Análise comparativa dos métodos de estimativas das perdas em capacitores de barramento CC em inversores fotovoltaicos

Andressa Mara Menezes Alexandre * **Paulo Soares Filho** *
João Pedro Carvalho Silveira * **José Cândido Silveira Santos Filho** *
Pedro José dos Santos Neto ** **Tárcio André dos Santos Barros** *

* *Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, SP, (e-mails: a247621@dac.unicamp.br, p246059@dac.unicamp.br, jpedrocs@unicamp.br,jcssf@unicamp.br, tarcio87@unicamp.br)*
** *Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, SP, (e-mail: pedrosn@unicamp.br)*

Abstract:
Inverters play a significant role in photovoltaic systems. Compared to other system elements, the inverter exhibits lower reliability due to its complex multifunctional nature. Electrolytic capacitors on the direct current (DC) bus are the components most likely to fail in photovoltaic inverters. Capacitor stress mainly occurs due to high average temperatures, making accurate estimation of capacitor power losses a crucial step in component thermal analysis. In this context, the present paper conducts a comparative evaluation of four methods for estimating capacitor losses, focusing on thermal response. The first method is performed considering a constant Equivalent Series Resistance (ESR), while the second and third methods consider the influence of operating frequency and capacitor temperature, respectively, on the ESR. The fourth method, in turn, combines the second and third methods, considering the influence of both frequency and temperature on the capacitor ESR. An approach using Lookup Tables (LUT) was implemented to mitigate computational effort, evaluating daily and annual mission profiles. The study results show the highest average temperature difference of 5.31%, between the methods with constant ESR and with ESR dependent on capacitor frequency and temperature.

Resumo: Os inversores desempenham um papel significativo em sistemas fotovoltaicos. Em comparação com outros elementos do sistema, o inversor apresenta uma confiabilidade inferior devido à sua natureza complexa multifuncional. Os capacitores eletrolíticos do barramento de corrente contínua (CC) são os componentes com mais probabilidade de falha nos inversores fotovoltaicos. O estresse do capacitor ocorre principalmente pelas altas temperaturas médias e, por esse motivo, a estimativa correta das perdas de potência no capacitor é uma etapa crucial para a análise térmica do componente. Nesse contexto, o presente artigo realiza uma avaliação comparativa entre quatro métodos de estimativa de perdas nos capacitores, com foco na resposta térmica, sendo o primeiro método realizado considerando a *Equivalent Series Resistance* (*ESR*) constante, enquanto que o segundo e terceiro método consideram a influência da frequência de operação e da temperatura do capacitor, na *ESR*, respectivamente. O quarto método, por sua vez, é uma junção do segundo e terceiro método, considerando a influência de ambos, frequência e temperatura, na *ESR* do capacitor. Foi implementada uma abordagem utilizando *Lookup Tables* (LUT) para mitigar o esforço computacional, avaliando perfis de missão diário e anual. Os resultados do estudo realizado mostram a maior diferença de temperatura média de 5.31%, entre os métodos com *ESR* constante e com a *ESR* dependente da frequência e temperatura do capacitor.

Keywords: Electrolytic capacitors; DC bus; Photovoltaic inverters; Capacitor loss calculation; Capacitor thermal model.

Palavras-chaves: Capacitores eletrolíticos; Barramento CC; Inversores fotovoltaicos; Cálculo de perdas de capacitores; Modelo térmico de capacitores.

1. INTRODUÇÃO

O banco de capacitores de barramento CC é responsável por interligar o arranjo fotovoltaico com o conversor de potência nos sistemas fotovoltaicos. Visando o baixo custo e alta densidade de energia, os capacitores eletrolíticos são amplamente empregados em inversores disponíveis no mercado. Apesar disso, pesquisas comprovam que os capacitores eletrolíticos estão entre os componentes mais propensos a falhas em inversores fotovoltaicos (Falck et al., 2018).

Sabendo-se da alta competitividade do mercado de geração de energia fotovoltaica, são desejados inversores mais confiáveis disponíveis em mercado (Sangwongwanich et al., 2019). Por esse motivo, cada vez mais estudos são desenvolvidos referentes às metodologias para análise de confiabilidade dos inversores fotovoltaicos. Tendo em vista que a vida útil do capacitor é afetada pelas altas temperaturas médias de operação, são necessárias metodologias para estimação da temperatura do capacitor (Zhou et al., 2018).

A estimativa da vida útil do capacitor está diretamente ligada a tradução do perfil de missão na temperatura de *hotspot*. A temperatura de *hotspot* é a temperatura máxima alcançada em um ponto específico dentro do capacitor. Contudo, determinar a temperatura do capacitor é um processo complexo, principalmente pela relação não linear entre os parâmetros elétricos do capacitor e a resposta à temperatura (Lenz et al., 2019).

O processo de estimativa da temperatura do capacitor está diretamente relacionado ao cálculo da perda de potência no componente. Em Matsumori et al. (2018) é proposto um método simples considerando a *Equivalent Series Resistance* (*ESR*) constante e utilizando o sinal *RMS* da corrente no capacitor. Já em Braham et al. (2009), são utilizadas as componentes harmônicas da corrente para considerar a influência da frequência na *ESR*. Outro método é considerar o impacto da frequência e da temperatura do capacitor na *ESR*, como é feito em Yang et al. (2015). Em Lenz et al. (2019) é feita uma avaliação comparativa de quatro métodos de cálculo de perdas no capacitor, inclusive o método mais representativo, utilizando uma abordagem com *Lookup Tables*, demonstrando que a análise *offline* é uma ferramenta útil para diminuir a complexidade na estimativa das perdas.

A análise apresentada em Lenz et al. (2019) é realizada com foco na avaliação de confiabilidade, onde são comparados os tempos de vida calculados a partir de cada método discutido, contudo, as perdas térmicas não são avaliadas pelo autor. Dessa forma, visando apresentar a influência do método do cálculo de perdas no capacitor do ponto de vista térmico, o objetivo deste artigo é realizar uma avaliação comparativa dos diferentes métodos de cálculo das perdas nos capacitores, com foco na influência da escolha do método de análise térmica do capacitor na temperatura de *hotspot* estimada.

2. MODELAGEM TERMOELÉTRICA DO CAPACITOR DE BARRAMENTO CC

Um modelo elétrico do capacitor é comumente representado pela capacitância primária C, a resistência série equivalente *ESR* e a indutância série equivalente ESL (Chung et al., 2015), como está apresentado na Figura 1. A *ESR* representa as perdas de potência no capacitor devido à resistência do material dielétrico, dos contatos e do condutor. A ESL por sua vez, representa a indutância das camadas de enrolamento do capacitor e dos terminais de energia conectados (Silveira Brito et al., 2021).

É importante notar que fatores como temperatura, tensão, frequência e tempo, ou seja, as condições de operação, impactam diretamente nesses parâmetros. Ignorar as variações provocadas pelas condições de operação pode resultar em uma análise inadequada, tanto do ponto de vista elétrico quanto do térmico. Essas imprecisões podem acarretar em previsões de vida útil que não refletem a realidade (Wang and Blaabjerg, 2014). A representação térmica de capacitores é apresentada na Figura 1, onde T_h é a temperatura de *hotspot*, P_{loss} é a perda de potência, T_{amb} é a temperatura ambiente e R_{th} é a resistência térmica do capacitor.

As perdas de potência inseridas no modelo térmico do capacitor são obtidas através do cálculo das perdas, permitindo a tradução do modelo elétrico para o térmico, como está apresentado na Figura 1. Todos os parâmetros, tanto elétricos como térmicos, do banco de capacitores utilizados neste trabalho foram modelados como em Wang et al. (2020), a partir das curvas fornecidas no *datasheet* do dispositivo.

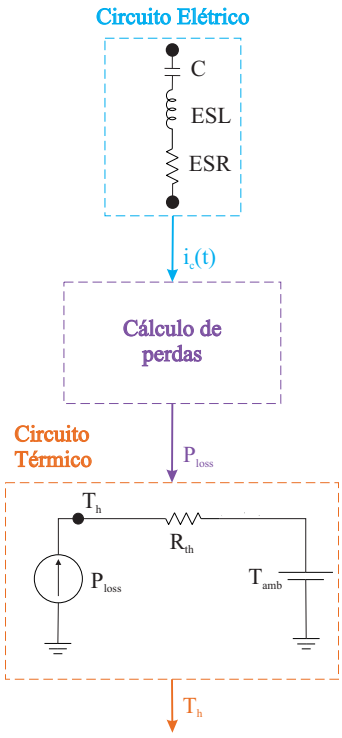


Figura 1. Tradução do modelo elétrico para o térmico através do cálculo das perdas de potência no capacitor.

Como apresentado na Figura 1, a temperatura de *hotspot* T_h é descrita por (1).

$$T_h = P_{loss} \times R_{th} + T_{amb} \tag{1}$$

3. MÉTODOS DE CÁLCULO DE PERDAS NO CAPACITOR

Existem diversos métodos para calcular as perdas no capacitor. Segundo Lenz et al. (2019), podemos listar quatro métodos, na ordem do mais conservador para o mais refinado, como apresentado nas próximas subseções.

3.1 Método 1 - ESR constante

Este método, considerado o mais conservador, consiste em desconsiderar a influência da frequência e da temperatura do capacitor na *ESR* e considerá-la como um valor constante típico que é fornecido no *datasheet*. Neste caso, é calculada a corrente *RMS* no capacitor. Assim, o método 1 pode ser descrito por (2).

$$P_{loss} = ESR \times I_{RMS}^2 \tag{2}$$

Analisando as curvas da *ESR* apresentadas na Figura 2, pode-se observar que a *ESR* diminui à medida que a frequência e a temperatura do capacitor aumentam. Assim, considerando a *ESR* constante fornecida no *datasheet*, teremos um alto valor de *ESR* para todo o perfil da corrente *RMS*, o que retorna valores maiores de perdas no capacitor. Por esse motivo, este método é considerado o mais conservador.

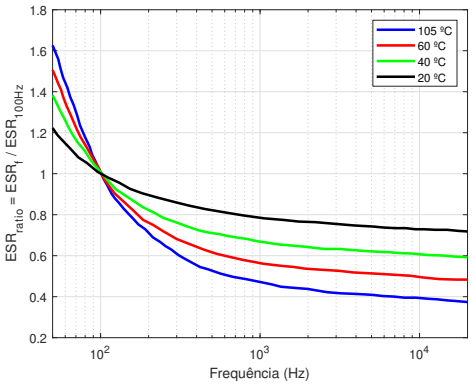
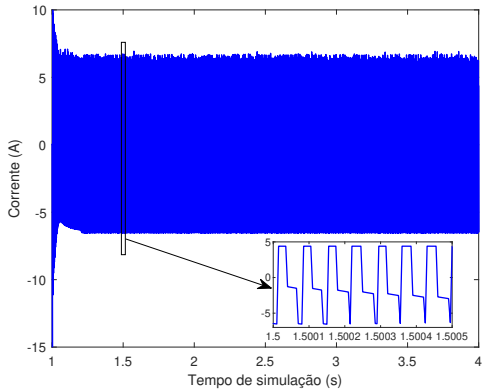


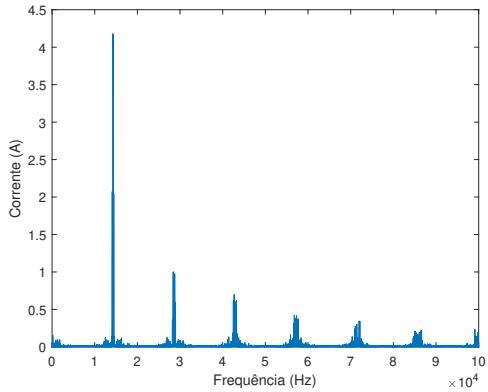
Figura 2. Curvas características da razão da *ESR* com a frequência e temperatura do capacitor (adaptado de EPCOS AG, 2013).

3.2 Método 2 - ESR(f)

As curvas características da *ESR* do capacitor mostradas na Figura 2, são utilizadas para modelar a *ESR* considerando a influência causada pelo aumento da frequência. Neste método é necessário implementar um algoritmo para calcular a transformada rápida de Fourier - *Fast Fourier Transform* (*FFT*). A partir do espectro da frequência da corrente no capacitor, as amplitudes das frequências harmônicas são utilizadas para realizar o cálculo das perdas. Assim como, para cada frequência harmônica, a respectiva *ESR* é determinada. Na Figura 3, são apresentados a corrente e o espectro da frequência da corrente no capacitor analisado para um caso de irradiância e temperatura ambiente constantes.



(a)



(b)

Figura 3. Para Irradiância=800 W/m^2, T_{amb}=30ºC e Potência de saída de 30 kW. (a) Corrente no capacitor. (b) Espectro da corrente no capacitor.

Como apresentado na Figura 3b, a frequência dominante é a frequência de chavemento do sistema, isto é, $f_s = 15kHz$. Assim, o método 2 do cálculo das perdas de potência no capacitor pode ser descrito por (3), onde f é a frequência fundamental e $h = 1, 2, 3, ..., N$ são as ordens harmônicas.

$$P_{loss} = \sum_{h=1}^{N} ESR(hf) \times I_{RMS}^2(hf) \tag{3}$$

Sabendo-se que a *ESR* diminui à medida que a frequência de operação aumenta, como está ilustrado na Figura 2, esse método nos fornece valores de perdas menores que as calculadas através do método 1.

3.3 Método 3 - ESR(T_h)

Enquanto que no método 2 é considerada apenas a frequência, neste método apenas a temperatura do capacitor é considerada. Conforme mostrado na Figura 2, a *ESR* diminui à medida que a temperatura do capacitor aumenta. Sendo assim, as perdas calculadas através deste método são ainda menores que as obtidas através do método 2. Neste método, não é necessário obter o espectro da corrente, já que não é levada em consideração a influência da frequência. Assim, o método 3 pode ser descrito por (4), onde T_h é a temperatura de *hotspot*.

$$P_{loss} = ESR(T_h) \times I_{RMS}^2 \quad (4)$$

Para implementar esse método, é necessário um processo iterativo, já que a temperatura do capacitor é dependente da *ESR*.

3.4 Método 4 - ESR(f, T_h)

Dentre os métodos avaliados (Lenz et al., 2019), o método 4 é o mais completo e considerado o mais refinado, visto que considera todas as influências geradas a partir da frequência e da temperatura do capacitor no cálculo das perdas de potência no componente. Neste método, é feita uma junção das considerações estabelecidas nos métodos 2 e 3, isto é, a *ESR* é modelada a partir das curvas características da *ESR* com base na frequência de operação e na temperatura do capacitor. Com isso, as perdas calculadas através deste método são as que mais se aproximam da realidade. Assim, o método 4 pode ser descrito como (5), onde f é a frequência fundamental, T_h é a temperatura de *hotspot* e $h = 1, 2, 3, ..., N$ são as ordens harmônicas.

$$P_{loss} = \sum_{h=1}^{N} ESR(hf, T_h) \times I_{RMS}^2(hf) \quad (5)$$

Assim como o método 03, esse também necessita de um processo iterativo, já que a temperatura do capacitor depende da *ESR* para ser calculada. Além disso, é necessário um algoritmo de *FFT* para calcular o espectro da corrente, como também é feito no método 02. Esses motivos aumentam o tempo de processamento e a memória necessária, exigindo um aumento significativo do esforço computacional para ser implementado, apesar de ser o método mais representativo (Lenz et al., 2019).

Tabela 1. Parâmetros do sistema analisado.

Parâmetro	Valor
Painel Jinco Solar JKM250P-60 Potência nominal	250 Wp
Potência nominal do arranjo fotovoltaico	40 kWp
Número de módulos FV em série	23
Número de arranjos FV em paralelo	7
Tensão nominal do barramento CC	680 V
Frequência de chaveamento	15 kHz
Capacitância total do banco	2350 µF
Frequência da rede	60 Hz
Tensão da rede	220 V*RMS*
Filtro L	4 mH
Capacitância individual do capacitor	470 µF
Tensão do capacitor	450 V
ESR @ 100Hz, 20 (°C)	260 mΩ
Resistência térmica do capacitor	13,56 (°C)/W
Máxima temperatura do capacitor	105 (°C)

4. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

A topologia do inversor fotovoltaico é apresentada na Figura 4. O sistema simulado é composto por um arranjo fotovoltaico interligado a um *Voltage Source Converter* (VSC) por meio de um barramento CC. Tendo em vista o valor de tensão e corrente do barramento, o banco de capacitores é composto por 20 capacitores TDK de mesmo *part number*, B43508, configurados em 10 ramos paralelos com 2 capacitores em série, cada. O inversor é conectado a uma rede trifásica através de um filtro L com sincronismo realizado por *Phase Locked Loop - PLL*. São empregados controle de tensão do barramento CC e controle de corrente do inversor em coordenadas dq, em ambos os casos utilizando controladores PI devidamente sintronizados por resposta em frequência. A Tabela 1 mostra os parâmetros do sistema analisado.

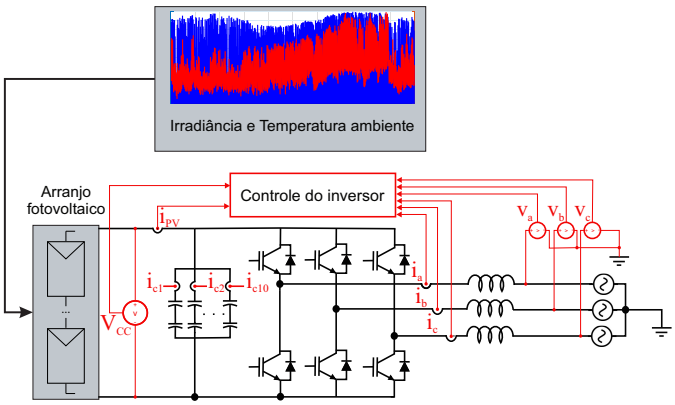


Figura 4. Sistema implementado no *PSIM* para realizar a análise.

4.1 Abordagem utilizando Lookup Table

Tendo em vista que o fluxo de energia do arranjo fotovoltaico para a rede ocorre principalmente por meio da irradiância e da temperatura ambiente, é possível implementar um método de análise *offline* a partir de amostras dessas duas variáveis durante um determinado período de tempo (Lenz and Pinheiro, 2018).

A fim de representar o sistema fotovoltaico, já que a simulação desse sistema exige grande esforço computacional a depender do tamanho do perfil de missão utilizado, uma abordagem utilizando tabelas de busca foi implementada para a simulação do modelo térmico do capacitor (Lenz and Pinheiro, 2018). A Figura 5 ilustra a metodologia de tabela de busca aplicada.

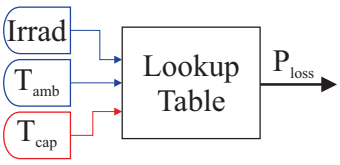
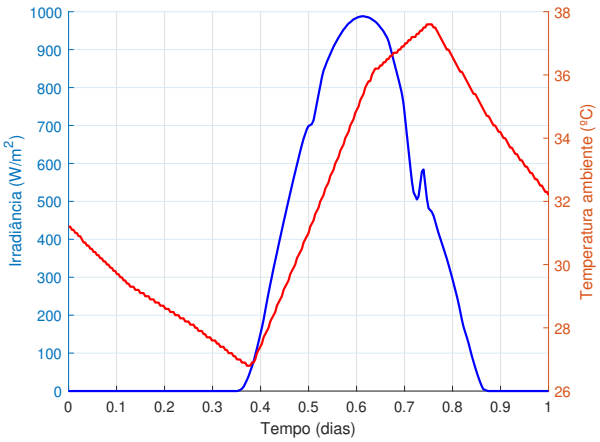
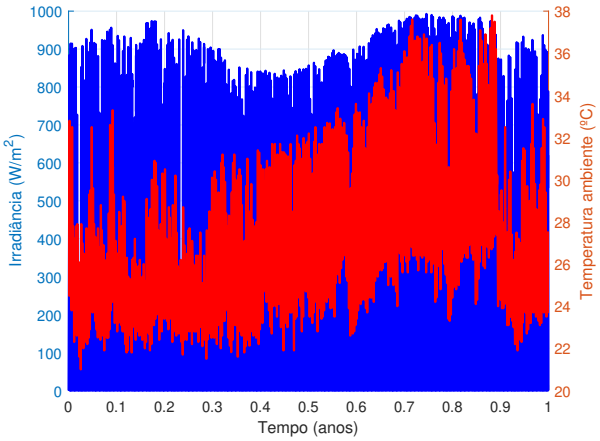


Figura 5. Abordagem com *Lookup Tables* 2D e 3D.

Para os métodos de cálculo de perdas de potência 1 e 2, apresentados na seção anterior, não há a realimentação da temperatura do capacitor, sendo assim, foi implementada uma tabela de busca 2D para obtenção das perdas no capacitor. As tabelas de busca 2D possuem como entradas 5 pontos de irradiância [200, 400, 600, 800, 1000] W/m^2 e 4 pontos de temperatura ambiente [-10, 10, 30, 50] ºC. No caso dos métodos 3 e 4, em que ocorre o método iterativo com a realimentação da temperatura do capacitor, foi implementada uma tabela de busca 3D. Nesse caso, além das entradas de irradiância e temperatura ambiente, também são entrada da *Lookup Table*, 2 pontos da temperatura de *hotspot* [20, 105] ºC, sendo que, nas duas implementações,



(a)



(b)

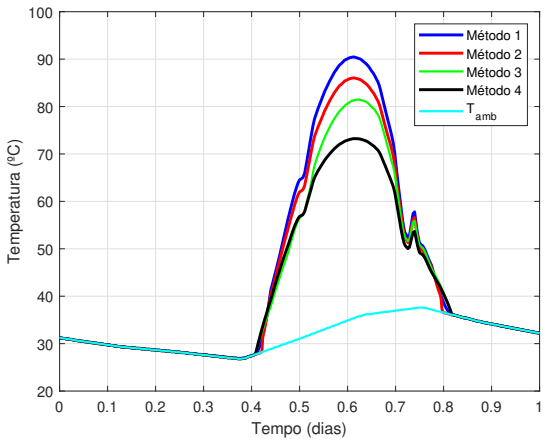
Figura 6. Perfil de missão em Teresina - PI a partir do Solcast - 5 min por dados de amostragem. (a) Perfil diário - dia típico ensolorado. (b) Perfil anual.

a saída das tabelas de busca são as perdas no capacitor, P_{loss}. Dessa forma, as tabelas 2D são formadas por 20 pontos de perdas no capacitor, enquanto que as tabelas 3D possuem 40 pontos.

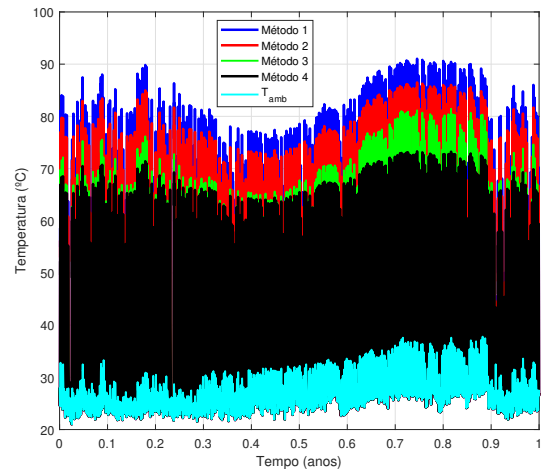
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram avaliadas as temperaturas de *hotspot* obtidas a partir dos métodos de cálculo de perdas apresentados na seção 3. O processo implementado é apresentado na Figura 1, para o sistema utilizado apresentado na Figura 4. A análise é realizada considerando como entrada dos sistemas o perfil de missão diário e anual, mostrados na Figura 6. O perfil de missão utilizado contém dados de irradiância e temperatura ambiente da cidade de Teresina - PI a partir do Solcast. Os dados têm 5 minutos de intervalo entre amostras.

As temperaturas de *hotspot* simuladas a partir de cada método de cálculo de perdas, para um dia ensolarado em Teresina - PI, são apresentadas na Figura 7a. É possível observar as reduções nas temperaturas obtidas a medida que utiliza-se o método com considerações mais ajustadas. Nota-se que a variação na temperatura não é linear e,



(a)



(b)

Figura 7. Temperaturas de *hotspot* para os 4 métodos de cálculos de perdas, utilizando o perfil de missão de Teresina - PI. (a) Temperaturas - perfil diário. (b) Temperaturas - perfil anual.

portanto, a diferença de temperatura entre os métodos também é não linear ao longo do tempo.

Tabela 2. Variação de temperatura média e percentual entre os métodos com relação ao método 04 e esforço computacional de cada método (+++ Rápido, ++ Moderado, + Lento).

Perfil	Método			
	1	2	3	4
DIÁRIO				
Variação média de temperatura (°C)	3.41	2.48	1.38	-
Variação percentual média (%)	5.31	3.91	2.13	-
ANUAL				
Variação média de temperatura (°C)	2.29	1.63	0.56	-
Variação percentual média (%)	4.13	3.04	1.09	-
Esforço computacional	+++	++	++	+

A Tabela 2 apresenta as variações de temperaturas entre os métodos 1, 2 e 3 com relação ao método 4. Observa-se que a maior variação média de temperatura obtida foi de

3.41 (°C), equivalente a taxa de variação percentual média de 5.31%, para o perfil diário.

As temperaturas simuladas considerando o perfil de missão anual são apresentadas na Figura 7b. Pode-se observar, além das variações das estimativas entre os métodos serem menores em dias menos ensolarados, essas variações também não são constantes ao longo do tempo. Da Tabela 2, é possível observar que a maior variação média de temperatura obtida foi de 2.29 (°C), equivalente a taxa de variação percentual média de 4.13%, para o perfil anual.

As maiores variações, tanto no perfil diário quanto anual, foram obtidas comparando o método 1 com o método 4. Isto já era esperado, visto que o método 1 resulta em uma superestimação das perdas de potência no capacitor, em comparação com os demais métodos. Por esse motivo, o método 4 apresenta as menores perdas, visto que a *ESR* diminui com a frequência de operação e a temperatura do capacitor.

CONCLUSÃO

Com a necessecidade crescente de otimização das ferramentas de avaliação térmica a longo prazo, são requeridas metodologias de análise de complexidade cada vez mais reduzidas e que mantenham a precisão dentro de níveis aceitáveis. Assim, neste estudo foi realizada uma avaliação de quatro métodos utilizados para o cálculo de perda de potência no capacitor. Como contribuição do estudo, investigou-se o impacto na estimativa da temperatura de *hotspot* de capacitores do barramento CC de inversores fotovoltaicos.

O método 1 é o mais simples de ser implementado, visto que se necessita conhecer apenas a corrente *RMS* do capacitor analisado. O método 2, que considera a influência da frequência, possui a necessidade de conhecer as componentes harmônicas da corrente no capacitor. Para isso, é necessário empregar uma *FFT*, aumentando o esforço computacional e a capacidade de memória necessária. Já no método 3, o desafio na implementação é proveniente da necessidade de implementar um processo iterativo para realizar a realimentação da temperatura do capacitor. Por último, o método 4, que é o mais representativo, é uma junção dos métodos 2 e 3, exigindo um esforço computacional ainda maior. Para diminuir o esforço computacional, foi empregada uma abordagem utilizando *Lookup Tables*, o que reduziu o tempo de simulação na implementação de todos os métodos. A partir da Tabela 2, observa-se que a maior diferença de temperatura média percentual obtida foi de 5.31% para o perfil diário e 4.13% para o perfil anual entre o método 1 e o método 4.

Portanto, a depender da necessidade de precisão e facilidade de implementação, a superestimação do método 1 pode ser aceitável. Contudo, com a necessidade de maior precisão de estimação da temperatura do capacitor, uma abordagem utilizando *Lookup Tables* pode ser um método suficente para mitigar o esforço computacional e obter maior precisão.

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer à TotalEnergies pelo apoio financeiro. Além disso, somos gratos a todos os colaboradores da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Reconhecemos o apoio da ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) por meio da regulamentação da taxa de P&D. Os agradecimentos são estendidos ao Centro de Estudos de Energia e Petróleo (CEPETRO) e à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação (FEEC).

REFERÊNCIAS

Braham, A., Lahyani, A., Venet, P., and Rejeb, N. (2009). Recent developments in fault detection and power loss estimation of electrolytic capacitors. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 25(1), 33–43.

Chung, H.S.h., Wang, H., Blaabjerg, F., Pecht, M., et al. (2015). *Reliability of power electronic converter systems*. Institution of Engineering and Technology Stevenage, UK.

EPCOS AG (2013). *Aluminum electrolytic capacitors Snap-in capacitors Series/Type: TDK B43508*.

Falck, J., Felgemacher, C., Rojko, A., Liserre, M., and Zacharias, P. (2018). Reliability of power electronic systems: An industry perspective. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 12(2), 24–35.

Lenz, J.M., Cupertino, A.F., Pereira, H.A., Zhou, D., Wang, H., and Pinheiro, J.R. (2019). Benchmarking of capacitor power loss calculation methods for wear-out failure prediction in pv inverters. *Microelectronics Reliability*, 100, 113491.

Lenz, J.M. and Pinheiro, J.R. (2018). Mission profile impact on capacitor reliability in pv single-stage inverters. In *2018 7th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, 976–981. IEEE.

Matsumori, H., Urata, K., Shimizu, T., Takano, K., and Ishii, H. (2018). Capacitor loss analysis method for power electronics converters. *Microelectronics Reliability*, 88, 443–446.

Sangwongwanich, A., Shen, Y., Chub, A., Liivik, E., Vinnikov, D., Wang, H., and Blaabjerg, F. (2019). Mission profile-based accelerated testing of dc-link capacitors in photovoltaic inverters. In *2019 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2833–2840. IEEE.

Silveira Brito, E.M. et al. (2021). Lifetime evaluation of photovoltaic inverters with capability of reactive power support.

Wang, H., Li, C., Zhu, G., Liu, Y., and Wang, H. (2020). Model-based design and optimization of hybrid dc-link capacitor banks. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 35(9), 8910–8925.

Wang, H. and Blaabjerg, F. (2014). Reliability of capacitors for dc-link applications in power electronic converters—an overview. *IEEE Transactions on industry Applications*, 50(5), 3569–3578.

Yang, Y., Ma, K., Wang, H., and Blaabjerg, F. (2015). Instantaneous thermal modeling of the dc-link capacitor in photovoltaic systems. In *2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2733–2739. IEEE.

Zhou, D., Song, Y., Liu, Y., and Blaabjerg, F. (2018). Mission profile based reliability evaluation of capacitor banks in wind power converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34(5), 4665–4677.