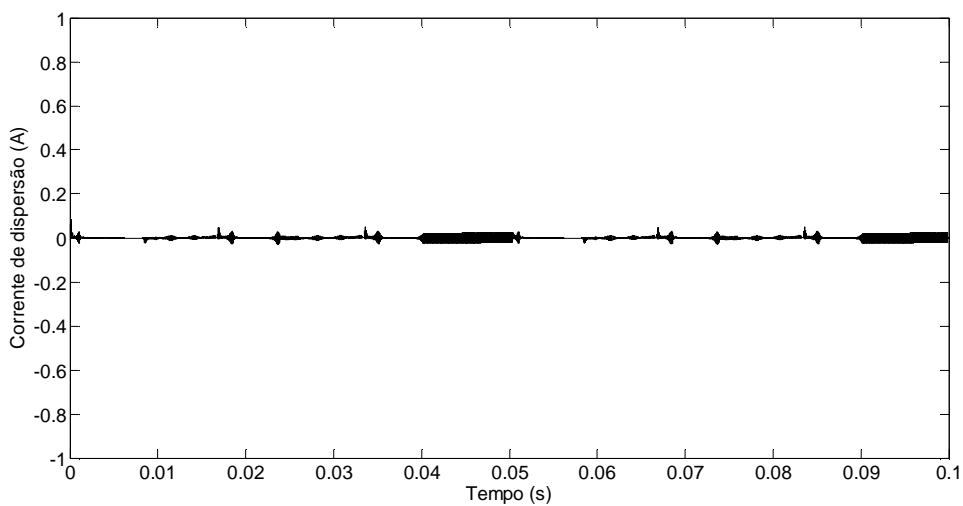
O conversor REFU apresentou tensão de modo comum constante e corrente de dispersão nula.

6.6 CONVERSOR PROPOSTO POR GUO *et al*

Os resultados de simulação para este conversor referentes a tensão de modo comum e corrente de dispersão são apresentados na Fig. 32.



(a)



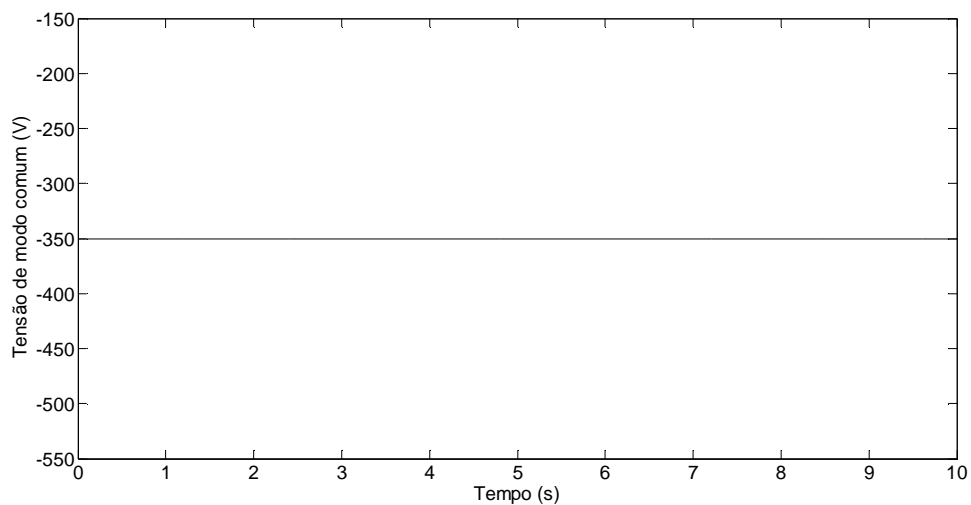
(b)

Figura 32 - (a) Tensão e (b) corrente de dispersão para o conversor proposto por Guo *et al*.

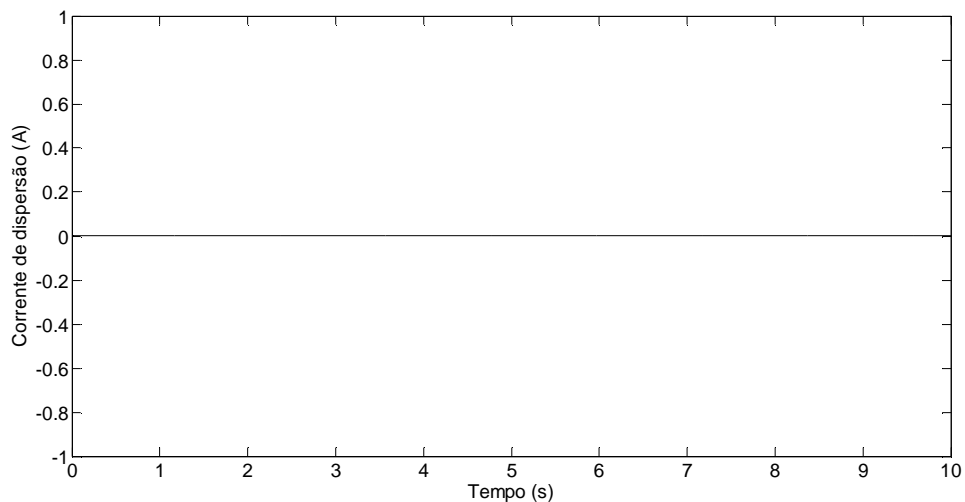
O conversor proposto por GUO *et al* apresentou tensão de modo comum senoidal e corrente de dispersão nula.

6.7 CONVERSOR NPC MONOFÁSICO

Os resultados de simulação para este conversor referentes a tensão de modo comum e corrente de dispersão são apresentados na Fig. 33.



(a)



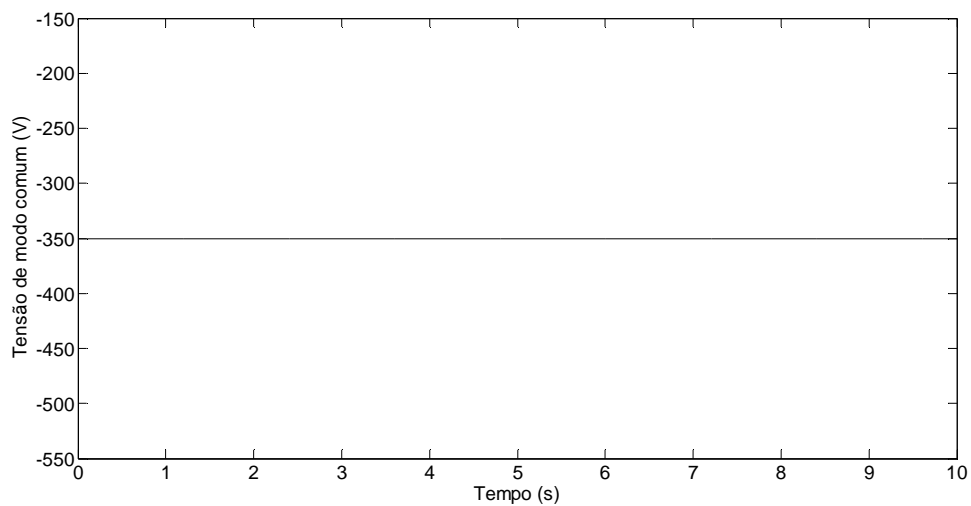
(b)

Figura 33 - (a) Tensão e (b) corrente de dispersão para o conversor NPC monofásico.

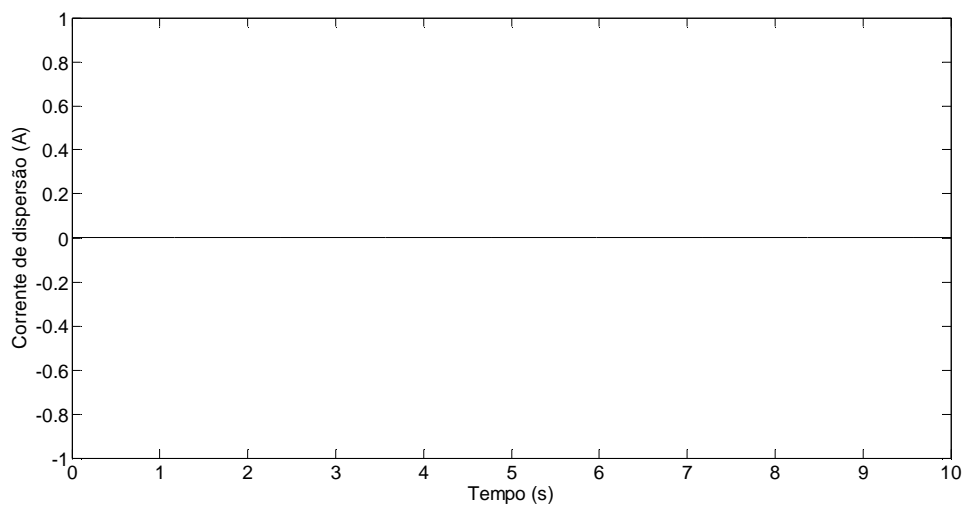
O conversor NPC apresentou tensão de modo comum constante e corrente de dispersão nula.

6.8 CONVERSOR FC MONOFÁSICO

Os resultados de simulação para o conversor FC monofásico referentes a tensão de modo comum e corrente de dispersão são apresentados na Fig. 34.



(a)



(b)

Figura 34 - (a) Tensão e (b) corrente de dispersão para o conversor FC monofásico.

O conversor FC apresentou tensão de modo comum constante e corrente de dispersão nula.

7 CONCLUSÕES

Com o crescimento do consumo, aumenta-se a dependência por energia elétrica procedente de fontes térmicas convencionais, que utilizam como fonte de energia os combustíveis fósseis.

Analisando o potencial de fontes alternativas de energia, vemos que estas têm capacidade de suprir parte da demanda de energia existente e também atender comunidades mais isoladas que não são atendidas pelas linhas de transmissão.

As facilidades de um sistema fotovoltaico, tais como: baixo custo de manutenção e vida útil longa faz com que estes se desenvolvam e popularizem cada vez mais, não apenas para sistemas isolados, mas também para sistemas de geração de energia elétrica interligados à rede elétrica, que podem utilizar ou não transformadores para isolação galvânica.

Nos sistemas sem transformador alguns problemas podem aparecer como corrente de dispersão pelo painel. Esta corrente pode alcançar valores elevados em certas condições de operação e problemas como interferência eletromagnética, distorção na corrente da rede e perdas adicionais no sistema.

A escolha de topologias adequadas de conversores c.c-c.a para aplicações em sistemas fotovoltaicos, assim como diferentes estratégias de modulação, pode minimizar ou atenuar os problemas relacionados à corrente de dispersão.

Dessa forma, este trabalho apresentou algumas das principais topologias de conversores utilizadas para aplicações em sistemas fotovoltaicos monofásicos conectados à rede sem o uso de transformador.

Para a topologia em ponte completa monofásica, o tipo de modulação tem a principal influência na tensão do capacitor parasita e, portanto na corrente de dispersão. Com a modulação unipolar, a corrente de dispersão ultrapassou o limite descrito pela norma alemã VDE-0126-1-1.

Dentre as topologias que derivam da ponte completa monofásica, possuindo adição de chaves, todas apresentaram corrente de dispersão com valor abaixo ao menor valor da norma ou valores nulos.

A topologia com menor número de adição de componentes é a H5, com apenas uma chave a mais que a ponte completa monofásica.

A topologia REFU é a topologia derivada da ponte completa com maior número de componentes adicionados, sendo duas chaves e quatro diodos a mais. Ainda assim, apresentou resultados como corrente de dispersão nula e tensão de modo comum constante em $V_{PN}/2$.

A topologia NPC, destaca-se, sendo uma boa opção para sistemas sem transformador devido ao aterramento em seu ponto médio, o que minimiza as flutuações de tensão presentes nos terminais do módulo fotovoltaico. Por outro lado, deve ter o dobro de arranjos de painéis fotovoltaicos de um conversor ponte completa, drenando corrente por apenas meio ciclo de cada um dos conjuntos que compõe a metade do arranjo.

A topologia FC e também a NPC apresentam uma limitação para a aplicação em sistemas PV, uma vez que diferenças nas tensões dos módulos ocasionam problemas para essas configurações. Sendo a topologia FC bastante prejudicada quando há uma variação brusca de tensão c.c, causando grandes transitórios.

Todas as topologias, com exceção da ponte completa com modulação unipolar, atendem aos limites descritos pela norma VDE-0126-1-1, apresentando-se como boas escolhas para aplicações em sistemas fotovoltaicos conectados à rede sem transformador. Mais especificamente, as topologias NPC, FC, REFU, HERIC e o conversor em ponte completa com modulação bipolar apresentaram os melhores resultados.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Demanda de energia 2050**. Rio de Janeiro, 2014
- [2] MANCISIDOR, A. I. M., et al. **European Union's renewable energy sources and energy efficiency policy review: the Spanish perspective**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009.
- [3] ELTAWIL, M. A., ZHAO, Z. **Grid-connected photovoltaic power systems: technical and potential problems—a review**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010.
- [4] ZHAO, Z. **High efficiency single-stage grid-tied PV inverter for renewable energy system**. Thesis (PhD), Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, 2012.
- [5] KOUTROULIS, E., BLAABJERG, F. **Methodology for the optimal design of transformerless grid-connected PV inverters**. IET Power Electron, 2012.
- [6] PINHO, J. T., GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Grupo de trabalho de energia solar, Rio de Janeiro, 2014.
- [7] ESPOSITO, A. S., FUCHS, P. G. **Desenvolvimento tecnológico e inserção da energia solar no Brasil**. Disponível em: <http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/revista/rev4003.pdf>. Acesso em: 12. mai.2016.
- [8] CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO. **Energia solar: princípios e aplicações**. Rio de Janeiro, 2006.
- [9] CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO. **Tutorial: energia solar**. Rio de Janeiro, 2008.
- [10] OLIVEIRA, K. C. **Avaliação da conversão da energia fotovoltaica em sistemas isolados**. Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.
- [11] PATRAO, I., et al. **Transformerless topologies for grid-connected single-phase photovoltaic inverters**. Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011.
- [12] GAVILÁN, E. J. M. **Estudo da influencia de diferentes modulações na tensão de modo comum e eficiência de inversor monofásico aplicado ao processamento de energia solar fotovoltaica**. Trabalho de conclusão de curso – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2013.

- [13] ROLLIER, S., RICHARD, B., KELLER, M. **Earth leakage control in solar inverters**. Power System Design Europe, 2005.
- [14] KEREKES, T., TEODORESCU, R., LISERRE, M. **Common Mode Voltage in case of Transformerless PV Inverters Connected to the Grid**. IEEE International symposium on industrial electronics, 2008.
- [15] ZILLES, Roberto et al. **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica**. São Paulo: Editora de textos, 2012.
- [16] RENEWABLE GLOBAL STATUS REPORT. **Renewable energy policy network for the 21st century**. Disponível em: <<http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/Public/46/105/46105561.pdf>>. Acesso em: 10.mai.2016.
- [17] FARIAS, A. M. **Técnicas de modulação para inversores fotovoltaicos sem transformador conectados à rede elétrica**. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011.
- [18] ISHIKAWA, T. **Grid connected photovoltaic power systems: survey of inverter and related protection equipments**. Agência Internacional de Energia, 2006.
- [19] SCHLUMBERGER, A. **Market survey on inverters 2007**. Photon International, 2007.
- [20] KEREKES, T. **Analysis and modeling of transformerless photovoltaic inverter systems**. Thesis (PhD) – Faculty of Engineering, Science and Medicine, Aalborg University, 2009.
- [21] CALAIS, M., AGELIDIS, V. G., **Multilevel converters for single-phase grid connected photovoltaic systems: an overview**. IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 1998.
- [22] MARANGONI, F. **Inversores monofásicos para conexão de sistemas fotovoltaicos à rede**. Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2012.
- [23] PRIEB, C. W. M. **Determinação da eficiência de seguimento de máxima potência de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede de distribuição**. Tese (doutorado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.
- [24] ISLAM, M., MEKHILEF, S., HASAN, M. **Single phase transformerless inverter topologies for grid-tied photovoltaic system: A review**. Renewable and sustainable energy reviews, 2015.

- [25] OLIVEIRA, K. C. **Conversores de potência para sistemas fotovoltaicos conectados à rede sem transformador.** Tese (doutorado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012.
- [26] GONZÁLEZ, R. et al. **Transformerless Inverter for Single-Phase Photovoltaic Systems.** IEEE Transactions on power electronics, v. 22, n.2, 2007.
- [27] LÓPEZ, O. et al. **Eliminating Ground Current in a Transformerless Photovoltaic Application.** IEEE Transactions on energy conversion, v.25, n.1, 2010.
- [28] LOPEZ, O. et al. **Leakage current evaluation of a single-phase transformerless PV inverter connected to the grid.** 22nd Annual IEEE Applied power electronics conference and exposition, 2007.
- [29] **Automatic disconnection between a generator and the public low-voltage grid.** DIN VDE-0126-1-1, 2006.
- [30] LÓPEZ, O., TEODORESCU, R., DOVAL-GANDOY, J. **Multilevel transformerless topologies for single-phase grid-connected converters.** 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics, 2006.
- [31] VICTOR, M. et al. **US Patent Application.** No. Pub: 2005/0286281 A1, 2005.
- [32] KUMAR, D., SINGH, A. P. S. K. **Comparative Assessment of Leakage current in a Photovoltaic Grid connected Single phase Transformerless Inverter system.** IEEE International conference on recent advances and innovations in engineering, 2014.
- [33] VAZQUEZ G., et al. **Losses and CMV evaluation in transformerless grid-connected PV topologies.** IEEE international symposium on industrial electronics, 2009.
- [34] HANTSCHHEL J. **German Patent Application.** No. Pub: DEI02006010694 A1, 2007.
- [35] GUO, X et al. **New interter topology for ground current suppression in transformerless photovoltaic system application.** Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2014.
- [36] WU B. **High power converters and AC drives.** Wiley, IEEE, 2006.
- [37] DAHER S., SCHMID J., ANTUNES F. L. M. **Multilevel inverter topologies for stand-alone PV systems.** IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008.

- [38] RODRIGUEZ J, JIH-SHENG L, FANG Z.P. **Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2002.