



ANÁLISE COMPARATIVA DE TOPOLOGIAS DE INVERSORES MONOFÁSICOS APLICADAS EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Ábner C. P. Pacheco*¹, Ivan N. Santos¹

¹FEELT – Universidade Federal de Uberlândia

Resumo - Neste artigo, é realizado um levantamento das principais topologias de inversores de tensão monofásicos de sistemas fotovoltaicos, os quais são comercialmente empregados na geração distribuída de energia. Uma análise comparativa é efetuada, por meio de simulação computacional, tendo como foco seu rendimento, a distorção harmônica gerada no ponto de conexão e a corrente de fuga característica de sua operação. Assim, os resultados são comentados, enquanto os respectivos desempenhos são avaliados.

Palavras-Chave - Inversores Fotovoltaicos; Simulação; Rendimento de Inversores; Distorção Harmônica; Corrente de fuga.

COMPARATIVE ANALYSIS OF VOLTAGE SOURCE INVERTER TOPOLOGIES APPLIED IN SINGLE-PHASE PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

Abstract - In this paper, a survey is carried out on the principal converter topologies of photovoltaic systems, commonly used at distributed generation. A comparative analysis is executed, by means of computational simulation, focusing on their efficiency, harmonic distortion at the connection point and the typical leakage current of their operation. Thus, the results are commented, while the respective performances are evaluated.

Keywords - Photovoltaic Converters; Simulation; Converters Efficiency; Harmonic Distortion; Leakage Current.

I. INTRODUÇÃO

Mais do que uma aposta para o futuro, a tecnologia da geração de energia fotovoltaica apresenta-se como uma realidade já bem estabelecida, que, embora não contribua, ainda, com uma fatia ampla na divisão da matriz energética brasileira, ocupa um papel importante no âmbito da geração distribuída, papel este que pode vir a ser fundamental em um

horizonte não tão distante, a julgar pelo ritmo de crescimento incessante registrado ano após ano.

Os dados atuais publicados pela Empresa de Pesquisa Energética no Balanço Energético Nacional 2019 [1], indicam um crescimento de 316,2% da energia solar fotovoltaica gerada no país em 2018 em relação ao ano anterior, totalizando cerca de 3,47 TWh, o que representa aproximadamente 0,52% da energia elétrica gerada em todo território nacional.

Apesar deste excelente crescimento, a participação da energia solar fotovoltaica, na geração total, ainda é baixa. Por outro lado, no contexto da geração distribuída, sua utilização é praticamente uma unanimidade, representando, na atualidade, mais de 200 mil unidades geradoras instaladas no país [2], totalizando mais de 2 GWp de potência instalada.

Diante desses números, torna-se claro a importância do tema. Esta realidade leva ao surgimento, no mercado de energia, de diversos modelos de sistemas fotovoltaicos, com emprego de diferentes estratégias de conversão de energia.

Isso posto, o presente trabalho traz como propósito o estudo e comparação, por meio de simulação computacional de diferentes topologias de inversores de tensão empregados em sistemas fotovoltaicos presentes no mercado, confrontando aspectos relevantes, tais como eficiência e qualidade da energia.

II. CONVERSORES EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Um sistema de geração fotovoltaico pode ser classificado, quanto a sua conexão com redes externas, em três categorias [3]:

- Sistema isolado;
- Sistema híbrido;
- Sistema conectado à rede (ou *on grid*).

O sistema isolado, geralmente aplicado em áreas remotas, alimenta diretamente a carga em momentos de geração intensa e se utiliza de bancos de baterias para garantir a continuidade do fornecimento quando a geração é insuficiente. O sistema híbrido, por sua vez, ainda conta com o banco de baterias tal como o sistema isolado, todavia, conectado a uma rede auxiliar, o que aumenta a confiabilidade e eficiência do fornecimento. Por fim, tem-se os sistemas conectados à rede,

*abnercppacheco@gmail.com

os quais não apresentam bancos de baterias e podem ou não alimentar uma carga localmente.

Qualquer que seja a categoria de sistema fotovoltaico adotado, dois elementos estão sempre presentes: os painéis fotovoltaicos e a unidade de controle e conversão de energia. Nos sistemas residenciais, o custo da unidade de controle e conversão corresponde a cerca de 13% do valor total da instalação [4], parcela considerável que justifica a atenção especial para o bom dimensionamento da unidade. Tal avaliação se aplica para sistemas *on grid*.

Ressalta-se que a unidade de controle e conversão possui duas funções essenciais:

- Converter a energia gerada pelos painéis de corrente contínua (CC) para a corrente alternada (CA) da carga ou rede de conexão, neste último caso, garantindo o sincronismo;
- Garantir o funcionamento dos painéis com maior eficiência através do rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT), neste caso, muitas vezes, se valendo de uma conversão adicional CC/CC.

Além destas funções, os diversos modelos de inversores presentes no mercado têm seu desempenho determinado por características intrínsecas, como rendimento e distorção harmônica, as quais são vinculadas aos aspectos construtivos do equipamento. O presente trabalho se propõe a avaliar as diferentes topologias empregadas em conversores fotovoltaicos, analisando as características intrínsecas já mencionadas, bem como a corrente de fuga.

A corrente de fuga, em sistemas fotovoltaicos, surge devido à capacitância encontrada entre os painéis fotovoltaicos e a terra (ou pontos aterrados). Tal capacitância constitui um caminho de baixa impedância para correntes de alta frequência advindas do chaveamento do inversor. A depender da topologia, chaveamento e condições ambientais, a corrente de fuga pode assumir magnitudes potencialmente danosas ao sistema, bem como causar interferência eletromagnética (IEM) [5]. Diante disso, esta se torna uma questão de interesse quando se trata da análise de desempenho de inversores aplicados em sistemas de conversão fotovoltaicos.

III. APRESENTAÇÃO DAS PRINCIPAIS TOPOLOGIAS DE INVERSORES COMERCIALMENTE ENCONTRADAS

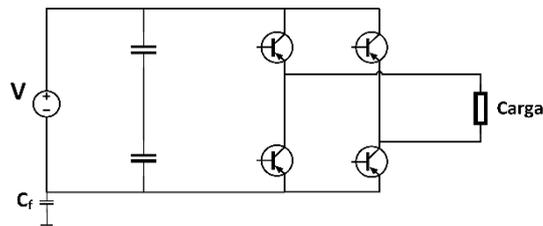
De forma geral, inversores de tensão se utilizam de chaves semicondutoras para comutar uma tensão contínua de modo a gerar uma tensão alternada. A lógica de acionamento das chaves varia de caso a caso e se mostra um fator importante ao se escolher determinada topologia, porém, tal questão não será aprofundada no contexto deste trabalho, por não ser o foco do mesmo.

Tratando-se das topologias, propriamente ditas, estas podem ser classificadas em duas famílias já bem consolidadas: Ponte-Completa e Ponto Neutro Conectado (PNC) [6]. A partir desta classificação, surgem variações que buscam aperfeiçoar certas características, por meio da adição de componentes ou pela mudança da lógica de acionamento. Na sequência, são apresentadas, de forma breve, as topologias a serem detalhadas e estudadas neste trabalho científico.

A. Ponte-Completa com modulação Bipolar (PC-B)

A primeira topologia pertence à família das pontes-completas e apresenta dois ramos de chaves semicondutoras, cada um com duas chaves. A tensão de saída é extraída dos pontos médios entre as chaves de cada ramo, e possui apenas dois níveis (+V e -V). A modulação bipolar aciona duas chaves, uma de cada ramo, por vez.

Figura 1 - Topologia Ponte-Completa.



B. Ponte-Completa com modulação Unipolar (PC-U)

Apresenta configuração idêntica à anterior, porém controlada por modulação unipolar, a qual aciona as chaves de cada ramo de forma independente segundo sua própria referência. Com esta modulação, juntamente com os diodos em anti-paralelo de cada chave, é possível a formação de três níveis de tensão na saída (+V, 0 e -V), o que reduz as variações instantâneas de tensão, resultando, assim, em menores correntes de fuga, perdas em elementos indutivos e IEM.

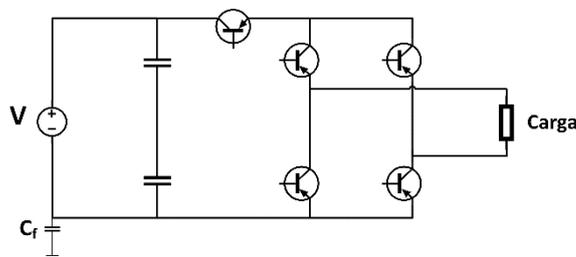
C. Ponte-Completa com modulação Híbrida (PC-H)

Ainda com a configuração de ponte-completa, apresenta agora modulação híbrida. Tal modulação estabelece frequências de chaveamento diferentes em cada ramo, sendo um com a frequência da rede e outro em alta frequência. O objetivo é reduzir as perdas por chaveamento no ramo que opera em baixa frequência.

D. Ponte-Completa H5

Com configuração semelhante à de ponte-completa, a novidade é a inserção de uma chave no elo CC, cuja função é isolar o painel da rede durante o ciclo de tensão zero. Essa isolamento evita a circulação de correntes de alta frequência na capacitância de fuga e a troca de energia entre elementos indutivos do circuito externo e os capacitores do elo CC.

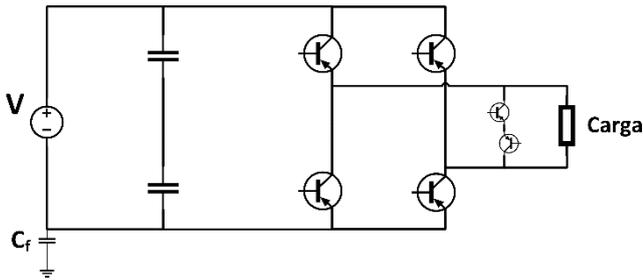
Figura 2 - Topologia H5.



E. Ponte-Completa HERIC

Baseando-se na topologia ponte-completa, esta configuração também busca isolar o painel e a rede durante o ciclo de tensão zero. Para isso, utiliza-se de duas chaves conectadas em anti-série, e paralelas à rede externa.

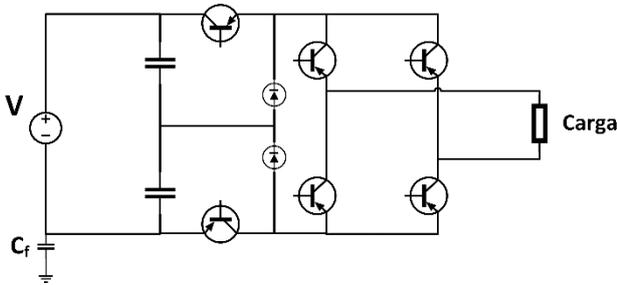
Figura 3 - Topologia HERIC.



F. Ponte-Completa H6

Também conhecida como *Full-Bridge DC Bypass* (FB-DCBP) [7], esta topologia adiciona mais uma chave no elo CC em relação à H5. A vantagem é a garantia de tensão zero aterrada, por meio da conexão de dois diodos ao ponto médio entre os capacitores do elo CC.

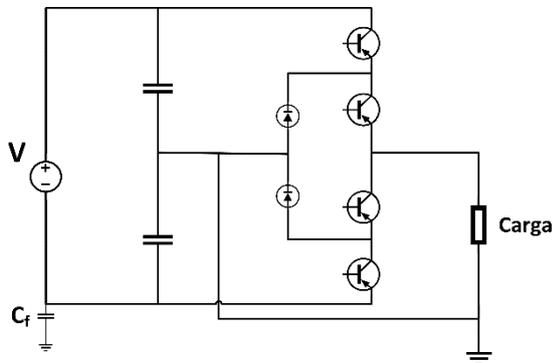
Figura 4 - Topologia H6.



G. Ponto Neutro Conectado (PNC) por Diodo – 3 Níveis (PNC-D3)

Iniciando-se a família dos inversores PNC, esta configuração tem por finalidade a criação de multi-níveis na tensão de saída através da conexão de diodos no ponto neutro dos capacitores do elo CC. O painel e, conseqüentemente, a capacitância de fuga são isolados das correntes de alta frequência provenientes do chaveamento.

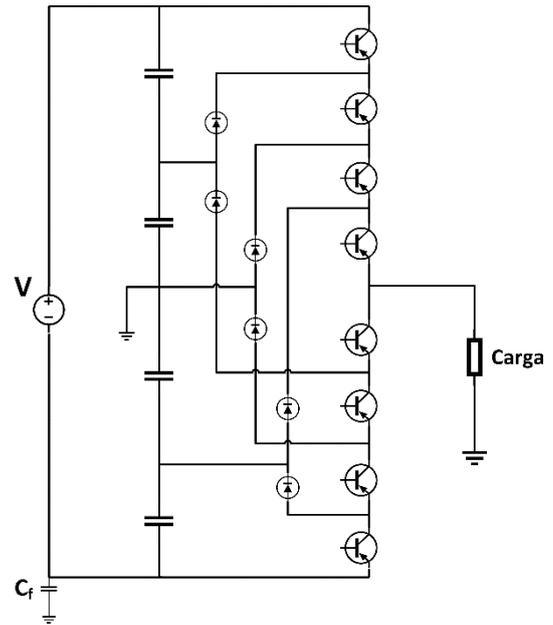
Figura 5 - Topologia PNC por diodo, 3 níveis.



H. Ponto Neutro Conectado por Diodo – 5 Níveis (PNC-D5)

A segunda topologia do grupo PNC entrega na saída cinco níveis de tensão, o que reduz a distorção harmônica ao custo de mais chaves e diodos aplicados.

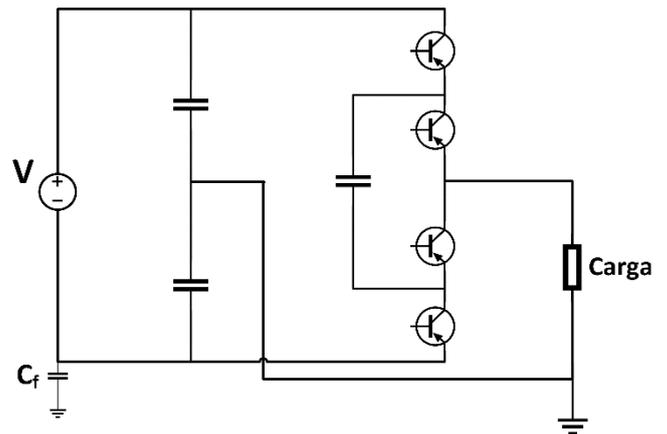
Figura 6 - Topologia PNC por diodo, 5 níveis.



I. Ponto Neutro Conectado por Capacitor – 3 Níveis (PNC-C3)

Esta topologia PNC utiliza-se de capacitores em substituição aos diodos empregados nas duas últimas. Os capacitores são conectados nos pontos entre as chaves a fim de se estabelecer os multi-níveis de tensão. Esta topologia apresenta maior versatilidade no controle das chaves, uma vez resguardados os ciclos de carga e descarga dos capacitores [8].

Figura 7 - Topologia PNC por capacitor, 3 níveis.



J. Ponto Neutro Conectado por Capacitor – 5 Níveis (PNC-C5)

Análoga à topologia anterior, esta lança mão de um maior número de chaves e capacitores para produzir cinco níveis de tensão na saída.

Figura 8 - Topologia PNC por capacitor, 5 níveis.

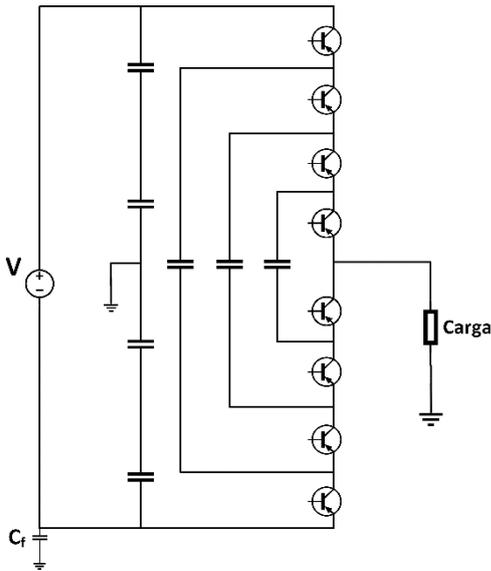
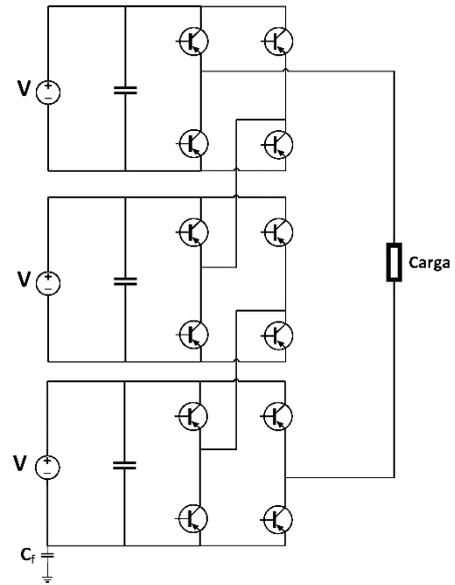


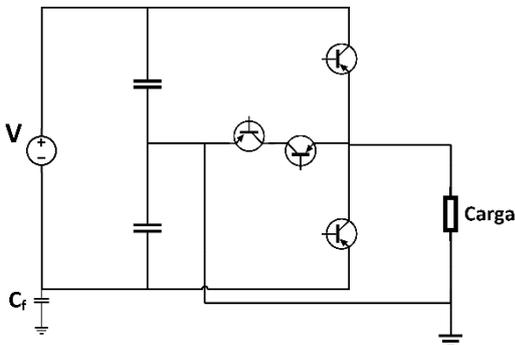
Figura 10 - Topologia multi-nível em cascata.



K. PNC Conergy

Desenvolvida pela empresa Conergy, esta topologia é da família PNC pois possui conexão ao ponto neutro, todavia, assemelha-se à topologia meia-ponte. O diferencial nesta configuração é a obtenção de tensão zero na saída, alcançada por meio da inserção de duas chaves em série entre si, conectadas entre o ponto médio entre as chaves e o ponto neutro.

Figura 9 - Topologia Conergy.



L. Inversor Multi-Nível em Cascata (MN-C)

Nesta nova categoria de topologias, são empregadas estruturas de ponte-completa, alimentadas separadamente por eles CC, com as saídas conectadas em série a fim de obter na saída geral multi-níveis de tensão. Nesta configuração específica, em que cada elo ou fonte CC possui a mesma tensão, a topologia denomina-se Inversor Multi-Nível em Cascata.

IV. ESTUDOS DE CASO

Uma vez apresentadas as distintas topologias a serem analisadas, segue-se aos estudos de caso. O programa selecionado para a simulação computacional trata-se da plataforma Simulink/MatLab. Dentro desta plataforma, o circuito elétrico de cada topologia foi montado de forma a se respeitar suas respectivas particularidades, bem como suas lógicas de controle das chaves.

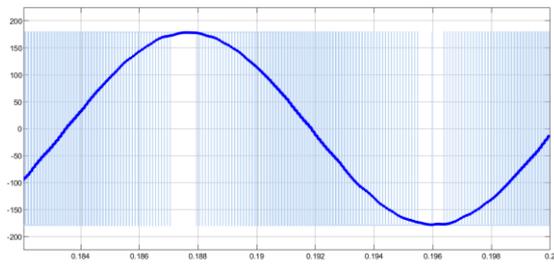
O objetivo das simulações, como já mencionado, é levantar o rendimento, distorção harmônica e corrente de fuga de cada topologia. Visto que se tratam de características estáticas dos inversores, optou-se por aplicar fontes de tensão CC constantes nas entradas dos mesmos, além de cargas de impedância constante em suas saídas.

Visando tornar coerente a comparação direta dos resultados obtidos em todos os casos, fez-se necessária a padronização de certos parâmetros da simulação, quais sejam: tensão eficaz nominal de 127 V na saída; Carga resistiva fixa de 1 kW na saída CA; Frequência de chaveamento de 10 kHz; Filtro LCL na saída do inversor idêntico em todos os casos e calculado segundo a metodologia proposta em [9]; E, por fim, a capacitância de fuga foi definida em 10 nF, baseando-se no valor de 4,2 nF estipulado em [5] para um único painel, sendo que este valor aumenta quando adicionados painéis em série ou paralelo.

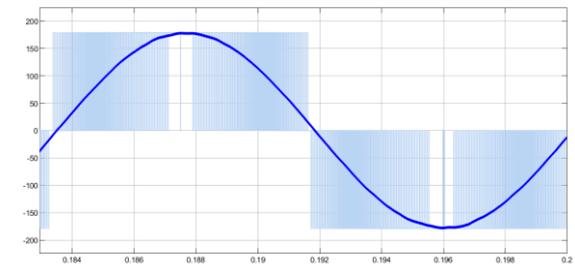
Os valores das fontes de tensão CC foram ajustados em cada caso de forma a se respeitar o valor de tensão nominal definido para a saída (127 V). Os parâmetros das chaves e diodos foram retirados dos catálogos dos fabricantes e escolhidos de maneira adequada de acordo com as características de cada topologia, uma vez que topologias com mais chaves normalmente necessitam de chaves com menor nível de isolamento dielétrica.

A Figura 11 sumariza os perfis de tensão obtidos em todos os casos, antes e após a filtragem do conversor.

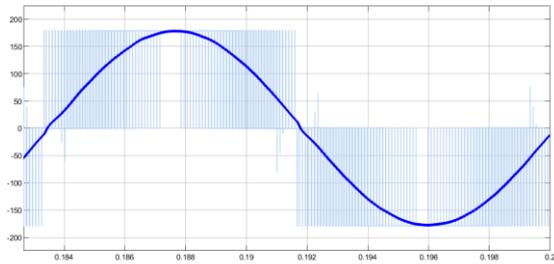
Figura 11 - Perfis de tensão nas saídas dos inversores antes (azul claro) e após (azul escuro) o filtro.



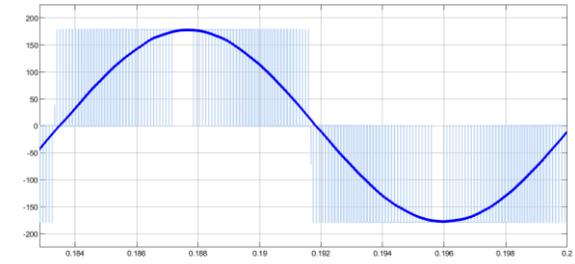
(a) Ponte-Completa Bipolar.



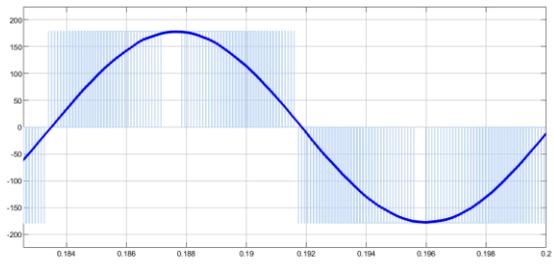
(b) Ponte-Completa Unipolar.



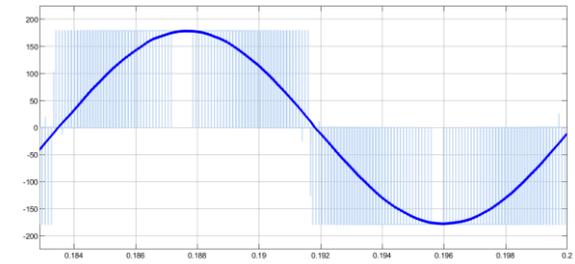
(c) Ponte-Completa Híbrida.



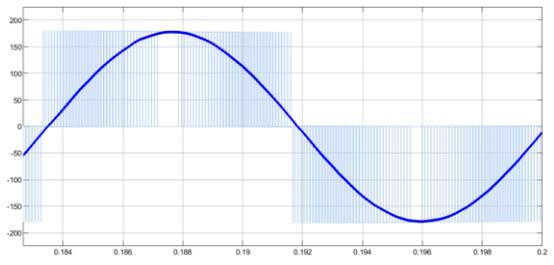
(d) Topologia H5.



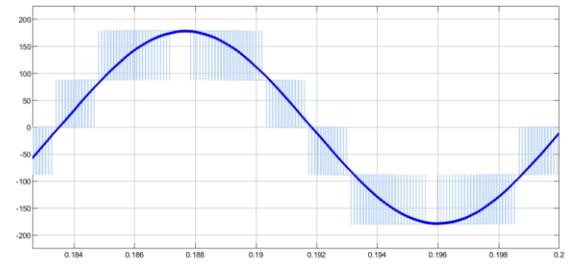
(e) Topologia HERIC.



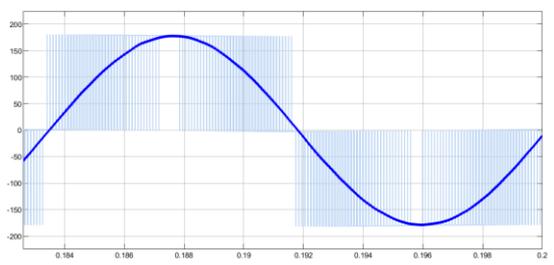
(f) Topologia H6.



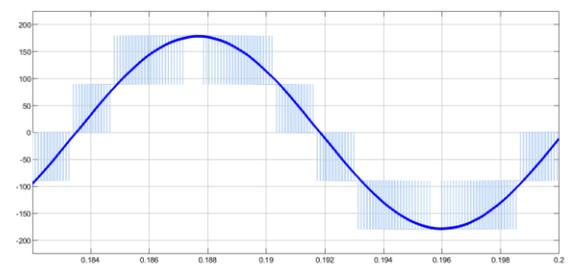
(g) Topologia PNC - D3.



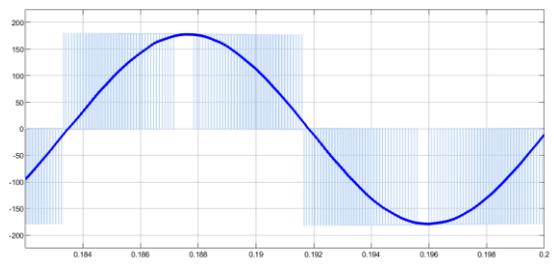
(h) Topologia PNC-D5.



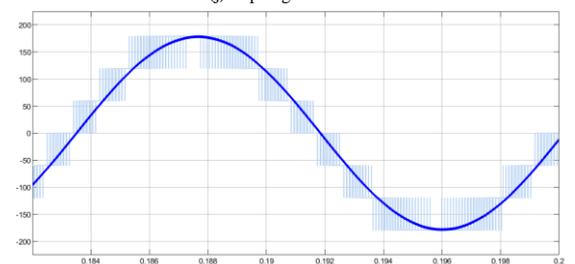
(i) Topologia PNC - C3.



(j) Topologia PNC-C5.



(k) Topologia Conergy.



(l) Topologia MN em Cascata.

V. RESULTADOS

Seguindo-se aos resultados alcançados nas simulações, as três grandezas elétricas selecionadas para efeito de comparação são o rendimento do inversor, a distorção harmônica e a corrente de fuga produzida.

O rendimento de cada inversor foi levantado por meio da relação entre a potência entregue à carga e a potência nos terminais da fonte CC primária. A distorção harmônica, por sua vez, foi calculada com base na tensão após a filtragem, ressaltando-se que o filtro aplicado é idêntico em todos os casos simulados. O parâmetro em foco é a distorção total, calculada levando-se em conta todas as frequências até a frequência de chaveamento (10 kHz). Já a corrente de fuga foi obtida pela medição direta da corrente eficaz através da capacitância de fuga, padronizada em 10 nF.

A Tabela 1 apresenta o resumo comparativo das grandezas avaliadas em todos os casos simulados.

Tabela 1. Comparação entre as topologias simuladas.

Topologia	Rendimento [%]	Distorção Harmônica Total [%]	Corrente de Fuga [A]
PC-B	98,53	0,97	0,2428
PC-U	98,54	0,42	0,2449
PC-H	98,39	0,86	0,2553
H5	98,55	0,58	0,01766
HERIC	98,67	0,51	0,175
H6	98,73	0,59	0,1249
PNC-D3	98,90	0,63	$5,32 \times 10^{-5}$
PNC-D5	98,55	0,68	$1,05 \times 10^{-4}$
PNC-C3	98,61	0,53	$4,11 \times 10^{-6}$
PNC-C5	98,93	0,4	$3,94 \times 10^{-6}$
Conergy	98,80	0,65	$5,31 \times 10^{-5}$
MN-C	98,97	0,18	$2,70 \times 10^{-2}$

Analisando-se a Tabela 1, percebe-se que a topologia PNC-D5 resultou em uma maior DHT quando comparada à PNC-D3, que possui menos níveis de tensão na saída. Esta situação anômala pode ser explicada pela presença do filtro LCL padronizado, o qual foi projetado para atenuar as altas frequências de chaveamento, não sendo igualmente eficiente diante das harmônicas de baixa frequência produzidas por inversores multi-níveis, como é o caso da PNC-D5.

A fim de contornar essa situação e tornar a análise mais coerente, uma nova simulação foi executada para todas as topologias PNC, retirando-se o filtro LCL, inserindo-se uma carga indutiva e analisando, agora, a distorção total de corrente. Os resultados desta nova simulação são apresentados na Tabela 2, os quais são mais coerentes.

Tabela 2. Resultados da nova simulação.

Topologia	DHT [%]
PNC-D3	4,38
PNC-D5	1,49
PNC-C3	1,11
PNC-C5	0,61

VI. CONCLUSÕES

Ao se analisar os três parâmetros sob estudo, nota-se comportamentos coerentes. O rendimento em todos os casos, apesar de semelhante, seguiu a tendência esperada de diminuir seu valor com o aumento dos componentes empregados, todavia, tal diminuição é amenizada quando o maior número de componentes atua no sentido de reduzir a DHT. Em se tratando da DHT, as topologias que buscavam diminuí-la, seja pelo aperfeiçoamento da modulação ou pelo emprego de mais chaves, cumpriram seus objetivos, mesmo com a situação atípica encontrada nas topologias da família PNC. E, por fim, os valores de corrente de fuga encontrados também seguiram o esperado em cada topologia.

É importante salientar que, ao contrário de elencar uma topologia superior em relação às demais, este trabalho buscou sobretudo realizar uma análise comparativa, sob condições de simulação específicas e padronizadas, a fim de dar suporte a uma eventual seleção de topologia em projeto. Os resultados aqui expostos visam fundamentar uma escolha inicial, porém não definitiva, visto que, em um projeto real, inúmeros outros fatores devem ser considerados, como potência do inversor, complexidade de controle e acionamento, dimensões físicas, além de outras particularidades de cada sistema.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG).

REFERÊNCIAS

- [1] Empresa de Pesquisa Energética – EPE (2019). *Balço Energético Nacional – BEN 2019*. Ministério de Minas e Energia, Brasil.
- [2] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (2020). *Unidades Consumidoras com Geração Distribuída*. Acessado em janeiro de 2020.
- [3] Rashid, M. H. (2011). *Power Electronics Handbook*. p. 726. Elsevier, EUA.
- [4] Picault, D., Raison, B., Bacha, S. (2009). *Guidelines for evaluating grid connected PV system topologies*. IEEE International Conference on Industrial Technology.
- [5] Calais, M., Agelidis, V. G. (1998). *Multilevel converters for single-phase grid connected photovoltaic systems – An overview*. IEEE International Symposium on Industrial Electronics.
- [6] Teodorescu, R., Liserre, M., Rodríguez, P. (2011). *Grid converters for photovoltaic and wind power systems*. John Wiley & Sons, Reino Unido.
- [7] Marangoni, F. (2012). *Inversores monofásicos para conexão de sistemas fotovoltaicos à rede*. UTFPR, Brasil.
- [8] Lin Luo, F., Ye, H. (2013). *Advanced DC/AC inverters: Applications in renewable energy*. CRC Press, EUA.
- [9] Reznik, A., Simões, M. G., Al-Durra, A., Mueen, S. M. (2013). LCL Filter design and performance analysis for grid interconnected systems. IEEE Transactions on Industry Applications.