

<http://dx.doi.org/10.48005/2237-3713rta2024v13n1p513>

Análise do paralelismo de transformadores monofásicos a partir do circuito equivalente*

Analysis of the parallelism of single-phase transformers from the equivalent circuit

Juliano Bitencourt Padilha

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina - IFSC
juliano.padilha@ifsc.edu.br

Lisandra Kittel Ries

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina - IFSC
lisandra.ries@ifsc.edu.br

Adilson Pacheco Bortoluzzi

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina - IFSC
adilson.bortoluzzi@ifsc.edu.br

Anésio Felipe Zeitune

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina - IFSC
anesio.felipe@ifsc.edu.br

RESUMO

O paralelismo de transformadores possibilita o aumento da capacidade de fornecimento de energia e da confiabilidade em uma instalação (que pode operar parcialmente ainda que um dos transformadores venha a sofrer avaria e necessite de manutenção). São requisitos para a ligação em paralelo que as máquinas possuam: mesma tensão nominal, mesma relação de transformação, mesma frequência, mesmo deslocamento angular e mesma tensão de curto-circuito (que está diretamente associada às impedâncias das máquinas). Este trabalho apresenta um estudo referente à operação em paralelo de dois transformadores monofásicos a partir do circuito equivalente dos transformadores. Os parâmetros do circuito equivalente de cada um dos transformadores foram obtidos por meio dos ensaios a vazio e de curto-circuito. Com exceção da tensão de curto-circuito, as máquinas consideradas apresentam todos os requisitos para a ligação em paralelo. A análise por meio do circuito equivalente possibilitou analisar dados como nível de carregamento e rendimento das máquinas, podendo ser utilizada em disciplinas que abordam o estudo de transformadores.

Palavras-chave: Máquinas elétricas. Transformadores monofásicos. Circuito equivalente. Paralelismo de transformadores. Impedâncias. Ensaio a vazio e de curto-circuito.

ABSTRACT

The parallel operation of transformers enables an increase in energy supply capacity and reliability in an installation (which can operate partially even if one of the transformers suffers damage and requires maintenance). The requirements for parallel connection are that the machines have: the same nominal voltage, the same transformation ratio, the same frequency, the same angular displacement, and the same short-circuit voltage (which is directly

* Received 17 November 2023; accepted in 01 July 2024; published online 05 August 2024.

associated with the machines' impedances). This work presents a study on the parallel operation of two single-phase transformers from the equivalent circuit of the transformers. The equivalent circuit parameters of each transformer were obtained through no-load and short-circuit tests. Except for the short-circuit voltage, the machines considered meet all the requirements for parallel connection. The analysis using the equivalent circuit made it possible to analyze data such as the loading level and efficiency of the machines and can be used in disciplines that address the study of transformers.

Keywords: Electric machines. Single-phase transformers. Equivalent circuit. Transformer parallelism. Impedances. No-load and short-circuit tests.

1 INTRODUÇÃO

O estudo de máquinas elétricas está presente em quase todos os currículos de cursos de engenharia voltados à área de eletrotécnica e eletrônica. Normalmente os currículos destinam carga horária para atividades teóricas e práticas sobre o assunto. As atividades práticas visam a ensaiar as máquinas com posterior análise dos resultados experimentais. Em relação aos transformadores, dois dos principais ensaios são o a vazio e o de curto-circuito. O primeiro busca determinar as perdas ferromagnéticas no núcleo e o segundo as perdas no cobre. Além disso, com os dados provenientes de tais ensaios são determinados os parâmetros do circuito equivalente da máquina (CHAPMAN, 2013). De posse do circuito equivalente, é possível implementar em um algoritmo a resolução do circuito e assim analisar o funcionamento do transformador para os mais variados tipos de carga acopladas ao secundário. O mesmo pode ser realizado para análise do paralelismo de transformadores, foco deste trabalho.

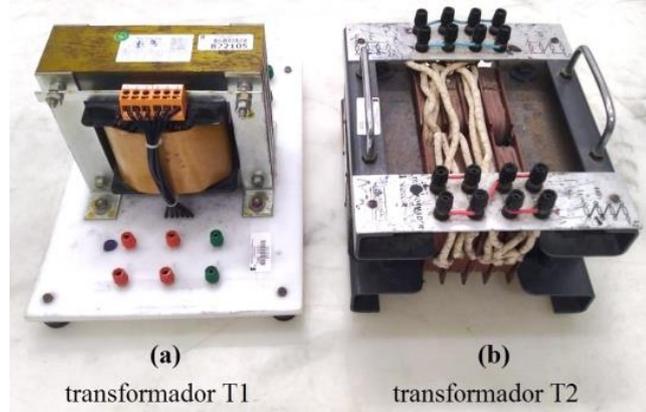
O paralelismo possibilita o aumento da capacidade de fornecimento de energia e da confiabilidade em uma instalação (que pode operar parcialmente ainda que um dos transformadores venha a sofrer avaria e necessite de manutenção). São requisitos para a ligação em paralelo que as máquinas possuam: mesma tensão nominal, mesma relação de transformação, mesma frequência, mesmo deslocamento angular e mesma tensão de curto-circuito (que está diretamente associada às impedâncias das máquinas) (DE OLIVEIRA, COGO, DE ABREU, 1984). Este trabalho apresenta um estudo referente à operação em paralelo de dois transformadores monofásicos a partir do circuito equivalente dos transformadores. Os parâmetros do circuito equivalente de cada um dos transformadores foram obtidos por meio dos dados provenientes dos ensaios a vazio e de curto-circuito. Com exceção da tensão de curto-circuito, as máquinas consideradas apresentam todos os requisitos para a ligação em paralelo. A análise por meio do circuito equivalente a partir de simulações computacionais possibilitou analisar dados como nível de carregamento e rendimento das máquinas, podendo ser utilizada em disciplinas que abordam o assunto.

É importante destacar a importância das simulações no ambiente de ensino. Muitos trabalhos têm discutido esse tipo de ferramenta, com conclusões positivas sobre a mesma (SOUZA, DANDOLINI, 2009), (BREMENKAMP, DE MENEZES, DO CARMO, 2012), (GARBIN, KAMPPFF, 2021). Assim, este artigo busca contribuir e exemplificar uma possibilidade de uso dessa ferramenta no campo da engenharia.

2 METODOLOGIA

Primeiramente realizou-se em laboratório os ensaios a vazio e de curto-circuito de dois transformadores monofásicos de 220/110 V, 60 Hz, 1 kVA. A Figura 1 ilustra as máquinas. Um dos transformadores é do tipo núcleo envolvido e outro do tipo núcleo envolvente. A partir desses ensaios, determinou-se os parâmetros do circuito equivalente das máquinas. O circuito equivalente considerado é o apresentado nos principais livros em nível de graduação sobre o assunto e hoje encontrados no mercado (CHAPMAN, 2013), (UMANS, 2014).

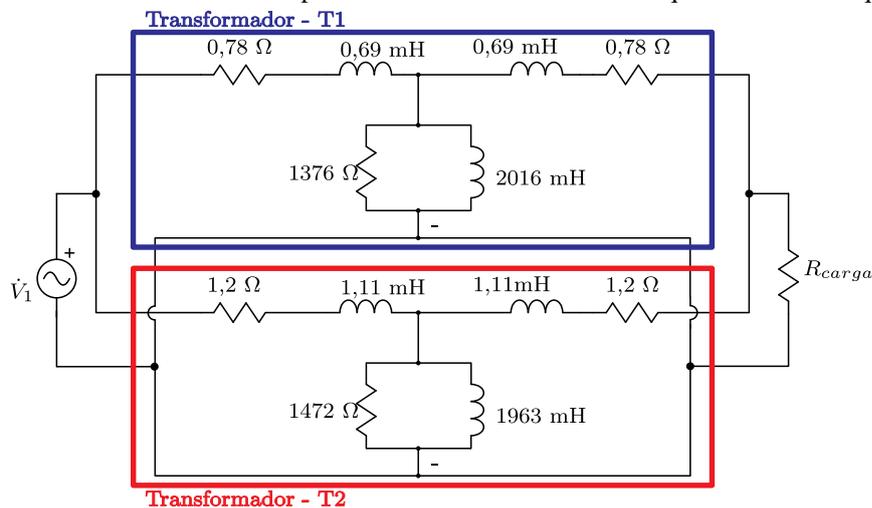
Figura 1 – Transformadores ensaiados em laboratório. (a) T1: núcleo envolvente; (b) T2: núcleo envolvido.



Fonte: elaborada pelos autores, 2023.

Os parâmetros obtidos, referentes ao lado de alta tensão (AT – 220 V), estão ilustrados na Figura 2. Nessa figura, os dois circuitos equivalentes encontram-se em paralelo. Em uma ligação real, é importante salientar que a polaridade dos transformadores deve ser determinada de modo que a conexão entre os mesmos seja realizada de forma correta.

Figura 2 – Transformadores em paralelo considerando o circuito equivalente das máquinas.



Fonte: elaborada pelos autores, 2023.

A resolução do circuito da Figura 2 foi implementada em um algoritmo em linguagem Matlab (MATHWORKS, 2023), assumindo a operação em regime permanente e fazendo o uso de fasores e impedâncias complexas, uma técnica comumente apresentada em livros de circuitos elétricos (ALEXANDER, SADIKU, 2013). O circuito também foi simulado no software Psim (POWERSIM, 2023). Essas duas formas de análise conduzem ao mesmo resultado quando considerando a mesma carga acoplada ao secundário, com a diferença que com o algoritmo é possível considerar diferentes cargas em uma única simulação.

3 RESULTADOS OBTIDOS

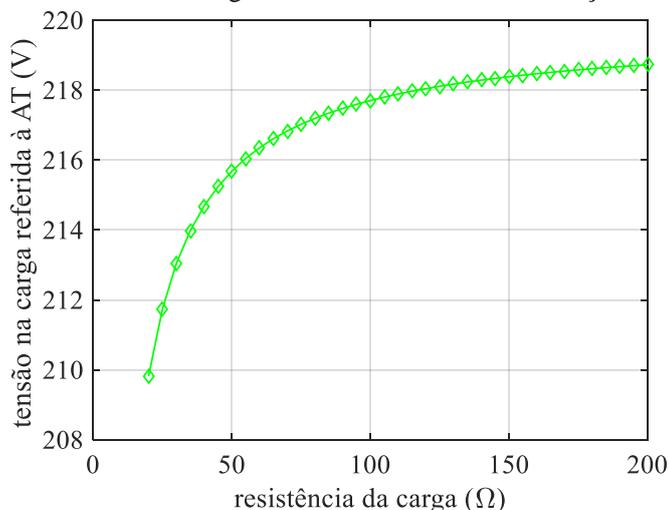
Nesta seção são apresentados os resultados obtidos com as ferramentas computacionais utilizadas e também experimentais.

3.1 Algoritmo em linguagem Matlab

Os primeiros resultados apresentados consideram o algoritmo implementado em linguagem Matlab para uma carga resistiva ligada ao secundário que varia de 20 até 200 Ω .

A Figura 3 ilustra a tensão eficaz referida ao lado de AT sobre a carga em função da resistência da carga.

Figura 3 – Tensão eficaz sobre a carga referida ao lado de AT em função da resistência da carga.

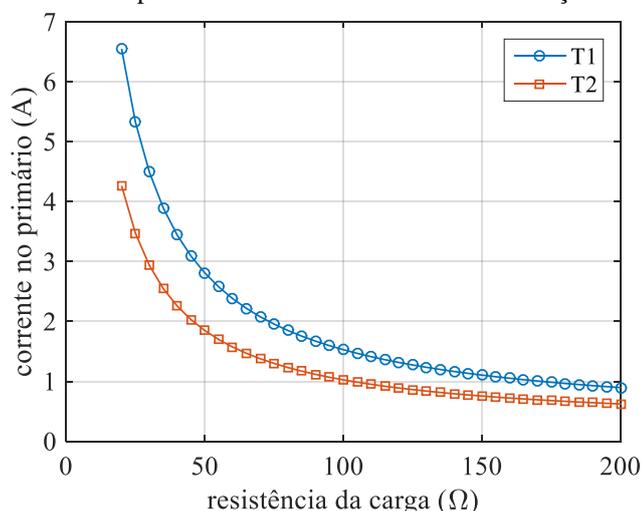


Fonte: elaborada pelos autores, 2023.

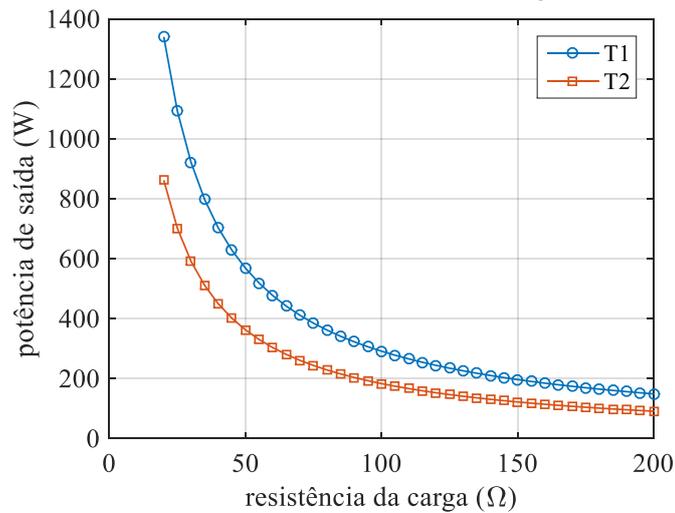
Pela Figura 3, observa-se que à medida que a resistência aumenta (o que significa uma diminuição da carga em termos de potência), o valor da tensão se aproxima de 220 V (o que significa uma menor regulação de tensão).

A Figura 4 ilustra a corrente eficaz no lado primário de cada transformador em função da resistência da carga. Já a Figura 5 ilustra a potência de saída de cada transformador (a soma dessas potências é a potência na carga).

Figura 4 – Corrente eficaz no primário de cada transformador em função da resistência da carga.



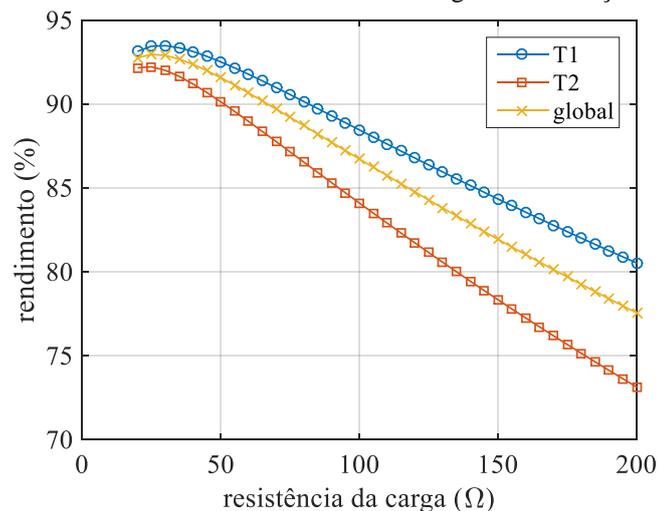
Fonte: elaborada pelos autores, 2023.

Figura 5 – Potência de saída de cada transformador em função da resistência da carga.

Fonte: elaborada pelos autores, 2023.

Pelas Figuras 4 e 5, observa-se que o transformador T1 apresenta uma maior corrente, contribuindo com uma maior parcela da potência de saída. Assim, é possível que o mesmo opere com sobrecarga para alguns níveis de potência de saída, enquanto o T2 não. Por exemplo, para uma resistência de carga igual a 20Ω a potência de saída total é da ordem de 2202 W, com T1 contribuindo com 1340 W (34 % de sobrecarga), enquanto a contribuição de T2 é de 862 W (13,8 % abaixo da carga nominal). Isso ocorre devido à diferença de impedância dos transformadores. Se a distribuição de potência fosse a mesma para ambos os transformadores, ambos estariam operando com 10% de sobrecarga (um valor aceitável durante um período de tempo).

Por fim, a Figura 6 ilustra o rendimento associado a cada transformador e também o rendimento global do sistema em função da resistência da carga.

Figura 6 – Rendimento de cada transformador e rendimento global em função da resistência da carga.

Fonte: elaborada pelos autores, 2023.

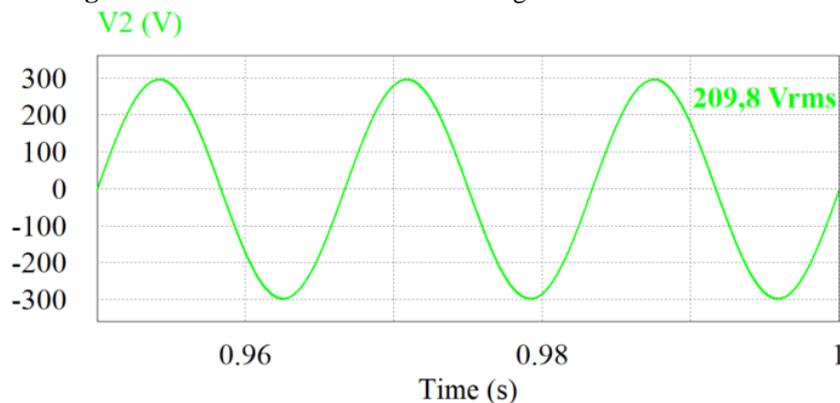
Pela Figura 6, observa-se que o transformador T2 apresentou o melhor rendimento, de modo que a soma das perdas ferromagnéticas com as perdas no cobre são menores nessa máquina do que em T1.

3.2. Simulação no *software* Psim

O circuito da Figura 2 também pode ser simulado com o *software* Psim. A vantagem de utilizar o *software* é de que nenhum esforço de programação é requerido.

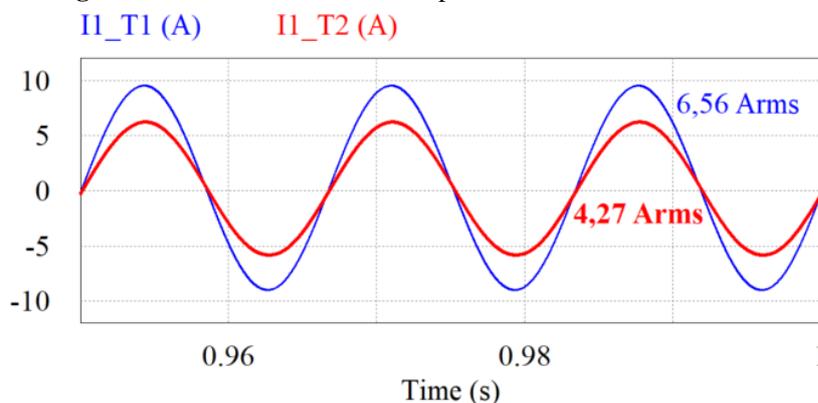
Para a realização da simulação, assumiu-se uma resistência de carga de 20Ω . As Figuras 7, 8 e 9 ilustram, respectivamente, a tensão de saída na carga referida ao lado de AT, as correntes no primário de cada transformador e a potência instantânea de saída em cada transformador.

Figura 7 – Tensão instantânea sobre a carga referida ao lado de AT.



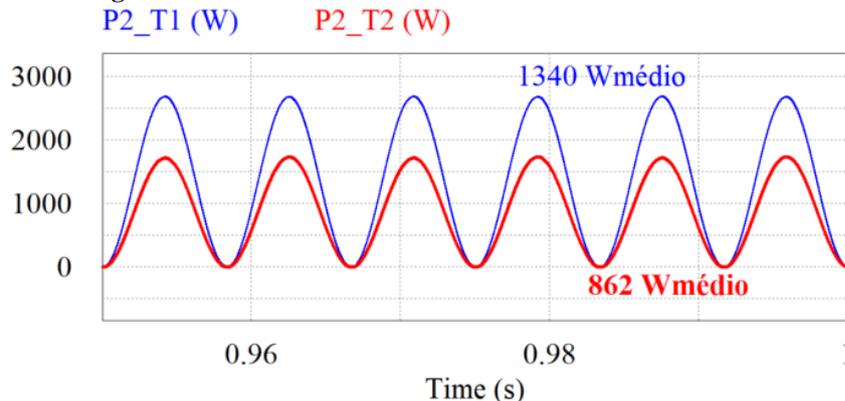
Fonte: elaborada pelos autores, 2023.

Figura 8 – Corrente instantânea no primário de cada transformador.



Fonte: elaborada pelos autores, 2023.

Figura 9 – Potência de saída instantânea de cada transformador.



Fonte: elaborada pelos autores, 2023.

Os resultados apresentados na Figuras 7, 8 e 9 estão em concordância com os obtidos por meio do algoritmo implementado. Observa-se que os valores de potência encontrados via algoritmo, e citados anteriormente, são os mesmos obtidos na simulação com o Psim (ver Figura 9).

3.3 Resultados experimentais

Os transformadores também foram conectados em paralelo em laboratório para o levantamento de resultados experimentais. As cargas acopladas aos mesmos foram de natureza resistiva, assim como as consideradas para os resultados até aqui apresentados.

De posse dos resultados experimentais, é possível compará-los com os de simulação. Essa comparação em termos de potência de saída é apresentada na Tabela 1. As diferenças calculadas consideram os resultados experimentais como referência.

Tabela 1 – Comparativo entre resultados experimentais e simulados.

R (Ω)	experimental		simulado		diferença (%)	
	P _{2_T1} (W)	P _{2_T2} (W)	P _{2_T1} (W)	P _{2_T2} (W)	P _{2_T1}	P _{2_T2}
66,4	400	290	433	275	+8,25	-5,17
49,6	520	390	572	365	+10,00	-6,41
37,4	660	520	749	479	+13,48	-8,56
29,7	810	650	930	597	+14,81	-8,15
26,0	890	760	1053	676	+18,31	-11,05

Fonte: elaborada pelos autores, 2023.

Pela Tabela 1, observa-se uma concordância entre os resultados simulados e experimentais. Algumas hipóteses que podem justificar as diferenças encontradas (todas menores que 20 %) são: imprecisões dos equipamentos utilizados nas medições, flutuações na rede de alimentação e imprecisão nos valores dos parâmetros do circuito equivalente dos transformadores.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho abordou o paralelismo de transformadores monofásicos, utilizando como base o circuito equivalente das máquinas. Foram apresentadas duas abordagens computacionais distintas: uma por meio de simulações empregando um algoritmo específico e outra utilizando o *software* Psim. Constatou-se, conforme esperado, que os resultados obtidos em ambas as abordagens revelaram-se os mesmos, corroborando a consistência e confiabilidade do estudo.

Adicionalmente, foram conduzidos experimentos visando explorar a conexão em paralelo dos transformadores estudados. Os resultados empíricos obtidos nesse contexto demonstraram congruência com os resultados previamente simulados, reforçando a validade e robustez das análises via circuito equivalente.

Dentro desse contexto, os autores almejam não apenas fornecer uma contribuição significativa para o conhecimento acadêmico, mas também estimular e promover a

incorporação desse tipo de estudo na prática docente, especialmente no âmbito de cursos de graduação. Acredita-se que essa abordagem, ao ser incorporada no ensino, pode enriquecer a formação dos alunos, oferecendo uma perspectiva prática e aplicada dos conceitos teóricos abordados no estudo de transformadores monofásicos.

REFERÊNCIAS

ALEXANDER, C. K.; SADIKU, M. N. O. **Fundamentos de Circuitos Elétricos**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013. 874 p. ISBN 978-0073380575.

BREMENKAMP, L. H.; DE MENEZES, A. G. C.; DO CARMO, C. T. Uso de interface computacional e simulações como estratégia de ensino em engenharia de produção: a importância do feedback na construção do conhecimento. **XXXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção**. Bento Gonçalves, RS, Brasil, 2012.

CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013. 700 p. ISBN 978-8580552065.

DE OLIVEIRA, J. C.; COGO, J. R.; DE ABREU, J. P. G. **Transformadores: teoria e ensaios**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1994.

DE SOUZA, J. A.; DANDOLINI, G. A. Utilizando simulação computacional com estratégia de ensino: estudo de caso. **Novas Tecnologias na Educação**. v. 7, n. 1, julho 2009.

GARBIN, F. G. B.; KAMPFF, A. J. C. Uso de simulação para o ensino de engenharia: aplicações em cursos de graduação brasileiros. **XLIX Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia e IV Simpósio Internacional de Educação em Engenharia da ABENGE**. Evento Online, 2021. DOI: 10.37702/2175-957X.COBENGE.2021.3568.

MATHWORKS, **Matlab**. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/products/matlab.html>> Acesso em: 14 mar. 2023

POWERSIM, **Psim**. Disponível em: <<https://powersimtech.com/products/psim/capabilities-applications/>> Acesso em: 14 mar. 2023

UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley**. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2014. 708 p. ISBN 978-8580553734.

DADOS BIOGRÁFICOS DOS AUTORES



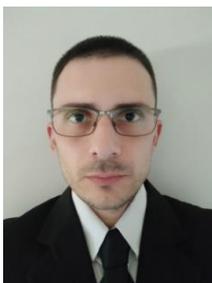
Possui doutorado e mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), tendo concluído seus estudos em 2016 e 2010, respectivamente. Além disso, concluiu a graduação em Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) em 2008 e obteve formação técnica em Eletrotécnica no Colégio Técnico Industrial de Santa Maria em 2003. Atualmente atua como professor no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina (IFSC), Câmpus Florianópolis. Suas áreas de interesse incluem a concepção e análise de dispositivos eletromagnéticos, programação e análise de dados.



Possui graduação (2010), mestrado (2013) e doutorado (2018) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, Brasil. Também concluiu graduação e mestrado em 2010 pelo Instituto Nacional Politécnico de Toulouse (INPT) na França, por meio de um programa de dupla titulação (BRAFITTEC). É atualmente professora adjunta no departamento de Eletrotécnica no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina (IFSC), Câmpus Florianópolis. Suas pesquisas de interesse incluem eletrônica de potência, fontes de energia renováveis e metodologias de ensino para Engenharia Elétrica.



Possui curso técnico em eletrotécnica pela Escola Técnica General Oswaldo Pinto Da Veiga (1988). Graduação em Engenharia Elétrica pela Fundação Universidade Regional de Blumenau (2001). Mestre pela Fundação Universidade Regional de Blumenau na área de sistemas de potência (2012). É atualmente professor adjunto no departamento de Eletrotécnica no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina (IFSC), Câmpus Florianópolis. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica com ênfase em componentes de sistemas elétricos de potência, atuando principalmente nos seguintes temas: máquinas elétricas, filtros harmônicos passivos e instalações elétricas industriais.



Possui graduação (2006), mestrado (2008) e doutorado (2012) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, Brasil. Além disso, concluiu pós-graduação lato sensu em Engenharia de Segurança do Trabalho (2016) pela Universidade Brasil. É atualmente professor no Departamento Acadêmico de Eletrotécnica no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina (IFSC), Câmpus Florianópolis. Suas áreas de interesse incluem sistemas de potência em regime permanente, análise de transitórios e fontes de energia renováveis.