

A Aplicação do Conhecimento Científico na Engenharia Elétrica

João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann
(Organizadores)



A Aplicação do Conhecimento Científico na Engenharia Elétrica

João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann
(Organizadores)



2020 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do Texto © 2020 Os autores

Copyright da Edição © 2020 Atena Editora

Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Diagramação: Karine de Lima

Edição de Arte: Lorena Prestes

Revisão: Os Autores



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores. Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Conselho Editorial

Ciências Humanas e Sociais Aplicadas

Profª Drª Adriana Demite Stephani – Universidade Federal do Tocantins
Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Alexandre Jose Schumacher – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Antonio Gasparetto Júnior – Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília
Prof. Dr. Carlos Antonio de Souza Moraes – Universidade Federal Fluminense
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa
Profª Drª Denise Rocha – Universidade Federal do Ceará
Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia
Prof. Dr. Edvaldo Antunes de Farias – Universidade Estácio de Sá
Prof. Dr. Eloi Martins Senhora – Universidade Federal de Roraima
Prof. Dr. Fabiano Tadeu Grazioli – Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionale delle Figlie di Maria Ausiliatrice
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
Profª Drª Keyla Christina Almeida Portela – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Pereira da Silva – Universidade Federal do Maranhão
Profª Drª Miranilde Oliveira Neves – Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Rita de Cássia da Silva Oliveira – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Sandra Regina Gardacho Pietrobon – Universidade Estadual do Centro-Oeste
Profª Drª Sheila Marta Carregosa Rocha – Universidade do Estado da Bahia
Prof. Dr. Rui Maia Diamantino – Universidade Salvador
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. William Cleber Domingues Silva – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

Ciências Agrárias e Multidisciplinar

Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano
Prof. Dr. Antonio Pasqualetto – Pontifícia Universidade Católica de Goiás
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná

Profª Drª Diocléa Almeida Seabra Silva – Universidade Federal Rural da Amazônia
Prof. Dr. Écio Souza Diniz – Universidade Federal de Viçosa
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Fágner Cavalcante Patrocínio dos Santos – Universidade Federal do Ceará
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Prof. Dr. Júlio César Ribeiro – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Profª Drª Lina Raquel Santos Araújo – Universidade Estadual do Ceará
Prof. Dr. Pedro Manuel Villa – Universidade Federal de Viçosa
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Profª Drª Talita de Santos Matos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Tiago da Silva Teófilo – Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

Ciências Biológicas e da Saúde

Prof. Dr. André Ribeiro da Silva – Universidade de Brasília
Profª Drª Anelise Levay Murari – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás
Prof. Dr. Edson da Silva – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri
Profª Drª Eleuza Rodrigues Machado – Faculdade Anhanguera de Brasília
Profª Drª Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina
Prof. Dr. Ferlando Lima Santos – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. Igor Luiz Vieira de Lima Santos – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Profª Drª Magnólia de Araújo Campos – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Mylena Andréa Oliveira Torres – Universidade Ceuma
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federaci do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Paulo Inada – Universidade Estadual de Maringá
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto
Prof. Dr. Alexandre Leite dos Santos Silva – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás
Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Conselho Técnico Científico

Prof. Msc. Abrãao Carvalho Nogueira – Universidade Federal do Espírito Santo
Prof. Msc. Adalberto Zorzo – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza
Prof. Dr. Adailson Wagner Sousa de Vasconcelos – Ordem dos Advogados do Brasil/Seccional Paraíba
Prof. Msc. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão
Profª Drª Andreza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico
Profª Msc. Bianca Camargo Martins – UniCesumar
Prof. Msc. Carlos Antônio dos Santos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Msc. Cláudia de Araújo Marques – Faculdade de Música do Espírito Santo
Prof. Msc. Daniel da Silva Miranda – Universidade Federal do Pará
Profª Msc. Dayane de Melo Barros – Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Edwaldo Costa – Marinha do Brasil
 Prof. Msc. Eliel Constantino da Silva – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita
 Prof. Msc. Gevair Campos – Instituto Mineiro de Agropecuária
 Prof. Msc. Guilherme Renato Gomes – Universidade Norte do Paraná
 Prof^a Msc. Jaqueline Oliveira Rezende – Universidade Federal de Uberlândia
 Prof. Msc. José Messias Ribeiro Júnior – Instituto Federal de Educação Tecnológica de Pernambuco
 Prof. Msc. Leonardo Tullio – Universidade Estadual de Ponta Grossa
 Prof^a Msc. Lilian Coelho de Freitas – Instituto Federal do Pará
 Prof^a Msc. Liliani Aparecida Sereno Fontes de Medeiros – Consórcio CEDERJ
 Prof^a Dr^a Lívia do Carmo Silva – Universidade Federal de Goiás
 Prof. Msc. Luis Henrique Almeida Castro – Universidade Federal da Grande Dourados
 Prof. Msc. Luan Vinicius Bernardelli – Universidade Estadual de Maringá
 Prof. Msc. Rafael Henrique Silva – Hospital Universitário da Universidade Federal da Grande Dourados
 Prof^a Msc. Renata Luciane Polsaque Young Blood – UniSecal
 Prof^a Msc. Solange Aparecida de Souza Monteiro – Instituto Federal de São Paulo
 Prof. Dr. Welleson Feitosa Gazel – Universidade Paulista

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)**

A642 A aplicação do conhecimento científico na engenharia elétrica [recurso eletrônico] / Organizadores João Dallamuta, Henrique Ajuz Holzmann. – Ponta Grossa, PR: Atena Editora, 2020.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-85-7247-932-5

DOI 10.22533/at.ed.325201701

1. Engenharia elétrica – Pesquisa – Brasil. I. Dallamuta, João.
II. Holzmann, Henrique Ajuz.

CDD 623.3

Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422

Atena Editora
 Ponta Grossa – Paraná - Brasil
www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br

APRESENTAÇÃO

A engenharia elétrica tornou-se uma profissão há cerca de 130 anos, com o início da distribuição de eletricidade em caráter comercial e com a difusão acelerada do telégrafo em escala global no final do século XIX.

Na primeira metade do século XX a difusão da telefonia e da radiodifusão além do crescimento vigoroso dos sistemas elétricos de produção, transmissão e distribuição de eletricidade, deu os contornos definitivos para a carreira de engenheiro eletricitista que na segunda metade do século, com a difusão dos semicondutores e da computação gerou variações de ênfase de formação como engenheiros eletrônicos, de telecomunicações, de controle e automação ou de computação.

Produzir conhecimento em engenharia elétrica é portando pesquisar em uma gama enorme de áreas, subáreas e abordagens de uma engenharia que é onipresente em praticamente todos os campos da ciência e tecnologia.

Neste livro temos uma diversidade de temas, níveis de profundidade e abordagens de pesquisa, envolvendo aspectos técnicos e científicos. Aos autores e editores, agradecemos pela confiança e espírito de parceria.

João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
PANORAMA ATUAL E CENÁRIO 2025 DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO BRASIL	
Isabela Valpecovski Urbanetz Allana de Moura Netto Bruno Scolari Vicente Leite Jair Urbanetz Junior	
DOI 10.22533/at.ed.3252017011	
CAPÍTULO 2	10
GESTÃO EFICIENTE DAS ANUIDADES REGULATÓRIAS NA CEMIG DISTRIBUIÇÃO	
Rosane de Pinho Matos Viviane Fernanda de Aguiar Pereira	
DOI 10.22533/at.ed.3252017012	
CAPÍTULO 3	21
DESAFIOS DA REVISÃO PERIÓDICA DE AJUSTES DE GRANDES SISTEMAS -NORMAS, PROCEDIMENTOS E FERRAMENTAS	
Rodrigo A. Benes Ferreira Mario Roberto Bastos Nilson José Francischetti Júnior	
DOI 10.22533/at.ed.3252017013	
CAPÍTULO 4	36
AVALIAÇÃO ECONÔMICA E ENERGÉTICA DE UM SISTEMA INTEGRANDO MÁQUINA BIOPEIXES E REATOR MULTIFUNCIONAL PARA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	
Francisco de Assis da Silva Mota Francisco Francielle Pinheiro dos Santos Paula Cristina de Amorim Andrade	
DOI 10.22533/at.ed.3252017014	
CAPÍTULO 5	48
ANÁLISE DE PERDAS TÉCNICAS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO	
Francisco Jeandson Rodrigues da Silva Ailson Pereira de Moura Adriano Aron Freitas de Moura Douglas Aurélio Carvalho Costa Obed Leite Vieira	
DOI 10.22533/at.ed.3252017015	
CAPÍTULO 6	61
CARACTERIZAÇÃO E ESTRATIFICAÇÃO DOS SFVCR NO BRASIL: CENÁRIO ATUAL E PERSPECTIVAS FUTURAS	
Diego Piazza Hilgert Jair Urbanetz Junior	
DOI 10.22533/at.ed.3252017016	

CAPÍTULO 7	75
GEOCORTE CEMIG D: SELEÇÃO ÓTIMA DE ALVOS DE CORTE USANDO GEORREFERENCIAMENTO: DESENVOLVIMENTO SAP/CCS	
Wellington Fazzi Cancian Andre Luiz Soares Charles Ramos Pimenta	
DOI 10.22533/at.ed.3252017017	
CAPÍTULO 8	89
ÍNDICES DE REFERÊNCIA PARA APLICAÇÃO DA TECNOLOGIA CABOS PARA-RAIOS ENERGIZADOS	
José Ezequiel Ramos Alexandre Piantini Ary D'Ajuz Valdemir Aparecido Pires Paulo Roberto de Oliveira Borges	
DOI 10.22533/at.ed.3252017018	
CAPÍTULO 9	96
A EXPERIÊNCIA DA COPEL COM RELIGADORES MONOFÁSICOS	
Maurício Varassim Hernandes Oscar Kim Júnior Fausto Aurélio Portella Garcia Guilherme Fernandes Gonçalves	
DOI 10.22533/at.ed.3252017019	
CAPÍTULO 10	108
SISTEMA DE MONITORAMENTO DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA COM VISTAS A MELHORIA DA QUALIDADE DE SERVIÇO	
Klendson Marques Canuto Avilez Batista de Oliveira Lima Paulo Roberto de Oliveira Braga Juraci Gomes de Aguiar Filho André Ribeiro da Costa	
DOI 10.22533/at.ed.32520170110	
CAPÍTULO 11	122
TÉCNICA DE RESGATE PARA TRABALHOS EM INSTALAÇÕES ENERGIZADAS – MÉTODO AO POTENCIAL	
Fernando César Pepe Wlademir Braido	
DOI 10.22533/at.ed.32520170111	
CAPÍTULO 12	128
MONITORAMENTO DE DESGASTE DE CONTATOS DOS DISJUNTORES DA SUBESTAÇÃO ISOLADA À GÁS DA UHE BELO MONTE	
Davi Carvalho Moreira	
DOI 10.22533/at.ed.32520170112	

CAPÍTULO 13 139

COMPARAÇÃO ENTRE TRANSFORMADORES A ÓLEO E A SECO

Marco Antonio Ferreira Finocchio
Márcio Mendonça
Lucas de Oliveira Antunes
Jeferson Gonçalves Ferreira

DOI 10.22533/at.ed.32520170113

CAPÍTULO 14 147

OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS APLICADA A CONTROLADORES DE CORRENTE PARA INVERSORES CONECTADOS À REDE

Lucas Cielo Borin
Iury Cleveston
Caio Ruviaro Dantas Osorio
Gustavo Guilherme Koch
Fabricio Moretto Bottega
Vinicius Foletto Montagner

DOI 10.22533/at.ed.32520170114

CAPÍTULO 15 161

OTIMIZAÇÃO DA CONFIABILIDADE PELA ALOCAÇÃO DE CHAVES AUTOMÁTICAS E USO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA EM ILHAMENTO

Railson Severiano de Sousa
Camilo Alberto Sepúlveda Rangel
Criciéle Castro Martins
Mauricio Sperandio
Luciane Neves Canha

DOI 10.22533/at.ed.32520170115

CAPÍTULO 16 175

COMO SELECIONAR TRANSISTORES DE POTÊNCIA PARA APLICAÇÕES EM CONVERSORES ESTÁTICOS?

Edemar de Oliveira Prado
Pedro Cerutti Bolsi
Mateus José Tiburski
Éder Bridi
Hamiltom Confortin Sartori
José Renes Pinheiro

DOI 10.22533/at.ed.32520170116

CAPÍTULO 17 190

METODOLOGIA DE PROJETO DE CONVERSORES BOOST PARA APLICAÇÕES DE ALTA EFICIÊNCIA E ELEVADO GANHO DE TENSÃO

Mateus José Tiburski
Éder Bridi
Edemar Oliveira Prado
Pedro Cerutti Bolsi
Hamiltom Confortin Sartori
José Renes Pinheiro

DOI 10.22533/at.ed.32520170117

CAPÍTULO 18	203
INFLUÊNCIA DO PONTO DE OPERAÇÃO DE CONVERSORES ESTÁTICOS NO VOLUME E PERDAS DE DIFERENTES MATERIAIS MAGNÉTICOS	
<ul style="list-style-type: none"> Pedro Cerutti Bolsi Edemar de Oliveira Prado Mateus José Tiburski Éder Bridi Hamiltom Confortin Sartori José Renes Pinheiro 	
DOI 10.22533/at.ed.32520170118	
CAPÍTULO 19	218
WIRELESS CHARGER MANUFACTURING USING INDUCTIVE METHOD	
<ul style="list-style-type: none"> Maryam Liaqat Sulman Joseph Shamsa Maqsood Ali Raza Sana Aslam Waseem Imtiaz Muhammad Furqan Shoukat 	
DOI 10.22533/at.ed.32520170119	
CAPÍTULO 20	235
TRANSFORMADOR DE ATERRAMENTO EM REDE DE DISTRIBUIÇÃO	
<ul style="list-style-type: none"> Djair Pamplona dos Santos 	
DOI 10.22533/at.ed.32520170120	
CAPÍTULO 21	248
OTIMIZAÇÃO DE CONVERSORES BOOST INTERCALADO DE ALTO GANHO DE TENSÃO E ALTA EFICIÊNCIA	
<ul style="list-style-type: none"> Éder Bridi Mateus José Tiburski Edemar Oliveira Prado Pedro Cerutti Bolsi Hamiltom Confortin Sartori José Renes Pinheiro 	
DOI 10.22533/at.ed.32520170121	
CAPÍTULO 22	262
DETERMINAÇÃO DE PROCEDIMENTO PARA AVALIAR A INCERTEZA NA PREVISÃO DE PRECIPITAÇÃO E VAZÃO AFLUENTE POR SISTEMAS HIDRO METEOROLÓGICOS PARA AUXÍLIO NA OPERAÇÃO DOS RESERVATÓRIOS E PLANEJAMENTO HIDROENERGÉTICO	
<ul style="list-style-type: none"> Reinaldo Bomfim da Silveira Anderson Nascimento de Araujo Mino Viana Sorribas Camila Freitas Rafael Schinoff Mércio Pereira Ângelo Breda José Eduardo Gonçalves 	
DOI 10.22533/at.ed.32520170122	
SOBRE OS ORGANIZADORES	276

INFLUÊNCIA DO PONTO DE OPERAÇÃO DE CONVERSORES ESTÁTICOS NO VOLUME E PERDAS DE DIFERENTES MATERIAIS MAGNÉTICOS

Data de submissão: 14/10/2019

Data de aceite: 03/01/2020

Pedro Cerutti Bolsi

Universidade Federal de Santa Maria - UFSM

Santa Maria – RS

<http://lattes.cnpq.br/0324597211954149>

Edemar de Oliveira Prado

Universidade Federal de Santa Maria - UFSM

Santa Maria – RS

<http://lattes.cnpq.br/1774778404976935>

Mateus José Tiburski

Universidade Federal de Santa Maria - UFSM

Santa Maria – RS

<http://lattes.cnpq.br/5498188421691529>

Éder Bridi

Universidade Federal de Santa Maria - UFSM

Santa Maria – RS

<http://lattes.cnpq.br/2790377192733673>

Hamilton Confortin Sartori

Universidade Federal de Santa Maria - UFSM

Santa Maria – RS

<http://lattes.cnpq.br/6722822162374884>

José Renes Pinheiro

Universidade Federal de Santa Maria - UFSM

Santa Maria – RS

<http://lattes.cnpq.br/2333794966860226>

RESUMO: Este artigo avalia e compara o comportamento elétrico e térmico de tecnologias de núcleos magnéticos através de um projeto de indutor. O objetivo é identificar os materiais de maior densidade volumétrica de potência e eficiência. As não linearidades causadas por variações na permeabilidade magnética dos materiais tornam o projeto complexo, e a visualização das relações entre os parâmetros de projeto é essencial. Projetos de indutor para núcleos de tecnologia MPP, HF, Kool M μ [®], Kool M μ MAX[®] e ferrite P são avaliados e comparados em uma varredura de pontos de operação (frequência e ondulação de corrente). Os resultados apresentam a relação entre volume, densidade de corrente, perdas no cobre e perdas no núcleo, apontando as faixas específicas nas quais cada material é recomendado.

PALAVRAS-CHAVE: Densidade de Corrente, Frequência, Núcleos Magnéticos, Perdas, Volume.

COMPARISON OF CORE TECHNOLOGIES APPLIED TO POWER INDUCTORS

ABSTRACT: This work evaluates and compares electrical and thermal behavior of magnetic material technologies applied to power inductors. The objective is to identify materials that have the highest volumetric power

density and efficiency. The nonidealities caused by variations in magnetic permeability increase design complexity, and knowing the thermal, electrical and magnetic relations in project parameters is essential. Inductor designs for MPP, HF, Sendust, Kool M μ MAX and P ferrite materials are evaluated and compared over a span of operating points (frequency and current ripple). Results present the relationship between volume, current density, copper losses and core losses, pointing the specific ranges each material is recommended at. Design procedure is described, and discussions relate performance to cost.

KEYWORDS: Current Density, Frequency, Magnetic Cores, Losses, Volume.

1 | INTRODUÇÃO

A redução do tamanho e peso dos circuitos é de grande interesse em aplicações como veículos elétricos, veículos elétricos híbridos, e conversores fotovoltaicos. Os esforços de pesquisa voltados a essas aplicações se dirigem à otimização da quantidade de energia processada relativa ao volume (SARTORI, HEY e PINHEIRO 2009), (SARTORI et al., 2015), possível através da elevação da frequência de operação. No entanto, elevar a frequência resulta em mais perdas de comutação nos semicondutores (SARTORI, BELTRAME e PINHEIRO, 2011).

Atualmente, a operação eficiente em alta frequência tornou-se possível graças ao desenvolvimento de tecnologias de MOSFETs como os CoolMOS, GaN e SiC (WANG et al., 2013). À medida que os transistores têm seus limites operacionais aumentados, as tecnologias de materiais magnéticos encaram a demanda, e a oportunidade, de seguirem o mesmo caminho. Ao passo que os transistores evoluíam, o ferrite era o material mais empregado para aplicações em alta frequência, podendo ser encontrados em frequências de 10 kHz a 1 MHz, com densidades de fluxo magnético na ordem de 0,05 T a 0,3 T (TENANT, ROUSSEAU, 1995). (ROSHEN et al., 1995).

Dado que indutores, em muitos casos, aparecem como o maior componente do circuito, a redução do seu volume está geralmente atribuída à máxima densidade de fluxo que o material magnético pode suportar sem atingir a saturação. Portanto, tecnologias de núcleo de pó de ferro (*powder*) tornam-se atrativas, devido às suas densidades máximas de fluxo de até 1,5 T (MAGNETICS 2017). Quando utilizando estes núcleos, a permeabilidade baixa e característica de saturação suave irão resultar em projetos que estarão na maioria das vezes limitados pela temperatura, ao invés de serem limitados pela saturação magnética (COX 2018).

Os esforços de pesquisa na direção do aumento da densidade volumétrica potência motivaram a descrição e comparação do desempenho de vários materiais de núcleo magnético até altas frequências. Para este fim, uma simulação computacional foi elaborada, na qual projetos de indutor são iterados para frequências de comutação de 5 kHz a 1 MHz, e ondulações de corrente (*ripple*) de 10% a 80%, utilizando densidades de corrente de 200 A/cm² e 600 A/cm². Materiais avaliados incluem ferrites

P (MAGNETICS 2015); núcleos powder Molypermalloy (MPP); High Flux (HF); Kool M μ ®; e Kool M μ MAX® (MAGNETICS 2017).

De forma a demonstrar o procedimento de projeto do indutor, uma topologia simples conversor foi usada, o conversor *Boost*. O procedimento de projeto (seção 2) e as discussões apresentadas (seção 3) podem ser aplicados a qualquer cenário que exija densidade de potência. Como entrada do circuito, um arranjo de cinco módulos solares policristalinos Kyocera KT265 é considerado, operando sob condições normais de operação (NOCT).

2 | PROCEDIMENTO DE PROJETO DO INDUTOR

Um banco de dados foi construído para a simulação contendo núcleos ordenados de forma crescente em capacidade de armazenamento de energia (COX, 2018), (MAGNETICS, 2017). Ao longo da simulação, a realizabilidade construtiva de um núcleo é verificada através de verificações de design e, quando uma decisão não atinge tais restrições de projeto, um núcleo mais volumoso e de maior energia substitui a escolha de núcleo prévia.

A. Dimensionamento do Condutor

O primeiro passo é projetar os condutores de forma a mitigar os efeitos pelicular (skin) e proximidade, reduzindo a parcela de resistência CA. Para isso, o fio litz é empregado. A profundidade pelicular (δ), em cm, será usada para selecionar um diâmetro para os filamentos de cobre (SULLIVAN, 1999),

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi\mu f_{eff}}} \cdot 10^2 \quad (1)$$

em que ρ é a resistividade do cobre esmaltado em função da temperatura, em $\Omega \cdot m$, μ_0 a permeabilidade magnética do vácuo, em H/m, e f_{eff} a frequência efetiva nos enrolamentos, em Hz. Para o conversor Boost, que possui uma forma de onda não senoidal com nível CC, a Equação 1 deve ser aplicada utilizando uma frequência efetiva f_{eff} , introduzida por (SULLIVAN, 1999).

O número de filamentos no agrupamento litz será o número de condutores em paralelo (n_p) que compensa para a área de cobre dada a densidade de corrente (J), em A/cm^2 e a corrente eficaz (I_{RMS}), em A,

$$n_p = \frac{\left(\frac{I_{RMS}}{J} \right)}{\left(\pi \frac{d_c^2}{4} \right)} \quad (2)$$

em que d_c é o diâmetro do filamento, em *cm*. Para garantir a minimização da resistência AC, bons projetos de condutor *litz* utilizam filamentos de diâmetro menor que δ . Um filamento de diâmetro (d_c) 4 vezes menor que δ é escolhido, uma escolha frequente (SULLIVAN, 1999).

Para qualquer agrupamento de condutores isolados, aumentar o número de filamentos, ao passo que se diminui o diâmetro individual, é uma forma de reduzir a resistência CA. No entanto, à medida que o número de filamentos aumenta, a fração da janela ocupada pelo agrupamento de cobre reduz, e a fração ocupada pelo isolamento aumenta. Isso resulta numa elevação da resistência CC para um mesmo diâmetro (SULLIVAN, 1999).

Eventualmente, a resistência CA é reduzida a um ponto em que a elevação da resistência CC não compensa. Portanto, existe um número ótimo de filamentos (n_{opt}) que resulta na minimização da resistência CA sem comprometer a resistência CC, obtido analiticamente por (SULLIVAN, 1999),

$$n_{opt} = \frac{\delta^2 b \sqrt{192(F_R - 1)}}{N \pi d_c^3} \quad (3)$$

em que δ é a profundidade pelicular, em *cm*, N é o número de espiras, b é a largura da janela atribuída às espiras (*bobbin breadth*), em *cm*, e d_c o diâmetro do filamento, em *cm*. F_R é a razão entre as resistências CA e CC.

O número ótimo de filamentos dado pela Equação (3) é uma indicação geral e não uma prescrição exata. A combinação de n_{opt} e d_c que minimiza a resistência CA sem comprometer a resistência CC é obtida iterativamente, aproximando o fator de resistência F_R da unidade, uma vez que,

$$F_R = \frac{R_{ca}}{R_{cc}} = 1 + \frac{(\pi n N)^2 d_c^6}{192 \delta^4 b^2}. \quad (4)$$

B. Capacidade de Armazenamento de Energia e Requisito de Indutância

A Equação (5) é usada para selecionar o indutor para um conversor *Boost* em Modo de Condução Contínua (MCC) (SARTORI, BELTRAME, PINHEIRO, 2011),

$$L = \frac{V_{in} D}{f \Delta i} \quad (5)$$

em que L é o requisito de indutância, em H , V_{in} é a tensão eficaz de entrada, em V , D é a razão cíclica, f a frequência de chaveamento, em Hz , e Δi o pico da corrente, em $A \left(I_{RMS} + \frac{\Delta i}{2} \right)$.

A Equação (5) é influenciada diretamente pelo ponto de operação ($f, \Delta i$). Isso significa que maiores frequências (f) e ripples (Δi) de corrente irão resultar em requisitos de indutância (L) menores, potencialmente reduzindo o volume do indutor.

A indutância necessária para o MCC resulta em um requisito de capacidade de armazenamento de energia (En), em A^2H , para cada ponto de operação, obtido pela Equação (6),

$$En = \frac{1}{2} \left[L \left(I_{RMS} + \frac{\Delta i}{2} \right)^2 \right] \quad (6)$$

Como cada núcleo possui uma capacidade de armazenamento de energia de acordo com seu produto de área (A_p), em cm^4 (MCLYMAN 2004), a Equação (6) é usada em combinação com a Equação (7) para selecionar os núcleos no banco de dados (MAGNETICS, 2017), (MAGNETICS, 2015),

$$En_{nuc} = \frac{A_p B_m J K_u}{2 \cdot 10^4} \quad (7)$$

em que B_m é a densidade de fluxo máxima, em T , e K_u é o fator de utilização da janela, estimado por quatro fatores (MCLYMAN 2004),

$$K_u = S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \cdot S_4 \quad (8)$$

dos quais S_1 diz respeito a área de janela que será utilizada pelo isolamento dos filamentos, sendo o fator da área de cobre nu sobre a área de cobre isolado; S_2 corresponde ao fator de preenchimento das espiras, devido à geometria circular dos agrupamentos de condutores em paralelo, espiras de indutores estão sujeitas a espaços vazios entre as camadas, reduzindo a área eficaz; S_3 considera o espaço necessário para o processo de enrolamento dos núcleos; e S_4 diz respeito ao espaço tomado pelo isolamento de entre camadas de espiras, como no revestimento dos agrupamentos litz.

C. Número de Espiras e Ocupação da Janela

O cálculo do número de espiras difere para cada tecnologia, devido à presença do entreferro nos ferrites e da característica de saturação suave dos núcleos *powder*.

Núcleos Powder: o número de espiras (N) é calculado,

$$N = \sqrt{\frac{Ll_e}{0,4\pi\mu A_e}} \quad (9)$$

no qual l_e é o caminho médio magnético, em cm , A_e , a área da seção transversal do núcleo, em cm^2 , e μ a permeabilidade magnética do material (μ_r, μ_o). Com o número de espiras determinado, a força magnetizante (H), em $\frac{A \cdot e}{cm}$, pode ser estimada através da Equação (10),

$$H = \frac{N \left(I_{RMS} + \frac{\Delta i}{2} \right)}{l_e}. \quad (10)$$

Dada a característica de saturação suave dos núcleos *powder*, sua permeabilidade magnética diminui gradativamente em função de H , com base nas curvas de permeabilidade vs. força magnetizante (MAGNETICS, 2017). Desta maneira, um número de espiras ajustado para a força magnetizante $N_{aj}(H)$ é calculado de forma a manter a indutância. Por outro lado, aumentar o número de espiras fará com que a força magnetizante aumente (Equação 10). Portanto, este processo é reiterado até que a indutância atenda ao objetivo dado pela Equação (5).

Para este processo iterativo de N e H é adotada uma tolerância de redução de permeabilidade de no máximo 50% na segunda iteração. Isto evita a operação próxima à saturação para o par $f, \Delta i$. Decisões de núcleo que apresentam redução de permeabilidade maior que 50% na segunda iteração são substituídos por outro núcleo de maior capacidade de armazenamento de energia.

Posteriormente, com base no número de espiras e dimensões do condutor, a segunda verificação de design é feita: caso a área total necessária para os enrolamentos for maior que a área da janela dado seu K_u , um núcleo de maior capacidade de energia é selecionado, até que todas as decisões de núcleo sejam realizáveis.

Para os núcleos *powder*, a elevação da frequência também afeta a permeabilidade magnética. Portanto, um número de espiras ajustado para a frequência $N_{aj}(f)$ é calculado com base nas curvas de permeabilidade vs. frequência, de forma a manter o valor da indutância (MAGNETICS, 2017).

Ferrites: um entreferro é empregado seguindo (MCLYMAN 2004). O número máximo de espiras (N_{pos}) que podem ser enroladas na janela de um núcleo EE dado o seu K_u é calculado por,

$$N_{pos} = \frac{W_a K_u}{A_w} \quad (11)$$

sendo A_w a área ocupada por uma espira, e W_a a área da janela do núcleo, ambas em cm^2 . O comprimento do entreferro (l_g), em cm é dado por (12),

$$l_g = \frac{0,4\pi N_{pos} A_e 10^{-8}}{L} - \frac{l_e}{\mu}. \quad (12)$$

A influência do fluxo de dispersão ao redor do entreferro é considerada através de um fator (F),

$$F = 1 + \frac{l_g}{\sqrt{A_e}} \ln \left(\frac{2l_t}{l_g} \right) \quad (13)$$

no qual l_t é o comprimento de uma espira, em cm. O fluxo de dispersão reduz a relutância no entreferro, aumentando o valor de indutância. Portanto, as espiras são ajustadas para um valor menor, dado pela Equação (14),

$$N_f = \sqrt{\frac{L l_g}{0,4\pi A_e F 10^{-8}}}. \quad (14)$$

Como para os ferrites as espiras são projetadas de acordo com a janela disponível, e o entreferro determina a permeabilidade magnética do núcleo, nenhum ajuste no número de espiras é feito para compensar eventuais variações de permeabilidade causadas pela frequência e força magnetizante.

D. Perdas e Temperatura

A equação de *Steinmetz* é utilizada para o cálculo de perdas no núcleo dado uma excitação senoidal. Para conversores CC-CC, (SARTORI et al., 2013) mostra uma aproximação válida fazendo uso de uma versão levemente modificada. Para núcleos *powder*, a variação da densidade de fluxo (ΔB), em T, é obtida das curvas de magnetização ($B \times H$) (MAGNETICS, 2017); o ΔB dos ferrites é calculado seguindo (MCLYMAN, 2004). As constantes a, b e c da Equação (15) são obtidas diretamente das curvas de densidade de perdas para os núcleos powder (MAGNETICS, 2017); já para os ferrites os parâmetros de perdas no núcleo são obtidos em (MAGNETICS, 2015). O período de chaveamento é T_s , e ton e $toff$ representam os estados ligado e desligado do transistor,

$$P_{núcleo} = a \left(\frac{\Delta B^b}{(2t_{on})^c} \frac{t_{on}}{T_s} + \frac{\Delta B^b}{(2t_{off})^c} \frac{t_{off}}{T_s} \right) V_{nuc} \cdot \quad (15)$$

Perdas no cobre em fios Litz são calculadas utilizando o fator Fr (Equação (4)),

$$P_{cu} = R_{CC} I_{RMS}^2 F_R \quad (16)$$

na qual,

$$R_{CC} = \frac{l_t \rho N}{\pi \left(\frac{d_c}{2} \right)^2 n_p} \cdot \quad (17)$$

Finalmente, dado que a temperatura ambiente (T_{amb}) seja definida em 25°C, a temperatura de operação (T) é estimada pela relação empírica dada pela Equação (18) (SARTORI et al., 2015). A área da superfície de troca de calor (A_{surf}) é aproximada considerando-se a contribuição adicional dos enrolamentos às dimensões do núcleo,

$$T = T_{amb} + \left(\frac{P_{cu} + P_{núcleo}}{A_{surf}} \right) \cdot \quad (18)$$

Materiais magnéticos diferentes estão avaliados para diferentes temperaturas máximas de operação (100°C para ferrites, 200°C para powder), portanto a terceira e quarta verificações de design são necessárias neste ponto.

Para os pares $f, \Delta i$ em que a temperatura está acima da máxima permitida, a decisão de núcleo é substituída pela próxima escolha de maior tamanho e maior capacidade de armazenamento de energia. Este processo também é feito iterativamente, selecionando núcleos maiores até que o requisito de temperatura seja atingido (terceira verificação de design). No entanto, como uma alta densidade de potência é o objetivo, o processo iterativo de substituição está limitado a subir a núcleos que possuam até, no máximo, o dobro do volume da decisão inicial (quarta verificação de design). Decisões que não atingem estes critérios são descartadas como não recomendadas para o par $f, \Delta i$, fazendo com que a temperatura e o volume sejam as principais restrições de projeto.

Finalmente, para os núcleos *powder*, a temperatura também irá aumentar ou reduzir a permeabilidade magnética (MAGNETICS, 2017), o que também exigirá um ajuste de espiras e atualização dos cálculos. Núcleos de ferrite diferem, novamente,

neste passo, pois para ferrites apenas o cálculo das perdas no núcleo é refeito, ajustado de acordo com a temperatura (MAGNETICS, 2015).

3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

Um conversor *Boost* operando em MCC é projetado para um arranjo de cinco módulos solares policristalinos Kyocera KT265 em NOCT. Este arranjo apresenta potência de entrada $P_{in} = 955$ W, tensão de entrada $V_{in} = 139,5$ VDC, e saída de $V_o = 311$ VDC, corrente eficaz $I_{RMS} = 6,85$ A e razão cíclica $D = 0,55$. A simulação itera simultaneamente equações de projeto para todas as tecnologias, com frequências variando de 5 kHz a 1 MHz, com passo de 5 kHz, e ondulação de corrente de 10% a 80%, com passo de 5%.

Com V_{in} e D fixos, a indutância é dada somente pelo ponto de operação em f e Δi (Equação (5)). Uma vez que todos os indutores são projetados para atingir a indutância mínima dada pela Equação (5), o conceito de capacidade de armazenamento de energia, dado pelas Equações (6) e (7) (requisito e capacidade de energia, respectivamente), é usado como comparativo entre as tecnologias para cada ponto de operação avaliado. O conceito de capacidade de energia engloba mais propriedades do material, como densidade de corrente, dimensões e densidade de fluxo magnético.

De forma a tornar a comparação entre os materiais o mais justa possível, somente núcleos com uma permeabilidade de 60μ são escolhidos do banco de dados, e ferrites são projetados para um *gap* que resulte na mesma permeabilidade. Para um projeto de indutor, a escolha da permeabilidade do material é livre. No entanto, para uma análise comparativa, as características de cada tecnologia são mais visíveis ao manter-se a permeabilidade magnética fixa.

Inicialmente, será discutida somente a relação entre o ponto de operação ($f, \Delta i$), a densidade de corrente (J), o volume, e as perdas no cobre e núcleo. Para menores $f, \Delta i$, há uma dominância das perdas no cobre sobre as perdas no núcleo. Por outro lado, à medida que $f, \Delta i$ se eleva, esta dominância se altera, as perdas no cobre diminuem enquanto as perdas no núcleo se elevam, eventualmente alterando a dominância completamente. A figura 1 ilustra este comportamento, usando o material Kool M μ MAX[®] como exemplo, para $J = 600$ A/cm² e Δi fixo em 40%.

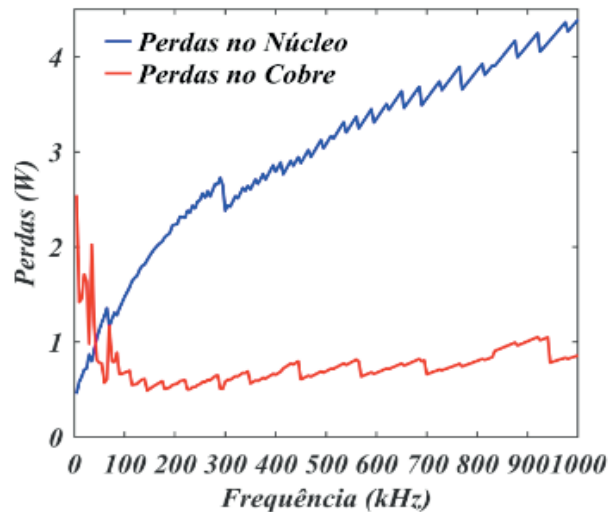


Figura 1. Comportamento das Perdas no Cobre e no Núcleo com relação à frequência.

As Figuras 2 e 3, de comparação de perdas, são utilizadas para ilustrar, além do desempenho dos materiais em termos de perdas, o seu alcance na extensão de f e Δi . Esta limitação do ponto de operação decorre da combinação de dois fenômenos característicos de f e Δi elevados: (1) as perdas no núcleo se elevam; (2) os menores volumes reduzem a área de superfície de troca de calor. A consequência disso é uma elevação na temperatura (Equação (18)), que muitas vezes não atinge as restrições térmicas da seção 2-D. Portanto, o alcance operacional dos materiais fica limitado, representado pelas linhas pontilhadas nas Figuras 2 e 3.

Nas Figuras 2 e 3, as elevadas perdas (totais) das frequências iniciais são atribuídas às perdas no cobre. Este pico inicial se reduz até em torno de 50 kHz, ponto em que as perdas no material passam a subir gradativamente devido ao aumento das perdas no núcleo. As Figuras 2 e 3, de comparação de perdas, são utilizadas para ilustrar, além do desempenho dos materiais em termos de perdas, o seu alcance na extensão de f e Δi . Esta limitação dos pontos de operação decorre da combinação de dois fenômenos característicos de f e Δi elevados: (1) as perdas no núcleo se elevam; (2) os menores volumes reduzem a área de superfície de troca de calor. A consequência disso é uma elevação na temperatura (Equação (18)), que muitas vezes não atinge as restrições térmicas da seção 2-D. Portanto, o alcance operacional dos materiais fica limitado, representado pelas linhas pontilhadas nas Figuras 2 e 3.

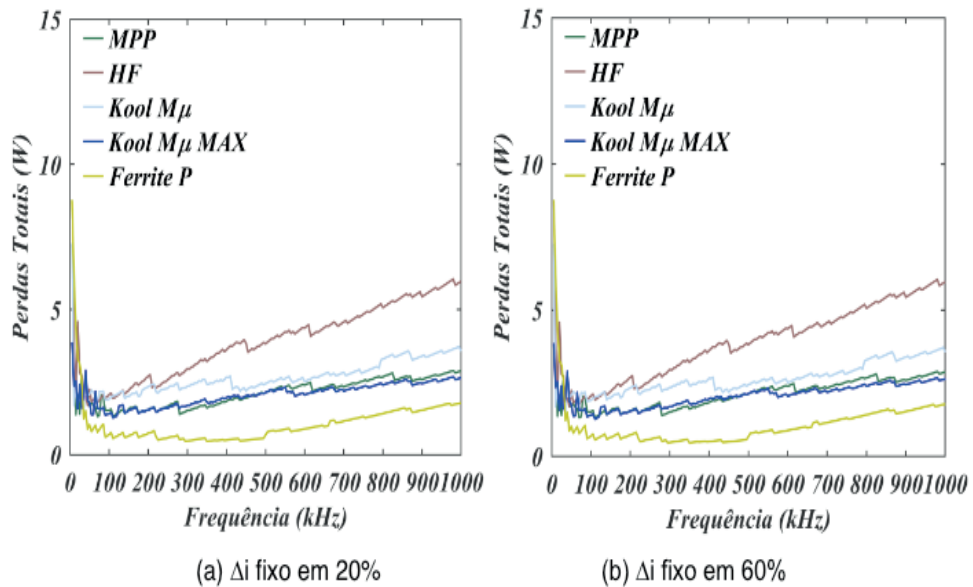


Figura 2. Perdas Totais com $J = 600 \text{ A/cm}^2$

Nas Figuras 2 e 3, as elevadas perdas (totais) das frequências iniciais são atribuídas às perdas no cobre. Este pico inicial se reduz até em torno de 50 kHz, ponto em que as perdas no material passam a subir gradativamente devido ao aumento das perdas no núcleo.

A Equação (7) aponta que utilizar uma J elevada é útil, pois aumentar a capacidade de armazenamento de energia no indutor significa reduzir o volume. No entanto, deve-se observar que para uma $f < 50 \text{ kHz}$ e Δi em torno de 20%, utilizar uma J alta resultará em elevação perdas no cobre, como visto na Figura 2(a).

Portanto, de forma a minimizar as perdas, a elevação da densidade de corrente (como em $J = 600 \text{ A/cm}^2$), é recomendada em $f > 50 \text{ kHz}$ e $\Delta i > 20\%$, pois para estas faixas as perdas no cobre (afetadas pela alta J) não são tão significantes. Ademais, elevar o ponto de operação de $f, \Delta i$ por si só reduzirá o volume (Equação (5)).

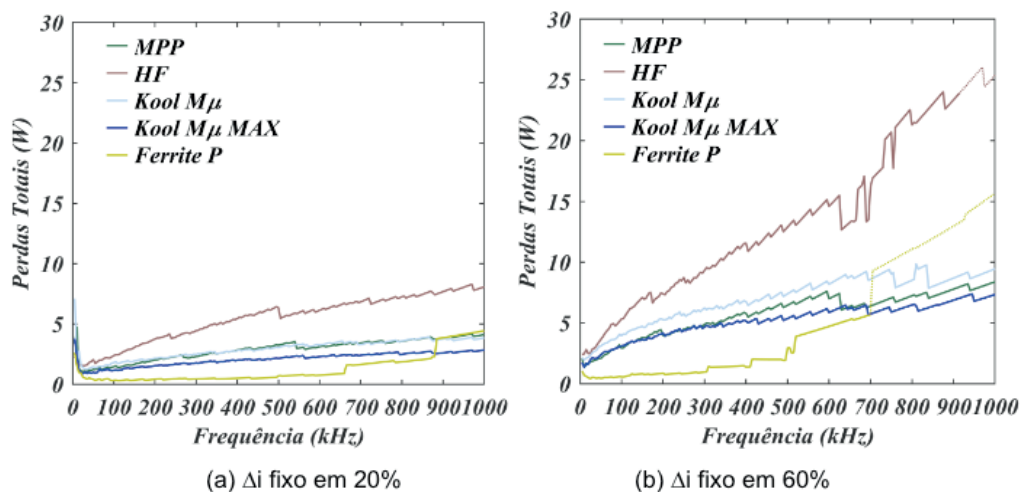


Figura 3. Perdas Totais com $J = 200 \text{ A/cm}^2$

Inversamente, para uma baixa densidade de corrente (como em $J = 200 \text{ A/cm}^2$) é indicado operar em frequências abaixo de 50 kHz e $\Delta i \leq 20\%$, uma vez que as perdas nesta faixa são menores com relação a $J = 600 \text{ A/cm}^2$, como indica a Figura 3(a).

O impacto da densidade de corrente sobre o volume do indutor (núcleo e espiras) é ilustrado pelas Figuras 4(a) e 4(b). Nestas também está aparente o limite operacional de cada tecnologia para a extensão de $f, \Delta i$, dadas as restrições da seção 2-D.

Como uma J mais baixa (200 A/cm^2) irá resultar em menor capacidade de armazenamento de energia (Equação (7)), núcleos mais volumosos serão necessários (Figura 4(b)). Este fato implicará em perdas maiores no núcleo (Equação (15)), evidente ao comparar-se a faixa acima de 50 kHz nas Figuras 2(b) e 3(b).

No entanto, devido às dimensões maiores, uma $J = 200 \text{ A/cm}^2$ faz com que os materiais abranjam uma faixa maior na extensão de $f, \Delta i$ (Equação (18)). De modo inverso, para $J = 600 \text{ A/cm}^2$, a capacidade de armazenamento de energia aumenta e o volume necessário diminui (Figura 4(a)); volumes menores implicam em menos perdas, porém temperaturas mais elevadas.

Comparando materiais para ambas densidades de corrente, o material de maior densidade de potência é o *High Flux*, devido à sua elevada densidade de fluxo máximo (B_{sat}), na ordem de 1,4 T. Uma maior B_{sat} significa que, para o mesmo tamanho, este material possuirá maior capacidade de armazenamento de energia (Equação (7)) sem atingir a saturação magnética. A desvantagem do material HF é a elevação das perdas no núcleo à medida que o par $f, \Delta i$ é aumentado. Este fenômeno limita a faixa de operação dos núcleos HF, pois os volumes reduzidos, característicos de $f, \Delta i$ altos, em combinação com as dimensões naturalmente menores do material HF, influenciam diretamente a temperatura (Equação (18)).

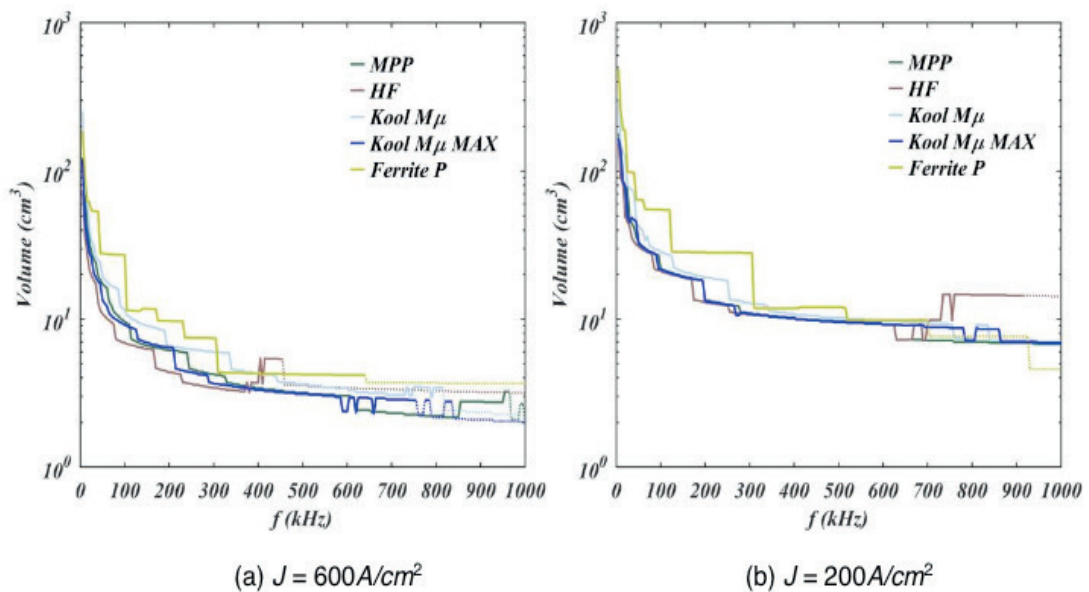


Figura 4. Volume dos materiais com Δi fixo em 60%

Para um par $f, \Delta i$ mais elevado, os núcleos mais eficientes são os de ferrite P ($B_{sat} \approx$

0,47 T), os MPP ($B_{\text{sat}} \approx 0,8 \text{ T}$) e os Kool M μ MAX® ($B_{\text{sat}} \approx 1,0 \text{ T}$), respectivamente. Uma observação importante é que apesar do fato de os ferrites P apresentar as menores perdas para todas as faixas, seus volumes são os maiores entre todos os núcleos, ambos em virtude de seu baixo B_{sat} . Ademais, sua faixa de operação é restringida por seu limite de temperatura menor (100°C) relativo aos outros materiais (200°C). Portanto, ferrites P são recomendados para projetos que não possuam volume como uma restrição, e estejam focados primariamente em perdas baixas.

Dentre os núcleos *powder*, para $f > 50 \text{ kHz}$ e $\Delta i > 20\%$, os MPP e Kool M μ MAX® são os de menores perdas, como indicado pelas Figuras 2 e 3. Em todas as faixas, os resultados de volume para os dois materiais são próximos, como visto nas Figuras 4(a) e 4(b). Tendo isso em vista, os núcleos MPP e Kool M μ MAX® são excelentes opções para um projeto de alta densidade volumétrica de potência. No entanto, destaca-se o fato de os MPP serem relativamente mais caros que todos os outros materiais analisados.

Por último, o material Kool M μ ® ($B_{\text{sat}} \approx 1,0 \text{ T}$) se mostra regular em termos de volume e perdas. No entanto, é o material de menor custo relativo, por não possuir Níquel em sua liga (núcleos HF e MPP possuem 50% e 81% respectivamente).

Um exemplo claro da situação supracitada, em que o método utilizado seleciona núcleos maiores ao se aproximar do limite de temperatura, é a forma como o material HF surge como o de maior volume ao ultrapassar 650 kHz, na Figura 4(b). Outro exemplo da mesma situação é como o ferrite P deixa de ser o material de menores perdas a partir de 880 kHz, na Figura 3(a).

4 | CONCLUSÃO

As particularidades de cada material estudado foram apresentadas e discutidas. Com respeito às perdas, os ferrites P apresentam os melhores resultados, sendo indicados para aplicações em que o volume não é um fator limitante, e/ou eficiência é crucial. De uma perspectiva de alta densidade de potência, pode ser dito que os ferrites P são competitivos com núcleos *powder* em situações que o requisito de armazenamento de energia é menor (ex: $f > 300 \text{ kHz}$ com Δi em 60%), devido à menor diferença em volume.

Dentre os núcleos *powder*, os núcleos HF e Kool M μ MAX® se destacam em termos de densidade volumétrica de potência, e são diferenciados por seu desempenho com respeito ao ponto de operação ($f, \Delta i$). Para pontos de operação baixos ($f < 50 \text{ kHz}$ e Δi em torno de 20%), o material HF apresenta perdas próximas aos outros materiais, porém com volume inferior. Portanto, núcleos HF são úteis em aplicações que requerem alta capacidade de armazenamento de energia com uma restrição de espaço.

À medida que se eleva o ponto de operação, os núcleos MPP e Kool M μ MAX® apresentam vantagem. Para todas as faixas, seu volume é comparável ao dos núcleos

HF, e são os mais eficientes entre os núcleos powder em alta frequência. No entanto, os núcleos Kool M μ MAX[®] possuem menor custo que os MPP, tornando-os superiores. Em contrapontos ao material HF, ambos os materiais são recomendados acima de 50 kHz e/ou 20% de ondulação de corrente. Os núcleos Kool M μ [®] apresentam desempenho intermediário em comparação aos outros materiais powder em termos de eficiência e tamanho, mas possuem custo menor. Portanto, são recomendados para aplicações onde uma solução custo efetiva é necessária.

Finalmente, resultados indicam que, independente do material magnético utilizado, para atingir-se uma alta densidade volumétrica de potência, deve-se associar um alto ponto de operação ($f > 50$ kHz e $\Delta i > 40\%$) com um J elevado, minimizando as perdas e o volume.

5 | AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

SARTORI, Hamiltom Confortin; HEY, Helio Leaes; PINHEIRO, Jose Renes. An optimum design of PFC Boost Converters. In: **2009 13th European Conference on Power Electronics and Applications**. IEEE, 2009. p. 1-10

SARTORI, Hamiltom C. et al. Integrated methodology design to improve the efficiency and reduce volume of the CCM PFC boost converters with pre-sizing settings. In: **2015 IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)**. IEEE, 2015. p. 1378-1385.

SARTORI, H. C.; BELTRAME, F.; PINHEIRO, J. R. A static converter comparative study taking into account semiconductor technologies and swithc auxiliary circuits: Optimized design. In: **XI Brazilian Power Electronics Conference**. IEEE, 2011. p. 280-285.

WANG, Gangyao et al. Performance comparison of 1200V 100A SiC MOSFET and 1200V 100A silicon IGBT. In: **2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition**. IEEE, 2013. p. 3230-3234.

TENANT, P.; ROUSSEAU, J.-J. Dynamic model for soft ferrites. In: **Proceedings of PESC'95-Power Electronics Specialist Conference**. IEEE, 1995. p. 1070-1076.

ROSHEN, Waseem A. et al. High-efficiency, high-density MHz magnetic components for low profile converters. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 31, n. 4, p. 869-878, 1995.

MAGNETICS INC., “Powder Cores Catalog”, 2017.

J. COX., “Iron Powder Cores for Switchmode Power Supply Inductors”, Micrometals INC., 2018.

SULLIVAN, Charles R. Optimal choice for number of strands in a litz-wire transformer winding. In: **PESC97. Record 28th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Formerly Power Conditioning Specialists Conference 1970-71. Power Processing and Electronic Specialists Conference 1972**. IEEE, 1997. p. 28-35.

MCLYMAN, Wm. T, “Transformer and Inductor design Handbook”, 3rded, Idyllwild California, 2004, pp.269-274

MAGNETICS INC., “Ferrite Cores Catalog”, 2017.

ÍNDICE REMISSIVO

A

AIS 10, 13
Ajustes de proteção 22, 28, 34, 103
Alocação de Recursos 161
Anarede 48, 49, 52, 54, 60
Anuidades 10, 11, 12, 13, 14, 15, 17, 18, 19, 20

B

BAR 10, 225
Biodiesel 36, 37, 38, 39, 40, 41, 43, 44, 45, 46, 47
BRR 10

C

CAIMI 10, 12, 13, 15, 19
Capacidade Instalada 1, 2, 3, 8
Célula combustível 190, 191, 192, 196
Cenário Energético 1
Chave fusível 96, 98, 110, 114
Chaves Automáticas 161, 162, 163, 164, 167, 168, 171
Comunidades isoladas 36, 38
Confiabilidade 20, 22, 24, 27, 49, 50, 53, 60, 84, 90, 121, 130, 136, 139, 145, 161, 162, 163, 165, 166, 167, 171, 172, 174, 192, 243
Continuidade do Fornecimento 108, 163
Conversor Boost 190
Conversores 147, 148, 175, 176, 190, 191, 192, 201, 203, 204, 209, 248, 249, 252, 258, 259, 260
Conversores conectados à rede 147
Custo operacional 15, 96, 102

D

DEC 90, 91, 92, 93, 94, 96, 97, 100, 101, 105, 106, 107, 111, 119, 164, 171
Densidade de Corrente 193, 196, 197, 198, 200, 201, 203, 205, 211, 213, 214, 248, 252, 256
Descargas atmosféricas 89, 90, 92, 93, 94
Desgaste de Contatos 128, 131

E

Energia Solar Fotovoltaica 1, 2, 3, 6, 7, 8, 61

F

Filtro LCL 147, 148, 149
Fluxo de Potência 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 148
Frequência 90, 97, 140, 147, 148, 151, 156, 163, 164, 175, 176, 177, 178, 181, 184, 185, 187, 191, 193, 196, 200, 201, 203, 204, 205, 207, 208, 209, 212, 216, 250, 251, 252, 260

G

Geração de energia 3, 36, 38, 43, 45, 46, 263

Geração Distribuída 2, 3, 4, 6, 9, 61, 62, 64, 65, 72, 73, 161, 162, 167, 172

I

Ilhamento de Geração Distribuída 161

Indicadores de Qualidade de Serviço 108, 118

Índices operacionais 89, 94

Interrupções 89, 90, 91, 92, 93, 94, 105, 106, 108, 118, 120, 134, 135, 163

Isolamento 124, 130, 139, 144, 164, 206, 207, 235, 238, 245

M

Manutenção Preditiva 128, 129, 136

Monitoramento de Disjuntor 128

Monitoramento Digital 108

Monitoramento On-line 128, 129

N

NERC PRC-027-1 21, 22

Núcleos Magnéticos 203, 252, 253, 257

O

Otimização por enxame de partículas 147, 148, 152

P

Perdas 48, 49, 50, 52, 53, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 142, 146, 175, 176, 177, 178, 179, 180, 181, 182, 183, 184, 185, 186, 187, 190, 191, 192, 193, 194, 195, 196, 197, 198, 199, 200, 201, 203, 204, 209, 210, 211, 212, 213, 214, 215, 216, 249, 250, 251, 252, 254, 255, 256, 257, 258

Perdas Técnicas 48, 49, 50, 52, 53, 55, 57, 58, 60

Proteção de Sistemas Elétricos 21, 22

PSS Sincal 21, 22, 30, 31, 32, 35

Q

Qualidade de Energia 96, 97, 107, 108, 109, 121

R

Religador monofásico 96, 98, 99, 105

Rendimento 142, 143, 145, 176, 184, 186, 187, 190, 192, 193, 199, 200, 201, 248, 249, 252, 259

Resolução Normativa ANEEL N° 482/2012 61

S

Siguard PSA 21, 22, 30, 31, 33

T

Tecnologia PRE 89

Transformador a óleo 139, 141, 145

Transistores de potência 175, 177

V

Vísceras de peixes 36, 43, 46

Volume 43, 57, 141, 188, 191, 193, 196, 199, 202, 203, 204, 207, 210, 211, 213, 214, 215, 216, 228, 250

