

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

JAIR GENZLER

**ESTUDO COMPARATIVO DE TOPOLOGIAS DE INVERSORES PARA A
CONEXÃO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS COM A REDE ELÉTRICA SEM O USO
DE TRANSFORMADOR**

**Alegrete
2015**

JAIR GENZLER

**ESTUDO COMPARATIVO DE TOPOLOGIAS DE INVERSORES PARA A
CONEXÃO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS COM A REDE ELÉTRICA SEM O USO
DE TRANSFORMADOR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Dr. Felipe Bovolini Grigoletto

**Alegrete
2015**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

G324e

Genzler, Jair

Estudo Comparativo de Topologias de Inversores para a Conexão de Painéis Fotovoltaicos com a Rede Elétrica sem o Uso de Transformador / Jair Genzler.

100 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) --
Universidade Federal do Pampa, ENGENHARIA ELÉTRICA, 2015.

"Orientação: Felipe Bovolini Grigoletto".

1. Inversores Monofásicos. 2. Sistemas Fotovoltaicos.
3. Rede elétrica. 4. Perdas nos Dispositivos
Semicondutores. 5. Corrente de Fuga. I. Título.


JAIR GENZLER

**ESTUDO COMPARATIVO DE TOPOLOGIAS DE INVERSORES PARA A
CONEXÃO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS COM A REDE ELÉTRICA SEM O USO
DE TRANSFORMADOR**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Elétrica da Universidade Federal do
Pampa, como requisito parcial para
obtenção do Título de Bacharel em
Engenharia Elétrica.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 08 de julho de 2015.

Banca examinadora:



Prof. Dr. Felipe Bovolini Grigoletto
Orientador
UNIPAMPA



Prof. Me. Guilherme Sebastião da Silva
UNIPAMPA



Prof. Dr. Giovani Guarienti Pozzebon
UNIPAMPA

Dedico este trabalho aos meus pais que nunca mediram esforços para que este sonho de tornasse real, e que me incentivaram a continuar, apesar das dificuldades encontradas no decorrer desta caminhada.

AGRADECIMENTO

Agradeço, primeiramente, à Consciência Criadora por esta vida e suas oportunidades de aprendizagem. Desta forma, agradeço a todas as pessoas que passaram por minha vida, pois estas, através das experiências trocadas, deram-me a oportunidade de aprender e melhorar como ser humano.

Nesta vida sempre há pessoas que são mais próximas a nós, assim quero agradecer à minha família pelo apoio dado, principalmente aos meus pais, que não mediram esforços, mesmo tendo que abrir mão de algumas coisas, para que esta caminhada chegasse ao fim, sempre me apoiaram, mesmo quando eu próprio não acreditava. Não há dúvidas, sem vocês, eu não teria chegado até aqui, muito obrigado por terem me proporcionado a oportunidade de obter conhecimentos acadêmicos e aprendizados de vida.

Agradeço ao meu colega José D'arays Filho que me estendeu a mão e me deu guarida quando eu mais precisei, graças a sua ajuda é que este momento se tornou possível, a ele e seus familiares agradeço também pela estadia e hospitalidade durante a realização do meu estágio. Quero estender os meus agradecimentos ao colega Alex Itczak pelas ajudas ao longo desta caminhada e na formatação deste trabalho, bem como aos colegas Fernando Santos Garcia e Maikon Makimore pela ajuda e parceria ao longo destes anos. Em fim, agradeço a todos os demais colegas que conviveram comigo e de uma ou outra forma contribuíram para esta conquista.

É claro que eu não poderia deixar de agradecer ao meu orientador Felipe Bovolini Grigoletto pelo apoio e pela compreensão em momentos que eu estava passando por situações difíceis. A disponibilidade, a atenção, as sugestões e contribuições foram fundamentais na elaboração deste trabalho.

“Somos o que pensamos. Tudo o que somos surge com os nossos pensamentos. Com nossos pensamentos, fazemos o nosso mundo”.

Siddhartha Gautama (Buddha).

“A educação é a arma mais poderosa que você pode usar para mudar o mundo”.

Nelson Mandela.

RESUMO

Este trabalho de conclusão de curso apresenta um estudo e uma análise comparativa entre diferentes topologias de inversores monofásicos para a conexão de painéis fotovoltaicos com a rede elétrica, sem uso de transformador. Estas análises foram realizadas com parâmetros de entrada dos inversores para diferentes irradiações solares. A análise dos dados tem por objetivo final a avaliação de qual das topologias estudadas é mais recomendável na utilização de sistemas de geração de energia solar fotovoltaica com interligação à rede elétrica. São levadas em consideração as vantagens e as desvantagens de cada topologia para cada um dos quesitos avaliados.

Palavras-Chave: inversores monofásicos, sistemas fotovoltaicos, rede elétrica, perdas nos dispositivos semicondutores, corrente de fuga.

ABSTRACT

This course conclusion work presents a study and a comparative analysis between different topologies of single-phase inverters for connecting solar panels to the grid without transformer use. Analyzes were conducted on the size of the inductive output filter, the losses in the semiconductor devices, the efficiency and the leakage current. These analyzes will be carried out with input parameters of the inverters for different solar radiations. Data analysis has the ultimate objective assessment of which of the studied topologies is more recommended the use of solar photovoltaic power generation with interconnection to the grid systems. They are taken into account the advantages and disadvantages of each topology for each of the variables evaluated.

Keywords: single-phase inverters, photovoltaic systems, electrical power grid, losses in semiconductor devices, leakage current.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Curvas (a) V_{xI} , (b) V_{xP} , com variação da temperatura	23
Figura 2 – Curvas (a) V_{xI} , (b) V_{xP} , com variação da irradiação.....	24
Figura 3 – Etapas de transição de um dispositivo semiconductor (IGBT), (a) entrada em condução, (b) bloqueio, (c) recuperação reversa do diodo	28
Figura 4 – Capacitância parasita de um painel solar.....	32
Figura 5 – Inversor monofásico com destaque dos pontos A, B e 0	33
Figura 6 – Circuito ressonante sistema PV aterrado	34
Figura 7 – Ilustração da corrente de fuga.....	34
Figura 8 – Topologia do conversor CC/CA Full-Bridge.....	36
Figura 9 – Etapas de funcionamento da topologia Full-Bridge com modulação bipolar, para (a) semiciclo positivo e (b) semiciclo negativo	37
Figura 10 – Modulação Bipolar, (a) comparação entre modulante e portadora, (b) sinal de comando S1 e S4, (c) sinal de comando S2 e S3, (d) tensão V_{AB}	38
Figura 11 – Etapas de funcionamento da topologia Full-Bridge com modulação unipolar, para o semiciclo positivo, (a) $V_{AB} = 0$, (b) $V_{AB} = V_{PV}$, (c) $V_{AB} = 0$, e para o semiciclo negativo, (d) $V_{AB} = 0$, (e) $V_{AB} = -V_{AB}$, (f) $V_{AB} = 0$	40
Figura 12 – Modulação Unipolar, (a) comparação entre modulantes e portadora, (b) sinal de comando S1, (c) sinal de comando S2, (d) sinal de comando S3, (e) sinal de comando S4, (f) tensão V_{AB}	43
Figura 13 – Topologia do conversor CC/CA H5	45
Figura 14 – Etapas de funcionamento da topologia H5, para o semiciclo positivo, (a) $V_{AB} = V_{PV}$, (b) $V_{AB} = 0$, e para o semiciclo negativo, (c) $V_{AB} = -V_{AB}$, (d) $V_{AB} = 0$.	45
Figura 15 – Modulação H5, (a) comparação entre V_{comp} e V_{tri} , (b) sinal de comando S1, (c) sinal de comando S2, (d) sinal de comando S3, (e) sinal de comando S4, (f) sinal de comando S5, (g) tensão V_{AB}	48
Figura 16 – Topologia do conversor CC/CA HERIC.....	50
Figura 17 – Etapas de funcionamento da topologia HERIC, para o semiciclo positivo, (a) $V_{AB} = V_{PV}$, (b) $V_{AB} = 0$, e para o semiciclo negativo, c) $V_{AB} = -V_{AB}$, (d) $V_{AB} = 0$.	51
Figura 18 – Modulação HERIC, (a) comparação entre V_{comp} e V_{tri} , (b) sinal de comando S1 e S4, (c) sinal de comando S2 e S3, (d) sinal de comando S5, (e) sinal de comando S6, (f) tensão V_{AB}	53
Figura 19 – Diagrama de Blocos do sistema de controle	60

Figura 20 – Diagrama de Bode do controlador.....	61
Figura 21 – Diagrama de Bode em malha aberta do sistema de controle.....	61
Figura 22 – Diagrama de Bode em malha fechada do sistema de controle	62
Figura 23 – Seguimento da referência de corrente	63
Figura 24 – Diagrama de blocos do sistema de controle e modulação no Software PSIM.....	64
Figura 25 – Forma de onda da corrente de saída do inversor Full-Bridge com modulação unipolar e sua respectiva THD total	65
Figura 26 – Espectro harmônico do sinal da corrente de saída do inversor Full-Bridge com modulação unipolar	66
Figura 27 – Perdas de condução e comutação no diodo e na chave, com variação da irradiação solar, para a topologia Full-Bridge com modulação Bipolar.....	68
Figura 28 – Perdas totais nos dispositivos semicondutores, com a variação da irradiação solar, para a topologia Full-Bridge com modulação Bipolar.....	69
Figura 29 – Eficiência, com a variação da irradiação solar, para a topologia Full-Bridge com modulação Bipolar.....	70
Figura 30 – Forma de onda da corrente de fuga, com irradiação solar máxima, para a topologia Full-Bridge com modulação Bipolar	71
Figura 31 – Corrente de fuga, com a variação da irradiação solar, para a topologia Full-Bridge com modulação Bipolar.....	71
Figura 32 – Perdas de condução e comutação no diodo e na chave, com variação da irradiação solar, para a topologia Full-Bridge com modulação Unipolar	72
Figura 33 – Perdas totais nos dispositivos semicondutores, com a variação da irradiação solar, para a topologia Full-Bridge com modulação Unipolar	73
Figura 34 – Eficiência, com a variação da irradiação solar, para a topologia Full-Bridge com modulação Unipolar	74
Figura 35 – Forma de onda da corrente de fuga, com irradiação solar máxima, para a topologia Full-Bridge com modulação Unipolar	75
Figura 36 – Corrente de fuga, com a variação da irradiação solar, para a topologia Full-Bridge com modulação Unipolar	76
Figura 37 – Perdas de condução e comutação no diodo e na chave, com variação da irradiação solar, para a topologia H5.....	77
Figura 38 – Perdas totais nos dispositivos semicondutores, com a variação da irradiação solar, para a topologia H5.....	78

Figura 39 – Eficiência, com a variação da irradiação solar, para a topologia H5 ...	79
Figura 40 – Forma de onda da corrente de fuga, com irradiação solar máxima, para a topologia H5	80
Figura 41 – Corrente de fuga, com a variação da irradiação solar, para a topologia H5.....	80
Figura 42 – Perdas de condução e comutação no diodo e na chave, com variação da irradiação solar, para a topologia HERIC	81
Figura 43 – Perdas totais nos dispositivos semicondutores, com a variação da irradiação solar, para a topologia HERIC	82
Figura 44 – Eficiência, com a variação da irradiação solar, para a topologia HERIC	83
Figura 45 – Forma de onda da corrente de fuga, com irradiação solar máxima, para a topologia HERIC.....	84
Figura 46 – Corrente de fuga, com a variação da irradiação solar, para a topologia HERIC	84
Figura 47 – Comparação das perdas por condução, com variação da irradiação solar, entre as topologias Full-Bridge (com modulação bipolar e unipolar), H5 e HERIC	86
Figura 48 – Comparação das perdas por condução, com irradiação solar máxima, entre as topologias Full-Bridge (com modulação bipolar e unipolar), H5 e HERIC	87
Figura 49 – Comparação das perdas por comutação, com variação da irradiação solar, entre as topologias Full-Bridge (com modulação bipolar e unipolar), H5 e HERIC	88
Figura 50 – Comparação das perdas por comutação, com irradiação solar máxima, entre as topologias Full-Bridge (com modulação bipolar e unipolar), H5 e HERIC	89
Figura 51 – Comparação das perdas totais nos dispositivos semicondutores, com variação da irradiação solar, entre as topologias Full-Bridge (com modulação bipolar e unipolar), H5 e HERIC.....	90
Figura 52 – Comparação das perdas totais nos dispositivos semicondutores, com irradiação solar máxima, entre as topologias Full-Bridge (com modulação bipolar e unipolar), H5 e HERIC.....	91
Figura 53 – Comparação da eficiência, com variação da irradiação solar, entre as topologias Full-Bridge (com modulação bipolar e unipolar), H5 e HERIC	92

Figura 54 – Comparação da eficiência, com irradiação solar máxima, entre as topologias Full-Bridge (com modulação bipolar e unipolar), H5 e HERIC	93
Figura 55 – Comparação da corrente de fuga, com variação da irradiação solar, entre as topologias Full-Bridge com modulação bipolar, H5 e HERIC	94
Figura 56 – Comparação da corrente de fuga, com irradiação solar máxima, entre as topologias Full-Bridge com modulação bipolar, H5 e HERIC	94
Figura 57 – Corrente de fuga, com variação da irradiação solar, para a topologia Full-Bridge com modulação unipolar	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Distorção máxima de harmônicas segundo a norma IEEE 1547.....	28
Tabela 2 – Comparação da operação simultânea e frequência de comutação das chaves para as topologias estudadas	55
Tabela 3 – Parâmetros do pinel KC200GT para 55°C	56
Tabela 4 – Parâmetros do sistema fotovoltaico para 55°C.....	59
Tabela 5 – Distorção máxima de harmônicas individuais pela norma IEEE 1547..	65
Tabela 6 – Valores das indutâncias do filtro de saída das topologias estudadas...	85
Tabela 7 – Comparação dos resultados, para os parâmetros estudados, com radiação solar de 1000 W/m ² , entre as topologias	96

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PV	Fotovoltaico – <i>Photovoltaic</i>
CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
MPP	Ponto de Máxima Potência – <i>Maximum Power Point</i>
P-N	Camada Interna da Célula Fotovoltaica
V _{xl}	Curva Tensão x Corrente do Pannel Fotovoltaico.
V _{xP}	Curva Tensão x Potência do Pannel Fotovoltaico.
THD	Distorção Harmônica Total – <i>Total Harmonic Distorcion</i>
I _n	Amplitude da n-ésima Harmônica
I ₁	Amplitude da Fundamental
turn-on	Entrada em Condução do Dispositivo Semicondutor
turn-off	Bloqueio do Dispositivo Semicondutor
IGBT	Transistor Bipolar de Porta Isolada – <i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
E _{ON}	Energia de Entrada em Condução
E _{REC}	Energia de Recuperação do Diodo
E _{OFF}	Energia de Bloqueio
V _{CE}	Tensão Coletor-Emissor
I _{CE}	Corrente Coletor-Emissor
T	Tempo
f _s	Frequência de Comutação
P _{ON}	Perdas de Entrada em Condução
P _{REC}	Perdas de Recuperação do Diodo
P _{OFF}	Perdas de Bloqueio
P _{cmt}	Perdas Totais por Comutação nos Dispositivos Semicondutores
V _{SW} (θ)	Tensão nos Terminais do Tiristor
V _F (θ)	Tensão nos Terminais do Diodo
i _{load} (θ)	Corrente de Carga
M _a	Índice de Modulação
I _{max}	Corrente Máxima do Inversor
φ	Ângulo do Fator de Potência da Carga
V _{ce}	Queda de Tensão na Chave para i _{load} (θ) \neq 0.
R _{ce}	Componente Resistiva de V _{SW} (θ)

V_F	Queda de Tensão no Diodo para $i_{load}(\theta) \neq 0$.
R_F	Componente Resistiva de $V_F(\theta)$
SW_x	Interruptor Genérico
$V_{cmd_{SW_x}}(\theta)$	Sinal de Comando para cada Interruptor SW_x
$P_{cnd.(D)}$	Perdas por Condução no Diodo
$P_{cnd.(S)}$	Perdas por Condução na Chave
P_{cnd}	Perdas Totais por Condução nos Dispositivos Semicondutores
P_{TOTAL}	Perdas Totais nos Dispositivos Semicondutores
C_p	Capacitância Parasita
V_{cm}	Tensão de Modo Comum
V_{A0}	Tensão Aplicada entre o Braço A do Inversor e o Ponto Zero
V_{B0}	Tensão Aplicada entre o Braço B do Inversor e o Ponto Zero
L	Indutância do Filtro de Saída
L_G	Indutância entre a Conexão de Terra do Inversor e da Rede Elétrica
S	Chave
PWM	Modulação por Largura de Pulso – <i>Pulse Width Modulation</i>
V_{AB}	Tensão Aplicada ao Filtro de Saída do Inversor
V_{CC}	Tensão no Barramento CC
V_{PV}	Tensão nos Terminais do Arranjo Fotovoltaico
V_{comp}	Forma de Onda Modulante
V_{tri}	Forma de Onda Triangular
ΔV_0	Diferença entre a Tensão de Saída Ideal e Real do Sistema
Fotovoltaico	
t_{Δ}	Tempo Morto da Chave Semicondutora
V_{CCid}	Tensão CC Ideal no Barramento CC
T_s	Período de Comutação
$V_{CC(min)}$	Tensão Mínima no Barramento CC para o Correto Funcionamento do
Inversor	
V_{rede}	Tensão da Rede Elétrica
$V_{\Delta S}$	Queda de Tensão nas Chaves
N_{mod}	Número de Painéis Fotovoltaicos Conectados em Série
$V_{PV(min)}$	Valor da Tensão de <i>MPP</i> para a Mínima Irradiação Solar
$I_{CA(max)}$	Corrente CA Máxima na Saída do Inversor

G_c (s)	Função de Transferência do Controlador
G_p (s)	Função de Transferência da planta
K_p	Ganho Proporcional do Controlador
K_r	Ganho Ressonante do Controlador
R	Resistência Série do Filtro de Saída
ζ	Constante de Amortecimento
ω_n	Frequência Natural
FTMF	Função de Transferência em Malha Fechada
C_{PV}	Capacitância do Filtro de Entrada do Inversor
$P_{PV(máx)}$	Potência Máxima do Arranjo Fotovoltaico
f_0	Frequência Fundamental
$\Delta V_{CC(máx)}$	Ondulação Máxima da Tensão no Barramento CC
$P_{cmt.(S)}$	Perdas Comutação na Chave
$P_{cmt.(D)}$	Perdas Comutação no Diodo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	20
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 Sistemas Fotovoltaicos	23
2.2 Inversores Monofásicos sem uso de Transformador	25
2.3 THD e Harmônicas Individuais de Corrente	27
2.4 Perdas nos Dispositivos Semicondutores	28
2.4.1 Perdas por Comutação	28
2.4.2 Perdas por Condução	31
2.4.3 Perdas Totais	32
2.5 Corrente Parasita.....	33
2.6 Tensão de Modo Comum.....	33
2.7 Corrente de Fuga.....	35
3 DESCRIÇÃO DO FUNCIONAMENTO DAS TOPOLOGIAS	36
3.1 Full-Bridge (Ponte Completa).....	36
3.1.1 Modulação Bipolar	36
3.1.2 Modulação Unipolar	40
3.2 H5.....	44
3.3 HERIC	50
3.4 Comparação da Frequência de Comutação das Chaves	55
4 DIMENSIONAMENTOS E IMPLEMENTAÇÕES	56
4.1 Dimensionamento do Sistema Fotovoltaico	56
4.2 Implementação do Sistema de Controle	60
4.3 Capacitor de Entrada	64
4.4 Filtro de Saída.....	64
5 ANÁLISE DOS RESULTADOS DE SIMULAÇÃO	67
5.1 Resultados da Topologia Full-Bridge Bipolar.....	67
5.1.1 Tamanho do Filtro de Saída	67
5.1.2 Perdas de Condução e Comutação no Diodo e na Chave	67
5.1.3 Perdas Totais.....	68
5.1.4 Eficiência.....	69
5.1.5 Corrente de Fuga.....	70
5.2 Resultados da Topologia Full-Bridge Unipolar.....	72

5.2.1 Tamanho do Filtro de Saída	72
5.2.2 Perdas de Condução e Comutação no Diodo e na Chave	72
5.2.3 Perdas Totais	73
5.2.4 Eficiência.....	74
5.2.5 Corrente de Fuga.....	74
5.3 Resultados da Topologia H5	76
5.3.1 Tamanho do Filtro de Saída	76
5.3.2 Perdas de Condução e Comutação no Diodo e na Chave	77
5.3.3 Perdas Totais	77
5.3.4 Eficiência.....	78
5.3.5 Corrente de Fuga.....	79
5.4 Resultados da Topologia HERIC.....	81
5.4.1 Tamanho do Filtro de Saída	81
5.4.2 Perdas de Condução e Comutação no Diodo e na Chave	81
5.4.3 Perdas Totais	82
5.4.4 Eficiência.....	82
5.4.5 Corrente de Fuga.....	83
5.5 Comparação entre os Resultados das Topologias	85
5.5.1 Tamanho do Filtro de Saída	85
5.5.2 Perdas por Condução	85
5.5.3 Perdas por Comutação	87
5.5.4 Perdas Totais	89
5.5.5 Eficiência.....	91
5.5.6 Corrente de Fuga.....	93
5.5.7 Análise e Comparação Geral.....	95
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	98
REFERÊNCIAS.....	99

1 INTRODUÇÃO

Um sistema de geração de energia solar fotovoltaica, conectado à rede elétrica é composto pelo sistema de interligação dos módulos fotovoltaicos que são ligados aos conversores estáticos. Pode haver a utilização de conversores *CC/CC*, quando houver a necessidade de elevação da tensão de saída do sistema fotovoltaico e, ou somente, conversores *CC/CA*, que fazem a transformação da energia elétrica gerada (*CC*) em (*CA*) e são ligados à rede elétrica.

A energia gerada pelos painéis fotovoltaicos possui uma característica não linear da corrente e da tensão de saída. Pois, há uma dependência do valor da potência gerada pelos painéis com a irradiação solar incidente na superfície dos mesmos, e da temperatura ambiente. Assim, para cada valor de irradiação solar existe apenas um ponto onde é entregue a máxima potência para a carga, que é denominado *MPP (Maximum Power Point)*. Este ponto de máxima potência pode ser rastreado através de vários algoritmos com este propósito [1].

No que concerne aos inversores, um fator que influencia bastante na eficiência global do sistema são as perdas nos dispositivos semicondutores, estas perdas ocorrem por comutação e condução. Desta forma, este é um quesito de grande importância em sistemas de geração fotovoltaicos (*PV*), pois está diretamente ligado à eficiência global do sistema [10].

Portanto, há várias possibilidades de estudo nesta área, como no processo de comutação a fim de diminuir as perdas nos dispositivos semicondutores, dos conversores *CC/CC* e dos algoritmos de rastreamento da máxima potência, dos painéis e dos módulos fotovoltaicos. Entretanto, este trabalho se delimitará no estudo e comparação entre topologias de inversores monofásicos sem o uso de transformador para a conexão do sistema *PV* à rede elétrica [1]-[3]-[10].

Desta forma, os objetivos deste trabalho referem-se à comparação entre as topologias de inversores monofásicos Full-Bridge, com modulação bipolar e unipolar, H5 e HERIC [2]-[6]-[7]-[8]-[15]-[16] nos quesitos de tamanho do filtro indutivo de saída, da corrente de fuga, das perdas nos dispositivos semicondutores e da eficiência.

A escolha do tema deve-se ao fato de as perspectivas futuras na área de geração de energia solar fotovoltaica serem bastante positivas, e desta forma, a escolha do inversor a ser utilizado torna-se bastante importante, pois o mesmo é

responsável por critérios de atendimento às normas, no tamanho e custo do sistema de geração *PV*, devido ao indutor de saída, e também influencia diretamente na eficiência global do sistema [8].

A metodologia a ser utilizada para a comparação das topologias consiste num estudo referente ao funcionamento das topologias empregadas, na escolha do painel fotovoltaico e no posterior dimensionamento do sistema *PV*. Os pontos de *MPP* para diferentes variações de irradiação e valor de temperatura fixa são inseridos no barramento *CC* do inversor. É realizada a implementação de um sistema de controle da corrente e da tensão de saída do inversor para que este possa operar em malha fechada e conectado à rede elétrica.

Após o dimensionamento do sistema *PV* e da implementação do sistema de controle, são realizadas simulações no Software PSIM com as topologias de inversores monofásico variando-se a tensão de entrada dos mesmos para valores de diferentes irradiações. Após, dimensionado o filtro de saída, são realizadas as simulações para a obtenção das perdas nos dispositivos semicondutores e dos valores das correntes de fuga.

A estrutura do trabalho segue a seguinte conformação: o capítulo 2 faz a abordagem de uma revisão bibliográfica á respeito das perdas nos dispositivos semicondutores, da norma sobre a taxa de distorção harmônica, das capacitâncias parasitas, da tensão de modo comum e da corrente de fuga. O capítulo 3 apresenta a descrição do funcionamento das topologias, o capítulo 4 apresenta o dimensionamento do sistema *PV*, do capacitor de entrada, do filtro de saída e a implementação do sistema de controle. O capítulo 5 refere-se á análise dos resultados experimentais, no capítulo 6 são realizadas as considerações finais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A diversificação das fontes de geração de energia elétrica vem se tornando cada vez mais discutida em todo o mundo. A implementação de fontes de energia renováveis é uma importante alternativa frente às atuais principais fontes, provenientes de combustíveis fósseis, nucleares e hidrelétricas. A energia produzida através da queima de combustíveis fósseis é altamente poluente e é uma energia com custo relativamente elevado quando comparada com as demais fontes de geração. No caso das usinas nucleares há o risco de acontecerem acidentes, além do problema do destino final dos resíduos radioativos produzidos [6]-[16].

A energia proveniente da matriz hidrelétrica, no Brasil, já atingiu a exploração da maior parte do seu potencial nas regiões que não englobam o bioma Amazônia, na região Norte, onde há a predominância deste bioma, ainda há um grande potencial hidrelétrico a ser explorado, mas este potencial é pouco explorado devido aos impactos ambientais, havendo, desta forma, uma grande demora/dificuldade de aprovação dos projetos. Outro problema da geração hidrelétrica é que em períodos de estiagem, fica-se refém do uso das usinas térmicas para suprir a demanda, aumentando o preço da energia elétrica gerada [6]-[16].

Sob estes aspectos, a utilização de fontes de energia eólica e solar adquire uma grande importância na diversificação da matriz energética. Na Alemanha o incentivo e a difusão da geração de energia solar são grandes, sendo a tecnologia desenvolvida no próprio país. No Brasil não houve um incentivo até o momento, o que torna a instalação de um sistema fotovoltaico caro, já que a tecnologia é importada [16]. Mas o panorama está prestes a mudar, o governo deve anunciar medidas que visam reduções tributárias sobre a importação dos painéis fotovoltaicos, fato este que deve alavancar a instalação de sistemas de geração *PV* nos próximos anos.

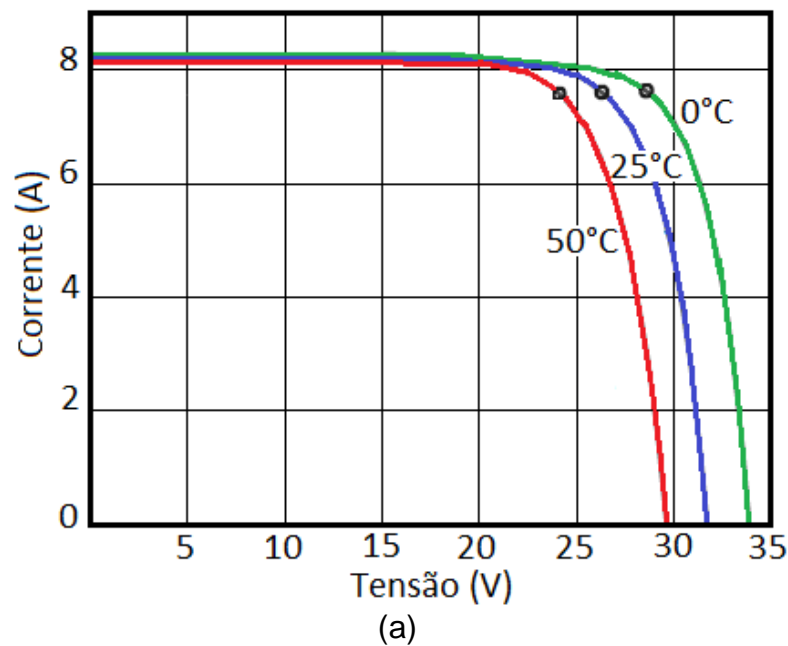
Sendo assim, é de suma importância que a energia *PV* gerada seja de qualidade e eficiente. A utilização de topologias de inversores para a transformação da energia elétrica *CC* gerada pelos painéis em *CA* injetada na rede elétrica está diretamente ligada à eficiência global do sistema, e à qualidade desta energia. Assim, os inversores a serem utilizados desempenham um papel fundamental no sistema geral, sendo de grande valia o estudo e comparação de diferentes

topologias para ver o qual melhor atende a determinados quesitos e condições [7] [14].

2.1 Sistemas Fotovoltaicos

As células fotovoltaicas que compõe os painéis solares possuem características que descrevem os semicondutores, pois são formadas por camada $P-N$, assim, a sua característica $V-I$ não é linear, e são muito dependentes da temperatura e da irradiação solar.

A influência da temperatura afeta o valor máximo das tensões nos terminais de saída do painel. A tensão nos terminais do painel sofre uma pequena redução quando há um aumento da temperatura ambiente. A figura 1 ilustra um exemplo da influência da variação da temperatura nas curvas (a) $V \times I$ e (b) $V \times P$.



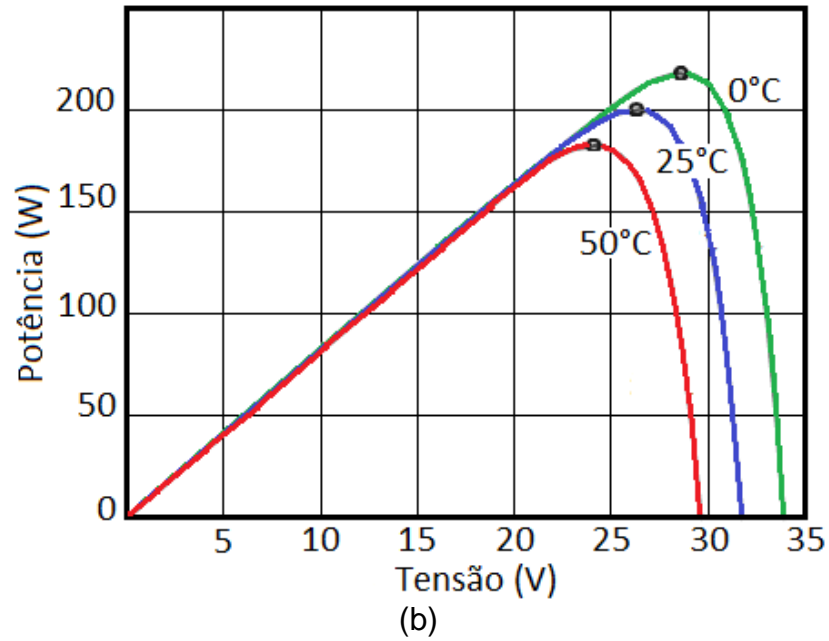
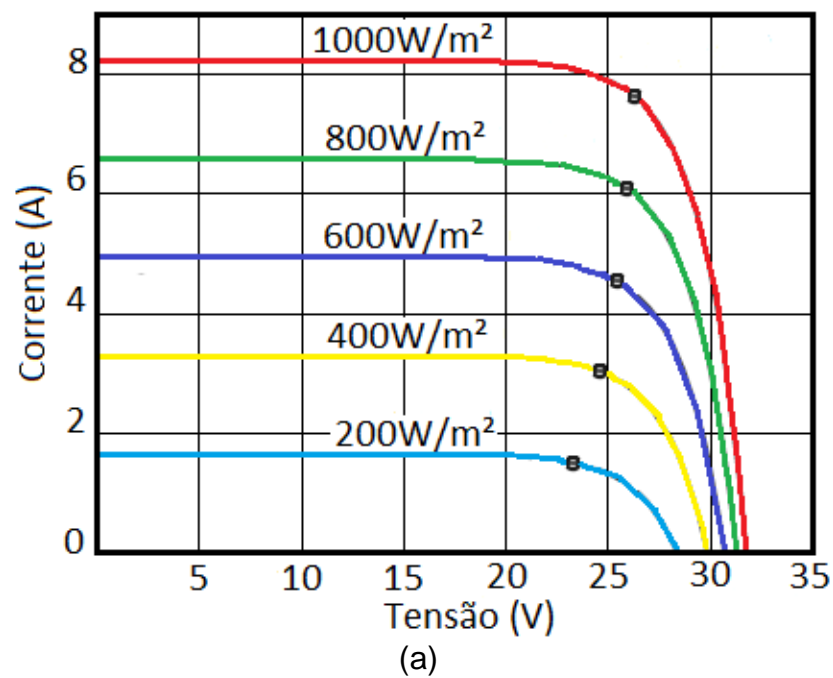


Figura 1: Curvas (a) $V \times I$ e (b) $V \times P$, com variação da temperatura.

A influência da irradiação solar afeta a capacidade máxima de corrente que é gerada pelo painel. Assim, como observado na influência da temperatura, a irradiação solar não afeta muito a variação da tensão, mas a variação de corrente é mais expressiva. A figura 2 ilustra um exemplo da influência da variação da irradiação nas curvas (a) $V \times I$ e (b) $V \times P$.



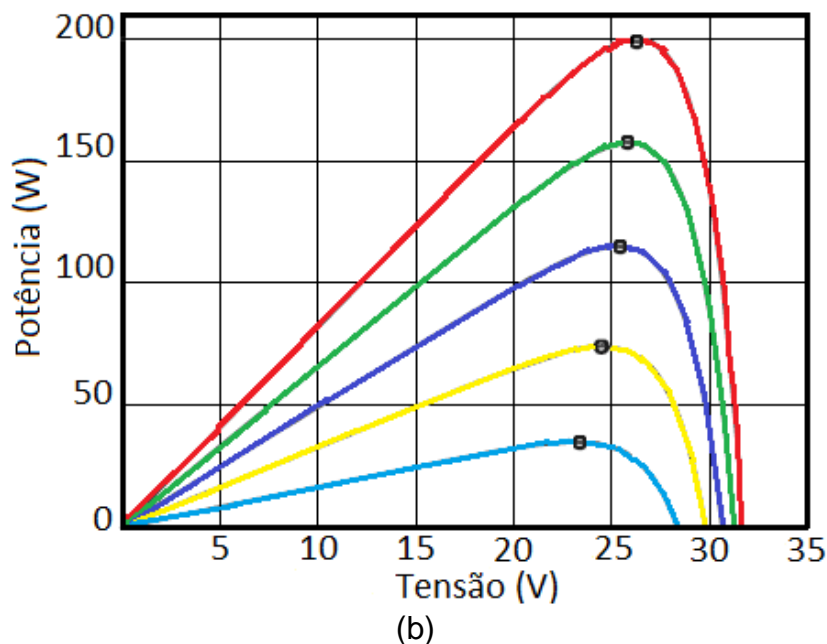


Figura 2: Curvas (a) $V \times I$ e (b) $V \times P$, com variação da irradiação.

Pelo fato dos painéis fotovoltaicos possuírem as características de variação de seus parâmetros elétricos em seus terminais quando há variação de temperatura e de irradiação, é necessário que haja uma preocupação no sentido de se obter sempre a máxima potência gerada. O Ponto de Máxima Potência (*Maximum Power Point - MPP*) é o ponto onde a potência fornecida pelo painel é máxima, e esse ponto é único para cada condição dos parâmetros climáticos. Para conseguir que o conversor conectado ao arranjo fotovoltaico (*PV*) opere sempre na máxima potência, faz-se necessário a implementação de algoritmos que rastreiem o *MPP*.

2.2 Inversores Monofásicos sem o uso de Transformador

As topologias de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica podem operar com ou sem transformador, onde a função do transformador consiste no isolamento dos módulos *PV* da rede. A utilização do transformador pode ocorrer em alta frequência ou na frequência da rede. Os transformadores utilizados para operar na frequência da rede são grandes e pesados, desta forma, agregam um custo maior no sistema global de geração *PV*, além de provocar a diminuição de sua eficiência. Já os transformadores utilizados em alta frequência operam em sistemas *PV* com alguns estágios, proporcionam uma diminuição da eficiência e tornam o sistema mais complexo [6].

As topologias de inversores sem a utilização de transformador, em geral, possuem um menor custo, bem como um menor tamanho e peso em relação às que utilizam transformador. Mas o fato da não utilização do transformador gera o problema do surgimento de uma capacitância parasita proveniente dos módulos *PV*, pelo fato de haver a ausência de isolamento galvânica entre os módulos e a rede. A capacitância parasita ocorre devido à grande superfície dos módulos *PV*, surge onde há o encontro dos eletrodos, entre os módulos e a terra. O valor desta capacitância pode variar entre 100 e 400 pF entre um único módulo *PV* e a terra, no entanto, ela pode atingir valores na ordem de 200 nF em dias chuvosos ou em ambientes úmidos. Desta forma, torna-se necessário o aterramento da estrutura do sistema *PV* para que haja uma diminuição desta corrente parasita [6].

Pelo fato de haver esta capacitância parasita, e dependendo da topologia do inversor e da estratégia de chaveamento a serem utilizadas podem ocorrer o aparecimento de flutuações do potencial entre os módulos *PV* e a terra. Devido a essas flutuações do potencial, há o aparecimento de uma corrente de dispersão capacitiva, e conseqüentemente, devido à mesma, poderá ocorrer uma distorção na corrente da rede, perdas no sistema, bem como problemas de compatibilidade eletromagnética. A corrente de dispersão capacitiva é elevada quando há aumento da área da superfície do arranjo *PV*, bem como das condições ambientais e da estrutura dos módulos [6].

Em sistemas *PV* que não são isolados galvanicamente da rede elétrica, há o aparecimento de um circuito ressoante entre a terra e os módulos *PV*, devido ao sistema estar aterrado. A norma ABNT NBR 5410:2004 trata do aterramento de sistemas elétricos de baixa tensão, visando à proteção das pessoas e dos equipamentos. O circuito ressoante abrange a capacitância parasita, o inversor e seu filtro de saída, e a impedância de rede. Devido à ressonância, há um aumento na corrente de dispersão através da capacitância parasita dos módulos, e, assim, esta corrente poderá chegar a níveis elevados. Pelo fato da corrente de dispersão estar sobreposta à corrente de linha, há um aumento no conteúdo harmônico de inversores sem transformador em relação aos inversores com transformador. Sendo assim, em aplicações de sistemas *PV* sem transformador, o comportamento das correntes de dispersão é uma característica que representa uma grande importância [6].

Nos sistemas *PV* sem transformador em que há a conexão entre o neutro da rede e o ponto central do barramento *CC*, observa-se que as correntes de dispersão possuem níveis muito baixos, isto ocorre, devido ao fato do potencial entre os módulos *PV* e a terra ser constante. Entretanto, esta conexão entre o neutro e o ponto central do barramento *CC* não é ideal, devendo ser considerada uma pequena indutância. E esta indutância é suficiente para provocar a oscilação em alta frequência do potencial, fazendo com que haja um aumento nas correntes de dispersão, e seus valores sejam maiores que os recomendados em normas internacionais. Quando não há conexão de neutro, tem-se o surgimento de altas correntes com a utilização da modulação por largura de pulso (*Pulse Width Modulation- PWM*) convencional, desta forma, não é viável a aplicação de inversores, sem transformador, para sistemas *PV* trifásicos. Assim, há a necessidade de estudar técnicas *PWM* que consigam minimizar ou eliminar a corrente de dispersão [6].

Um aspecto importante, no que concerne ao cumprimento de normas, para os inversores é atender aos critérios referentes à ondulação da corrente que é injetada na rede elétrica, a distorção harmônica deve permanecer abaixo de valores estipulados, como será apresentado, detalhadamente, na próxima seção.

2.3 THD e Harmônicas Individuais de Corrente

O *THD* (*Total Harmonic Distortion*) é um índice que pode representar o conteúdo harmônico presente nos sinais elétricos de tensão e de corrente, este índice descreve a relação existente entre os valores eficazes das componentes harmônicas e a componente da frequência fundamental, como pode ser observado na Equação (1).

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (1)$$

Onde: I_n é a amplitude da n -ésima harmônica;

I_1 é a amplitude da fundamental.

A distorção harmônica total e as harmônicas individuais de corrente que são injetadas na rede elétrica, oriundas de sistemas de geração de até 10 MW, devem obedecer aos quesitos da norma IEEE 1547. A Tabela 1 mostra estes limites em (%).

Tabela 1 - Distorção máxima de harmônicas segundo a norma IEEE 1547.

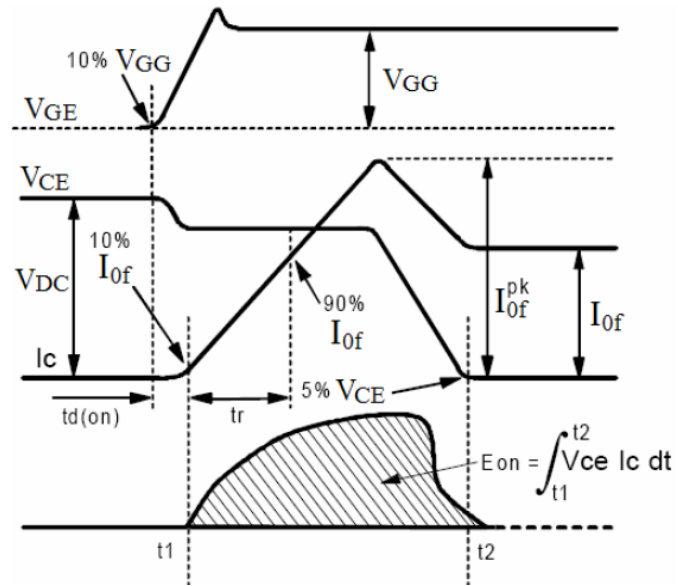
Harmônica Individual de ordem h	h < 11	11 ≤ h < 17	17 ≤ h < 23	23 ≤ h < 35	35 ≤ h	Distorção Harmônica Total (THD)
Ímpares (%)	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
Pares (%)	1,0	0,5	0,375	0,15	0,075	

2.4 Perdas nos Dispositivos Semicondutores

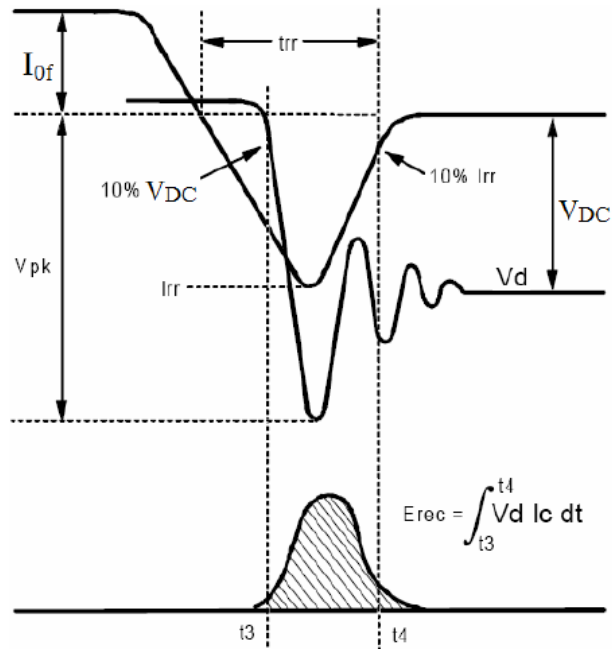
Os dispositivos semicondutores possuem fatores que estão diretamente ligados às suas perdas de energia, como a tensão de ruptura, queda de tensão, resistência em condução, transição na entrada e saída de condução, a dissipação de calor. A frequência de comutação está diretamente interligada com as perdas em condução nos dispositivos bipolares. A seguir serão abordadas detalhadamente as perdas por comutação e condução.

2.4.1 Perdas por Comutação

As perdas de comutação dividem-se em perdas de entrada em condução (*turn-on*), de bloqueio (*turn-off*) e de recuperação reversa do diodo. Estas perdas são obtidas através de gráficos, encontrados em datasheets, para uma transição de cada uma das etapas. A figura 3 mostra a transição da entrada em condução, de bloqueio e da recuperação reversa do diodo durante um período de referência. Fonte: (IRG4BC30KD Datasheet, 2006).



(a)



(b)

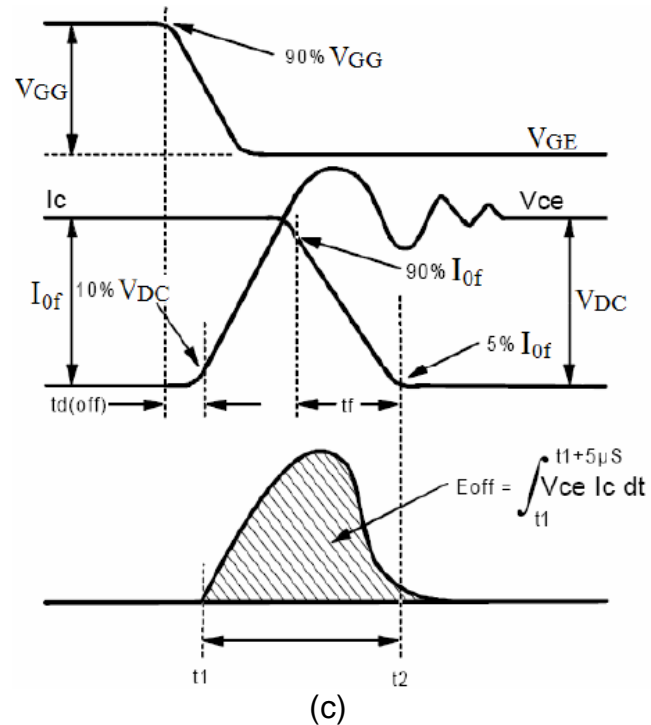


Figura 3: Etapas de transição de um dispositivo semiconductor (IGBT), (a) entrada em condução, (b) recuperação reversa do diodo e (c) bloqueio.

Fonte: (IRG4BC30KD Datasheet, 2006).

A partir da análise da Figura 3 obtemos as expressões que nos permitem calcular as energias E_{ON} , E_{REC} e E_{OFF} , descritas nas equações (2), (3) e (4), respectivamente.

$$E_{ON} = \int_{t_1}^{t_2} V_{CE} \cdot I_{CE} dt \quad (2)$$

$$E_{REC} = \int_{t_3}^{t_4} V_d \cdot I_{CE} dt \quad (3)$$

$$E_{OFF} = \int_{t_1}^{t_1+5\mu s} V_{CE} \cdot I_{CE} dt \quad (4)$$

Onde: V_{CE} é a tensão coletor-emissor.

I_{CE} é a corrente coletor-emissor.

V_d é a tensão no diodo.

t é o tempo.

E_{ON} é a energia de entrada em condução.

E_{REC} é a energia de recuperação do diodo.

E_{OFF} é a energia de bloqueio.

Com o valor das energias e da frequência de chaveamento do inversor pode-se determinar as perdas para cada uma das etapas utilizando as equações (5), (6) e (7).

$$P_{ON} = E_{ON} \cdot f_S \quad (5)$$

$$P_{REC} = E_{REC} \cdot f_S \quad (6)$$

$$P_{OFF} = E_{OFF} \cdot f_S \quad (7)$$

Onde: P_{ON} são as perdas de entrada em condução.

P_{REC} são as perdas de recuperação do diodo.

P_{OFF} são as perdas de bloqueio.

f_S é a frequência de chaveamento.

As perdas totais por comutação podem ser obtidas através da equação (8).

$$P_{cmt} = P_{ON} + P_{REC} + P_{OFF} \quad (8)$$

2.4.2 Perdas por Condução

As perdas de condução ocorrem quando há uma circulação de corrente através do dispositivo semicondutor e permanece em seus terminais uma tensão, $V_{SW}(\theta)$ para o IGBT e $V_F(\theta)$ para o diodo. Obtendo a corrente de carga a partir da equação (9), pode-se calcular as tensões nos terminais da chave e do diodo através das equações (10) e (11), respectivamente.

$$i_{load}(\theta) = m_a \cdot I_{max} \cdot \text{sen}(\theta - \varphi) \quad (9)$$

$$V_{ce}(\theta) = V_{ce} + R_{ce} \cdot |i_{load}(\theta)| \quad (10)$$

$$V_F(\theta) = V_F + R_F \cdot |i_{load}(\theta)| \quad (11)$$

Onde: $i_{load}(\theta)$ é a corrente de carga.

m_a é o índice de modulação.

I_{max} é a corrente máxima do inversor.

φ é ângulo do fator de potência da carga.

V_{ce} é a queda de tensão na chave para $i_{load}(\theta) \neq 0$.

R_{ce} é a componente resistiva de $V_{ce}(\theta)$.

V_F é a queda de tensão no diodo para $i_{load}(\theta) \neq 0$.

R_F é a componente resistiva de $V_F(\theta)$.

Através das equações (12) e (13) pode-se determinar as perdas de condução na chave e no diodo, respectivamente.

$$P_{cnd.(S)} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_{SW}(\theta) \cdot i_{load}(\theta) \cdot V_{cmd_{SWx}}(\theta) d\theta \quad (12)$$

$$P_{cnd.(D)} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_F(\theta) \cdot i_{load}(\theta) \cdot V_{cmd_{SWx}}(\theta) d\theta \quad (13)$$

Onde: $V_{cmd_{SWx}}(\theta)$ é o sinal de comando de cada interruptor SW_x .

As perdas totais de condução podem ser calculadas através da equação (14).

$$P_{cnd} = P_{cnd.(S)} + P_{cnd.(D)} \quad (14)$$

2.4.3 Perdas Totais

As perdas totais nos dispositivos semicondutores podem ser obtidas pela equação (15).

$$P_{TOTAL} = P_{cmt} + P_{cnd} \quad (15)$$

2.5 Capacitância Parasita

Pelo fato das células fotovoltaicas dos painéis serem constituídas de materiais como o silício e possuírem um comportamento semelhante, camada $P-N$, ao dos dispositivos semicondutores, há o surgimento de uma capacitância entre as células e destas com as extremidades do painel. A figura 4 ilustra esse fenômeno.

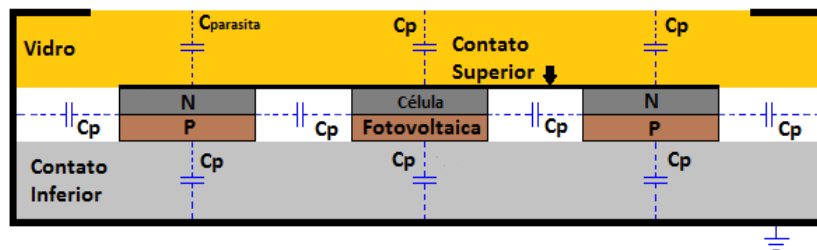


Figura 4: Capacitância parasita de um painel solar.

O problema destas capacitâncias parasitas é o fato de que elas podem constituir um caminho para a circulação de corrente no terminal de aterramento do painel, fazendo com que haja uma circulação de corrente entre os painéis e a rede elétrica. O valor desta capacitância depende da sua composição e conformação física, mas também há interferências climáticas, a umidade é um fator que faz com que essa capacitância seja elevada.

2.6 Tensão de Modo Comum

Quando um sistema fotovoltaico está conectado com a rede pode ocorrer que o potencial alternado da mesma chegue aos painéis solares. A tensão de modo comum que é transmitida aos painéis pode ser entendida através da análise da Figura 5 e da equação (16).

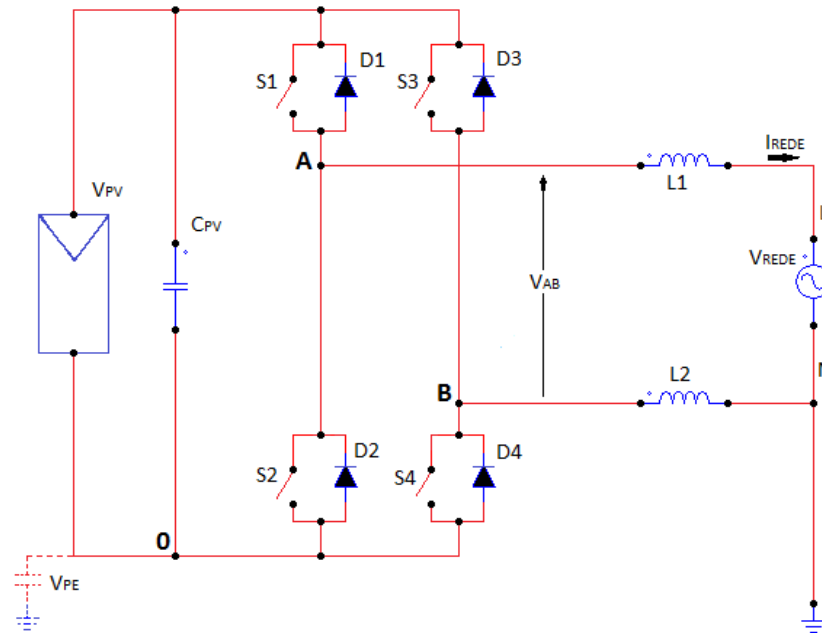


Figura 5: Inversor monofásico com destaque dos pontos A, B e 0.

A partir da Figura 5, pode-se chegar à equação (16) para o cálculo da tensão de modo comum do inversor.

$$V_{cm} = \frac{V_{A0} + V_{B0}}{2} \quad (16)$$

Onde: V_{cm} é a tensão de modo comum.

V_{A0} é a diferença de potencial entre os pontos A e zero (0).

V_{B0} é a diferença de potencial entre os pontos B e zero (0).

Quando o módulo fotovoltaico é aterrado há o surgimento de um circuito ressonante, que engloba a capacitância parasita (C_{PV}), a indutância do filtro de saída (L) e a indutância entre a conexão de terra do inversor e da rede elétrica (L_G), como pode ser observado na Figura 6.

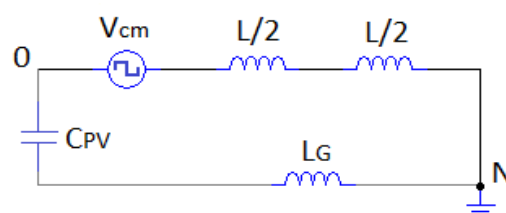


Figura 6: Circuito ressonante sistema PV aterrado.

Devido à ressonância, há um aumento na corrente de dispersão através da capacitância parasita dos módulos, e, assim, esta corrente poderá chegar a níveis elevados. Desta forma há um aumento no conteúdo harmônico de inversores sem transformador em relação aos inversores com transformador.

Busca-se, através de diferentes estruturas e modulações de topologias, a manutenção da tensão de modo comum constante, pois a sua variação influi diretamente no módulo da corrente de fuga em sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica sem o uso de transformador.

2.7 Corrente de Fuga

A variação da tensão de modo comum dos inversores monofásicos, quando não há utilização de transformador para a isolação galvânica entre o sistema PV e a rede elétrica, que é aplicada aos terminais do módulo fotovoltaico faz com que haja uma alteração do estado de carga das capacitâncias parasitas. E, assim, há o surgimento de uma corrente de fuga que flui através destas capacitâncias e circula pelo sistema, como mostrado na Figura 7.

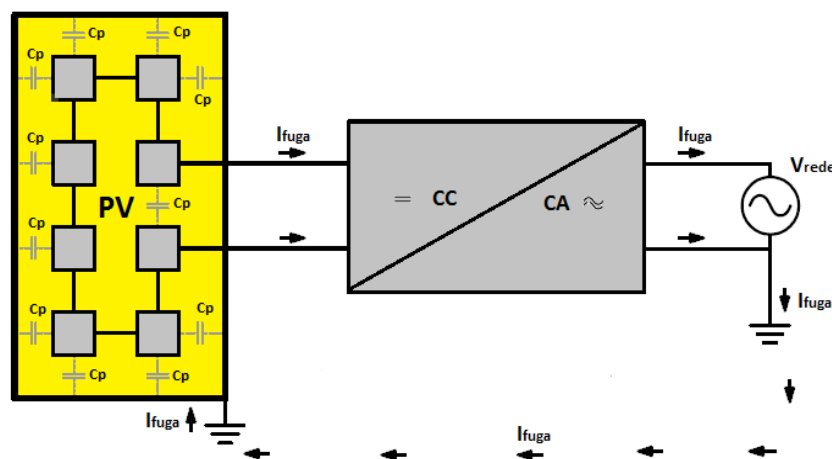


Figura 7: Ilustração da corrente de fuga.

Devido ao surgimento da corrente de fuga poderá ocorrer uma distorção na corrente da rede, perdas no sistema, bem como problemas de compatibilidade eletromagnética. Caso não houver aterramento do módulo fotovoltaico, em dias úmidos, este pode causar choques elétricos, pois a corrente que circula através da capacitância assume valores elevados.

3 DESCRIÇÃO DO FUNCIONAMENTO DAS TOPOLOGIAS

Neste capítulo é realizada a abordagem detalhada do funcionamento de cada uma das topologias de inversores monofásicos sem transformador utilizados neste trabalho. Serão abordados o sincronismo e a modulação utilizada na comutação das chaves semicondutoras das topologias empregadas.

3.1 Full-Bridge (Ponte Completa)

A topologia do conversor CC/CA Full-Bridge, Figura 8, pode funcionar com diferentes tipos de modulação. Dependendo da modulação que é empregada pode-se obter a redução do volume do filtro indutivo de saída do mesmo. Também se pode eliminar ou minimizar os problemas causados pela corrente de fuga, através da manutenção da tensão de modo comum constante. Será apresentado, detalhadamente, o funcionamento desta topologia de inversor operando com modulação Bipolar e Unipolar.

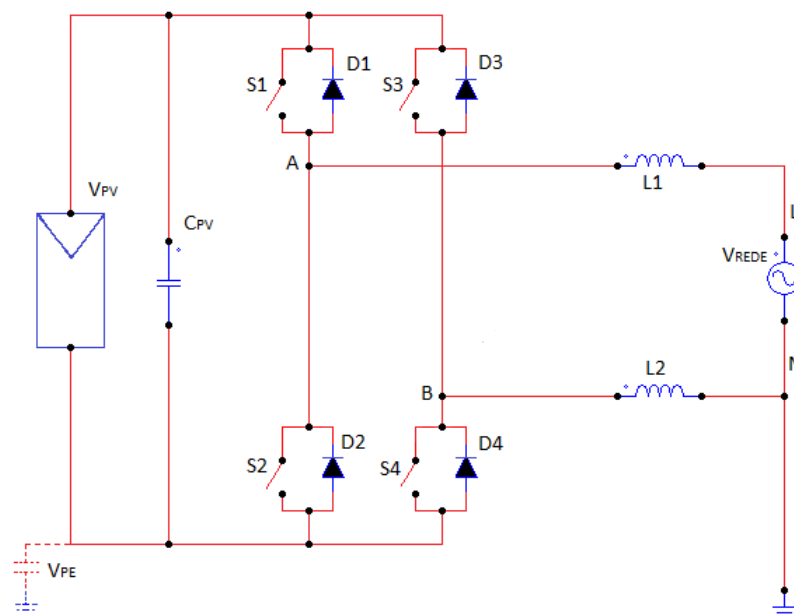
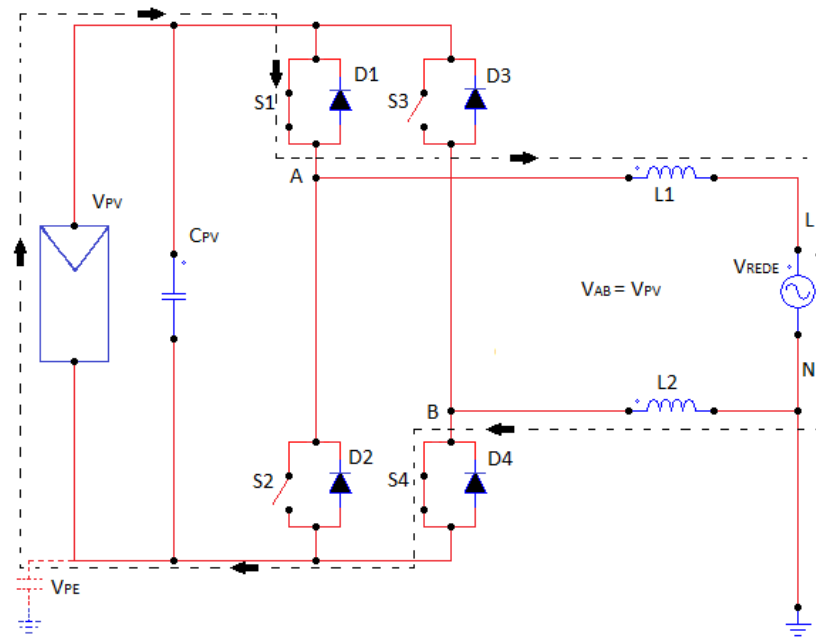


Figura 8: Topologia do conversor CC/CA Full-Bridge.

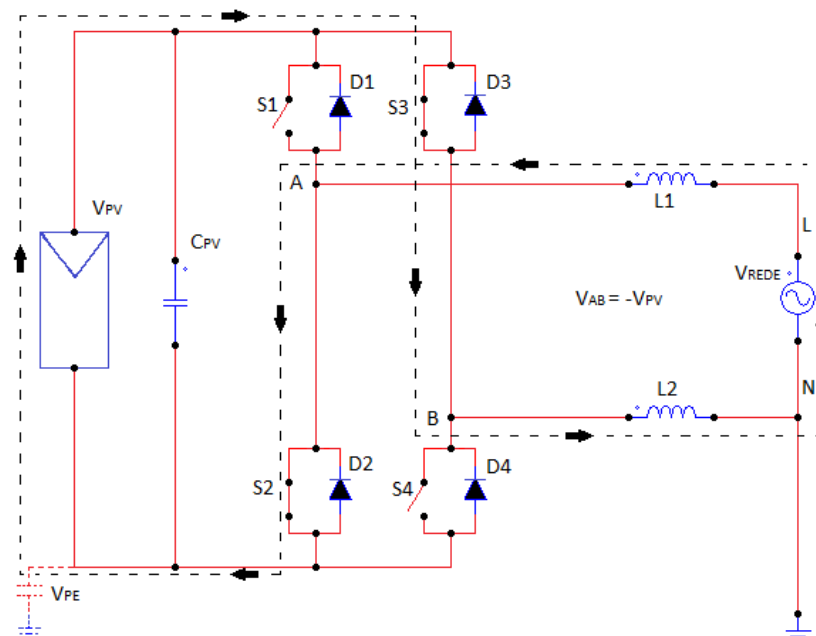
3.1.1 Modulação Bipolar

No caso do inversor estar operando com modulação bipolar, as chaves são comutadas em diagonal, isto é, S1 síncrona com S4 e S3 síncrona com S2. Desta

forma, a tensão AC pode ser gerada, como mostrado na figura 9 (a) e (b) para a tensão de saída positiva e negativa, respectivamente. Desta forma, os braços A e B são comutados de forma síncrona na diagonal ($S1 = S3$ e $S2 = S4$) com alta frequência e a mesma referência senoidal.



(a)



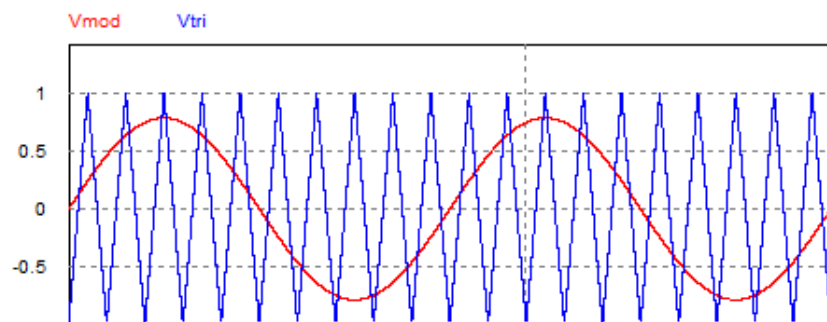
(b)

Figura 9: Etapas de funcionamento da topologia Full-Bridge com modulação bipolar, para (a) semiciclo positivo e (b) semiciclo negativo.

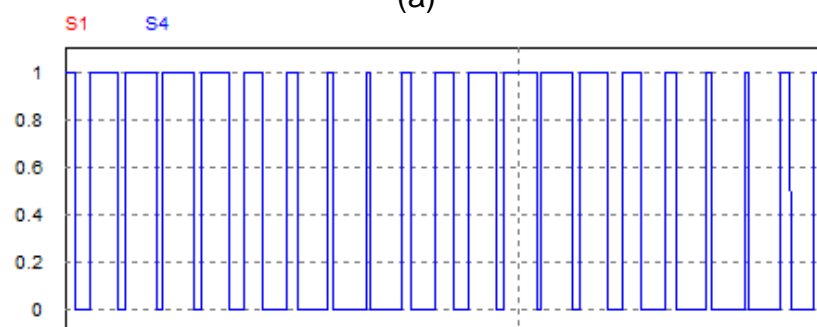
A modulação *PWM* pode ser gerada através da comparação de uma função modulante, em fase com a tensão da rede, com uma função portadora (forma de

onda triangular), como pode ser observado na figura 10(a). Onde a tensão da rede possui frequência fixa de 60 Hz, ao passo em que a frequência da portadora pode operar com um valor numa faixa de dezenas de quilo Hertz.

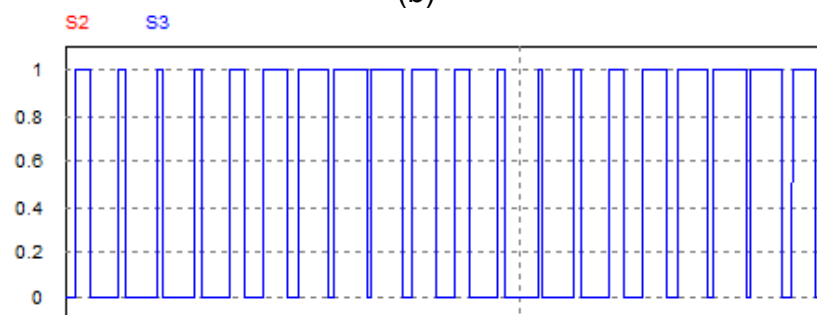
Nas figuras 10(b, c) observa-se as formas de onda dos sinais de comando para as chaves (S1 e S4) e para as chaves (S2 e S3), respectivamente. Analisando as figuras 9(a, b) e 10(a, b, c) podemos compreender de forma mais clara de como resulta a tensão V_{AB} aplicada sobre o filtro indutivo do inversor, como pode ser observado na figura 10(d).



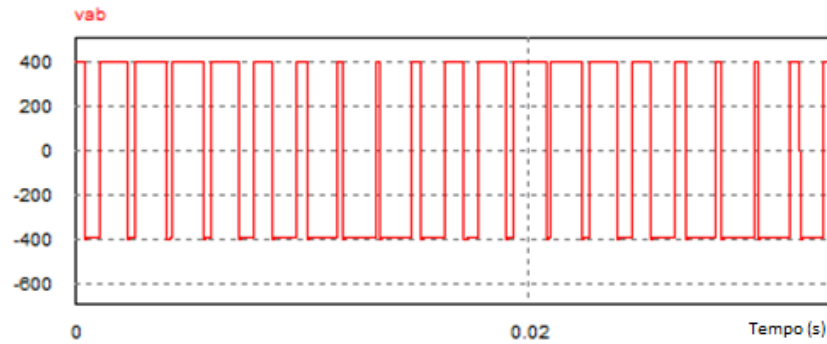
(a)



(b)



(c)



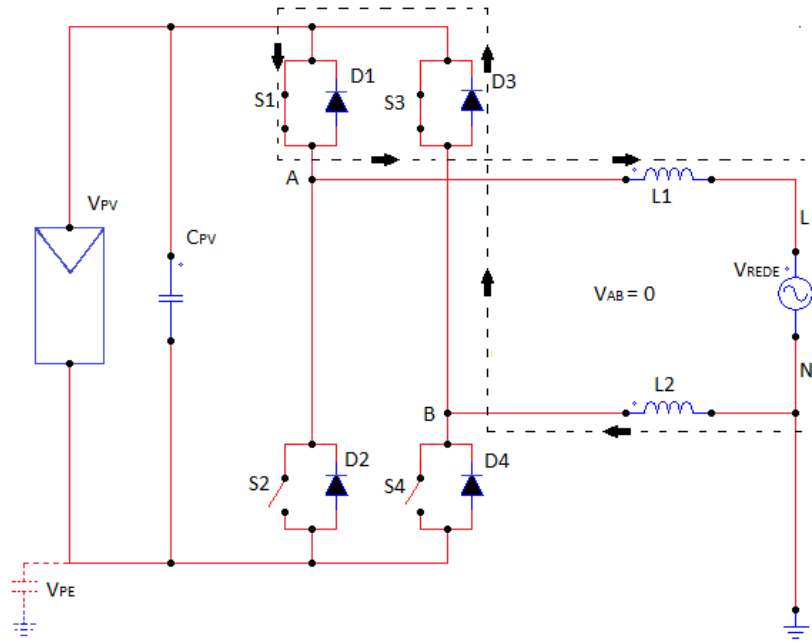
(d)

Figura 10: Modulação bipolar, (a) comparação entre modulante e portadora, (b) sinal de comando S1 e S4, (c) sinal de comando S2 e S3, (d) tensão V_{AB} .

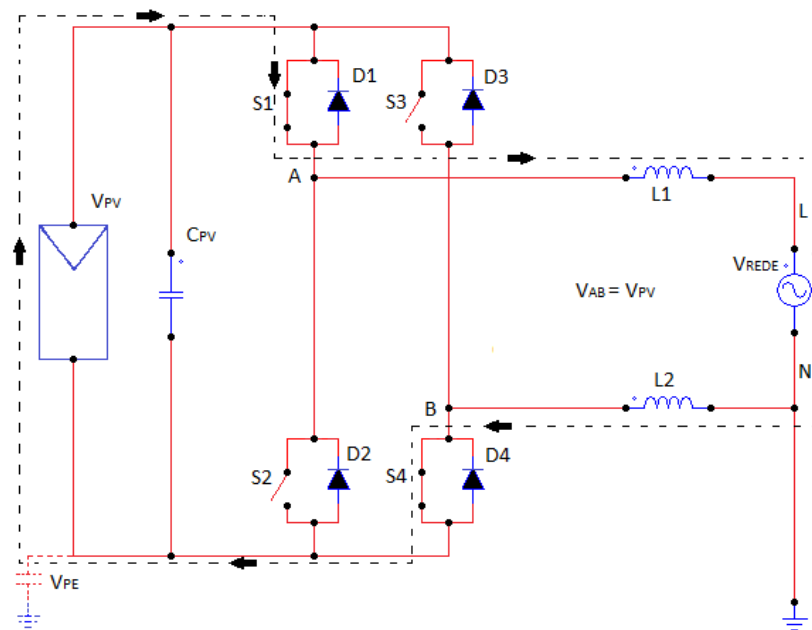
Observa-se na Figura 10(d) que na operação do inversor Full-Bridge com modulação *PWM* bipolar, a tensão V_{AB} que é aplicada no filtro assume apenas dois valores $+V_{CC}$ ou $-V_{CC}$. Neste tipo de operação, pode-se salientar ainda que a tensão de modo comum (V_{cm}) permanece sempre constante. E que as variações de tensão através do filtro tem uma amplitude de $2V_{CC}$ e a frequência de V_{AB} é a frequência da forma de onda portadora (triangular).

3.1.2 Modulação Unipolar

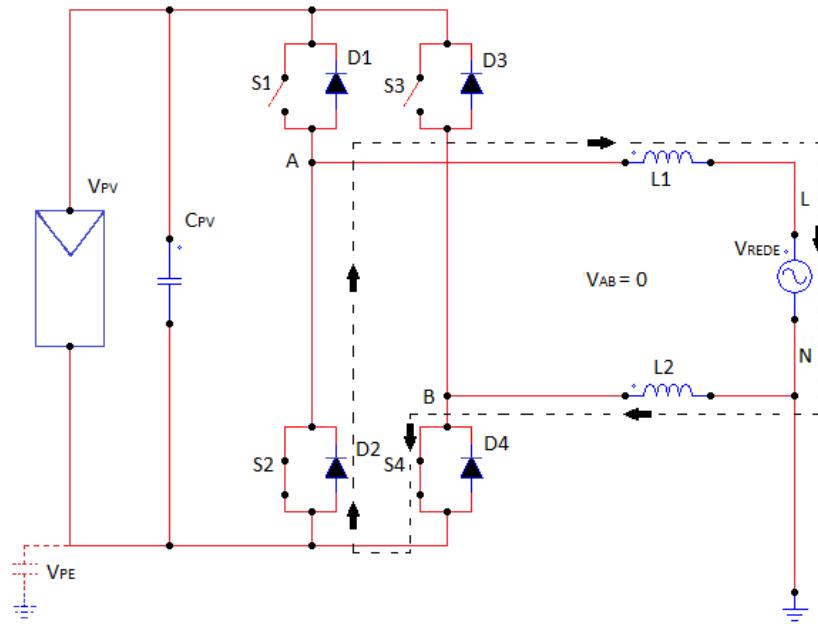
Quando o inversor Full-Bridge opera com modulação unipolar, cada braço é comutado de acordo com a sua referência. Braço A e B são comutados em alta frequência com referência senoidal espelhada. Dois estados de zero na tensão de saída são possíveis (S1, S3 = Ligado e S2, S4 = Ligado). Desta forma, a corrente alternada pode ser gerada conforme ilustrado na figura 11(a, b, c) para o semiciclo positivo e 11(d, e, f) para o semiciclo negativo.



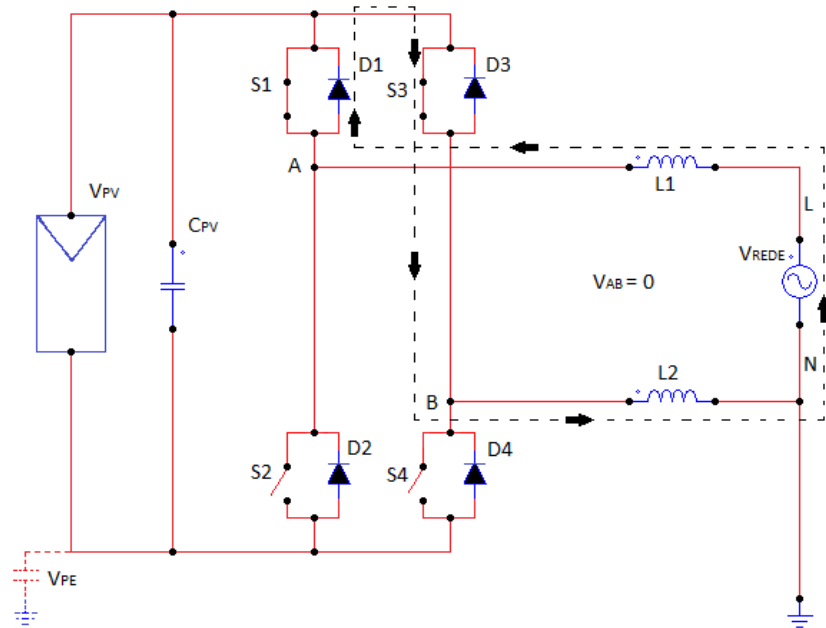
(a)



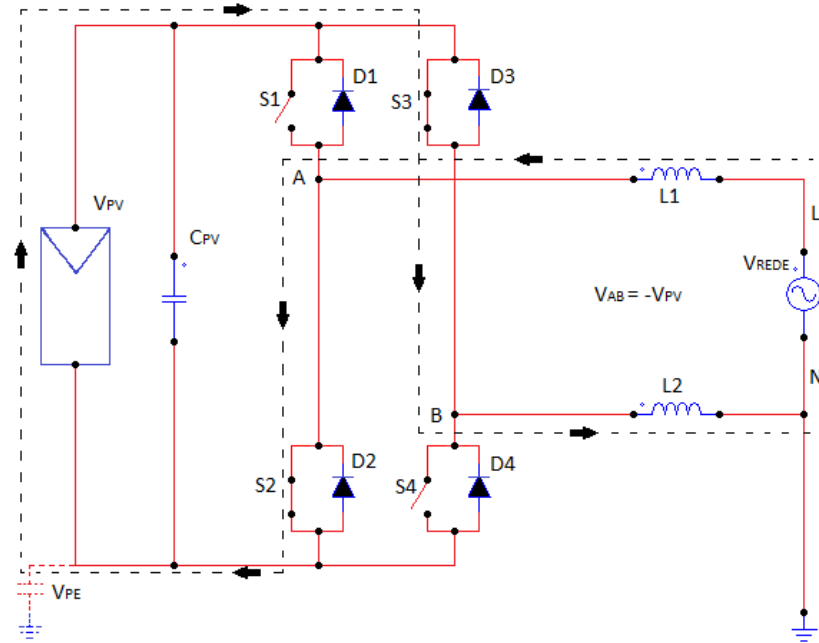
(b)



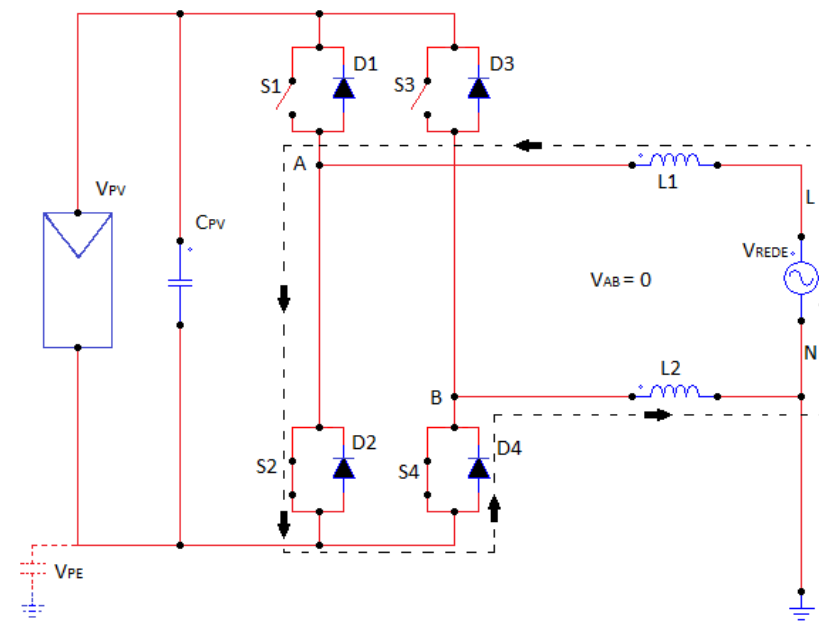
(c)



(d)



(e)

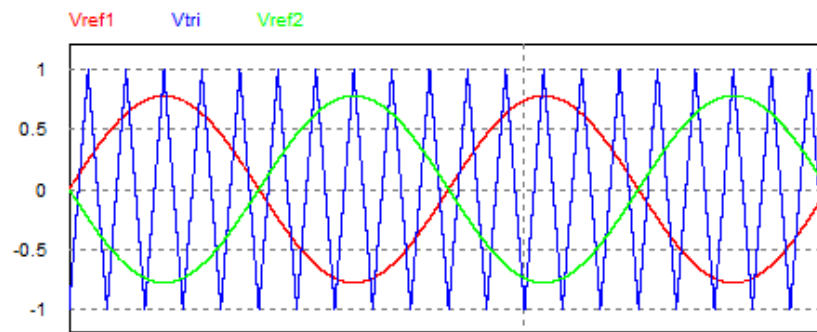


(f)

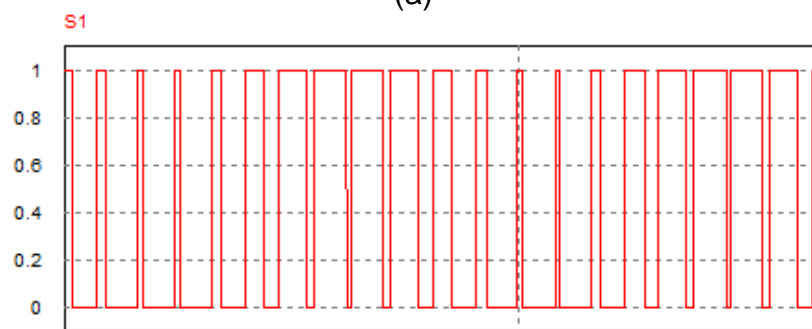
Figura 11: Etapas de funcionamento da topologia Full-Bridge com modulação Unipolar, para o semiciclo positivo, (a) $V_{AB} = 0$, (b) $V_{AB} = V_{PV}$, (c) $V_{AB} = 0$, e para o semiciclo negativo, (d) $V_{AB} = 0$, (e) $V_{AB} = -V_{PV}$, (f) $V_{AB} = 0$.

A modulação *PWM* unipolar pode ser realizada através da comparação de uma função portadora (triangular) com dois sinais senoidais referentes à tensão da rede, e estes sinais defasados 180° entre si, como se pode observar na figura 5(a). Cada comparador envia o comando para um braço do inversor, as chaves em série operam uma com o complemento da outra. Através da análise das figuras 11(a, b, c,

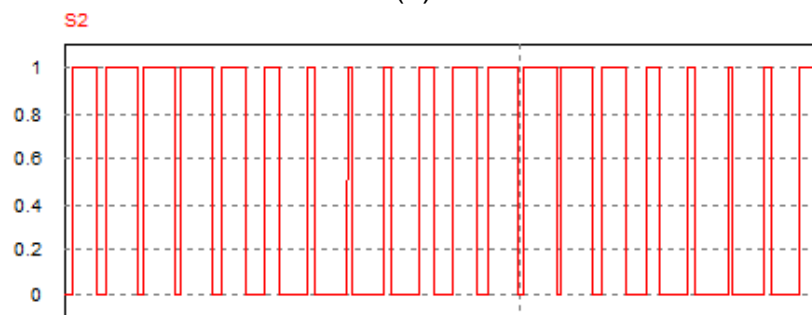
d, e, f), que mostram o processo de comutação das chaves, e das figuras 12(b, c, d, e), que mostram os sinais de comando para a comutação de cada uma das chaves, é possível uma melhor compreensão do funcionamento desta modulação, e conseqüentemente o resultado da forma de onda da tensão V_{AB} aplicada ao filtro de saída do conversor, que pode ser observada na figura 12(f).



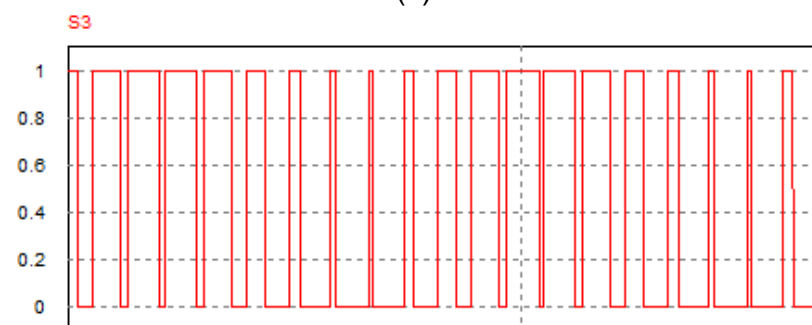
(a)



(b)



(c)



(d)

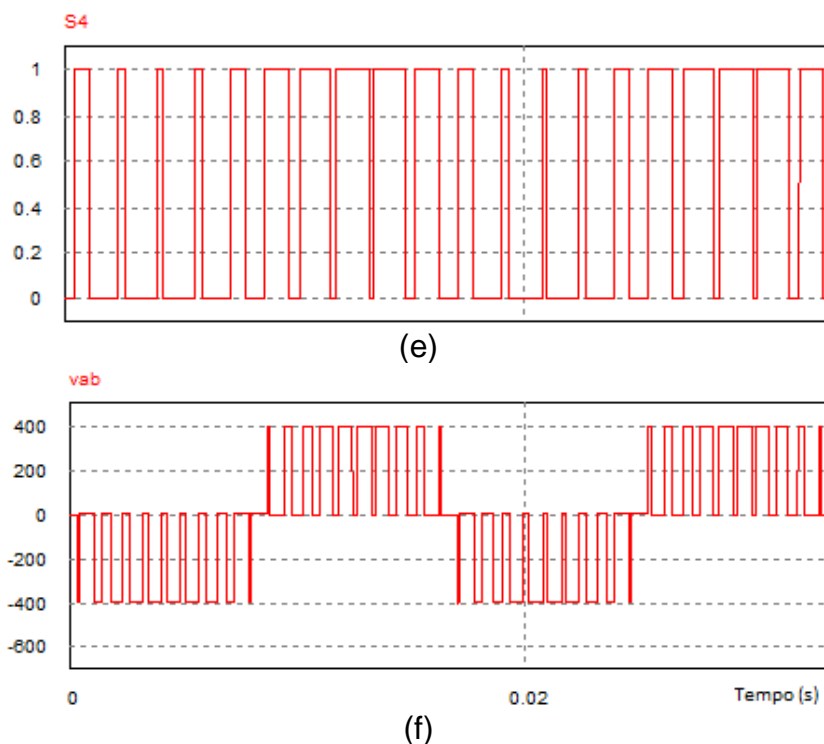


Figura 12: Modulação Unipolar, (a) comparação entre modulantes e portadora, (b) sinal de comando S1, (c) sinal de comando S2, (d) sinal de comando S3, (e) sinal de comando S4, (f) tensão V_{AB} .

Observando a figura 12(f), nota-se que a tensão V_{AB} que é aplicada no filtro possui três valores diferentes, $+V_{CC}$, zero, e $-V_{CC}$. Pode-se destacar ainda que na operação com modulação *PWM* unipolar a tensão de modo comum não é constante, e que a frequência de saída do inversor é o dobro da frequência de comutação das chaves, desta forma, as derivadas de tensão possuem uma amplitude V_{CC} .

3.2 H5

Desenvolvida pela empresa alemã SMA, a topologia H5, figura 13, é uma variação do inversor Full-Bridge, o que o diferencia é a adição de uma chave (S5) entre o barramento *CC* (arranjo *PV*) e o circuito do Full-Bridge original, fato pelo qual deriva o seu nome. A função da chave S5 é realizar o desacoplamento elétrico entre o arranjo de painéis fotovoltaicos e a rede, e, desta forma, evitar a circulação de correntes de fuga.

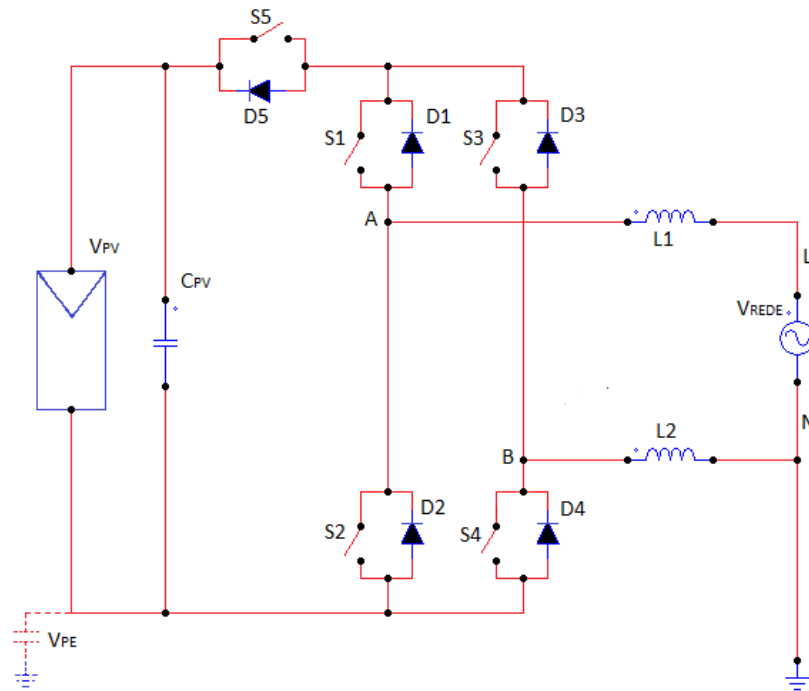
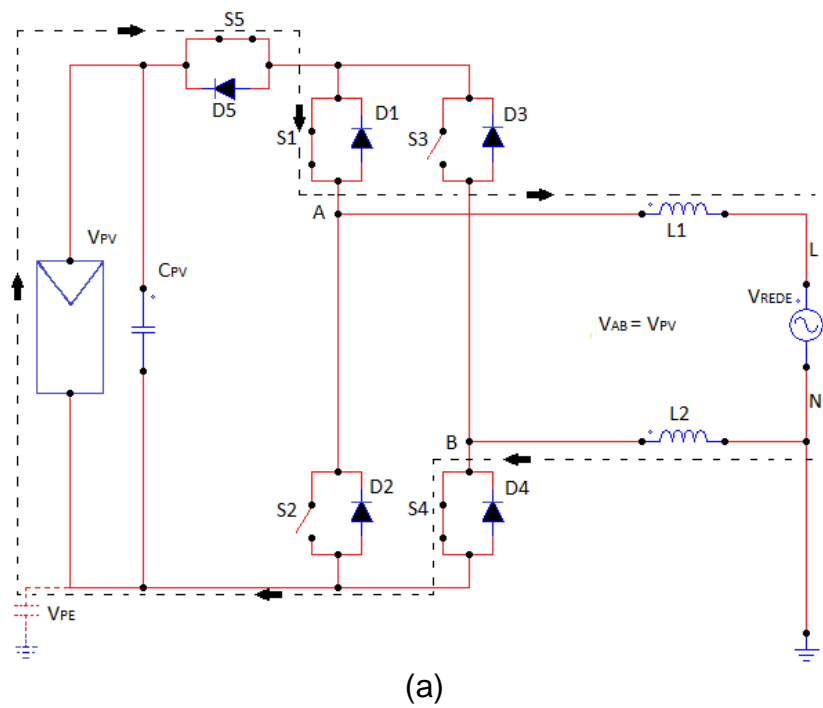
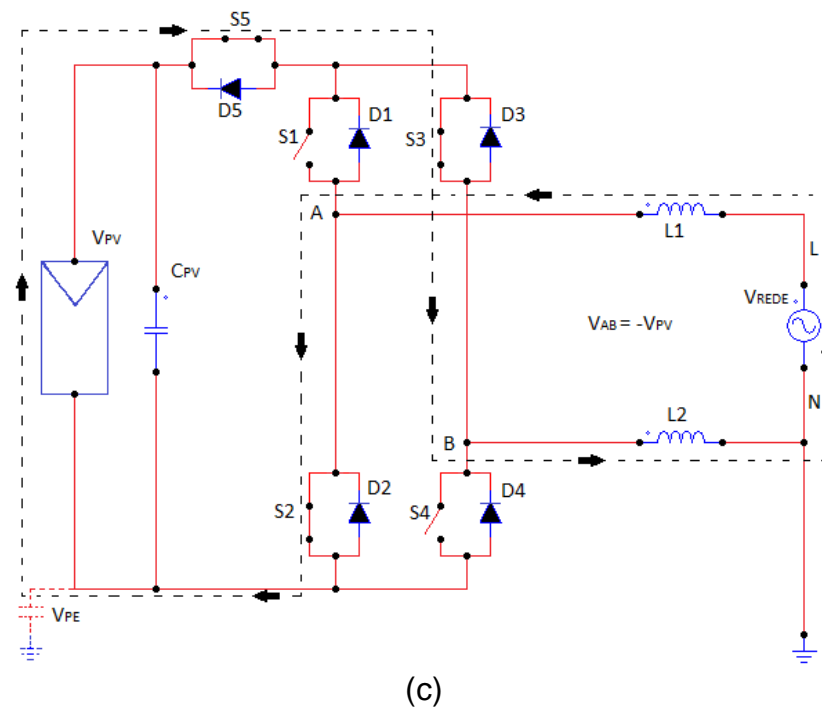
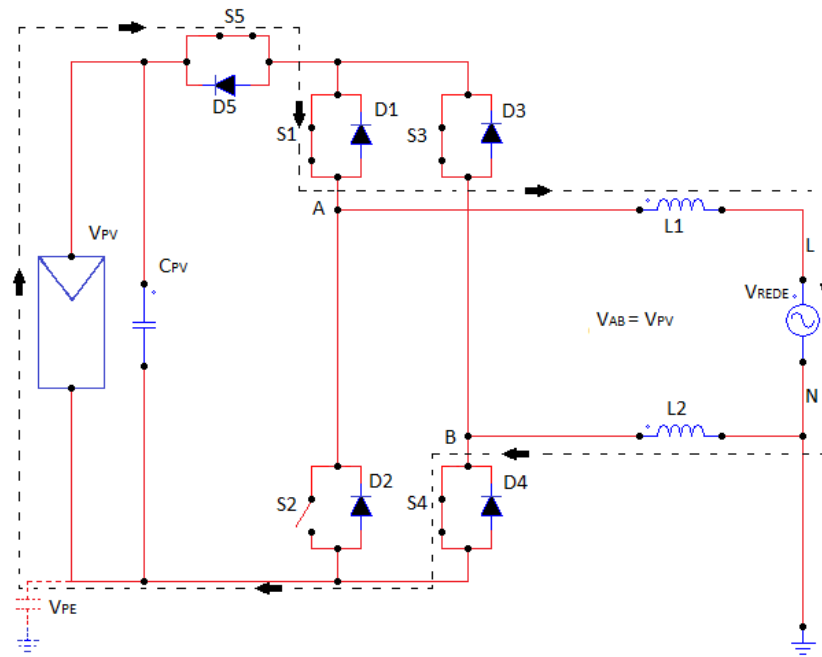


Figura 13: Topologia do conversor CC/CA H5.

A seguir, através da Figura 14, serão ilustradas as etapas de comutação das chaves para os semiciclos, positivo e negativo desta topologia.





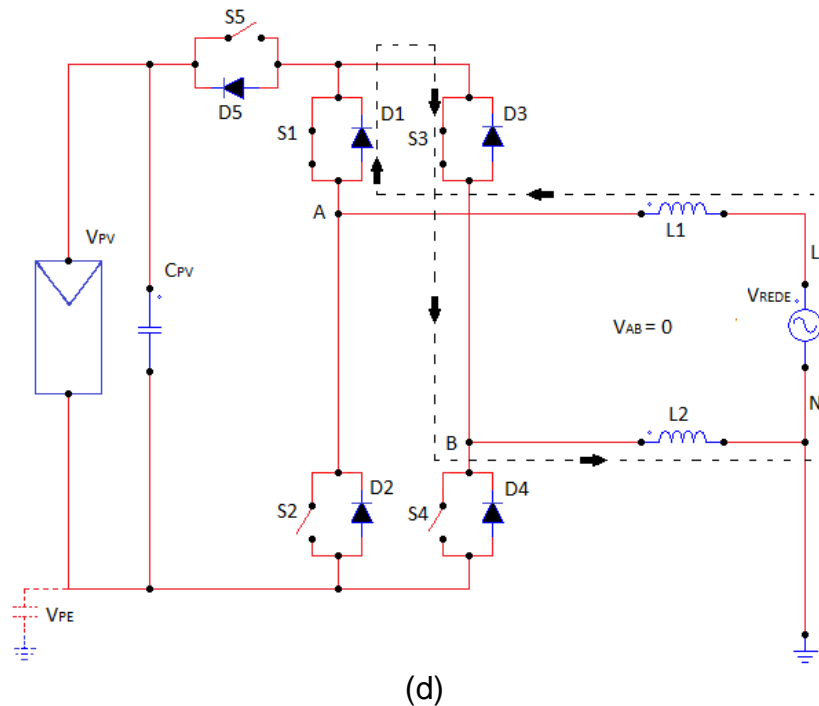


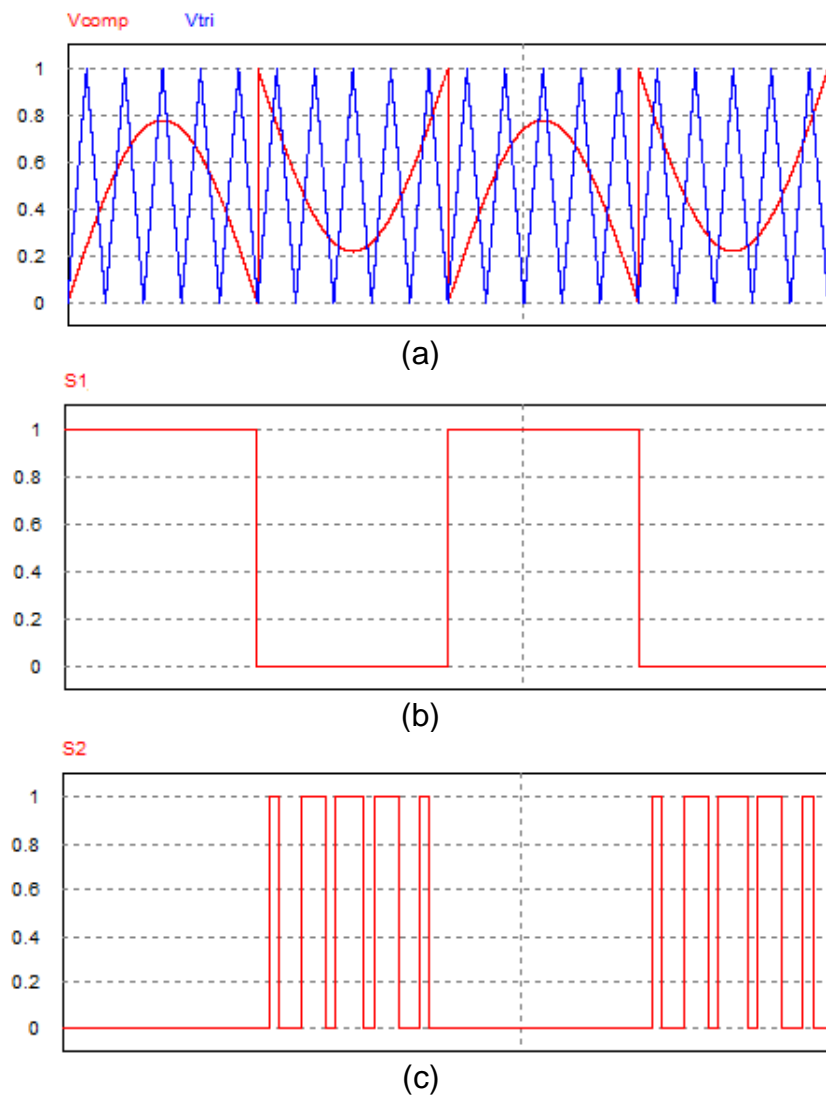
Figura 14: Etapas de funcionamento da topologia H5, para o semiciclo positivo, (a) $V_{AB} = V_{PV}$, (b) $V_{AB} = 0$, e para o semiciclo negativo, (c) $V_{AB} = -V_{PV}$, (d) $V_{AB} = 0$.

As figuras 14(a, b) mostram as duas etapas de funcionamento para o semiciclo positivo conversor H5, onde as chaves S2 e S3 permanecem inativas, enquanto que a chave S1 permanece acionada durante todo o semiciclo, e S4 e S5 operam simultaneamente, acionadas pelo comando do *PWM*. Durante a etapa de roda-livre a corrente circula através da chave S1 e do diodo da chave S3. Nesta etapa, a tensão V_{CC} é aplicada sobre as chaves S5 e o equivalente paralelo de S2 e S4.

As figuras 14(c, d) mostram as duas etapas de funcionamento para o semiciclo negativo conversor H5, na qual ocorre a condução das chaves S2, S3 e S5, fazendo com que a corrente flua do painel para a carga através das mesmas. Durante a etapa de roda livre as chaves S2 e S5 são bloqueadas, as chaves S1 e S4 permanecem inativas e S3 permanece acionada. A corrente circula através de S3 e do diodo antiparalelo de S1, evitando o seu retorno ao painel. Observa-se que há uma única etapa de roda-livre, e que a mesma se repete em ambos os semiciclos. A etapa de roda livre ocorre somente nas chaves superiores (S1 e S3) para que a corrente não chegue aos terminais do sistema fotovoltaico, já que nesta etapa, a chave S5 encontra-se aberta, interrompendo o caminho da corrente aos painéis na parte superior do inversor. Como as duas etapas de roda livre ocorrem nas chaves

S1 e S3, há um aquecimento das mesmas, e devido a esse aquecimento tem-se um aumento das perdas. Para diminuir as perdas nestas chaves, as mesmas são comutadas em baixa frequência.

Na figura 15(a) pode-se observar a comparação entre uma forma de onda (V_{comp}), modulante em 60 Hz, e uma portadora triangular, (V_{tri}). Esta comparação, em conjunto com o sincronismo da comutação das chaves, define a modulação desta topologia. Através da análise das figuras 14(a, b, c, d), que mostram o processo de comutação das chaves, e das figuras 15(b, c, d, e, f), que mostram os sinais de comando para a comutação de cada uma das chaves, é possível uma melhor compreensão do funcionamento desta modulação, e conseqüentemente o resultado da forma de onda da tensão V_{AB} aplicada ao filtro de saída do conversor, que pode ser observada na figura 15(g).



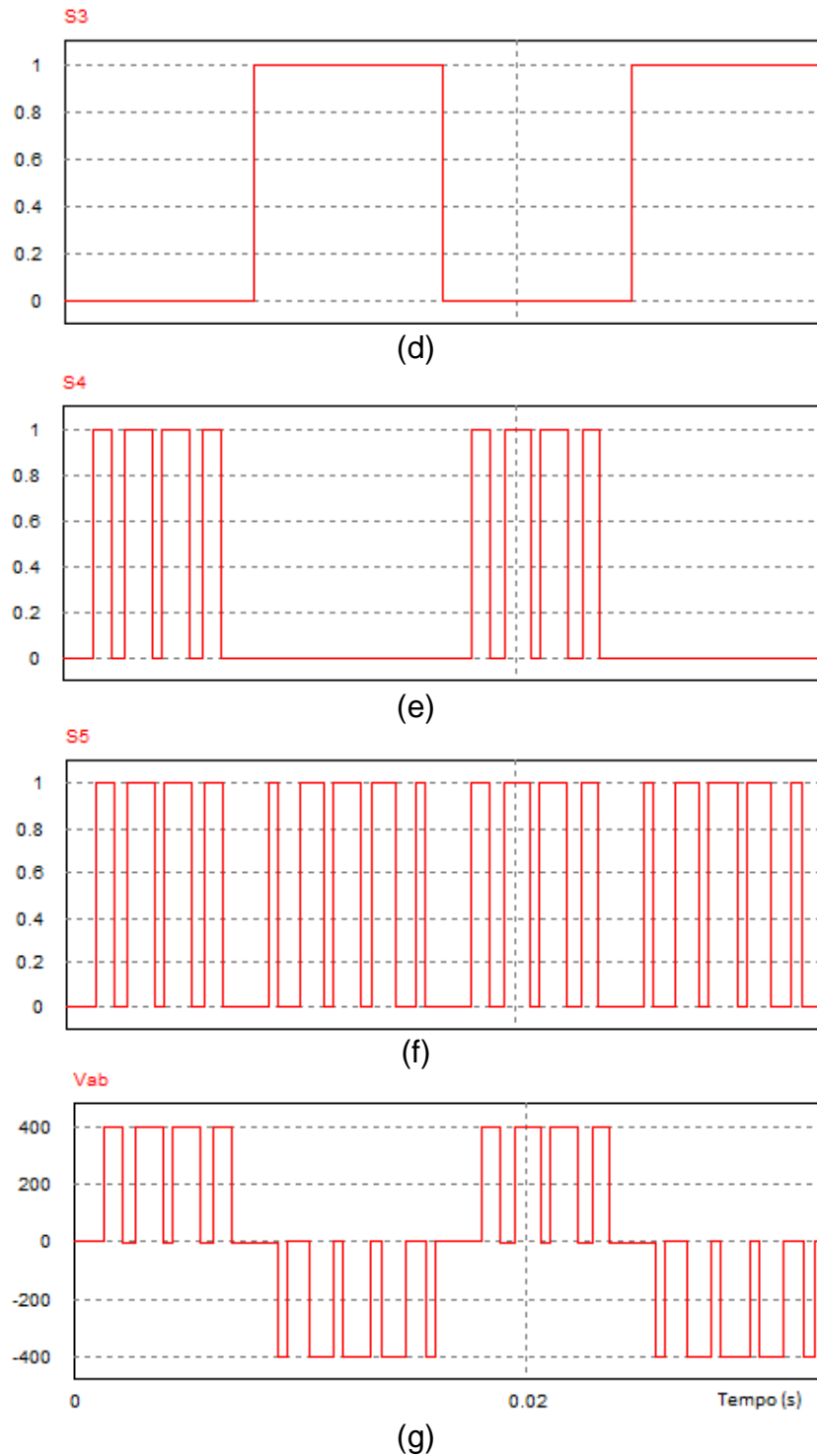


Figura 15: Modulação H5, (a) comparação entre V_{comp} e V_{tri} , (b) sinal de comando S1, (c) sinal de comando S2, (d) sinal de comando S3, (e) sinal de comando S4, (f) sinal de comando S5, (g) tensão V_{AB} .

Através da figura 15(g), observa-se que a tensão V_{AB} aplicada ao filtro ativo do inversor assume três níveis de saída, assim como o ocorrido na topologia Full-Bridge com modulação unipolar. Também se pode salientar que a tensão de modo

comum (V_{cm}) permanece constante, assim como o ocorrido na topologia Full-Bridge com modulação bipolar.

3.3 HERIC

A topologia HERIC, desenvolvida pela empresa alemã Sunways, e cujo nome significa *Highly Efficient Reliable Inverter Concept* (Conceito de Inversor Altamente Confiável e Eficiente), consiste na adição de duas chaves, conectadas com sentidos opostos, em paralelo com a saída de um circuito Full-Bridge original, como pode ser observado na figura 16. A adição destas chaves adicionais proporciona um caminho alternativo para que, durante as etapas de roda-livre, a corrente não retorne ao painel fotovoltaico. Ou seja, as chaves adicionais formam um circuito de *by-pass* CA que implementa as etapas de roda-livre do inversor.

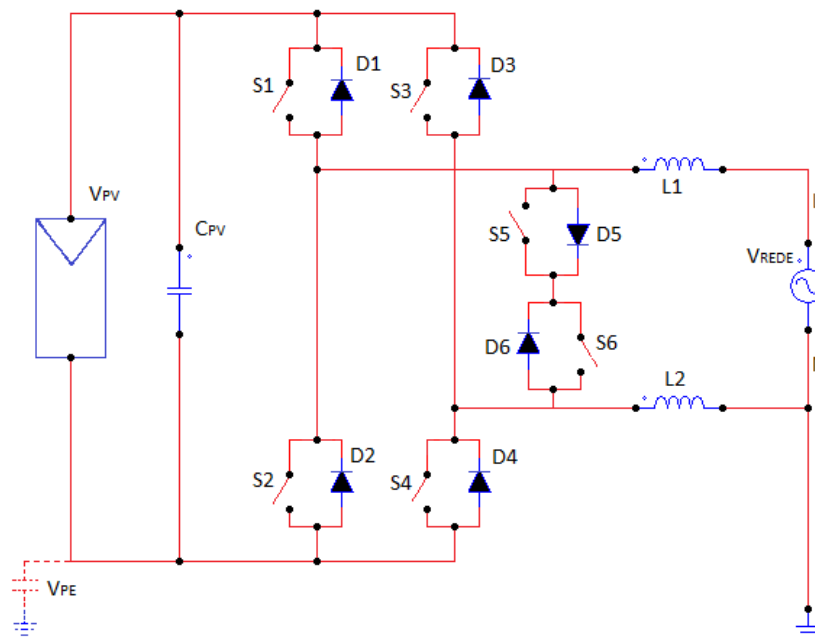
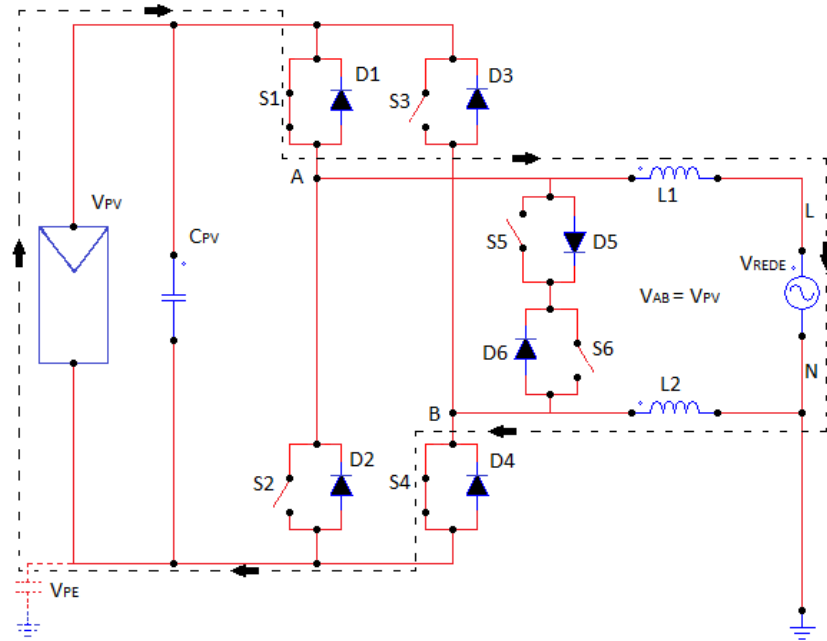
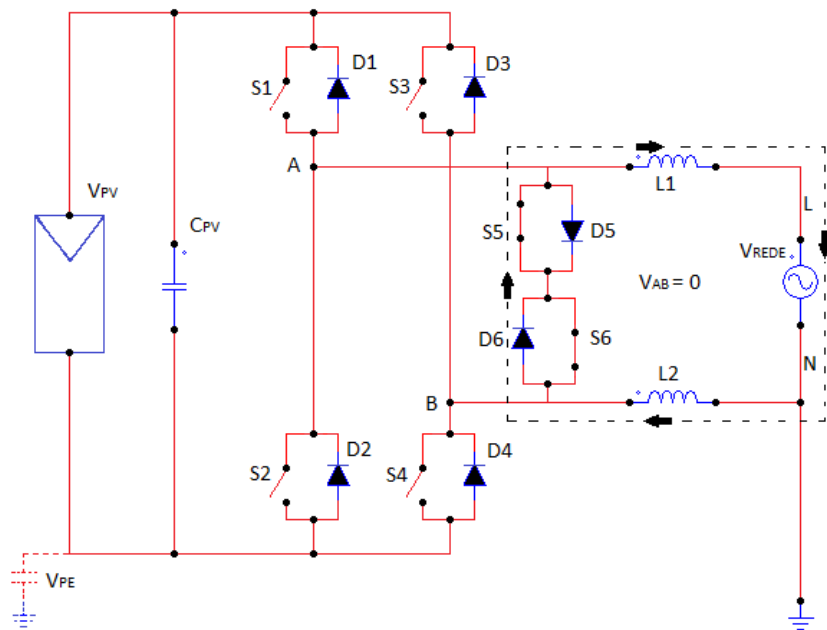


Figura 16: Topologia do inversor CC/CA HERIC.

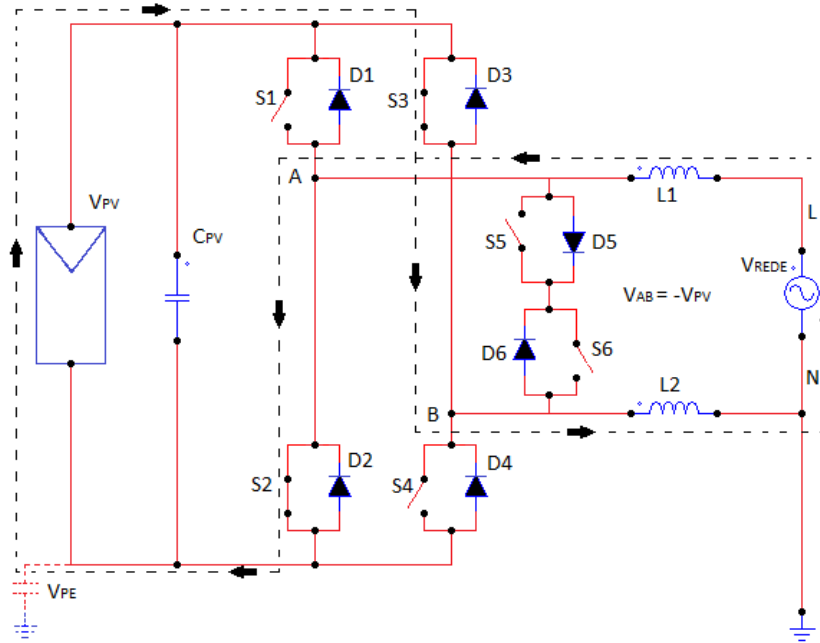
A seguir, através da Figura 17, serão ilustradas as etapas de comutação das chaves para os semiciclos, positivo e negativo desta topologia.



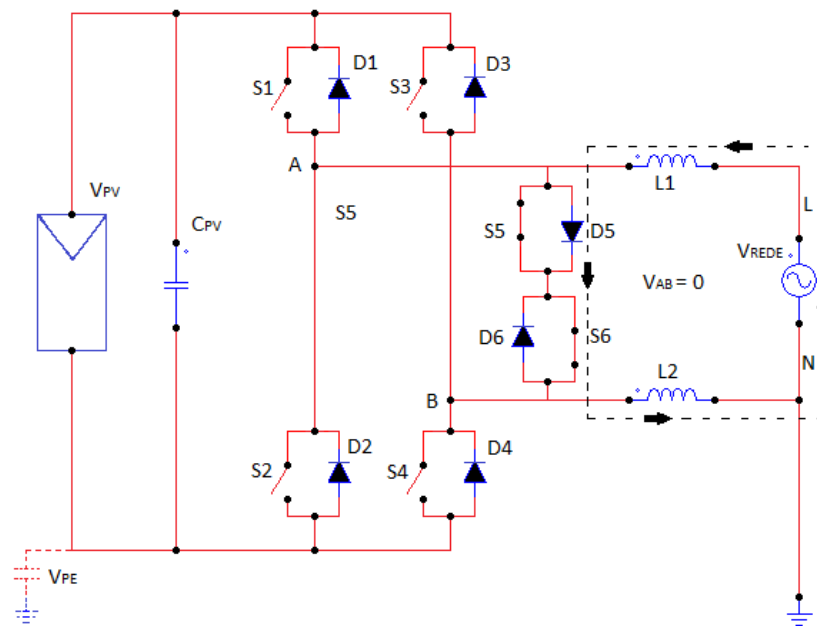
(a)



(b)



(c)



(d)

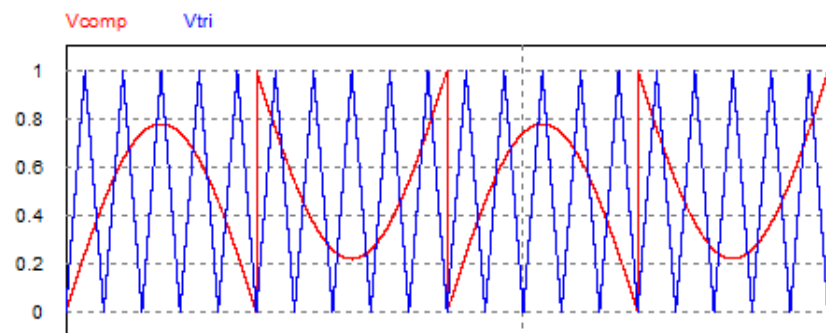
Figura 17: Etapas de funcionamento da topologia HERIC, para o semiciclo positivo, (a) $V_{AB} = V_{PV}$, (b) $V_{AB} = 0$, e para o semiciclo negativo, (c) $V_{AB} = -V_{PV}$, (d) $V_{AB} = 0$.

As figuras 17(a, b) mostram as duas etapas de funcionamento para o semiciclo positivo do conversor HERIC, onde a chave S5 é comutada em baixa frequência e permanece fechada durante todo o semiciclo, já as chaves S1 e S4 são comandadas pelo *PWM*, enquanto que as chaves S2, S3 e S6 permanecem inativas. No período em que as chaves S1 e S4 estão acionadas, a corrente circula do painel para a rede, e quando estas estão inativas, a corrente circula através da chave S5 e

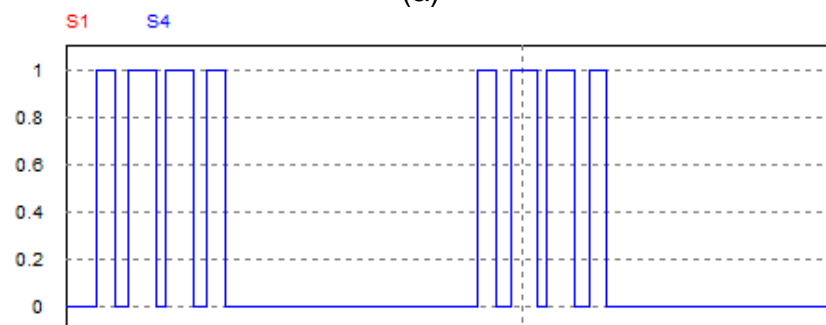
do diodo da chave S6 (etapa de roda-livre). Durante esta etapa a tensão V_{cc} é aplicada sobre a impedância série formada pelo equivalente paralelo de S1-S3 e do equivalente paralelo de S2-S4.

As figuras 17(c, d) mostram as duas etapas de funcionamento para o semiciclo negativo conversor HERIC, onde a chave S6 é comutada em baixa frequência e permanece fechada durante o semiciclo, as chaves S2 e S3 são comandadas pelo *PWM*, enquanto que as chaves S1, S4 e S5 permanecem inativas. Durante etapa de roda-livre o processo é semelhante ao semiciclo positivo, com a diferença que agora a corrente circula através da chave S6 e do diodo da chave S5.

Na figura 18(a) pode-se observar a comparação entre uma forma de onda (V_{comp}), modulante em 60 Hz, e uma portadora triangular, (V_{tri}). Esta comparação, em conjunto com o sincronismo da comutação das chaves, define a modulação desta topologia. Através da análise das figuras 17(a, b, c, d), que mostram o processo de comutação das chaves, e das figuras 18(b, c, d, e), que mostram os sinais de comando para a comutação de cada uma das chaves, é possível uma melhor compreensão do funcionamento desta modulação, e conseqüentemente o resultado da forma de onda da tensão V_{AB} aplicada ao filtro de saída do conversor, que pode ser observada na figura 18(f).



(a)



(b)

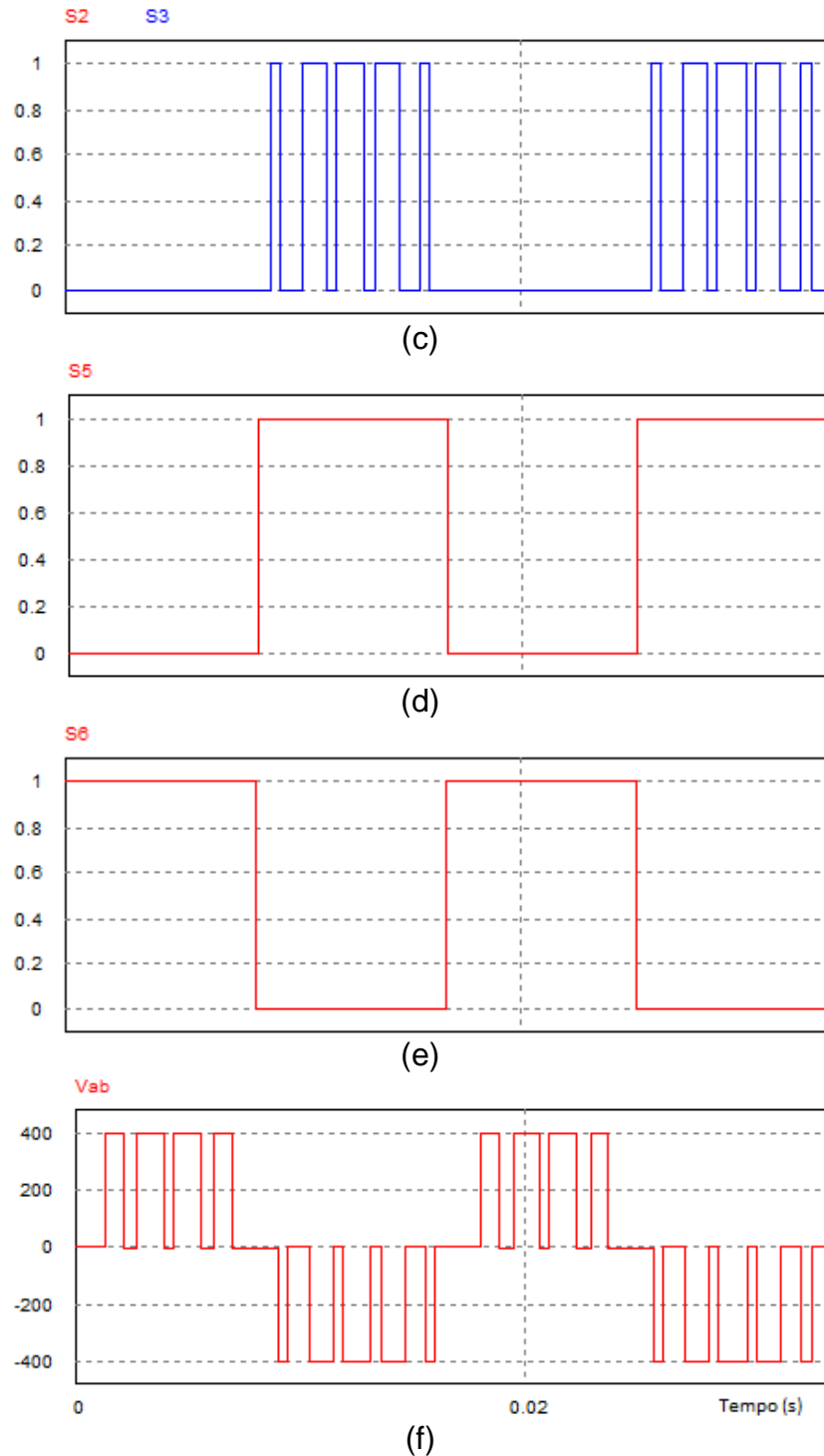


Figura 18: Modulação HERIC, (a) comparação entre V_{comp} e V_{tri} , (b) sinal de comando S1 e S4, (c) sinal de comando S2 e S3, (d) sinal de comando S5, (e) sinal de comando S6, (f) tensão V_{AB} .

Através da figura 18(f) observa-se que a tensão V_{AB} aplicada ao filtro ativo do inversor assume três níveis de saída, assim como o ocorrido na topologia Full-Bridge com modulação unipolar. Também se pode salientar que a tensão de modo comum

(V_{cm}) permanece constante, assim como o ocorrido na topologia Full-Bridge com modulação bipolar. A principal vantagem da topologia HERIC em relação à topologia H5 é que ela opera com duas chaves em condução durante as etapas *PWM*, enquanto que o H5 opera com três chaves em condução.

3.4 Comparação da Frequência de Comutação das Chaves

A Tabela 2 apresenta a comparação entre as topologias estudadas em termos de acionamento simultâneo das chaves em cada uma das etapas de operação, bem como a quantidade das mesmas comutam à frequência da rede e as que comutam em alta frequência.

Tabela 2: Comparação da operação simultânea e frequência de comutação das chaves para as topologias estudadas.

Topologias	Chaves operando simultaneamente na etapa $V_{AB} > 0$	Chaves operando simultaneamente na etapa $V_{AB} = 0$	Chaves operando simultaneamente na etapa $V_{AB} < 0$	Chaves comutando à frequência da rede	Chaves comutando em alta frequência
Full-Bridge Bipolar	2,0	0,0	2,0	0,0	4,0
Full-Bridge Unipolar	2,0	2,0	2,0	0,0	4,0
H5	3,0	2,0	3,0	2,0	3,0
HERIC	2,0	2,0	2,0	2,0	4,0

Através da Tabela 2, pode-se observar que somente a topologia H5 possui três chaves que operam simultaneamente, as demais têm somente duas operando simultaneamente. Também se observa que somente as topologias H5 e HERIC possuem chaves operando à frequência da rede. Quando as chaves operam em baixa frequência há uma diminuição de suas perdas, já quando estas operam em alta frequência, há um aumento nas perdas. Como o H5 possui três chaves comutando em alta frequência simultaneamente, suas perdas serão maiores do que as do HERIC.

4 DIMENSIONAMENTOS E IMPLEMENTAÇÕES

Neste capítulo serão descritos os dimensionamentos do sistema fotovoltaico, no qual o valor da tensão, da corrente e da potência do ponto de *MPP* para diferentes irradiações serão aplicadas na entrada dos inversores, além do capacitor de entrada e do tamanho do filtro de saída. Também será descrita a implementação do sistema de controle da corrente e da tensão de saída do inversor.

4.1 Dimensionamento do Sistema Fotovoltaico

Para a realização das simulações das diferentes topologias de inversores monofásicos foi optado por usar o caso de um sistema fotovoltaico que pode ser implementado na prática. Para isso, foi considerado que o sistema está operando no ponto de máxima potência, havendo, assim, a definição dos valores de potência, tensão e corrente de acordo com as curvas VxI e VxP do painel fotovoltaico. A Tabela 3 mostra os valores de *MPP* para o painel KC200GT da empresa Kyocera, estes valores são obtidos para uma temperatura de 55 °C e variação de irradiação de 100 W/m² a 1000 W/m².

Tabela 3 – Parâmetros do painel KC200GT para 55 °C

Irradiação (W/m ²)	Tensão [V_{mpp}] (V)	Corrente [A_{mpp}] (A)	Potência [W_{mpp}] (W)
100	18,85	0,740	13,956
200	20,30	1,491	30,269
300	21,10	2,251	47,486
400	21,75	3,002	65,291
500	22,20	3,763	83,536,
600	22,55	4,529	102,131
700	22,90	5,285	121,019
800	23,20	6,401	140,156
900	23,45	6,802	159,512
1000	23,65	7,571	179,061

Depois de escolhido o painel e seus parâmetros de *MPP*, o objetivo é o dimensionamento do sistema fotovoltaico. Assim, é necessário definir a mínima tensão no barramento CC para que o inversor consiga operar, para isto, o primeiro passo é encontrar o valor da tensão ideal do barramento CC, que pode ser feita através da equação (17) [7].

$$\Delta V_0 = \pm \frac{2t_{\Delta}V_{CCid}}{T_S} \quad (17)$$

Onde: ΔV_0 é a diferença entre a tensão de saída ideal e a real.

t_{Δ} é o tempo morto da chave semicondutora.

V_{CCid} é a tensão ideal do barramento CC.

T_S é período de comutação das chaves.

Utilizando uma frequência de comutação de 15 kHz, e considerando o tempo morto (t_{Δ}), que é o atraso de tempo entre o bloqueio (*turn-off*) de uma chave e a condução (*turn-on*) da outra chave, igual a 300 ns, e sabendo que o tempo morto gera uma diferença de tensão entre a tensão de saída ideal e a real (ΔV_0), e após encontrados esses valores em datasheets de dispositivos semicondutores e a partir da equação (17), podemos calcular o valor da tensão ideal do barramento CC.

$$2 = \frac{2.300 \times 10^{-9} \cdot V_{CCid}}{15 \times 10^{-3}} = V_{CCid} = 222,222 \text{ V} \quad (18)$$

Depois de encontrado V_{CCid} , pode-se calcular a mínima tensão de entrada no barramento CC para que o inversor possa operar, a equação (19) nos permite realizar este cálculo.

$$V_{CC(\min)} = \frac{V_{rede}}{m_a} + \frac{2t_{\Delta}V_{CCid}}{T_S} + V_{\Delta S} \quad (19)$$

Onde: $V_{CC(\min)}$ é a tensão mínima para o funcionamento do inversor.

V_{rede} é a tensão da rede elétrica.

m_a é o índice de modulação.

$V_{\Delta S}$ é a queda de tensão nas chaves.

Utilizando uma tensão de rede igual a 220 V, um índice de modulação unitário, e uma queda de tensão nos dispositivos semicondutores de 2 V, lembrando que este valor deve ser multiplicado pelo número de chaves em condução do conversor, pode-se calcular $V_{CC(\min)}$ a partir da equação (19).

$$V_{CC(\min)} = \frac{220 \cdot \sqrt{2}}{1} + \frac{2.300 \times 10^{-9} \cdot 222,222}{\frac{1}{15 \times 10^3}} + 2.2 = 317,126 \text{ V} \quad (20)$$

Tendo em mãos o valor mínimo do barramento CC, pode-se calcular o número mínimo de painéis do sistema fotovoltaico que será conectado ao inversor, como demonstrado na equação (21).

$$N_{mod} = \frac{V_{CC(\min)}}{V_{PV(\min)}} \quad (21)$$

Onde: N_{mod} é o número de painéis fotovoltaicos conectados em série.

$V_{PV(\min)}$ é o valor da tensão de *MPP* do painel para a mínima irradiação.

A partir da equação (21), obtemos:

$$N_{mod} = \frac{317,126}{18,85} = 16,82 \approx 17 \quad (22)$$

Após a obtenção do número de painéis, pode-se projetar o sistema fotovoltaico, o arranjo PV é realizado através da conexão entre os painéis a fim de se obter os parâmetros desejáveis na entrada do inversor. Sabe-se que a potência do arranjo é o somatório das potências de todos os painéis conectados. Na ligação em paralelo, o número de ligações em paralelo dos painéis é multiplicado pela corrente, enquanto que na ligação em série, há um somatório do número de painéis conectados em série e multiplicados pela tensão. Neste projeto, o arranjo fotovoltaico é realizado através da ligação em série dos painéis. Assim, a Tabela

4apresenta os valores de *MPP* para o sistema fotovoltaico com 17 painéis conectados em série.

Tabela 4 – Parâmetros do sistema fotovoltaico para 55 °C.

Irradiação (W/m ²)	Tensão [<i>V_{mpp}</i>](V)	Corrente [<i>A_{mpp}</i>] (A)	Potência [<i>W_{mpp}</i>] (W)
100	320,45	0,740	237,252
200	345,10	1,491	514,573
300	358,70	2,251	807,262
400	369,75	3,002	1019,947
500	377,40	3,763	1420,112
600	383,35	4,529	1736,227
700	389,30	5,285	2057,323
800	394,40	6,401	2382,652
900	398,65	6,802	2711,704
1000	402,05	7,571	3044,037

Com a utilização da equação (23) pode-se calcular a corrente máxima nominal de saída do inversor.

$$I_{CA(máx)} = \frac{P_{PV(máx)}}{V_{rede}} \quad (23)$$

Onde: $I_{CA(máx)}$ é a corrente nominal de saída do inversor.

$P_{PV(máx)}$ é a potência máxima do sistema fotovoltaico.

V_{rede} é a tensão nominal da rede elétrica.

A partir da equação (23), podemos calcular:

$$I_{CA(máx)} = \frac{3044.037}{220} = 13,8365 \text{ A} \quad (24)$$

4.2 Implementação do Sistema de Controle

Para a realização das simulações das topologias de inversores monofásicos no Software PSIM foi necessária a implementação de um sistema de controle da corrente e da tensão de saída. Desta forma, foi implementado um controlador Proporcional-Ressonante (*PR*) cuja ideia consiste na transformação de um controlador Proporcional-Integral (*PI*) em um controlador com compensação para sinais alternados. Este controlador combina um laço de controle proporcional e um laço de controle ressonante. Em malha aberta, o controlador *PR* em tempo contínuo introduz um ganho infinito em uma frequência de ressonância selecionada para a eliminação do erro estacionário desta frequência.

Nas equações (25) e (26) estão dispostas as funções de transferência do controlador e da planta, respectivamente.

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_r \cdot s}{s^2 + 2\zeta \cdot \omega_n \cdot s + \omega_n^2} \quad (25)$$

$$G_p(s) = \frac{1}{L \cdot s} \quad (26)$$

Onde: K_p é o ganho proporcional.

K_r é o ganho ressonante.

ζ é a constante de amortecimento.

ω_n é a frequência natural.

L é a indutância do filtro de saída.

Na equação (26) foi considerada somente a indutância do filtro de saída devido ao fato de (L) ser muito maior do que a resistência (R) do mesmo.

Na Figura 19 encontra-se o Diagrama de Blocos que representa o sistema de controle utilizado.

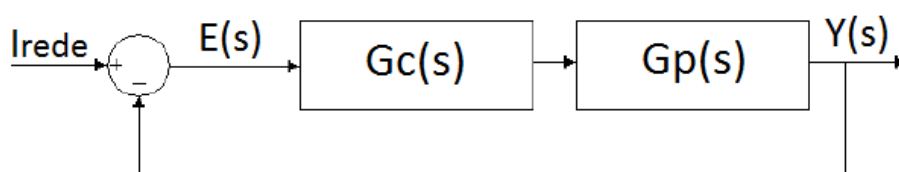


Figura 19: Diagrama de Blocos do sistema de controle.

Pelo princípio do modelo interno para se ter erro nulo em regime permanente, deve existir na malha o modelo do sinal referencia.

Na Figura 20 encontra-se o Diagrama de Bode do controlador.

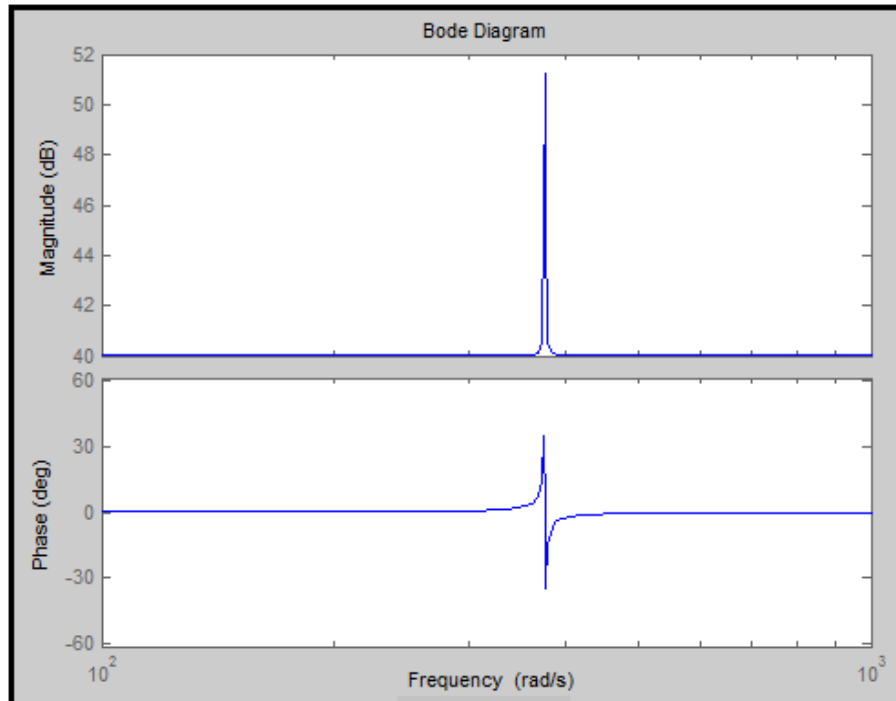


Figura 20: Diagrama de Bode do controlador.

Na Figura 21 pode-se observar o Diagrama de Bode em malha aberta do sistema de controle.

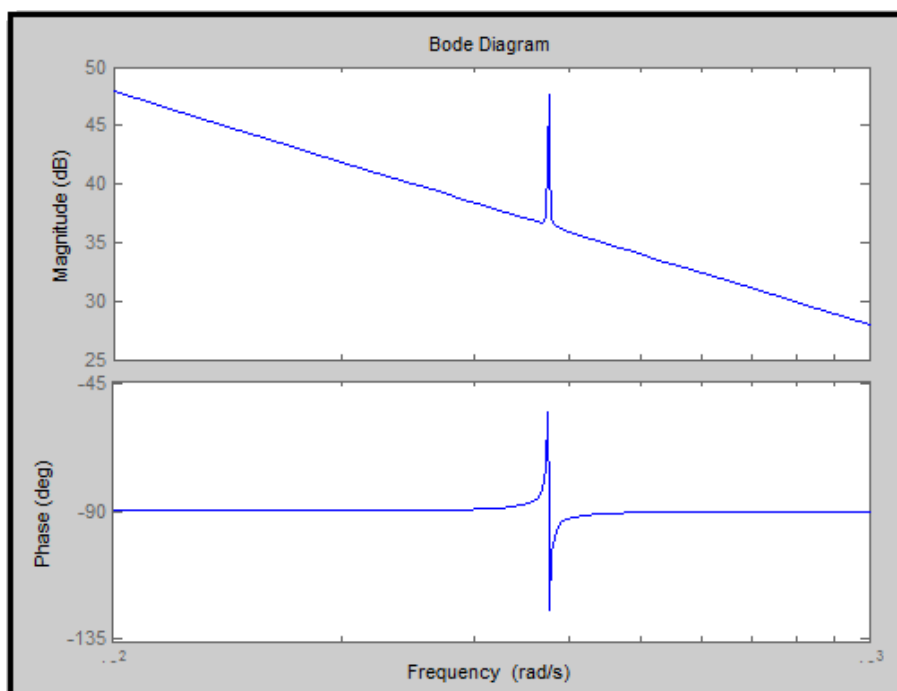


Figura 21: Diagrama de Bode em malha aberta do sistema de controle.

As equações (27), (28), (29), (30) e (31) referem-se à função de transferência em malha fechada do sistema de controle.

$$FTMF = \frac{Gc(s).Gp(s)}{1+Gc(s).Gp(s)} \quad (27)$$

$$FTMF = \frac{\frac{Kp(S^2+2.\zeta.Wn.S+W^2n)+Kr.S}{L.S(S^2+2.\zeta.Wn.S+W^2n)}}{1+\frac{Kp(S^2+2.\zeta.Wn.S+W^2n)+Kr.S}{L.S(S^2+2.\zeta.Wn.S+W^2n)}} \quad (28)$$

$$FTMF = \frac{\frac{Kp(S^2+2.\zeta.Wn.S+W^2n)+Kr.S}{L.S(S^2+2.\zeta.Wn.S+W^2n)}}{\frac{L.S(S^2+2.\zeta.Wn.S+W^2n)+Kp(S^2+2.\zeta.Wn.S+W^2n)+Kr.S}{L.S(S^2+2.\zeta.Wn.S+W^2n)}} \quad (29)$$

$$FTMF = \frac{Kp(S^2+2.\zeta.Wn.S+W^2n)+Kr.S}{L.S(S^2+2.\zeta.Wn.S+W^2n)+Kp(S^2+2.\zeta.Wn.S+W^2n)+Kr.S} \quad (30)$$

$$FTMF = \frac{S^2.Kp+S(Kp2.\zeta.Wn+Kr)+Kp.W^2n}{S^3.L+S^2(2.\zeta.Wn.L+Kp)+S(L.W^2n+2.\zeta.Wn.Kp+Kr)+Kp.W^2n} \quad (31)$$

A Figura 22 mostra o Diagrama de Bode da função de transferência em malha fechada do sistema de controle.

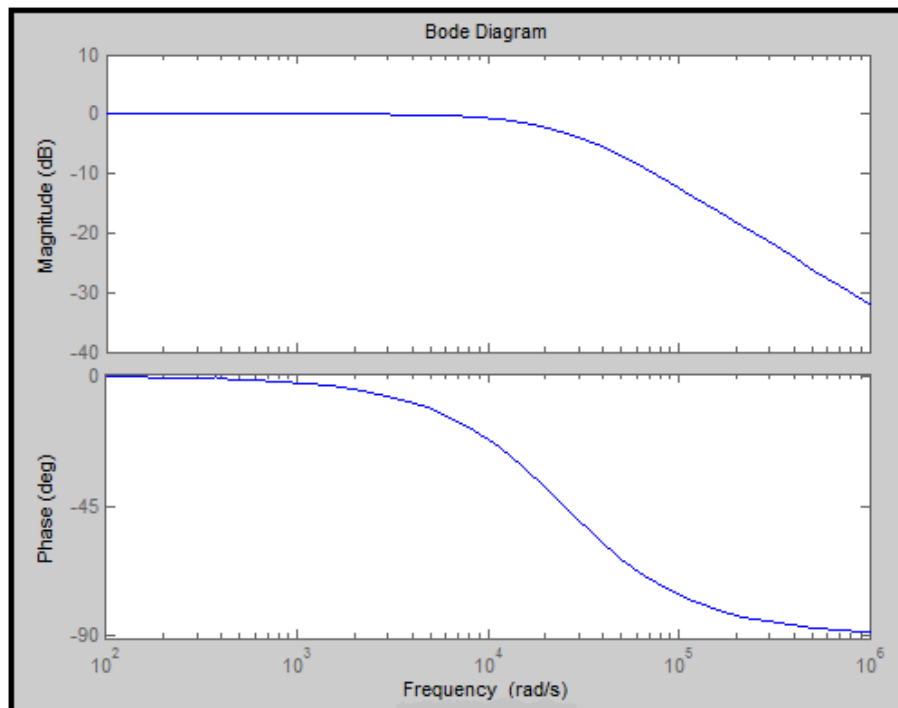


Figura 22: Diagrama de Bode em malha fechada do sistema de controle.

Após, desenvolvido o código, foram realizados os ajustes dos ganhos K_p e K_r para que o sistema atingisse o comportamento esperado. Desta forma, observa-se que a tensão de saída, com frequência de 60 Hz, apresenta erro nulo em regime permanente à frequência de ressonância (277π rad/s). Também se pode observar, através da Figura 23, que o sistema de controle consegue rastrear a referência senoidal da corrente.

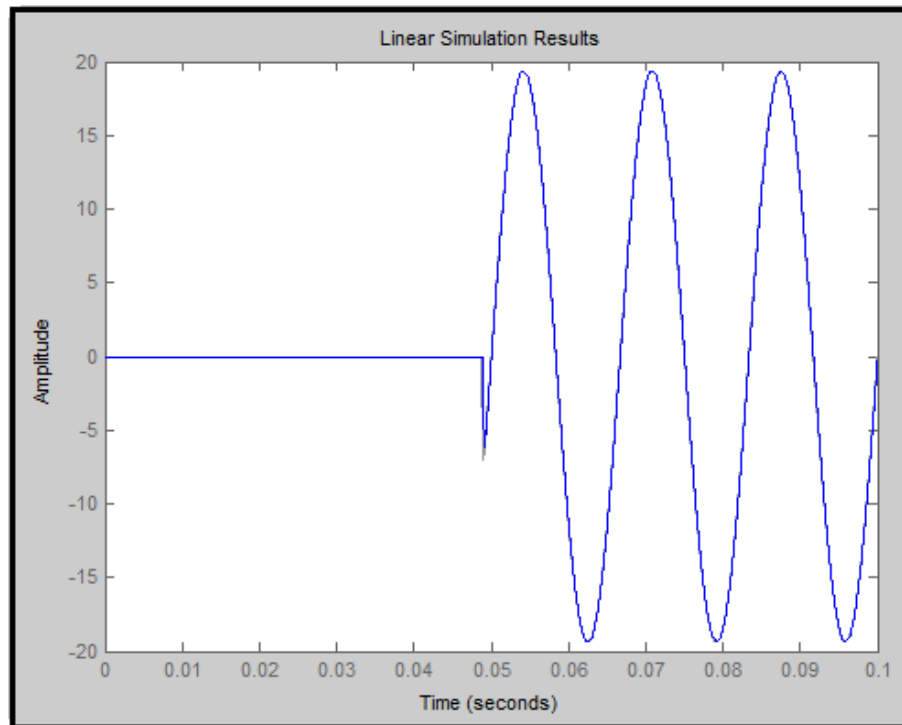


Figura 23: Seguimento da referência de corrente.

Depois de concluído o projeto de controle, a função de transferência do controlador foi inserida no diagrama de blocos do sistema de controle no Software PSIM, onde foi considerado o ganho de $1/V_{cc}$ para todas as topologias estudadas. A próxima etapa constituiu na junção do sistema de controle com o de modulação das topologias, e assim, puderam-se realizar as simulações das mesmas. A Figura 24 mostra o diagrama de blocos do sistema de controle e de modulação para o inversor Full-Bridge com modulação bipolar.

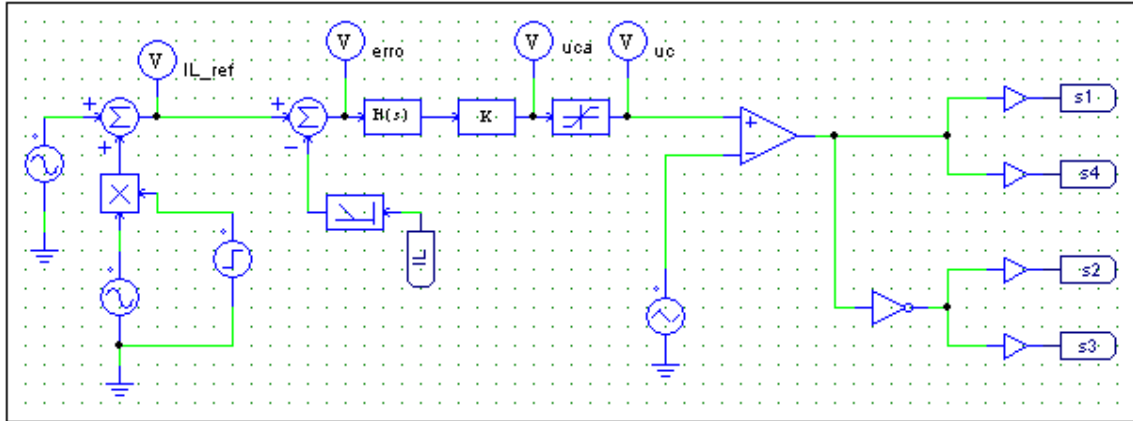


Figura 24: Diagrama de blocos do sistema de controle e modulação no Software PSIM.

4.3 Capacitor de Entrada

O capacitor do barramento CC, entrada do inversor, pode ser calculado usando-se a definição de um valor máximo de ondulação para a tensão do barramento. A equação (32) permite a realização deste cálculo [2].

$$C_{PV} = \frac{P_{PV(máx)}}{4\pi f_0 \Delta V_{CC(máx)} V_{CC(máx)}} \quad (32)$$

Onde: C_{PV} é a capacitância do capacitor do barramento CC.

$P_{PV(máx)}$ é a máxima potência do sistema PV.

f_0 é a frequência fundamental.

$\Delta V_{CC(máx)}$ é a ondulação da máxima tensão do barramento CC.

$V_{CC(máx)}$ é a máxima tensão do barramento CC.

Considerando uma ondulação de 2% na tensão aplicada ao barramento CC, a partir da equação (32) podemos dimensionar o capacitor de entrada do inversor.

$$C_{PV} = \frac{3044,037}{4\pi \cdot 60,8041402,05} \cong 1250 \mu F \quad (33)$$

4.4 Filtro de Saída

Para a obtenção do valor da indutância do filtro de saída das topologias dos inversores estudados foi realizada a fixação de um valor comum de THD total na corrente de saída das mesmas. Utilizando o Software PSIM, foram realizadas inúmeras simulações, variando-se o valor da indutância do filtro de saída, até obter um valor de THD , aproximadamente, igual a 1,4%. A Figura 25 mostra a forma de onda da corrente de saída do inversor Full-Bridge com modulação unipolar.

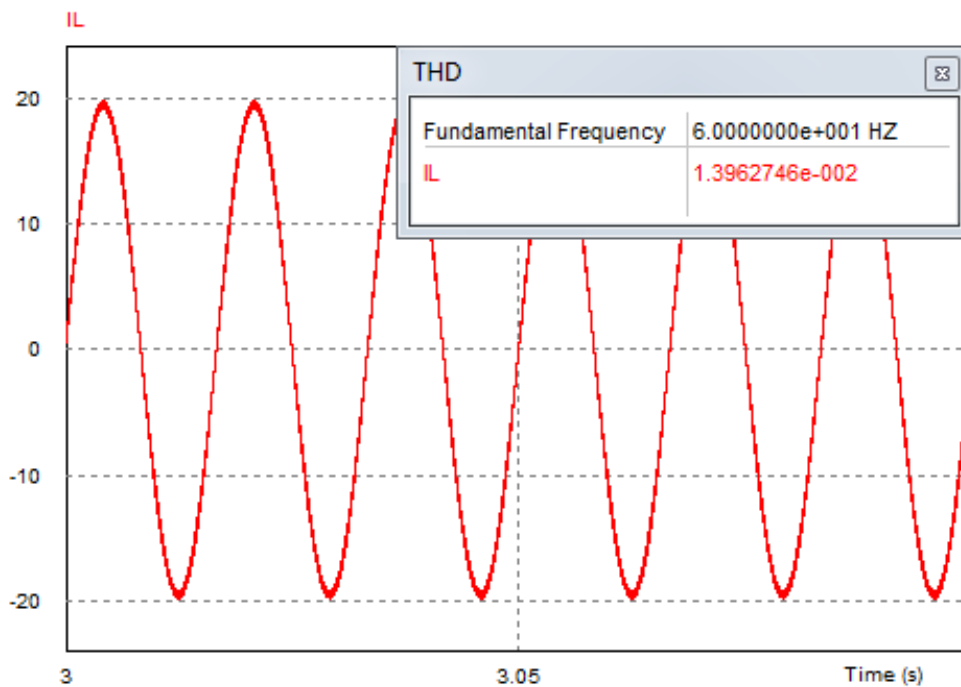


Figura 25: Forma de onda da corrente de saída do inversor Full-Bridge com modulação unipolar e sua respectiva THD total.

Como observado na Figura 25, a corrente de saída obedece à norma IEEE 1547, descrita na seção 2.3, que estabelece uma THD total inferior ou igual a 5%. Outra análise realizada no domínio da frequência refere-se às harmônicas individuais de ordem (h) da corrente de saída. Estes limites de distorção harmônica máxima estão dispostos na Tabela 5.

Tabela 5 - Distorção máxima de harmônicas individuais pela norma IEEE 1547.

Harmônica Individual de ordem h	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$
Ímpares (%)	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3
Pares (%)	1,0	0,5	0,375	0,15	0,075

A Figura 26 mostra a disposição dos espectros das harmônicas situadas em 30 kHz, que é o dobro da frequência de chaveamento, e em 60 kHz.

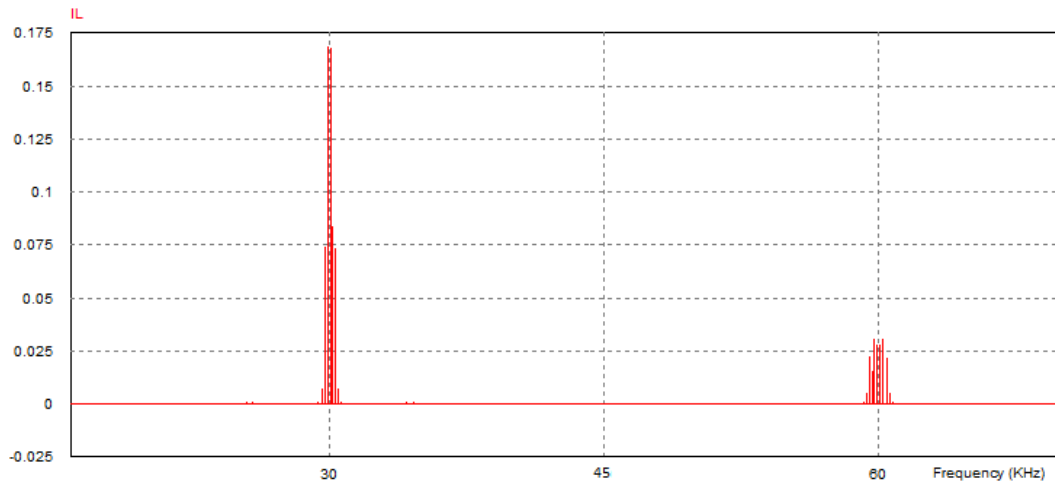


Figura 26: Espectro harmônico do sinal da corrente de saída do inversor Full-Bridge com modulação unipolar.

Sabendo-se que a corrente de pico de saída do inversor é de 19,37 A, e através da análise da Figura 26, observa-se que os valores de distorção máxima de harmônicas individuais, da Tabela 5, são atendidos. Portanto, para o dimensionamento da indutância do filtro de saída, foram analisadas porcentagens das ordens harmônicas individuais, ímpares e pares, para ver se estas satisfaziam aos critérios estabelecidos pela norma IEEE 1547. Estas mesmas análises foram realizadas para cada inversor individualmente, e, desta forma, a obtenção do valor da indutância obedeceu a um mesmo critério para todos os casos.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos, através das simulações em Software, referentes às perdas nos dispositivos semicondutores, por condução e comutação, da eficiência, do tamanho do filtro de saída e da corrente de fuga para cada uma das topologias. Também será realizada uma análise destes resultados, que visa entender o comportamento de uma topologia com a variação da irradiação solar, e a posterior, comparação entre as topologias.

5.1 Resultados da Topologia Full-Bridge Bipolar

A seguir, serão apresentados e analisados, separadamente, os resultados de cada quesito estudado para a topologia Full-Bridge com modulação bipolar.

5.1.1 Tamanho do Filtro de Saída

A partir do critério especificado na seção 4.4, obteve-se uma indutância de **14 mH** para o filtro indutivo de saída da topologia Full-Bridge com modulação bipolar.

5.1.2 Perdas de Condução e Comutação no Diodo e na Chave

As perdas por condução nas chaves ($P_{cnd.(S)}$) e nos diodos ($P_{cnd.(D)}$) e as perdas por comutação nas chaves ($P_{cmt.(S)}$) e nos diodos ($P_{cmt.(D)}$), com variação da irradiação solar, para a topologia Full-Bridge com modulação bipolar podem ser observadas na Figura 27.

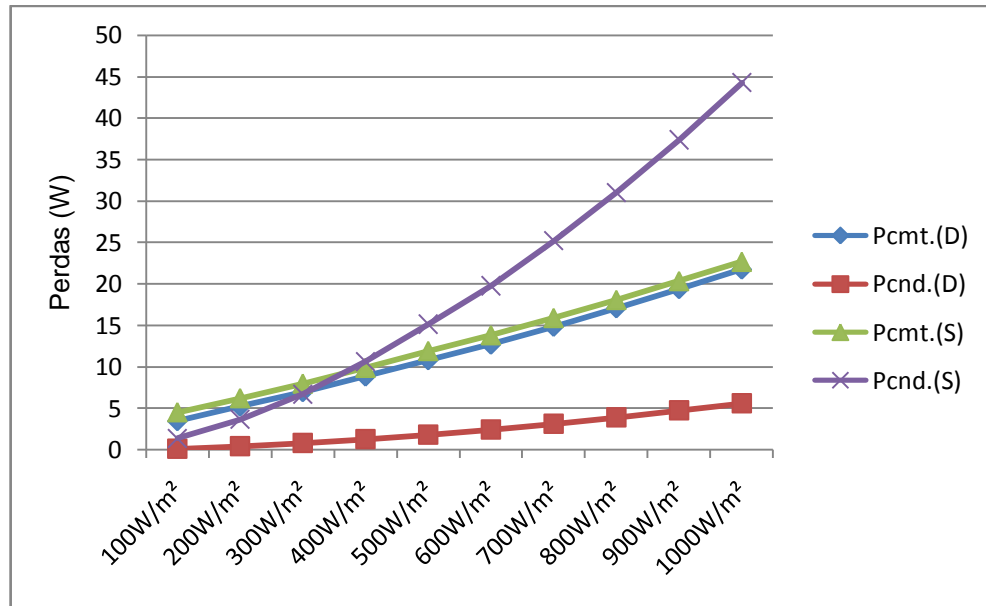


Figura 27: Perdas de condução e comutação no diodo e na chave, com variação da irradiação solar, para a topologia Full-Bridge com modulação Bipolar.

Observa-se que as perdas por condução na chave são maiores do que as demais perdas por condução e comutação para irradiações solares acima de 400 W/m², isto se deve principalmente devido ao aumento da corrente processada pelo inversor. Para a irradiação de 1000 W/m² as perdas por condução na chave são praticamente o dobro das perdas por comutação nas chaves e nos diodos. As perdas por condução no diodo apresentam valores bem menores do que as demais perdas para todos os valores de irradiação, e as perdas por comutação da chave e do diodo são semelhantes.

5.1.3 Perdas Totais

As perdas totais nos dispositivos semicondutores, com variação da irradiação solar, para a topologia Full-Bridge com modulação bipolar podem ser observadas na Figura 28.

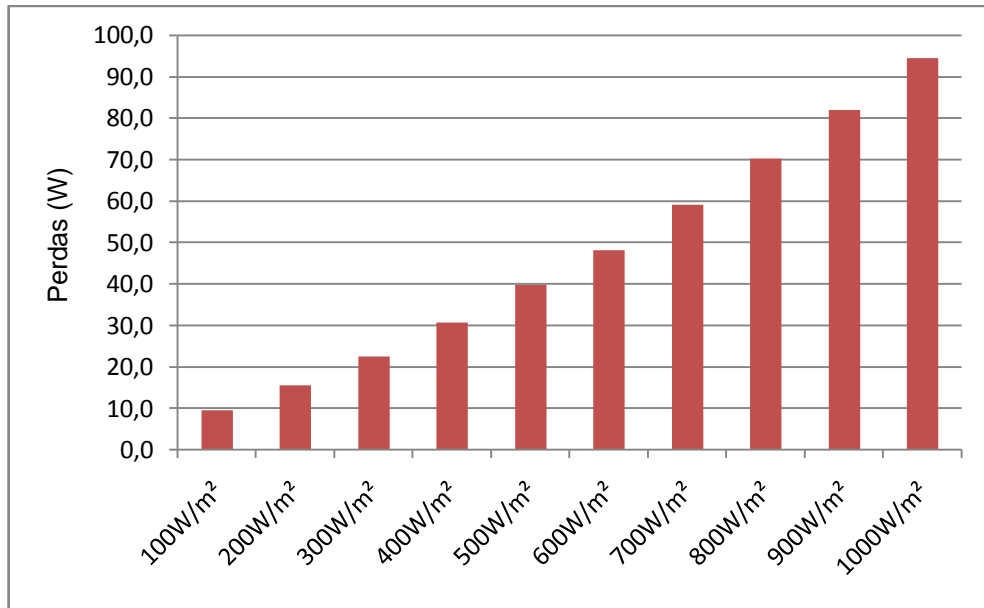


Figura 28: Perdas totais nos dispositivos semicondutores, com a variação da irradiação solar, para a topologia Full-Bridge com modulação Bipolar.

Na Figura 28, observa-se que as perdas totais nos dispositivos semicondutores possuem um comportamento quase linear, aumentando proporcionalmente com a variação da irradiação solar. Isto se deve pelo fato do inversor absorver potências diferentes do sistema fotovoltaico para cada irradiação, desta forma, as perdas aumentam à medida que a potência absorvida também aumenta.

5.1.4 Eficiência

A eficiência da topologia Full-Bridge com modulação bipolar para a variação da irradiação solar pode ser observada na Figura 29.

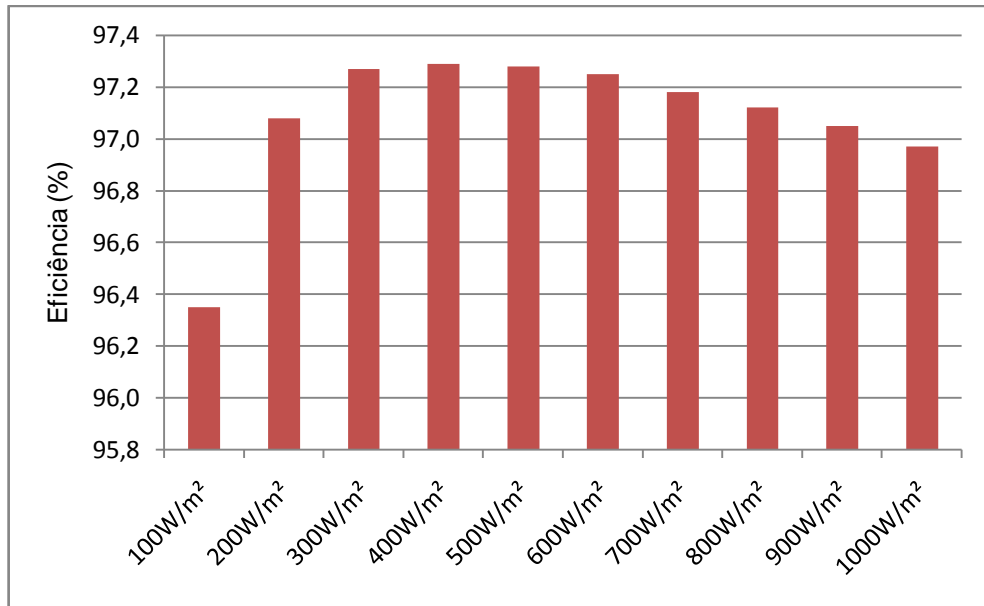


Figura 29: Eficiência, com a variação da irradiação solar, para a topologia Full-Bridge com modulação Bipolar.

Observa-se que a eficiência do inversor aumenta à medida que irradiação solar diminui, até chegar à irradiação de 400 W/m², a partir deste ponto a eficiência começa a diminuir, para a irradiação de 100 W/m² há uma queda mais acentuada. Desta forma, a Figura 29 está condizente com a curva típica de conversores estáticos, onde existe baixa eficiência para baixas potências processadas. A eficiência é elevada para valores intermediários de potência e apresenta uma leve queda próximo aos valores nominais.

5.1.5 Corrente de Fuga

Para a realização das simulações, deste quesito, foram utilizados, uma capacitância parasita de 10 nF, uma resistência para o terra de 2 Ω, tensão de rede igual a 220 V e um filtro de saída de 14 mH, já dimensionado anteriormente para esta topologia, com uma resistência série de 0,1 Ω. A frequência de comutação é de 15 kHz, e a potência de entrada do inversor é variada de acordo com os valores obtidos para as diferentes irradiações solares do sistema fotovoltaico dimensionado, cujos valores se encontram na Tabela 4.

Na Figura 30 está representada a forma de onda da corrente de fuga para uma irradiação solar de 1000 W/m².

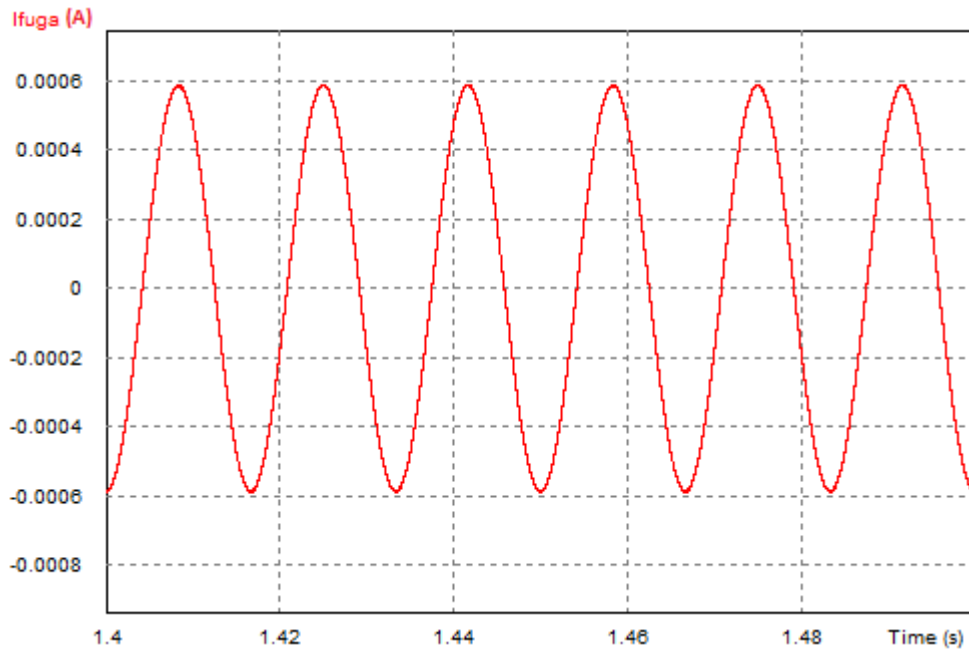


Figura 30: Forma de onda da corrente de fuga, com irradiação solar máxima, para a topologia Full-Bridge com modulação Bipolar.

Após a realização das simulações, foram coletados os valores rms das correntes de fuga para as diferentes irradiações solares. Os valores da corrente de fuga, com variação da irradiação solar, para a topologia Full-Bridge com modulação bipolar pode ser observada na Figura 31.

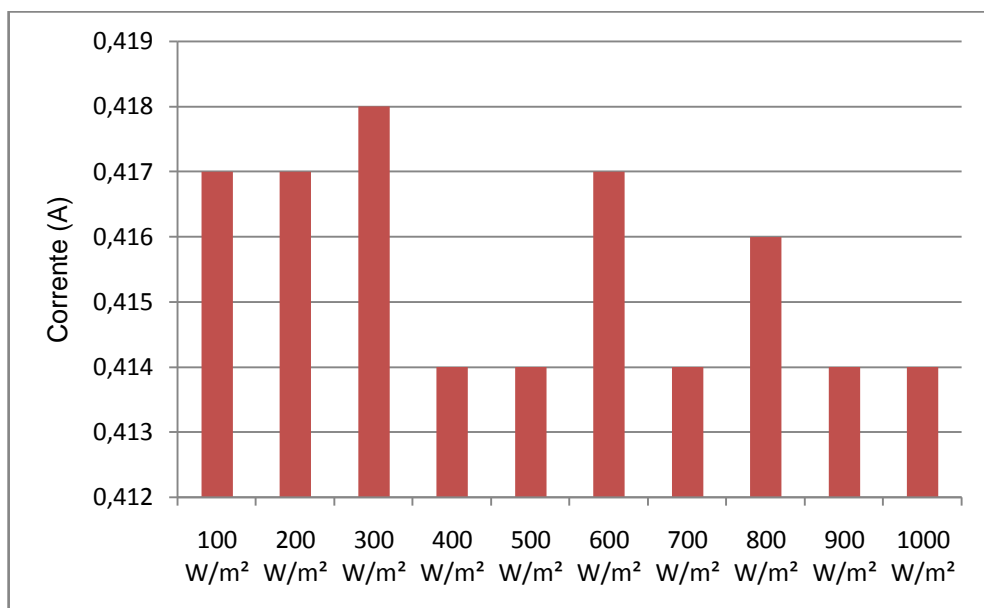


Figura 31: Corrente de fuga, com variação da irradiação solar, para a topologia Full-Bridge com modulação Bipolar.

Observa-se que a corrente de fuga do inversor varia entre 0,414 e 0,418 mA, possuindo os maiores valores entre 100 e 300 W/m², desta forma, suas variações para diferentes irradiações solares não são muito expressivas em termos numéricos.

5.2 Resultados da Topologia Full-Bridge Unipolar

A seguir, serão apresentados e analisados, separadamente, os resultados de cada quesito estudado para a topologia Full-Bridge com modulação unipolar.

5.2.1 Tamanho do Filtro de Saída

A partir do critério especificado na seção 4.4, obteve-se uma indutância de 4 mH para o filtro indutivo de saída da topologia Full-Bridge com modulação unipolar.

5.2.2 Perdas de Condução e Comutação no Diodo e na Chave

As perdas por condução nas chaves ($P_{cnd.(S)}$) e nos diodos ($P_{cnd.(D)}$) e as perdas por comutação nas chaves ($P_{cmt.(S)}$) e nos diodos ($P_{cmt.(D)}$), com variação da irradiação solar, para a topologia Full-Bridge com modulação unipolar podem ser observadas na Figura 32.

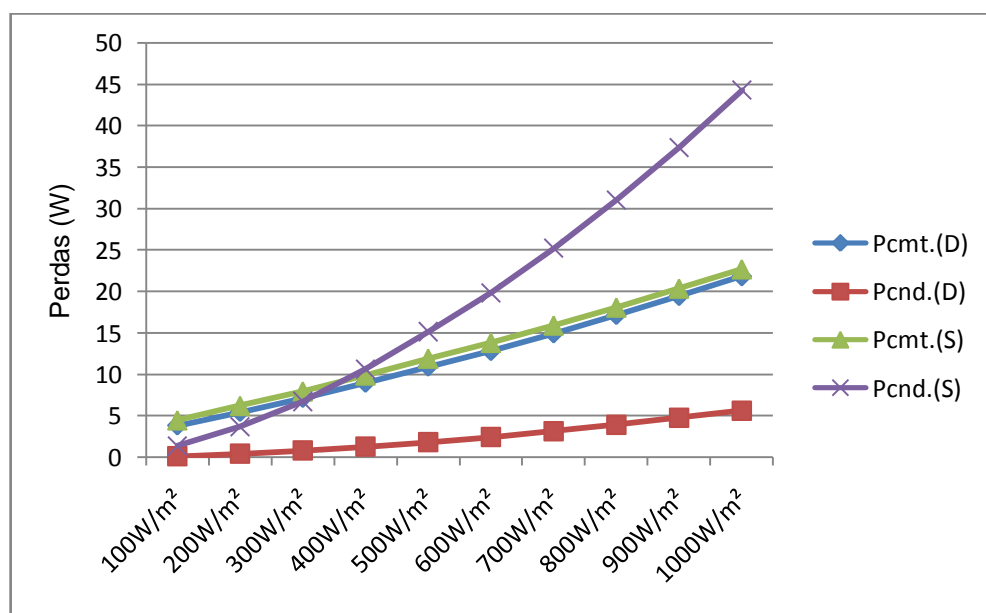


Figura 32: Perdas de condução e comutação no diodo e na chave, com variação da irradiação solar, para a topologia Full-Bridge com modulação Unipolar.

Observa-se que as perdas por condução na chave são maiores do que as demais perdas por condução e comutação para irradiações solares acima de 400 W/m², isto se deve principalmente devido ao aumento da corrente processada pelo inversor. Para a irradiação de 1000 W/m² as perdas por condução na chave são praticamente o dobro das perdas por comutação nas chaves e nos diodos. As perdas por condução no diodo apresentam valores bem menores do que as demais perdas para todos os valores de irradiação, e as perdas por comutação da chave e do diodo são semelhantes.

5.2.3 Perdas Totais

As perdas totais nos dispositivos semicondutores, com variação da irradiação solar, para a topologia Full-Bridge com modulação unipolar podem ser observadas na Figura 33.

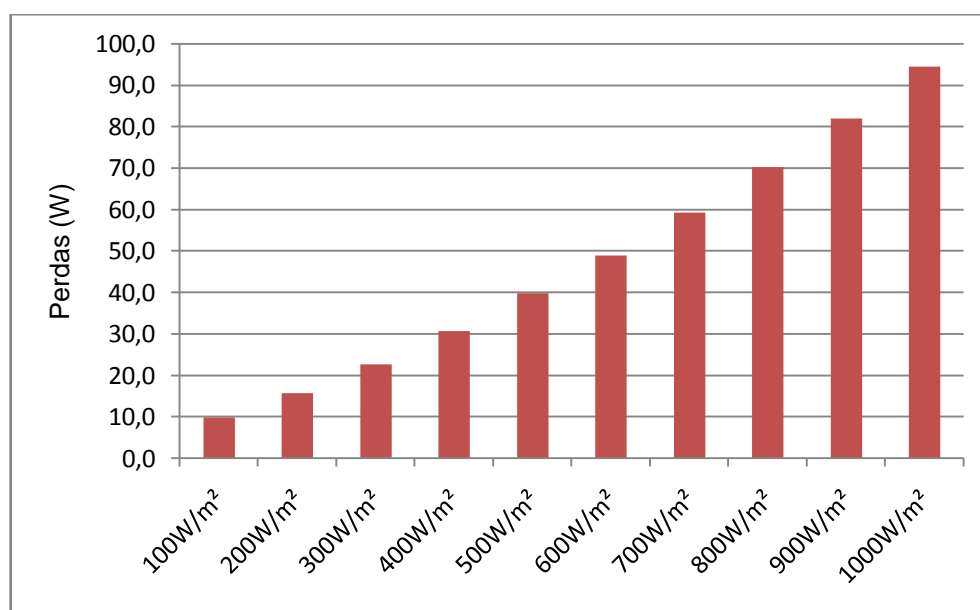


Figura 33: Perdas totais nos dispositivos semicondutores, com variação da irradiação solar, para a topologia Full-Bridge com modulação Unipolar.

Na Figura 33, observa-se que as perdas totais nos dispositivos semicondutores possuem um comportamento quase linear, aumentando proporcionalmente com a variação da irradiação solar. Isto se deve pelo fato do inversor absorver potências diferentes do sistema fotovoltaico para cada irradiação,

desta forma, as perdas aumentam à medida que a potência absorvida também aumenta.

5.2.4 Eficiência

A eficiência da topologia Full-Bridge com modulação unipolar para a variação da irradiação solar pode ser observada na Figura 34.

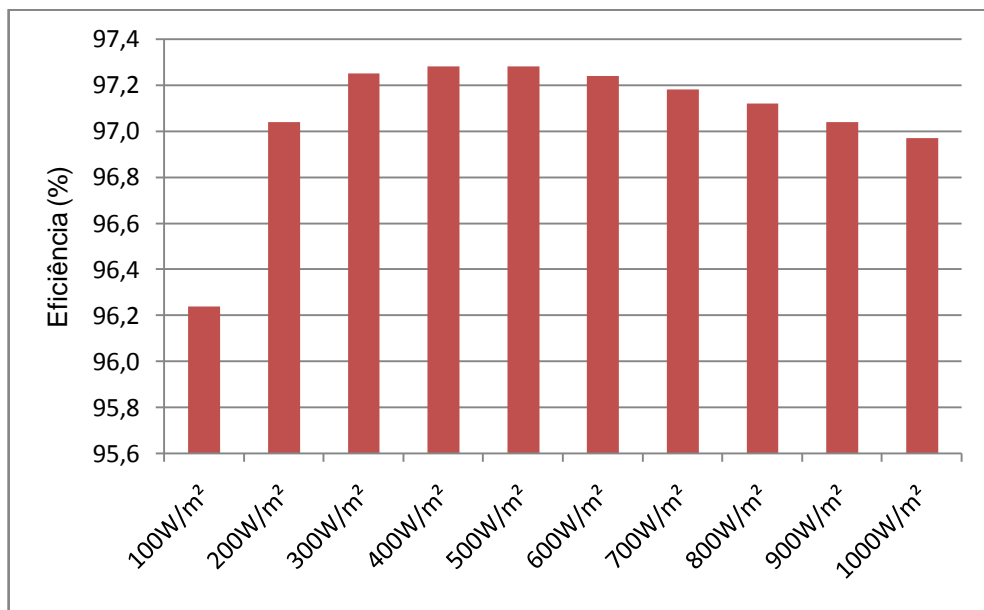


Figura 34: Eficiência, com variação da irradiação solar, para a topologia Full-Bridge com modulação Unipolar.

Observa-se que a eficiência do inversor aumenta à medida que irradiação solar diminui, até chegar à irradiação de 500 W/m², a partir deste ponto a eficiência começa a diminuir, para a irradiação de 100 W/m² há uma queda mais acentuada. Desta forma, a Figura 34 está condizente com a curva típica de conversores estáticos, onde existe baixa eficiência para baixas potências processadas. A eficiência é elevada para valores intermediários de potência e apresenta uma leve queda próximo aos valores nominais.

5.2.5 Corrente de Fuga

Para a realização das simulações, deste quesito, foram utilizados, uma capacitância parasita de 10 nF, uma resistência para o terra de 2 Ω, tensão de rede

igual a 220 V e um filtro de saída de 4 mH, já dimensionado anteriormente para esta topologia, com uma resistência série de 0,1 Ω . A frequência de comutação é de 15 kHz, e a potência de entrada do inversor é variada de acordo com os valores obtidos para as diferentes irradiações solares do sistema fotovoltaico dimensionado, cujos valores se encontram na Tabela 4.

Na Figura 35 está representada a forma de onda da corrente de fuga para uma irradiação solar de 1000 W/m².

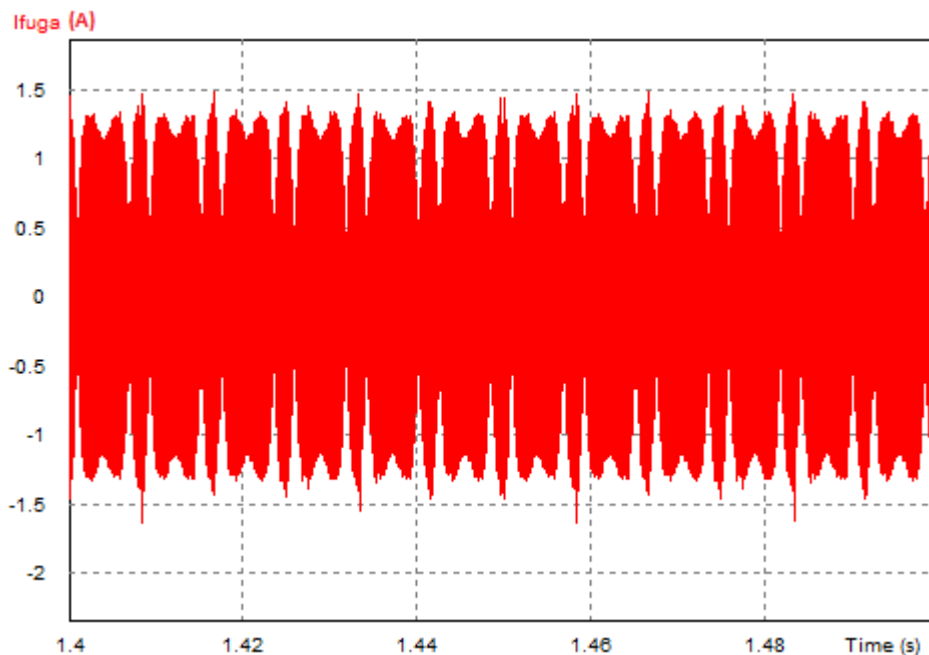


Figura 35: Forma de onda da corrente de fuga, com irradiação solar máxima, para a topologia Full-Bridge com modulação Unipolar.

Após a realização das simulações, foram coletados os valores rms das correntes de fuga para as diferentes irradiações solares. Os valores da corrente de fuga, com variação da irradiação solar, para a topologia Full-Bridge com modulação unipolar pode ser observada na Figura 36.

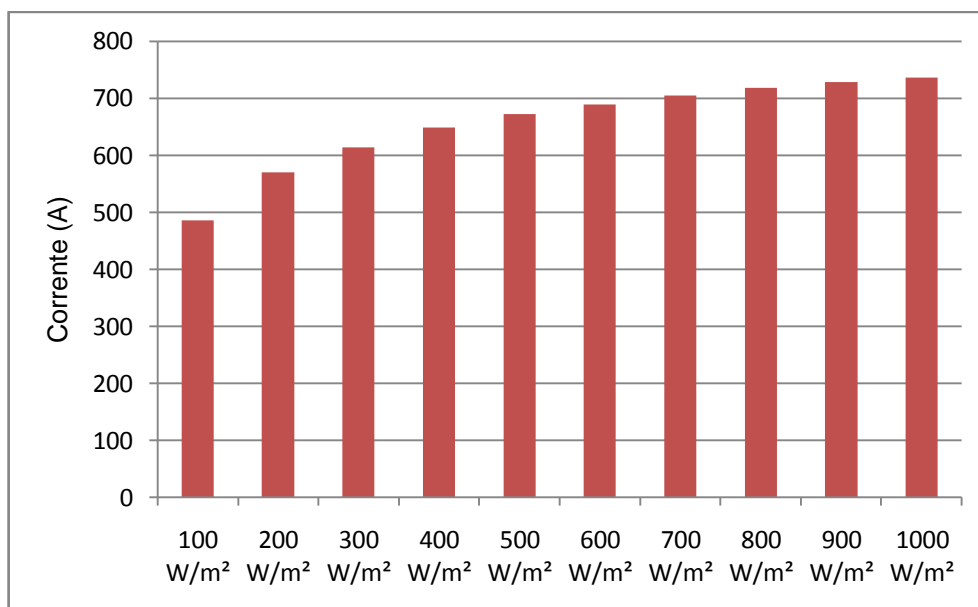


Figura 36: Corrente de fuga, com variação da irradiação solar, para a topologia Full-Bridge com modulação Unipolar.

Observa-se que a corrente de fuga do inversor sofre um decréscimo com a diminuição da irradiação solar. Sendo que entre 300 e 100 W/m² este decréscimo possui uma característica linear, para irradiações intermediárias a diminuição torna-se mais atenuada e para as irradiações máximas o decréscimo é menor. Os valores das correntes de fuga para as irradiações de 100 e 1000 W/m² são 485,736 e 736,152 mA, respectivamente. Havendo, portanto, uma diferença de 250,416 mA de diferença entre a máxima e a mínima irradiação solar.

5.3 Resultados da Topologia H5

A seguir, serão apresentados e analisados, separadamente, os resultados de cada quesito estudado para a topologia H5.

5.3.1 Tamanho do Filtro de Saída

A partir do critério especificado na seção 4.4, obteve-se uma indutância de **7,5 mH** para o filtro indutivo de saída da topologia H5.

5.3.2 Perdas de Condução e Comutação no Diodo e na Chave

As perdas por condução nas chaves ($P_{cnd.(S)}$) e nos diodos ($P_{cnd.(D)}$) e as perdas por comutação nas chaves ($P_{cmt.(S)}$) e nos diodos ($P_{cmt.(D)}$), com variação da irradiação solar, para a topologia H5 podem ser observadas na Figura 37.

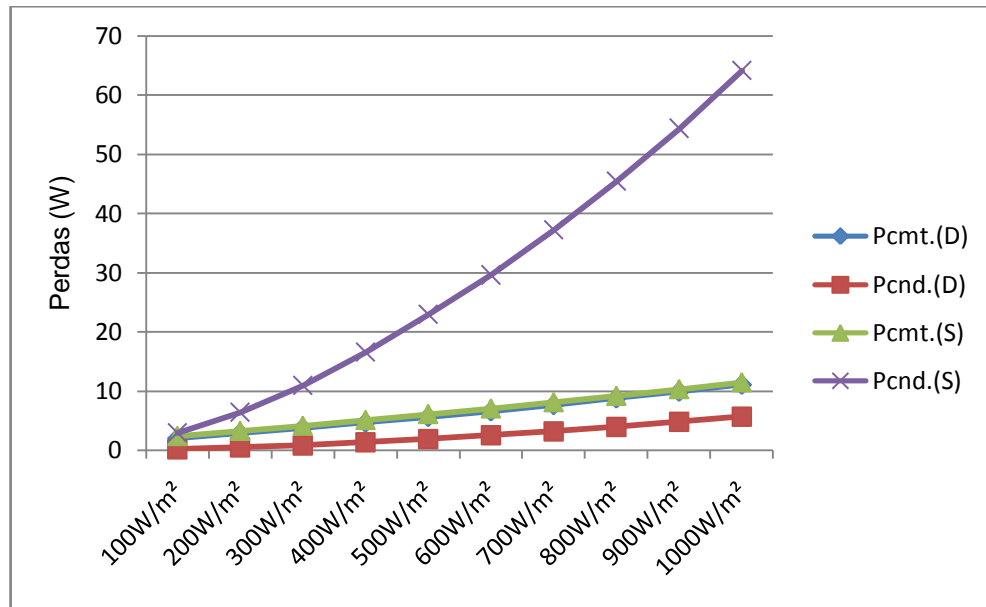


Figura 37: Perdas de condução e comutação no diodo e na chave, com variação da irradiação solar, para a topologia H5.

Observa-se que as perdas por condução na chave são bem maiores do que as demais perdas, isto se deve principalmente devido ao aumento da corrente processada pelo inversor e pelo fato de haver um dispositivo semiconductor em série com o barramento CC. Para a irradiação de $1000 W/m^2$ as perdas por condução na chave representam 69,33 % das perdas dos dispositivos semicondutores. As perdas por comutação na chave e no diodo apresentam valores semelhantes, sendo estas, basicamente o dobro das perdas de condução no diodo para a irradiação de $1000 W/m^2$.

5.3.3 Perdas Totais

As perdas totais nos dispositivos semicondutores, com variação da irradiação solar, para a topologia H5 podem ser observadas na Figura 38.

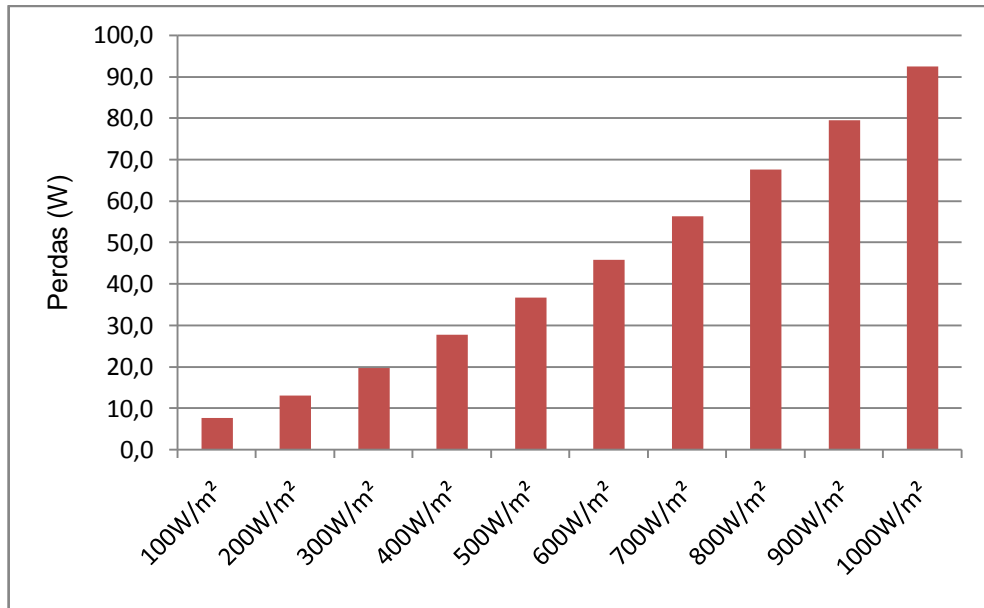


Figura 38: Perdas totais, com variação da irradiação solar, para a topologia H5.

Na Figura 38, observa-se que as perdas totais nos dispositivos semicondutores possuem um comportamento quase linear, aumentando proporcionalmente com a variação da irradiação solar. Isto se deve pelo fato do inversor absorver potências diferentes do sistema fotovoltaico para cada irradiação, desta forma, as perdas aumentam à medida que a potência absorvida também aumenta.

5.3.4 Eficiência

A eficiência da topologia H5 para a variação da irradiação solar pode ser observada na Figura 39.

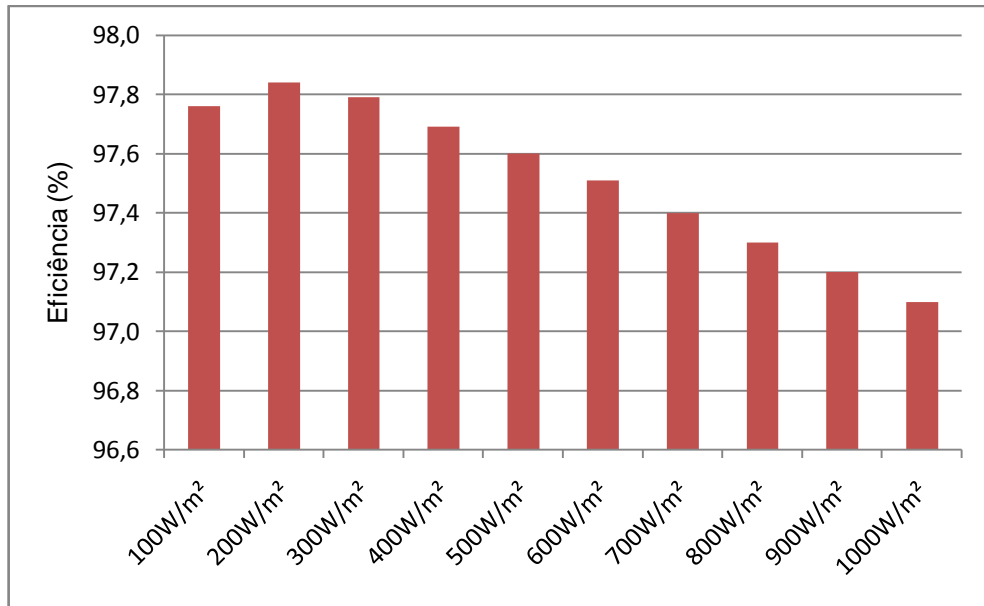


Figura 39: Eficiência, com variação da irradiação solar, para a topologia H5.

Observa-se que a eficiência do inversor aumenta à medida que irradiação solar diminui, até chegar à irradiação de 200 W/m², a partir deste ponto a eficiência começa a diminuir, em conformidade com a curva típica de conversores estáticos, onde existe baixa eficiência para baixas potências processadas. Para esta topologia a eficiência varia, praticamente, de forma linear de 300 W/m² a 1000 W/m².

5.3.5 Corrente de Fuga

Para a realização das simulações, deste quesito, foram utilizados, uma capacitância parasita de 10 nF, uma resistência para o terra de 2 Ω, tensão de rede igual a 220 V e um filtro de saída de 7,5 mH, já dimensionado anteriormente para esta topologia, com uma resistência série de 0,1 Ω. A frequência de comutação é de 15 kHz, e a potência de entrada do inversor é variada de acordo com os valores obtidos para as diferentes irradiações solares do sistema fotovoltaico dimensionado, cujos valores se encontram na Tabela 4.

Na Figura 40 está representada a forma de onda da corrente de fuga para uma irradiação solar de 1000 W/m².

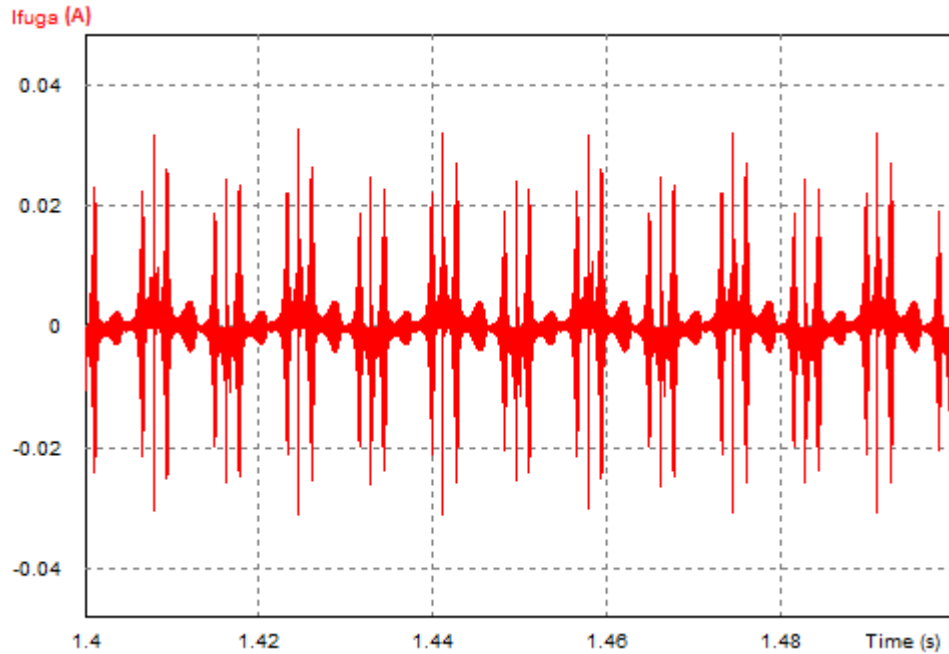


Figura 40: Forma de onda da corrente de fuga, com irradiação solar máxima, para a topologia H5.

Após a realização das simulações, foram coletados os valores rms das correntes de fuga para as diferentes irradiações solares. Os valores da corrente de fuga, com variação da irradiação solar, para a topologia H5 pode ser observada na Figura 41.

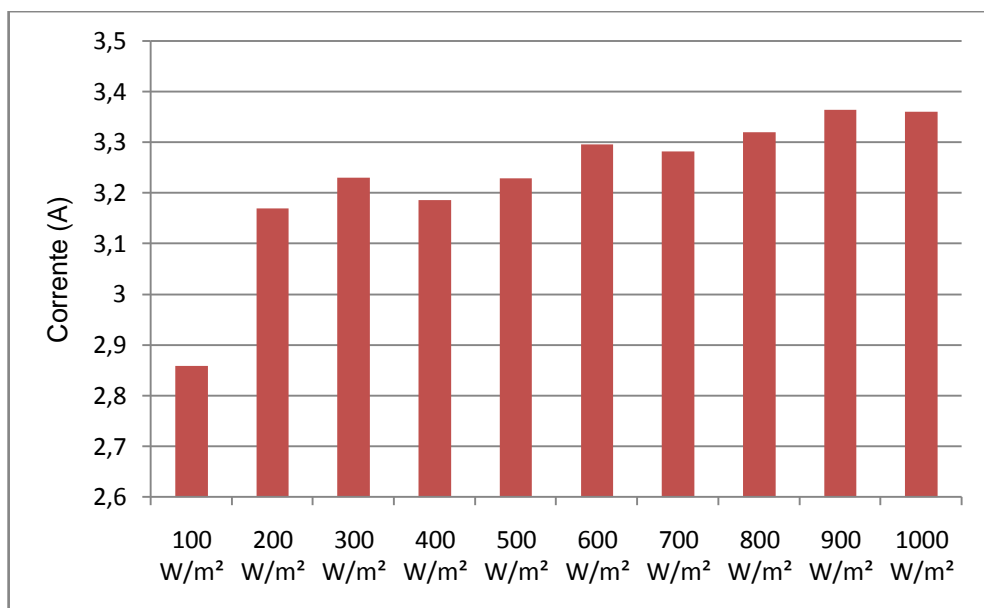


Figura 41: Corrente de fuga, com variação da irradiação solar, para a topologia H5.

Observa-se que a corrente de fuga do inversor apresenta algumas variações intermediárias, mas que a característica geral do mesmo apresenta uma tendência

de queda da corrente de fuga com a diminuição da irradiação solar. O menor valor é encontrado para a irradiação de 100 W/m^2 .

5.4 Resultados da Topologia HERIC

A seguir, serão apresentados e analisados, separadamente, os resultados de cada quesito estudado para a topologia HERIC.

5.4.1 Tamanho do Filtro de Saída

A partir do critério especificado na seção 4.4, obteve-se uma indutância de **7,5 mH** para o filtro indutivo de saída da topologia HERIC.

5.4.2 Perdas de Condução e Comutação no Diodo e na Chave

As perdas por condução nas chaves ($P_{\text{cnd.}(S)}$) e nos diodos ($P_{\text{cnd.}(D)}$) e as perdas por comutação nas chaves ($P_{\text{cmt.}(S)}$) e nos diodos ($P_{\text{cmt.}(D)}$), com variação da irradiação solar, para a topologia HERIC podem ser observadas na Figura 42.

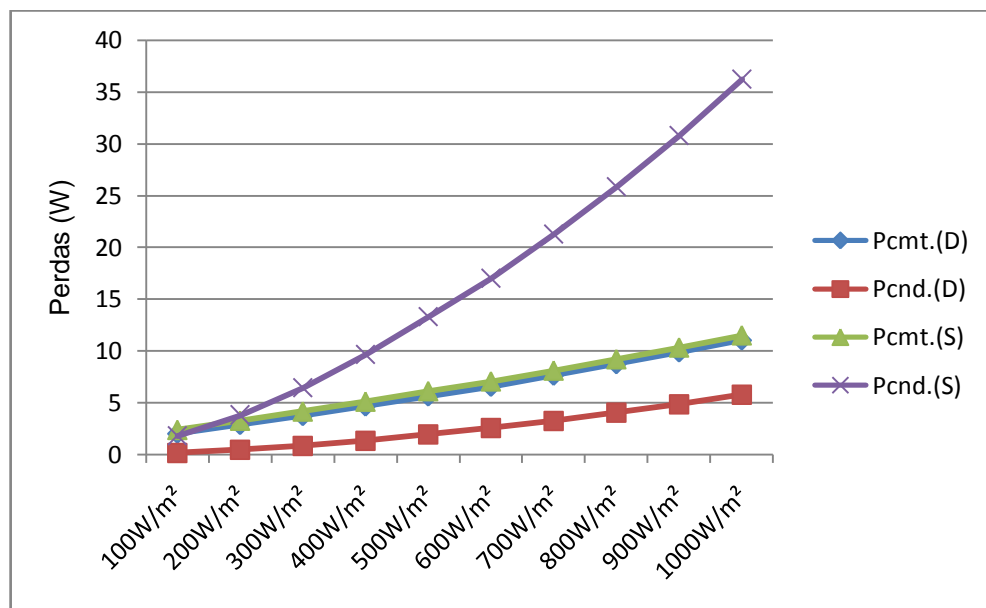


Figura 42: Perdas de condução e comutação no diodo e na chave, com variação da irradiação solar, para a topologia HERIC.

Observa-se que as perdas por condução na chave são bem maiores do que as demais perdas, isto se deve principalmente devido ao aumento da corrente processada pelo inversor. Para a irradiação de 1000 W/m^2 as perdas por condução na chave representam $56,08 \%$ das perdas dos dispositivos semicondutores. As perdas por comutação na chave e no diodo apresentam valores semelhantes, sendo estas, basicamente o dobro das perdas de condução no diodo para a irradiação de 1000 W/m^2 .

5.4.3 Perdas Totais

As perdas totais nos dispositivos semicondutores, com variação da irradiação solar, para a topologia HERIC podem ser observadas na Figura 43.

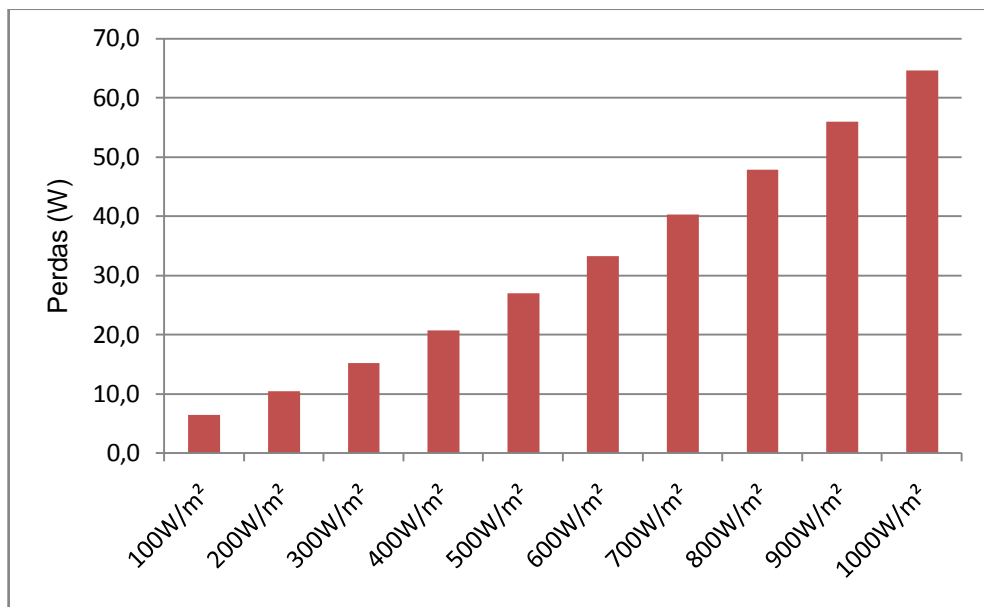


Figura 43: Perdas totais, com variação da irradiação solar, para a topologia HERIC.

Na Figura 43, observa-se que as perdas totais nos dispositivos semicondutores possuem um comportamento quase linear, aumentando proporcionalmente com a variação da irradiação solar. Isto se deve pelo fato do inversor absorver potências diferentes do sistema fotovoltaico para cada irradiação, desta forma, as perdas aumentam à medida que a potência absorvida também aumenta.

5.4.4 Eficiência

A eficiência da topologia HERIC para a variação da irradiação solar pode ser observada na Figura 44.

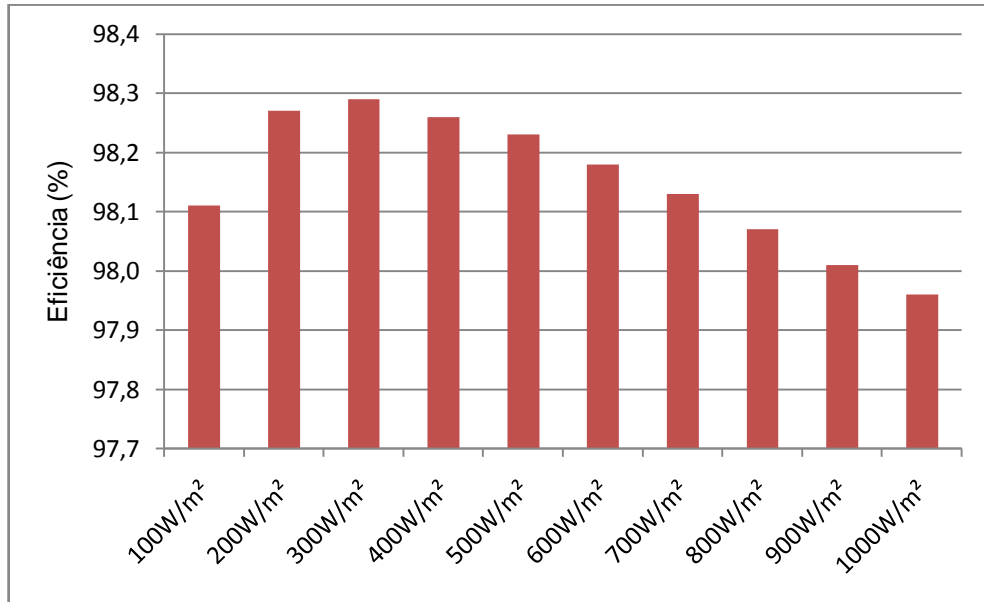


Figura 44: Eficiência, com variação da irradiação solar, para a topologia HERIC.

Observa-se que a eficiência do inversor aumenta à medida que irradiação solar diminui, até chegar à irradiação de 300 W/m², a partir deste ponto a eficiência começa a diminuir, estando em conformidade com a curva típica de conversores estáticos, onde existe baixa eficiência para baixas potências processadas. A eficiência é elevada para valores intermediários de potência e apresenta uma leve queda próximo aos valores nominais.

5.4.5 Corrente de Fuga

Para a realização das simulações, deste quesito, foram utilizados, uma capacitância parasita de 10 nF, uma resistência para o terra de 2 Ω , tensão de rede igual a 220 V e um filtro de saída de 7,5 mH, já dimensionado anteriormente para esta topologia, com uma resistência série de 0,1 Ω . A frequência de comutação é de 15 kHz, e a potência de entrada do inversor é variada de acordo com os valores obtidos para as diferentes irradiações solares do sistema fotovoltaico dimensionado, cujos valores se encontram na Tabela 4.

Na Figura 45 está representada a forma de onda da corrente de fuga para uma irradiação solar de 1000 W/m²

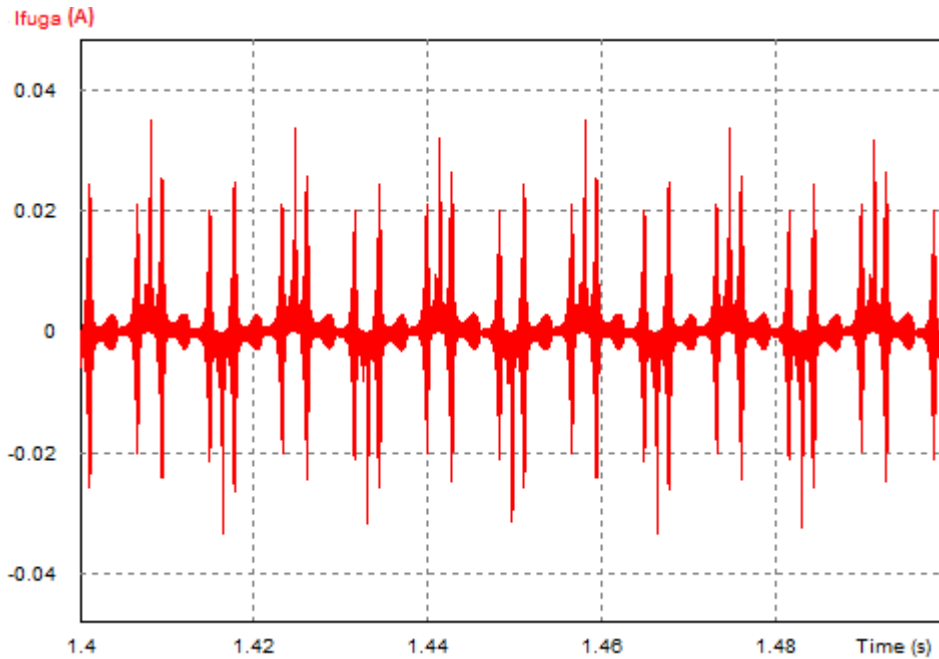


Figura 45: Forma de onda da corrente de fuga, com irradiação solar máxima, para a topologia HERIC.

Após a realização das simulações, foram coletados os valores rms das correntes de fuga para as diferentes irradiações solares. Os valores da corrente de fuga, com variação da irradiação solar, para a topologia H5 pode ser observada na Figura 46.

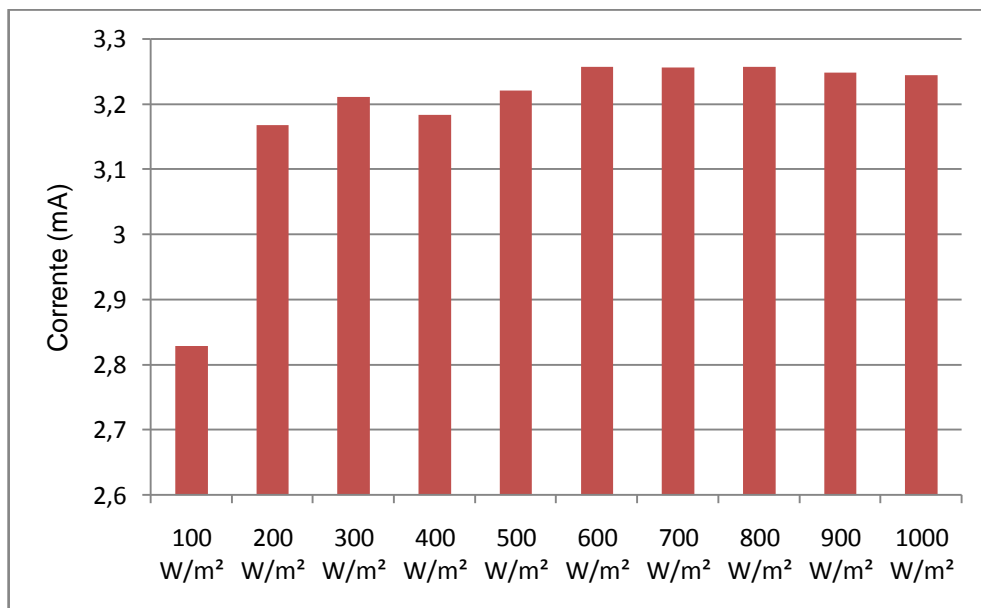


Figura 46: Corrente de fuga, com variação da irradiação solar, para a topologia HERIC.

Observa-se que a corrente de fuga do inversor apresenta os maiores valores entre 500 e 1000 W/m², e apresenta o menor valor para a irradiação de 100 W/m².

5.5 Comparação entre os Resultados das Topologias

Após a análise dos resultados individuais de cada topologia, será realizada uma análise comparativa entre as topologias para cada um dos quesitos estudados.

5.5.1 Tamanho do Filtro de Saída

Na Tabela 6 encontram-se os valores das indutâncias do filtro de saída de cada um dos inversores estudados.

Tabela 6 – Valores das indutâncias do filtro de saída das topologias estudadas.

Topologias	Indutância do filtro de saída (mH)
Full-Bridge Bipolar	14,0
Full-Bridge Unipolar	4,0
H5	7,5
HERIC	7,5

Observa-se que o inversor que apresenta um menor valor de indutância é o Full-Bridge com modulação unipolar, em contrapartida, o Full-Bridge operando com modulação bipolar requer o maior valor. O H5 e o HERIC requerem o mesmo valor de indutância para os seus filtros de saída.

5.5.2 Perdas por Condução

A comparação das perdas por condução, com variação da irradiação solar, entre as topologias Full-Bridge (com modulação bipolar e unipolar), H5 e HERIC pode ser observada na Figura 47.

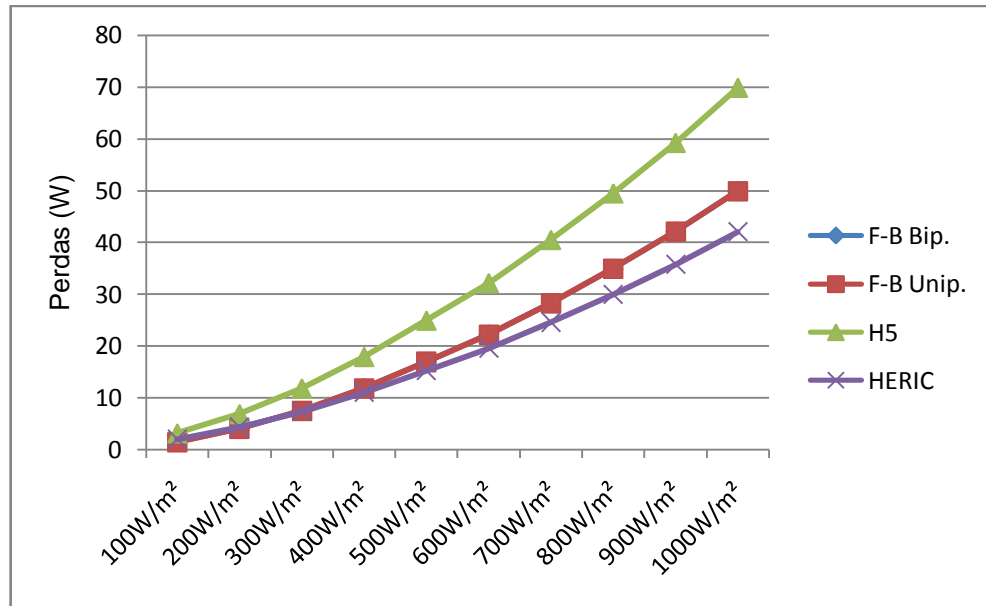


Figura 47: Comparação das perdas por condução com variação da irradiação solar entre as topologias Full-Bridge (com modulação bipolar e unipolar), H5 e HERIC.

Através da Figura 47, observa-se que as características das perdas por condução nos dispositivos semicondutores, com a variação da irradiação solar, são as mesmas para todas as topologias. As topologias Full-Bridge com modulação bipolar e unipolar possuem valores muito semelhantes, a ponto de uma curva se sobrepor à outra. Já a topologia H5 é a que possui as maiores perdas por condução, enquanto que a topologia HERIC é a que apresenta as menores perdas.

A comparação das perdas por condução, para a irradiação solar máxima (1000 W/m²), entre as topologias Full-Bridge (com modulação bipolar e unipolar), H5 e HERIC pode ser observada na Figura 48.

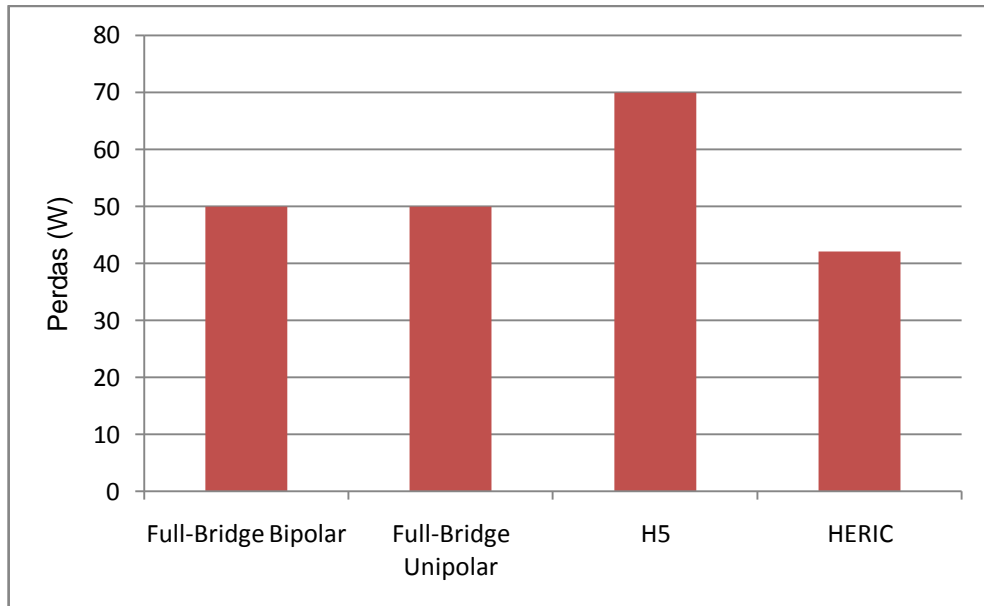


Figura 48: Comparação das perdas por condução, com irradiação solar máxima, entre as topologias Full-Bridge (com modulação bipolar e unipolar), H5 e HERIC.

Na Figura 48 observa-se que, para uma irradiação solar máxima, o valor das perdas por condução nos dispositivos semicondutores das topologias Full-Bridge com modulação bipolar e unipolar são semelhantes, sendo 49,91 e 49,92 W, respectivamente. A topologia H5 apresenta as maiores perdas, sendo estas de 69,88 W, enquanto que a topologia HERIC apresenta as menores perdas, sendo estas de 42,04 W.

5.5.3 Perdas por Comutação

A comparação das perdas por comutação, com variação da irradiação solar, entre as topologias Full-Bridge (com modulação bipolar e unipolar), H5 e HERIC pode ser observada na Figura 49.

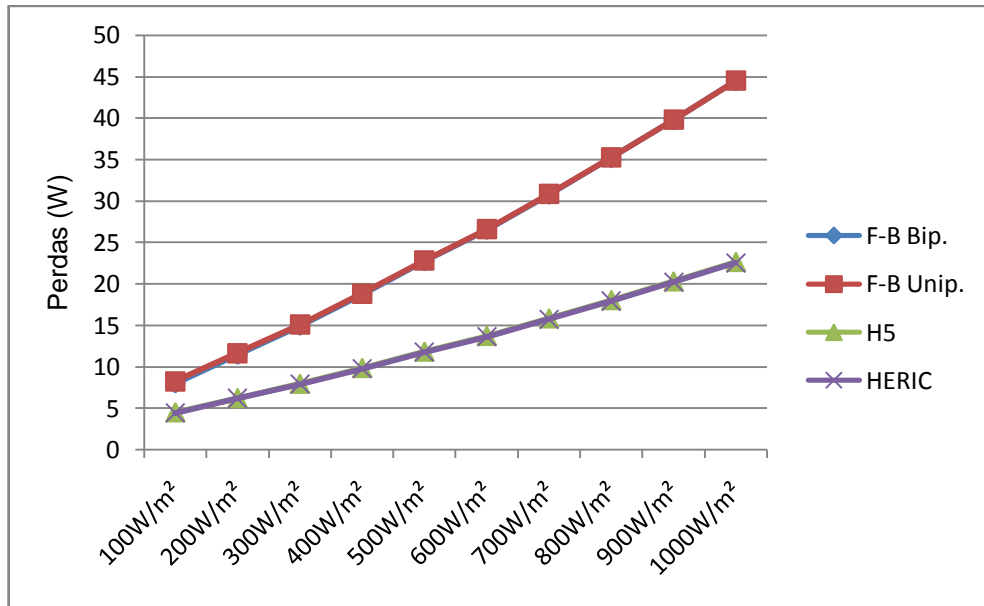


Figura 49: Comparação das perdas por comutação, com variação da irradiação solar, entre as topologias Full-Bridge (com modulação bipolar e unipolar), H5 e HERIC.

Através da Figura 49, observa-se que as características das perdas por comutação nos dispositivos semicondutores, com a variação da irradiação solar, são as mesmas para todas as topologias. As topologias Full-Bridge com modulação bipolar e unipolar possuem valores muito semelhantes, a ponto de uma curva se sobrepor à outra, o mesmo fato ocorre entre as topologias H5 e HERIC, a diferença é que estas duas últimas apresentam valores menores, quase a metade, do que as duas primeiras.

A comparação das perdas por comutação, para a irradiação solar máxima (1000 W/m²), entre as topologias Full-Bridge (com modulação bipolar e unipolar), H5 e HERIC pode ser observada na Figura 50.

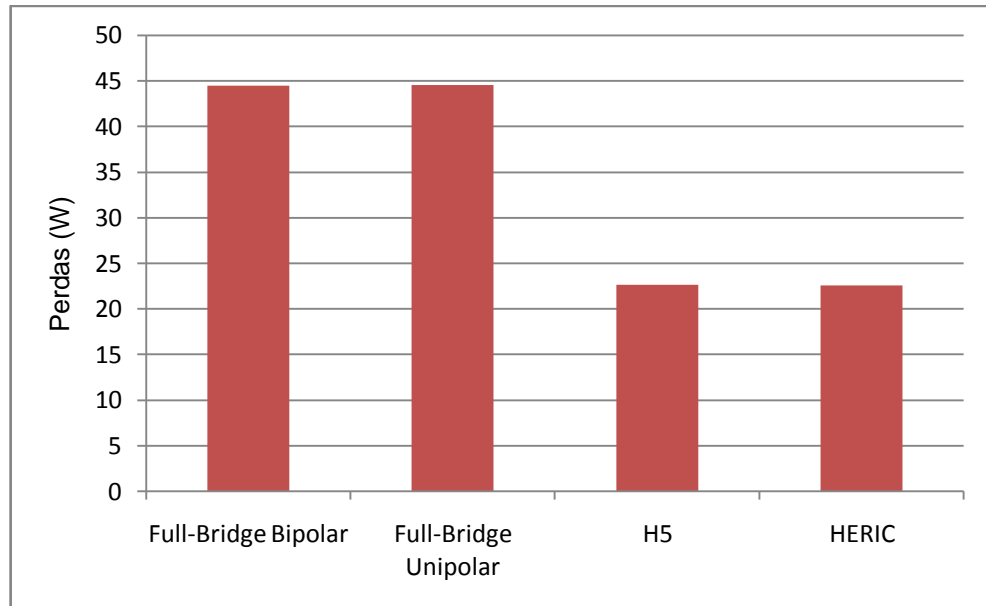


Figura 50: Comparação das perdas por comutação, com irradiação solar máxima, entre as topologias Full-Bridge (com modulação bipolar e unipolar), H5 e HERIC.

Na Figura 50 observa-se que, para uma irradiação solar máxima, o valor das perdas por comutação nos dispositivos semicondutores das topologias Full-Bridge com modulação bipolar e unipolar são semelhantes, sendo 44,47 e 44,53 W, respectivamente. O mesmo ocorre entre as topologias H5 e HERIC que apresentam 22,64 e 22,55 W, respectivamente.

5.5.4 Perdas Totais

A comparação das perdas totais nos dispositivos semicondutores, com variação da irradiação solar, entre as topologias Full-Bridge (com modulação bipolar e unipolar), H5 e HERIC pode ser observada na Figura 51.

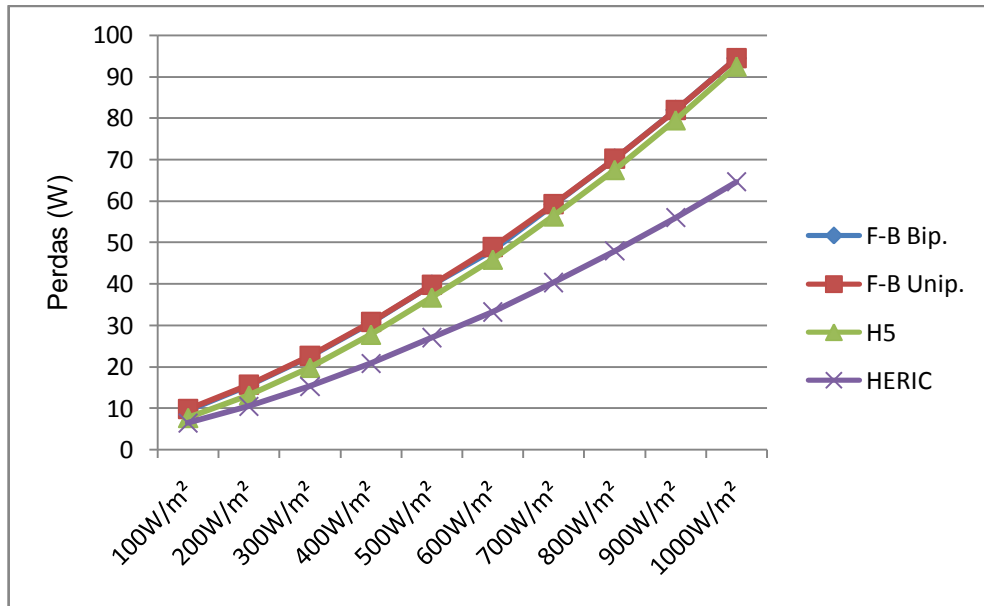


Figura 51: Comparação das perdas totais nos dispositivos semicondutores, com variação da irradiação solar, entre as topologias Full-Bridge (com modulação bipolar e unipolar), H5 e HERIC.

Através da Figura 51, observa-se que as características das perdas totais nos dispositivos semicondutores, com a variação da irradiação solar, são as mesmas para todas as topologias. As topologias Full-Bridge com modulação bipolar e unipolar possuem valores semelhantes, enquanto que a topologia H5 possui perdas um pouco menores do que as topologias Full-Bridge, e a topologia HERIC apresenta as menores perdas.

A comparação das perdas totais nos dispositivos semicondutores, para a irradiação solar máxima (1000 W/m²), entre as topologias Full-Bridge (com modulação bipolar e unipolar), H5 e HERIC pode ser observada na Figura 51.

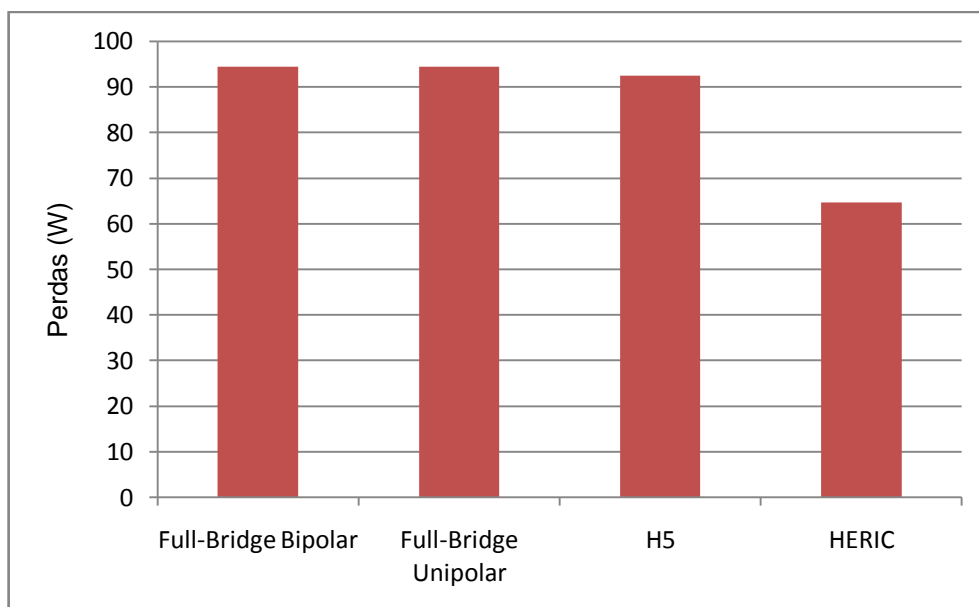


Figura 52: Comparação das perdas totais nos dispositivos semicondutores, com irradiação solar máxima, entre as topologias Full-Bridge (com modulação bipolar e unipolar), H5 e HERIC.

Na Figura 52 observa-se que, para uma irradiação solar máxima, os valores das perdas totais nos dispositivos semicondutores das topologias Full-Bridge com modulação bipolar e unipolar são semelhantes, sendo 94,39 e 94,46 W, respectivamente. Enquanto que a topologia H5 possui 92,49 W e a topologia HERIC apresenta 64,59 W de perdas totais.

5.5.5 Eficiência

A comparação da eficiência entre as topologias Full-Bridge (com modulação bipolar e unipolar), H5 e HERIC para uma variação da irradiação solar pode ser observada na Figura 53.

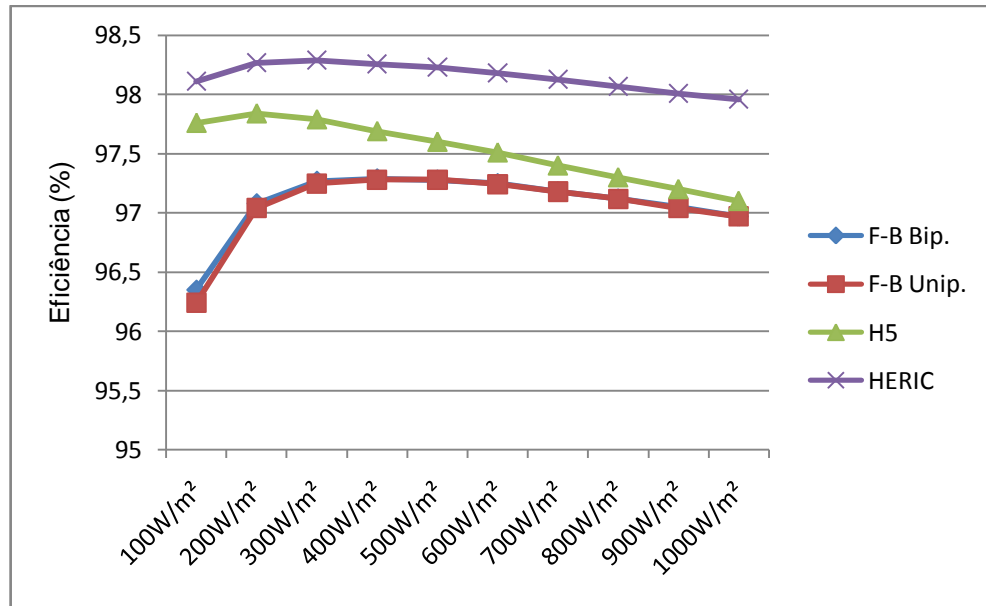


Figura 53: Comparação da eficiência, com variação da irradiação solar, entre as topologias Full-Bridge (com modulação bipolar e unipolar), H5 e HERIC.

Na Figura 53, pode-se observar que as eficiências, para diferentes irradiações, são, praticamente, iguais para as topologias Full-Bridge com modulação bipolar e unipolar, sendo que há uma pequena discrepância entre ambas entre 100 e 400 W/m². A eficiência da topologia H5 possui um comportamento semelhante às topologias do Full-Bridge entre 500 e 1000 W/m², com um módulo maior, mas entre 500 e 100 W/m² ela segue de forma crescente, enquanto que as outras duas começam a decrescer, aumentando o valor da diferença entre elas nesta faixa. A topologia HERIC possui a maior eficiência para todos os valores de irradiações solares, somente para a irradiação de 100 W/m² que a topologia H5 se aproxima de seu valor, ficando a mesma com uma eficiência de 97,76 % contra 98,11 % do HERIC, no restante das irradiações, esta última apresenta-se amplamente superior.

A comparação da eficiência entre as topologias Full-Bridge (com modulação bipolar e unipolar), H5 e HERIC para a irradiação solar máxima (1000 W/m²) pode ser observada na Figura 54.

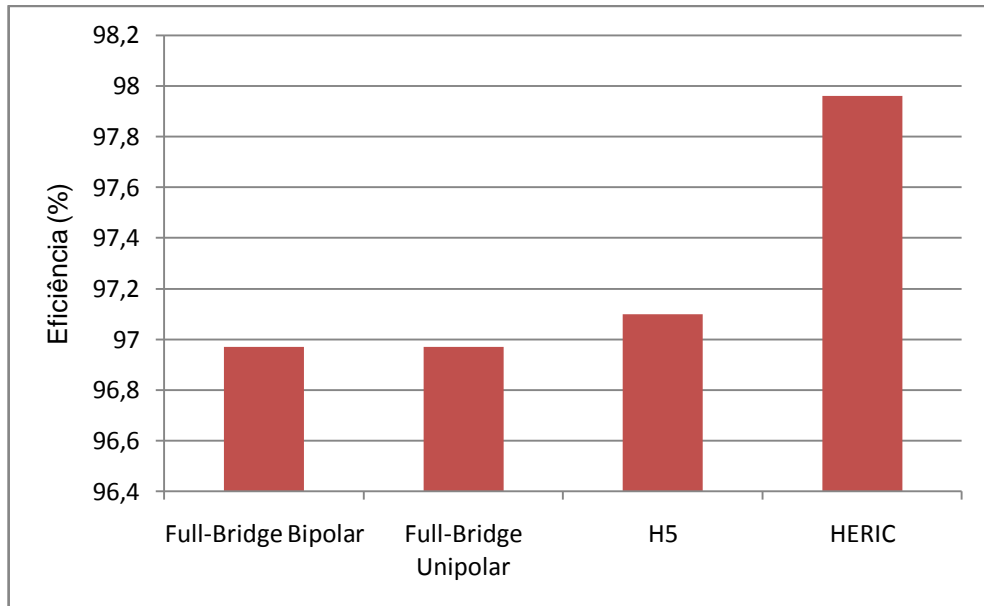


Figura 54: Comparação da eficiência, com irradiação solar máxima, entre as topologias Full-Bridge (com modulação bipolar e unipolar), H5 e HERIC.

Na Figura 54, observa-se que a eficiência, para a irradiação solar máxima, é igual para as topologias Full-Bridge com modulação bipolar e unipolar, ficando em 96,97 %. A eficiência da topologia H5 é um pouco maior do que as do Full-Bridge, ficando em 97,1 %, enquanto que a topologia HERIC possui maior rendimento, que é de 97,96 %.

5.5.6 Corrente de Fuga

A comparação da corrente de fuga entre as topologias Full-Bridge com modulação bipolar, H5 e HERIC para uma variação da irradiação solar pode ser observada na Figura 55.

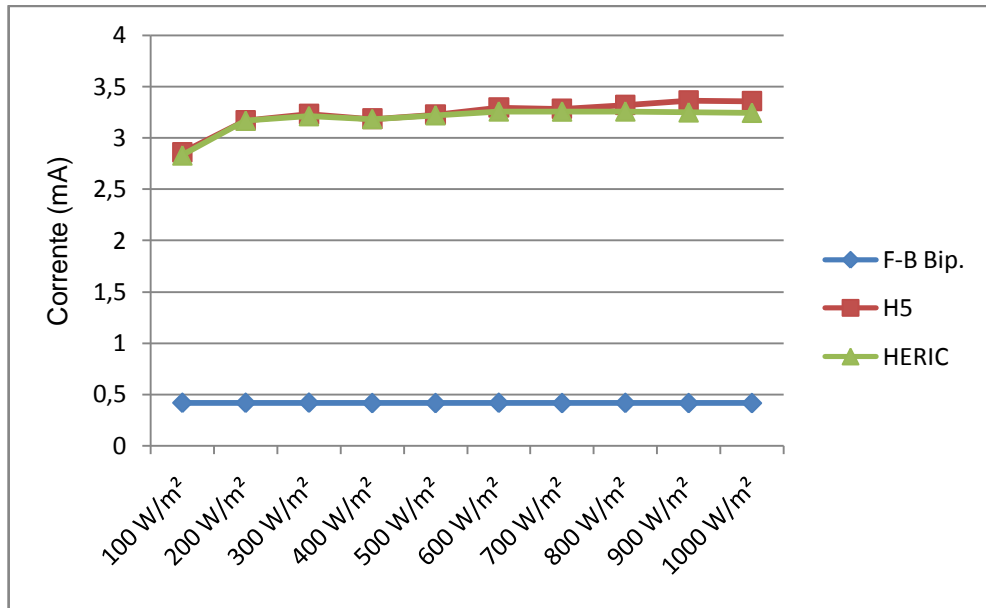


Figura 55: Comparação da corrente de fuga, com variação da irradiação solar, entre as topologias Full-Bridge com modulação bipolar, H5 e HERIC.

Através da Figura 55, pode-se observar que a topologia Full-Bridge com modulação bipolar possui valores de corrente de fuga menores do que as topologias H5 e HERIC para todas as irradiações solares. A topologia HERIC possui valores um pouco menores do que a topologia H5 ao longo de toda variação da irradiação.

A comparação da corrente de fuga entre estas topologias, para a irradiação solar máxima (1000 W/m²), pode ser observada na Figura 56.

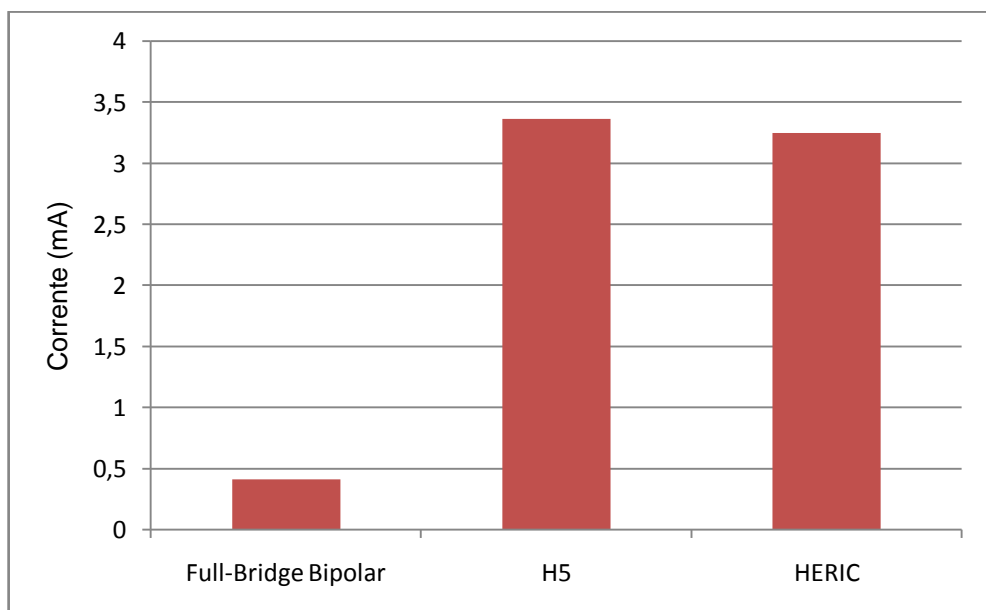


Figura 56: Comparação da corrente de fuga, com irradiação solar máxima, entre as topologias Full-Bridge com modulação bipolar, H5 e HERIC.

Através da Figura 56, pode-se observar que, para irradiação solar máxima, a topologia H5 apresenta um valor de corrente de fuga de 3,36 mA, seguido pelo HERIC com 3,244 mA, enquanto que a topologia Full-Bridge com modulação bipolar apresenta 0,414 mA. Em contrapartida, a topologia Full-Bridge com modulação unipolar apresenta valores de corrente de fuga muito maiores das demais topologias estudadas, como pode ser observado na Figura 57, onde o seu valor para a irradiação solar de 1000 W/m² é de 736,152 mA.

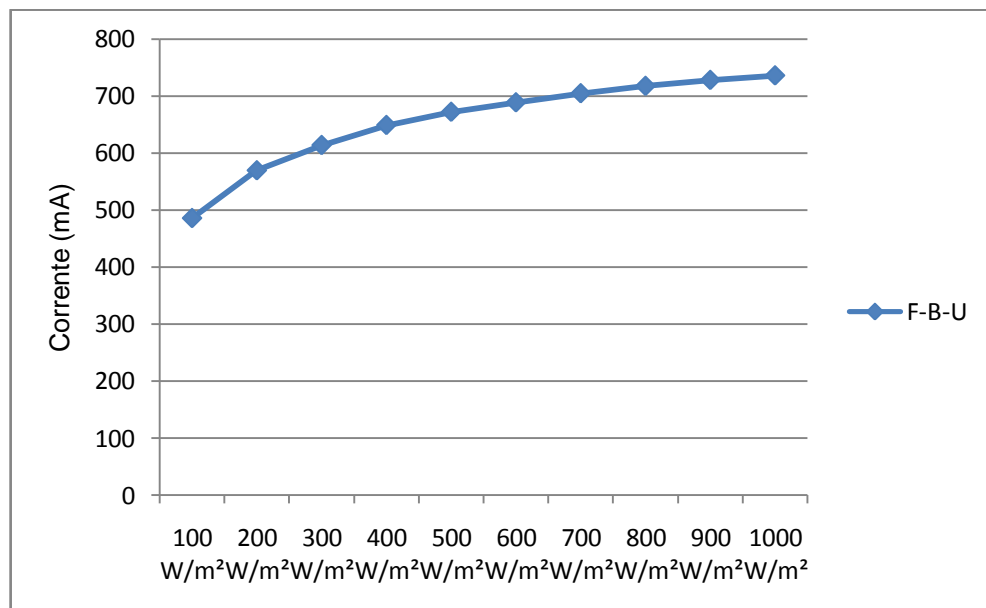


Figura 57: Corrente de fuga, com variação da irradiação solar, para a topologia Full-Bridge com modulação unipolar.

Desta forma, após as análises das figuras acima, observa-se que a diferença dos valores das correntes de fuga da topologia Full-Bridge com modulação unipolar é enorme em relação às demais topologias. A topologia Full-Bridge com modulação bipolar apresenta os menores valores de correntes de fuga, enquanto que a as topologias H5 e HERIC possuem valores bem próximos entre si, sendo os valores da corrente de fuga do HERIC um pouco menores das do H5.

5.5.7 Comparação e Análise Geral

Após a análise dos resultados para cada uma das topologias e da comparação, separada dos parâmetros estudados, entre as mesmas, será abordada uma análise geral, através da comparação dos resultados de todos os parâmetros

obtidos, onde a Tabela 6 nos fornece os resultados para a irradiação solar máxima (1000 W/m²), e estes dados são importantes para a avaliação das vantagens e desvantagens de cada topologia em relação ao tamanho do filtro indutivo de saída, das perdas nos dispositivos semicondutores, da eficiência e da corrente de fuga.

Tabela 7 – Comparação dos resultados, para os parâmetros estudados, com radiação solar de 1000 W/m², entre as topologias.

Topologias	Tamanho do filtro indutivo	Corrente de fuga	Perdas nos dispositivos semicondutores	Eficiência
Full-Bridge Bipolar	14,0mH	0,414mA	94,39 W	96,97 %
Full-Bridge Unipolar	4,0mH	736,152mA	94,46 W	96,97 %
H5	7,5mH	3,360mA	92,49 W	97,10 %
HERIC	7,5mH	3,244mA	64,59 W	97,96 %

A partir dos dados da Tabela 7 e dos demais dados analisados anteriormente à mesma, pode-se descrever as vantagens e as desvantagens, em cada quesito, das topologias estudadas. A seguir, cada topologia será avaliada separadamente, visando à correlação com as demais.

A topologia Full-Bridge com modulação bipolar possui a vantagem de ter a menor corrente de fuga, e em comparação com a topologia Full-Bridge com modulação unipolar esta corrente é muito menor. A desvantagem desta topologia refere-se ao valor da indutância do filtro de saída ser bem maior do que nas demais. Ela também possui juntamente com a topologia Full-Bridge com modulação unipolar, as maiores perdas nos dispositivos semicondutores e a menor eficiência.

A topologia Full-Bridge com modulação unipolar possui a vantagem ter o menor valor da indutância do filtro de saída, sendo este, bem inferior às demais topologias. A grande desvantagem desta topologia refere-se à corrente de fuga, onde possui o maior valor entre as topologias, e sendo este valor, muito superior. Também possui juntamente com a topologia Full-Bridge com modulação bipolar, as maiores perdas nos dispositivos semicondutores e a menor eficiência.

A topologia H5, assim como o HERIC, possui um valor de indutância do filtro de saída intermediário, e um valor de corrente de fuga um pouco maior do que o

mesmo, mas muito menor em relação à topologia Full-Bridge com modulação unipolar e relativamente maior do que a topologia Full-Bridge com modulação bipolar. Possui perdas um pouco menores nos dispositivos semicondutores e uma eficiência um pouco maior do que as topologias do Full-Bridge. Em comparação com o HERIC, possui perdas bem maiores e uma eficiência menor, mas a sua característica com a variação da irradiação solar se mostra melhor, mesmo nunca o ultrapassando, chega a um valor razoavelmente próximo. A vantagem desta topologia diz respeito ao aumento quase linear de sua eficiência à medida que irradiação solar diminui.

A topologia HERIC possui, juntamente com o H5, um valor de indutância do filtro de saída intermediário, e se comparado com o mesmo, no quesito corrente de fuga, possui um valor um pouco menor, enquanto que este valor é bem inferior ao da topologia Full-Bridge com modulação unipolar e razoavelmente maior do que a topologia com modulação bipolar. As vantagens desta topologia dizem respeito às menores perdas nos dispositivos semicondutores e à maior eficiência, nestes quesitos ela é insuperável, tendo uma eficiência 0,86% maior do que a topologia H5 para a irradiação solar máxima.

Como pode ser observado, não existe uma topologia que seja a melhor em todos os parâmetros analisados, há algumas que são melhores num, mas piores noutra, há as que ficam numa posição intermediária em alguns e se saem melhor em outros. Sendo assim, é preciso saber qual é a prioridade no projeto de um sistema fotovoltaico, ou seja, se há uma maior preocupação com o tamanho do filtro indutivo de saída, com as perdas nos dispositivos semicondutores e com a eficiência do conversor, ou com o valor das correntes de fuga. A partir desta prioridade estabelecida, pode-se fazer uso da topologia de inversores monofásicos que melhor se adequam ao projeto requerido. Mas no aspecto geral, sem priorizar um ou outro quesito, o HERIC desponta como favorito, mostrando-se altamente confiável e eficiente.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, quando há somente um estágio de conversão de energia, o inversor possui um papel muito importante no sistema em relação à qualidade da energia elétrica a ser fornecida à rede, à eficiência e aos problemas relacionados à corrente de fuga. Os inversores representam cerca de 10 % do custo total do sistema, desta forma, torna-se interessante a realização de estudos que visem à análise e comparação entre as topologias, bem como o aprimoramento dos mesmos.

Neste trabalho foi dado um enfoque no estudo das topologias Full-Bridge, com modulação bipolar e unipolar, H5 e HERIC, avaliando os parâmetros de tamanho do filtro indutivo de saída, corrente de fuga, perdas nos dispositivos semicondutores e eficiência. Através da montagem dos circuitos destas topologias e do sistema de controle da corrente e tensão de saída dos mesmos e da simulação, para diferentes irradiações solares de um sistema *PV* projetado, no Software PSIM foram obtidos resultados que serviram de parâmetros para análises e comparações.

Observou-se que não se pode definir uma topologia como sendo a melhor das demais num contexto geral, mas sim, que algumas topologias apresentam melhores resultados em alguns parâmetros, enquanto que outras são melhores em outro parâmetro estudado. Desta forma, se a prioridade principal de um projeto consiste na minimização da corrente de fuga, então se pode utilizar o inversor Full-Bridge com modulação bipolar, mas se este projeto visa à atenuação da ondulação da corrente de saída e atendimento das normas referentes à *THD*, então é recomendável que utilize o inversor Full-Bridge operando com modulação unipolar, pois assim, utilizará um filtro de saída menor, diminuindo os custos.

Se a opção for um projeto que apresenta um equilíbrio entre os parâmetros, pode-se utilizar o inversor H5, que possui um filtro de saída intermediário, e tem uma eficiência um pouco maior do que os inversores da topologia Full-Bridge e menores que o HERIC, mas possui uma característica linear com a diminuição da irradiação solar, aumentando a sua eficiência. Mas se um projeto priorizar as menores perdas nos dispositivos semicondutores e uma maior eficiência, então é altamente recomendável que se utilize o inversor HERIC, que também possui, assim como o H5, um valor de filtro indutivo intermediário e corrente de fuga um pouco maior do que a topologia Full-Bridge com modulação bipolar.

REFERÊNCIAS

- [1] CARVALHO, Edson de Paula. **Uma Nova Abordagem de Rastreamento do Ponto de Máxima Potência em Painéis Fotovoltaicos**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade de Taubaté, Taubaté, SP, 2012;
- [2] MATTOS, Felipe Caixeiro. **Contribuição ao Estudo de um Sistema Solar Fotovoltaico Monofásico de Único Estágio**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, MG, 2011;
- [3] DE FARIAS, Alexandre Manoel. **Técnicas de Modulação para Inversores Fotovoltaicos sem Transformador Conectados à Rede Elétrica**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 2011;
- [4] DORF, Richard C.; BISHOP, Robert H. **Sistemas de Controle Modernos**. Décima Primeira Edição, LTC, 2009;
- [5] MOHAN, N., UNDELAND, T., WILLIAMS, R. **Converters, Applications and Design**, John Willy and Sons, 2009;
- [6] DE OLIVEIRA, Kleber Carneiro. **Conversores de Potência para Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica sem Transformador**, Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 2012;
- [7] MARANGONI, Felipe. **Inversores Monofásicos para Conexão de Sistemas Fotovoltaicos à Rede**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Paraná, Pato Branco, PR, 2012;
- [8] TEODORESCU, R.; LISERRE, M.; RODRÍGUEZ, P. **Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems**. [S.1.], John Wiley& Sons, 2010;
- [9] DO VALE, Sandro Felipe Martins. **Microinversor para Pannel Fotovoltaico**, Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores), Universidade do Porto, Porto, PT, 2012;

- [10] ZAMBRA, Diorge Alex Bão. **Estudo e Comparação de Sistemas de Acionamento Multiníveis para Aplicações de Alta Potência e Média Tensão**, Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2010;
- [11] KYOCERA, **DatasheetKC200GT**, <www.kyocerasolar.com>, acesso em 25 de outubro de 2014;
- [12] INFINEON, **DatasheetSKP15N60**, <www.infineon.com/igbt/>, acesso em 05 de abril de 2015;
- [13] IOR, **Datasheet IRG4BC30KD**, <www.irf.com>, acesso em 30 de abril de 2015;
- [14] IEE STD 1547.1. IEEE Standard Conformance Test Procedures for Equipment Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems;
- [15] LOPES, Luiz Claudio Gambôa. **Sistema Experimental Fotovoltaico de Geração de Energia Elétrica Operando em Paralelo com a Rede Elétrica CA**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, MG, 2006;
- [16] DE SOUZA, Kleber Cesar Alves. **Estudo e Otimização de Conversores Estáticos Utilizados em Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica Comercial**, Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2009;
- [17] AFFONSO, Alex Antonio. **Estudo, Modelagem e Simulação de um Inversor de Comutação Suave para Aplicação em Filtros Ativos de Potência Monofásicos**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2007.