

JOÃO DALLAMUTA  
HENRIQUE AJUZ HOLZMANN  
(ORGANIZADORES)

---

*Collection:*

# APPLIED ELECTRICAL ENGINEERING

---

Atena  
Editora  
Ano 2022

JOÃO DALLAMUTA  
HENRIQUE AJUZ HOLZMANN  
(ORGANIZADORES)

---

*Collection:*

# APPLIED ELECTRICAL ENGINEERING

---

Atena  
Editora  
Ano 2022

**Editora chefe**

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

**Editora executiva**

Natalia Oliveira

**Assistente editorial**

Flávia Roberta Barão

**Bibliotecária**

Janaina Ramos

**Projeto gráfico**

Camila Alves de Cremo

Daphynny Pamplona

Gabriel Motomu Teshima

Luiza Alves Batista

Natália Sandrini de Azevedo

**Imagens da capa**

iStock

**Edição de arte**

Luiza Alves Batista

2022 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do texto © 2022 Os autores

Copyright da edição © 2022 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.

Open access publication by Atena Editora



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição-Não-Comercial-Não-Derivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. 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.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

**Conselho Editorial****Ciências Exatas e da Terra e Engenharias**

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto

Profª Drª Alana Maria Cerqueira de Oliveira – Instituto Federal do Acre

Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie

Profª Drª Ana Paula Florêncio Aires – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás

Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná



Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás  
Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia  
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro  
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará  
Profª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho  
Prof. Dr. Juliano Bitencourt Campos – Universidade do Extremo Sul Catarinense  
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande  
Profª Drª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte  
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá  
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora  
Prof. Dr. Miguel Adriano Inácio – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas  
Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista



**Diagramação:** Camila Alves de Cremo  
**Correção:** Yaidy Paola Martinez  
**Indexação:** Amanda Kelly da Costa Veiga  
**Revisão:** Os autores  
**Organizadores:** João Dallamuta  
Henrique Ajuz Holzmann.

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**

C697 Collection: applied electrical engineering / Organizadores  
João Dallamuta, Henrique Ajuz Holzmann. – Ponta  
Grossa - PR: Atena, 2022.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-5983-858-5

DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.585222801>

1. Electrical engineering. I. Dallamuta, João  
(Organizador). II. Holzmann, Henrique Ajuz (Organizador). III.  
Título.

CDD 621.3

**Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166**

**Atena Editora**

Ponta Grossa – Paraná – Brasil

Telefone: +55 (42) 3323-5493

[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)

contato@atenaeditora.com.br



## DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.



## DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código Penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access*, *desta forma* não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce*, ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.



## 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 eletricista 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**

#### **A MODEL BASED DESIGN APPROACH FOR KNOCK CONTROL IN INTERNAL COMBUSTION ENGINES USING MACHINE LEARNING**

Eduardo Vieira Falcão

Vinicius Mafra Melo

Péricles Rezende Barros

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5852228011>

### **CAPÍTULO 2..... 15**

#### **DEVELOPMENT OF A COMPUTATIONAL TOOL FOR DIMENSIONING AND ANALYZING THE ECONOMIC FEASIBILITY OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS**

David Coverdale Rangel Velasco

Elivandro Tavares Lôbo

Welder Azevedo Santos

Wagner Vianna Bretas

Rodrigo Martins Fernandes

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5852228012>

### **CAPÍTULO 3..... 21**

#### **OTIMIZAÇÃO DE OPERAÇÕES MODULARES ATRAVÉS DO USO DE PSEUDO-MÓDULOS**

Augusto Cezar Boldori Vassoler

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5852228013>

### **CAPÍTULO 4..... 33**

#### **OTIMIZAÇÃO DE UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA USANDO SIMULAÇÃO MATEMÁTICA E TESTES EXPERIMENTAIS**

Eduardo G. Silva

Alexandre S. Caporali

Cesar da Costa

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5852228014>

### **CAPÍTULO 5..... 49**

#### **MAPAS COGNITIVOS FUZZY DINÂMICOS ADAPTATIVOS APLICADOS EM PROCESSO INDUSTRIAL**

Márcio Mendonça

Francisco de Assis Scannavino Junior

Wagner Fontes Godoy

Lucas Botoni de Souza

Marta Rúbia Pereira dos Santos

Fábio Rodrigo Milanez

Carlos Alberto Paschoalino

Michele Eliza Casagrande Rocha

Vicente de Lima Gongora

Ricardo Breganon

Marcio Aurélio Furtado Montezuma

Emanuel Ignacio García

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5852228015>

**CAPÍTULO 6..... 61**

DESENVOLVIMENTO DE MATERIAL DIDÁTICO SOBRE FILTROS PROBABILÍSTICOS EMPREGADOS NA SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE LOCALIZAÇÃO EM ROBÓTICA MÓVEL

José Lucas Araújo dos Santos

Luciano Buonocore

Luiz Eugênio Santos Araújo Filho

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5852228016>

**CAPÍTULO 7..... 74**

EFFECTO DE LA IMPLANTACIÓN DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA ESPAÑOLA

Paula Romo Santos

Begoña Lapeña Barrio

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5852228017>

**CAPÍTULO 8..... 90**

INSTALAÇÃO DE MEDIÇÃO NOS ALIMENTADORES DAS SUBESTAÇÕES

Adalberto Leandro da Silva

Fabio Coelho de Santana

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5852228018>

**CAPÍTULO 9..... 106**

PROJETO DE OUVIDORIA DA DISTRIBUIÇÃO DA EDP SÃO PAULO – ANÁLISE DE DEMANDA DE MAIOR IMPACTO

Márcia Lúcia Lopes de Souza Jesus

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5852228019>

**CAPÍTULO 10..... 114**

DIAGNÓSTICO, CRESCIMENTO E ATENUAÇÃO DE RISCOS DE INSTALAÇÕES ELÉTRICAS EM FAVELAS

Márcio Mendonça

Marta Rúbia Pereira dos Santos

Fábio Rodrigo Milanez

Wagner Fontes Godoy

Rodrigo Henrique Cunha Palácios

Marco Antônio Ferreira Finocchio

Carlos Alberto Paschoalino

Francisco de Assis Scannavino Junior

Vicente de Lima Gongora

Lucas Botoni de Souza

Michele Eliza Casagrande Rocha

José Augusto Fabri

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.58522280110>

**CAPÍTULO 11..... 127**

**ANÁLISE COMPARATIVA DE UM SISTEMA DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM UMA EDIFICAÇÃO DA CIDADE DE PORTO VELHO - RO**

Angelina Lidiane Moura Cunha  
Felipe Alexandre Souza da Silva  
Antonio Carlos Duarte Ricciotti  
Viviane Barrozo da Silva  
Paulo de Tarso Carvalho de Oliveira

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.58522280111>

**CAPÍTULO 12..... 140**

**O DESEMPENHO E EFICIÊNCIA DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EM PALMAS - TO: ANÁLISE EM FUNÇÃO DO PONTO CARDEAL E VARIAÇÃO ANGULAR DAS PLACAS**

Aline Silva Magalhães  
Jabson da Cunha Silva

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.58522280112>

**CAPÍTULO 13..... 153**

**SIMULADOR DE CARGA UTILIZANDO MECANISMO DE FRENAGEM ELETROMAGNÉTICA PARA ENSAIOS DE COMPORTAMENTO DE MÁQUINAS ASSÍNCRONAS**

Murilo Meneghetti Caramori  
Alexandre Dalla Rosa

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.58522280113>

**CAPÍTULO 14..... 184**

**PROPOSTA DE GEOMETRIAS DE NÚCLEOS USADOS EM ACOPLAMENTOS DE SISTEMAS ATRAVÉS DO FLUXO MAGNÉTICO**

Lucas Lapolli Brighenti  
Walbermark Marques Dos Santos  
Denizar Cruz Martins

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.58522280114>

**CAPÍTULO 15..... 198**

**DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DE LIGAÇÕES CRUZADAS EM BORRACHA DE ESTIRENO-BUTADIENO (SBR) PARA DIFERENTES SISTEMAS DE VULCANIZAÇÃO**

Harison Franca do Santos  
Arthur Pimentel de Carvalho  
Carlos Toshiyuki Hiranobe  
Eduardo Roque Budenberg  
Gabriel Deltrejo Ribeiro  
Giovanni Barrera Torres  
Jose Francisco Resende  
Leonardo Lataro Paim  
Leandra Oliveira Salmazo  
Miguel Ángel Rodríguez Pérez

Renivaldo José dos Santos

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.58522280115>

<b>SOBRE OS ORGANIZADORES .....</b>	<b>210</b>
<b>ÍNDICE REMISSIVO.....</b>	<b>211</b>

## PROPOSTA DE GEOMETRIAS DE NÚCLEOS USADOS EM ACOPLAMENTOS DE SISTEMAS ATRAVÉS DO FLUXO MAGNÉTICO

*Data de aceite: 10/01/2022*

*Data de submissão: 08/10/2021*

### **Lucas Lapolli Brighenti**

Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica, Instituto de Eletrônica de Potência – INEP  
Florianópolis – SC  
<http://lattes.cnpq.br/0848735096682176>

### **Walbermark Marques Dos Santos**

Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, Departamento de Engenharia Elétrica, Laboratório de Eletrônica de Potência e Acionamento – LEPAC  
Vitória – ES  
<http://lattes.cnpq.br/5558697161842579>

### **Denizar Cruz Martins**

Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica, Instituto de Eletrônica de Potência – INEP  
Florianópolis – SC  
<http://lattes.cnpq.br/6156546664055944>

**RESUMO:** Neste trabalho são propostas geometrias para núcleos utilizados em barramentos magnéticos de alta frequência. O barramento magnético faz o acoplamento de sistemas de energia através do fluxo magnético, similar ao barramento capacitivo em microrredes CC. Em sistemas conectados à rede de distribuição, a isolação galvânica

é indispensável e o acoplamento magnético traz além desta vantagem, a possibilidade de interligar fontes de energia com diferentes níveis de tensão. Microrredes e transformadores de estado sólido suas principais aplicações, tendo os conversores multiportas, derivados do Dual Active Bridge, como as principais topologias para o gerenciamento do fluxo de potência. Quatro geometrias baseadas em núcleos magnéticos tipo pote são propostas e os resultados obtidos, por método de elementos finitos, mostram que elas apresentam vantagens em comparação às geometrias existentes (shell, core e matrix). Estas vantagens são: menor indutância de dispersão, maior fator de acoplamento, maior indutância magnetizante e menores perdas magnéticas no núcleo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Barramento magnético, conversor MAB, transformador de estado sólido, núcleos magnéticos.

### PROPOSAL OF CORE GEOMETRIES USED IN SYSTEM COUPLINGS THROUGH MAGNETIC FLUX

**ABSTRACT:** This work presents the proposal of structures to be used as magnetic bus in high frequency operation. The magnetic bus is used to couple energy systems through the magnetic flux, similar to the capacitive bus widely used in DC microgrids. In systems connected to the distribution grid, galvanic isolation is indispensable and the magnetic coupling brings in addition to this advantage the possibility of interconnecting energy sources with different voltage levels. Its applications range from microgrids to solid-state transformers, with multi-port converters, derived

from Dual Active Bridge, as the primary choices for powering systems with high-frequency magnetic coupling. Four pot-core based geometries were proposed and the results obtained by finite element method, showed that they have as advantages compared to core geometries commonly used (shell type, core type and matrix type). These advantages are a lower leakage inductance, higher coupling factor, higher magnetizing inductance and lower core losses.

**KEYWORDS:** Magnetic bus; MAB converters; solid state transformer; magnetic cores.

## 1 | INTRODUÇÃO

Por ter a capacidade de isolar eletricamente dois sistemas e elevar ou abaixar a tensão, o transformador é um elemento essencial nos sistemas de transmissão e distribuição. Com ele é possível transmitir energia por longas distâncias com perdas reduzidas e fornecê-la aos usuários em níveis seguros de tensão. Estas características foram cruciais para a “vitória” da transmissão em corrente alternada na guerra das correntes disputada por Westinghouse e Thomas Edison no final do século XIX. Ainda hoje, o transformador é um elemento indispensável nos mais diversos dispositivos eletrônicos, assim como no sistema elétrico de potência. Na geração distribuída, o ele é o elo de interconexão de fontes de energias renováveis com o sistema elétrico de potência, tanto para adequar os níveis de tensão, quanto para a segurança e proteção destes sistemas (JESZENSZKY, 1996; HURLEY; WÖLFLE, 2013).

O isolamento galvânico é indispensável na conexão de sistemas à rede de distribuição devido à segurança para os usuários e para os equipamentos conectados a ele. Nesse contexto, surge o conceito de barramento magnético, fazendo o acoplamento de sistemas elétricos que trocam energia entre si através do fluxo magnético, conforme ilustrado na Figura 1.

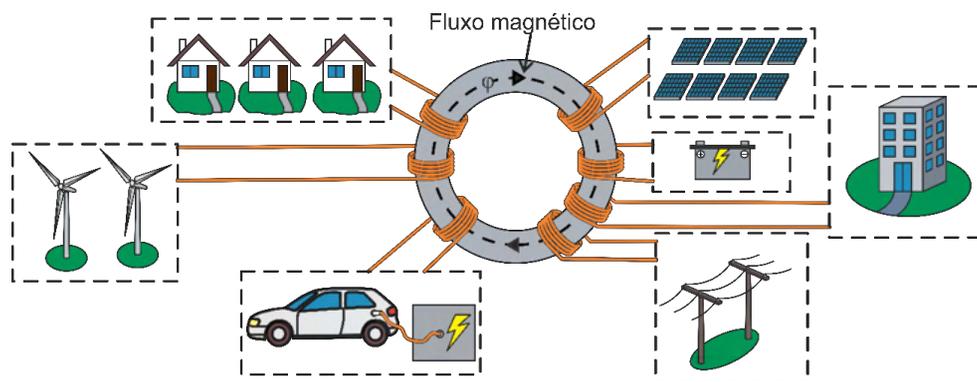


Figura 1. Conceito de um barramento magnético acoplando diferentes tipos de cargas e fontes de alimentação.

Fonte: produção do próprio autor.

As vantagens de se utilizar um acoplamento magnético em alta frequência em relação ao acoplamento capacitivo, presente nas microrredes CC, são:

- Isolação galvânica: potenciais da carga eletricamente desacoplados do barramento da rede de distribuição;
- Adequação dos níveis de tensão de diferentes sistemas;
- Possibilidade de conexões CC e CA tanto em baixa tensão como em alta tensão, dependendo dos conversores utilizados;
- Redução de estresses nos conversores.

As desvantagens do acoplamento através de um barramento magnético são:

- Número limitado de conexões: aumento da complexidade no controle do fluxo de energia com aumento de enrolamentos;
- Aumento de perdas devido ao fluxo magnetizante no núcleo e ao efeito joule nos enrolamentos.

Este artigo apresenta o estudo dos efeitos das geometrias dos núcleos usados em barramentos magnéticos de alta frequência. A geometria do núcleo afeta diretamente a distribuição das linhas de fluxo magnético dentro do volume do núcleo. Assim, será avaliado em cada geometria o fator de acoplamento, distribuição das linhas de fluxo magnético e perdas devido ao fluxo magnetizante circulando em seu interior. Além disso, são propostas quatro diferentes geometrias baseadas nos núcleos do tipo XS (Figura 2-a) e pote (Figura 2-b).

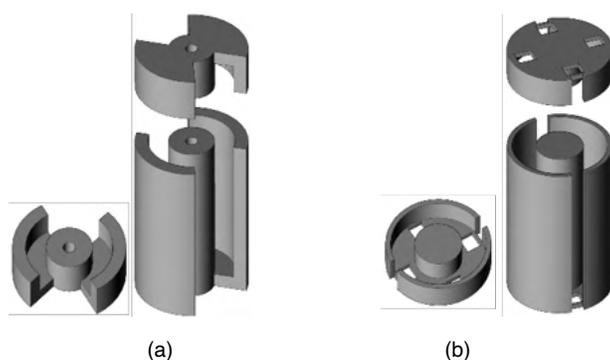


Figura 2. Geometrias de núcleos propostos para barramento magnético com múltiplas portas para acoplamento em alta frequência: (a) núcleo XS estendido, (b) núcleo pote estendido.

Fonte: produção do próprio autor.

Tais geometrias são muito utilizadas em acoplamentos de sinais, mas não são exploradas em aplicações de potência. Espera-se que esta nova topologia apresente vantagens como uma melhor distribuição de linhas de fluxo, aumentando o fator de

acoplamento e reduzindo a indutância de dispersão. Além destas vantagens, a proposta prevê uma melhor versatilidade no sentido de incluir e retirar elementos do barramento, devido a altura estendida.

O artigo está estruturado da seguinte forma: na seção 2 será apresentada uma introdução aos conversores multiportas, com ênfase ao conversor DAB (*Dual Active Bridge*), na seção 3 será feita uma revisão bibliográfica do barramento magnético com as principais geometrias encontradas na literatura, na seção 4, os resultados de simulação e na seção 5, as conclusões.

## 2 | CONVERSORES MULTIPORTAS

A generalização do conceito de conversores multiportas para acoplamento magnético de sistemas foi introduzido na literatura por (TAO et al., 2006). A possibilidade de transferir energia entre todas as portas, utilizando diversos tipos de fontes e cargas, com diferentes níveis de tensão, tornam estes conversores as principais escolhas para o processamento da energia em sistemas com acoplamento magnético (FALCONES; MAO; AYYANAR, 2010). Desta forma, um único transformador com múltiplos enrolamentos único permite a multidirecionalidade e um aumento na densidade de potência do conversor (FALCONES; AYYANAR; MAO, 2013).

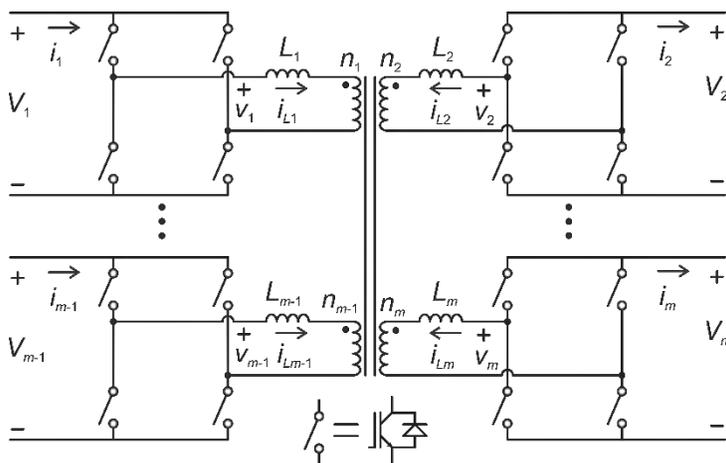


Figura 3. Generalização do conversor multiportas MAB (FALCONES; AYYANAR; MAO, 2013).

Fonte: produção do próprio autor.

O conversor MAB é tido como uma generalização do conversor DAB proposto por (DONCKER; DIVAN; KHERALUWALA, 1991). O conversor TAB (*Triple Active Bridge*), com três portas foi apresentado por (MICHON et al., 2004) para interligar células de combustível, carga e uma bateria para armazenamento de energia. Em 2006, (QIANG; WEI-

YANG; ZHEN-LIN, 2009) introduz o conversor de quatro portas (QAB) e em (FALCONES; AYYANAR; MAO, 2013) é formalizado o conceito dos conversores multiportas, lançando o conversor MAB com foco em aplicações nos transformadores de estado sólido (SSTs).

### 3 | BARRAMENTO MAGNÉTICO

Nesta seção, serão apresentadas as principais geometrias utilizadas em núcleos de barramentos magnéticos encontradas na literatura. O aproveitamento da indutância de permitida pelos conversores MAB ocasiona divergências nas linhas de pensamento para o projeto do barramento. Alguns trabalhos defendem o conceito de projetar o barramento magnético com a indutância de dispersão necessária para a transmissão de potência, dispensando a utilização de indutores extras. Por outro lado, há autores que afirmam que o barramento magnético deve ser projetado com indutância de dispersão mínima, acrescentando indutores em série quando necessário.

A principal justificativa utilizada para se projetar um barramento magnético com a indutância de dispersão necessária é o aumento da densidade de potência. Algumas técnicas utilizadas para controlar a indutância de dispersão são: deslocamento vertical dos enrolamentos concêntricos (DE LEON; PURUSHOTHAMAN; QASEER, 2014; STEIGER; MARIETHOZ, 2011), deslocamento horizontal dos enrolamentos (HERNANDEZ; DE LEON; GOMEZ, 2011; SHUAI; BIELA, 2013) e inserção de um núcleo magnético entre os enrolamentos (BAEK; BHATTACHARYA, 2011; HERNANDEZ; DE LEON; GOMEZ, 2011).

Projetar o barramento magnético com indutância de dispersão mínima apresenta melhor aceitação (RAULS; NOVOTNY; DIVAN, 1993; BOGUSLAW et al., 2006; CHEN; DIVAN, 2017). A indutância de dispersão é dependente de diversos fatores onde não há um controle preciso, sendo extremamente dependente do processo de fabricação. Elevados valores de indutância de dispersão remetem a um baixo fator de acoplamento, diminuindo a eficiência na transferência de energia, podendo não resultar em um aumento na densidade de potência. Em transformadores de alta tensão, é muito difícil manter valores baixos de indutância de dispersão e isso acaba dificultando consideravelmente o projeto e fabricação de um barramento magnético com valor de indutância desejado. Apesar dos conversores da família MAB, que necessitam de uma indutância de transmissão, serem as principais topologias usadas, há outros conversores, principalmente aplicados em SSTs, onde a indutância de dispersão é extremamente prejudicial, como o caso dos SSTs baseados em *flyback* (MANJREKAR; KIEFERNDORF; VENKATARAMANAN, 2002), conversores matriciais isolados (BASU et al., 2015) e topologia *Dyna-C* (CHEN; PRASAI; DIVAN, 2017). Aliado a estes argumentos, um barramento magnético com indutância de dispersão mínima torna-se mais atrativo e versátil para a manufatura e aplicações com variabilidade de funcionamento.

### 3.1 Geometrias de barramentos magnéticos

Existem dois tipos de estruturas do barramento magnético: solenoidais e coaxiais (SHE; HUANG; BURGOS, 2013). As estruturas solenoidais são as mais comuns entre os transformadores em geral. Nela, o campo magnético flui em paralelo ao eixo cilíndrico e a corrente circula ao redor deste eixo. As estruturas solenoidais são subdivididas em tipo *shell* (ORTIZ et al., 2013), *core* (PEREZ et al., 2002) e *matrix* (ROTHMUND et al., 2015), sendo o núcleo EE o modelo mais comum das desta categoria. A Figura 4 ilustra os diferentes tipos de estruturas solenoidais.

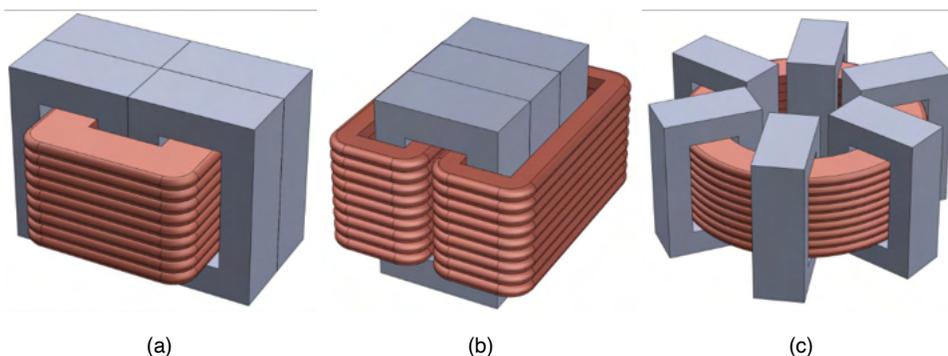


Figura 4. Estruturas solenoidais (a) shell, (b) core, (c) matrix (SHE; HUANG; BURGOS, 2013) e (d) multielementos (FILCHEV et al., 2009).

Fonte: produção do próprio autor.

As estruturas coaxiais são largamente utilizadas em telecomunicações e foram introduzidas na eletrônica de potência por (KHERALUWALA; NOVOTNY; DIVAN, 2002). Alguns trabalhos sobre transformadores coaxiais são encontrados em (BAEK; BHATTACHARYA, 2011; BOGUSLAW et al., 2006; WALTRICH; DUARTE; HENDRIX, 2010).

A principal vantagem desta estrutura é o alto fator de acoplamento e baixa indutância de dispersão, porém, esta característica é válida apenas com relação de transformação 1:1, (WALTRICH; DUARTE; HENDRIX, 2010). O transformador apresentado em (BOGUSLAW et al., 2006) apresenta relação 1:1, porém as descontinuidades nas curvas causam uma pequena degradação nestas características. Os transformadores propostos por (KHERALUWALA; NOVOTNY; DIVAN, 2002) e (KADAVELUGU et al., 2011), ilustrados na Figura 5, apresentam relações de transformação diferente de 1:1, com isso, a acomodação das múltiplas espiras nos enrolamentos faz com que estas estruturas se aproximem das solenoidais, com a desvantagem do núcleo magnético volumoso.

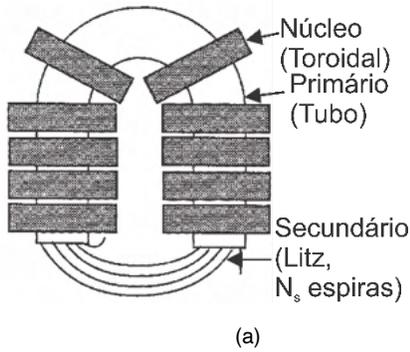


Figura 5. Transformador coaxial proposto por (a) (KHERALUWALA; NOVOTNY; DIVAN, 2002) e (b) (KADAVELUGU et al., 2011).

Fonte: (KHERALUWALA; NOVOTNY; DIVAN, 2002) e (KADAVELUGU et al., 2011).

Os transformadores coaxiais são utilizados principalmente em aplicações de frequências mais elevadas, entre 100 kHz até mega-hertz. Nestas condições, o volume do barramento magnético é reduzido, contrabalanceando a desvantagem da necessidade de um núcleo volumoso a fim de obter um valor de indutância magnetizante adequada, devido ao baixo número de espiras.

### 3.2 Projetos dos barramentos magnéticos

Com base no que foi abordado, são propostas geometrias de núcleos para barramentos magnéticos baseadas nos núcleos pote e XS. Este estudo tem como objetivo avaliar as perdas no núcleo, distribuição das linhas de fluxo, indutância magnetizante e indutância de dispersão perante variações na geometria do núcleo, sendo desconsiderados os efeitos dos enrolamentos. Uma análise com dois enrolamentos (conversor DAB) é suficiente para avaliar estes efeitos, sendo que interações entre enrolamentos afetarão de forma praticamente igual todas as geometrias.

A Figura 6 ilustra os critérios de projetos adotados para os núcleos dos barramentos magnéticos.

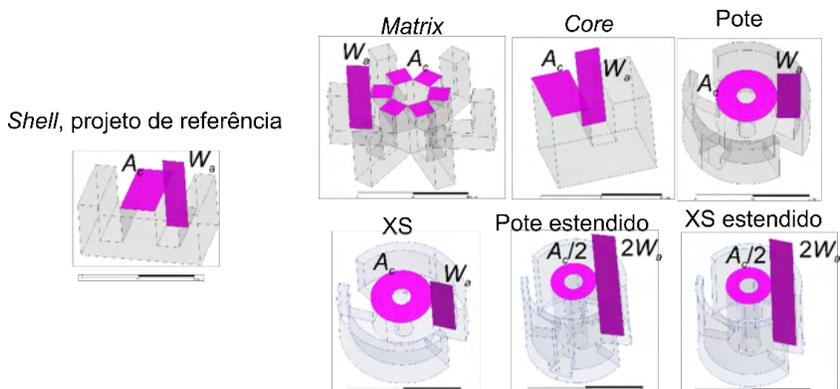


Figura 6. Critérios de projeto adotados para o dimensionamento dos núcleos.

Fonte: produção do próprio autor.

Para uma comparação justa, foi projetado um barramento magnético do tipo *shell* pelos métodos usados na literatura (KAZIMIERCZUK, 2013) e as dimensões dos demais núcleos foram obtidas de forma a manter as mesmas áreas da perna central e da janela. Para os núcleos estendidos, o critério foi usar metade da área da perna central e o dobro da área da janela do núcleo de referência, mantendo o produto das áreas e tornando os núcleos estendidos competitivos com os demais. Desta forma, a avaliam-se todas as geometrias de núcleos com o mesmo projeto.

### 3.3 Dimensionamento do núcleo tipo Shell

O dimensionamento do núcleo EE do tipo *shell* foi baseado em (KAZIMIERCZUK, 2013), pelo método do produto das áreas:

$$A_p = \sum_{x=1}^y \frac{V_x I_x}{k_f k_u J_{rms} B_m f} \quad (1)$$

Onde:

- $A_p$  produto das áreas da janela e da perna central;
- $V_x$  valor eficaz da tensão no enrolamento  $x$ ;
- $I_x$  valor eficaz da corrente no enrolamento  $x$ ;
- $y$  número total de enrolamentos;
- $k_f$  fator de forma, depende da forma de onda de tensão:  $k_f = 4,4$  para tensão senoidal e  $k_f = 4,0$  para tensão retangular;
- $J_{rms}$  densidade de corrente;
- $k_u$  fator de utilização;
- $B_m$  valor de pico da densidade de fluxo magnético;

$f$  frequência de operação.

Os valores de densidade de corrente e densidade de fluxo magnético máximo foram obtidos por meio de um processo iterativo de forma a igualar as perdas no núcleo e no cobre. Este processo consiste em calcular as perdas no núcleo e no cobre, caso sejam divergentes, aumenta-se ou reduz o valor da densidade de fluxo magnético ou da densidade de corrente até encontrar um valor ideal. O objetivo foi encontrar um valor ótimo para o tamanho do núcleo onde as perdas totais teóricas do barramento magnético fossem menores que 1%. As especificações do transformador simulado são apresentadas na Tabela 1.

Grandeza	Símbolo	Valor
Tensão no primário	$V_{priRMS}$	400 V
Tensão no secundário	$V_{secRMS}$	800 V
Corrente no primário	$I_{priRMS}$	3,04 A
Corrente no secundário	$I_{secRMS}$	1,52 A
Frequência de operação	$f$	50 kHz
Fator de utilização	$k_u$	0,7
Densidade de fluxo magnético	$B_m$	0,054 T
Fator de forma	$k_f$	4
Densidade de corrente	$J_{RMS}$	384 A/cm <sup>2</sup>
Produto das áreas	$A_p$	4,6 cm <sup>4</sup>

Tabela 1. Especificações do transformador

Fonte: produção do próprio autor.

Com base nas especificações, foi escolhido o núcleo EE do fabricante Thornton modelo NEE 63-33-26 com material IP12 (THORNTON, 2020). Os demais núcleos foram projetados de acordo com os critérios ilustrados na Figura 6 e a Tabela 2 apresenta seus principais valores dimensionais.

Geometria	$A_c$ (mm <sup>2</sup> )	$W_a$ (mm <sup>2</sup> )	$A_p$ (cm <sup>4</sup> )	$V_c$ (cm <sup>3</sup> )	$A_s$ (mm <sup>2</sup> )	MLT (mm)	MPL (mm)
EE	770,1	547,8	42,2	127,2	29,1	168,2	157,5
Core	770,1	547,8	42,2	150,9	26,0	168,2	194,6
Matrix	779,8	547,8	42,7	123,6	46,5	172,9	158,5
Pote	771,6	547,8	42,3	140,4	42,2	142,7	153,5
XS	771,6	547,8	42,3	132,4	39,64	142,7	148,8
Pote Es.	385,2	1100	42,4	101,2	47,4	115,6	227,4
XS Es.	385,2	1100	42,4	98,6	46,2	115,6	224,2

Tabela 2. Dados geométricos dos núcleos.

Onde  $V_c$  é o volume do núcleo,  $A_s$  é a área da superfície, MLT é o comprimento médio da espira e MPL é o comprimento do caminho magnético.

#### 4 | RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos por simulação utilizando o método de elementos finitos. A Tabela 3 apresenta o resumo dos resultados obtidos para a indutância magnetizante, perdas no núcleo, fator de acoplamento e indutância de dispersão.

Geometria	Indutância mag. (mH)	Perdas no núcleo (W)	Fator de acoplamento	Indutância de dispersão ( $\mu$ H)
EE	71,1	1,29	0,999528	50,69
Core	58,9	1,63	0,997203	248,23
Matrix	66,7	1,42	0,999510	49,06
Pote	75,2	1,19	0,999764	26,94
XS	77,3	1,16	0,999771	26,71
Pote Est.	97,8	0,91	0,999489	76,90
XS Est.	99,3	0,90	0,999493	77,31

Tabela 3. Resultados de simulações no modo *eddy-currents* e transiente no ansys

Fonte: produção do próprio autor.

Na Figura 7 são apresentadas as distribuições das linhas de fluxo magnético nos núcleos *shell*, *core* e *matrix* e na Figura 8 são apresentadas as mesmas distribuições para os núcleos pote, XS, pote estendido e XS estendido propostos pelos autores.

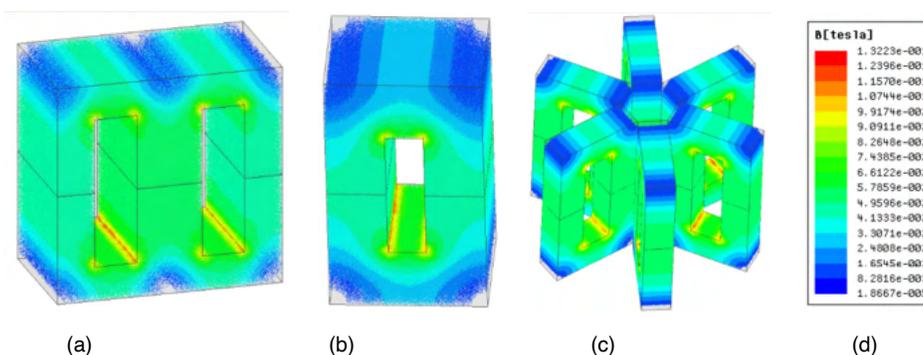


Figura 7. Densidade de fluxo magnético distribuído nos núcleos com geometrias do tipo (a) *Shell*, (b) *Core*, (c) *Matrix* e (d) escala gráfica do módulo da densidade de fluxo magnético.

Fonte: produção do próprio autor.

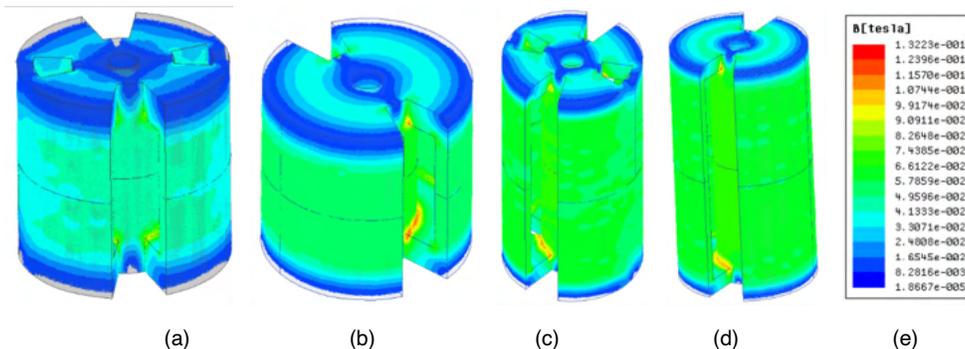


Figura 8. Densidade de fluxo magnético distribuído nos núcleos (a) pote, (b) XS, (c) pote estendido, (d) XS estendido e (e) escala gráfica do módulo da densidade de fluxo magnético.

Fonte: produção do próprio autor.

A Tabela 4 mostra os valores de perdas no núcleo, obtidos pelo modo de simulação transiente do *Ansys*, as perdas por volume de ferrite em cada núcleo, as perdas teóricas no cobre e eficiência de cada geometria. Pela Tabela 3 e Tabela 4, percebe-se que os núcleos do tipo pote e XS apresentam um melhor aproveitamento volumétrico, pois mesmo apresentando um volume levemente maior que os demais (Tabela 2), suas perdas são menores, mostrando que os resultados condizem com o esperado. Além disso, devido à melhor distribuição das linhas de fluxo magnético, seus valores de indutância de dispersão são menores que os demais, apresentando um melhor acoplamento entre os enrolamentos. A maior área superficial dos núcleos pote e XS facilitam seu arrefecimento, contabilizando como vantagens destas estruturas.

Geometria	Núcleo (W)	Por volume (kW/L)	Cobre (W)	Totais (W)	Eficiência (%)
EE	1,29	10,14	2,22	3,51	99,649
Core	1,63	10,78	2,22	3,85	99,615
Matrix	1,40	11,51	2,29	3,71	99,629
Pote	1,19	8,50	1,89	3,08	99,692
XS	1,16	8,75	1,89	3,05	99,695
Pote Est.	0,91	9,03	3,16	4,07	99,593
XS Est.	0,90	9,13	3,16	4,06	99,594

Tabela 4. Comparação das perdas totais entre as geometrias

Fonte: produção do próprio autor.

O núcleo do tipo *core* apresentou um pior desempenho entre todos os comparados. Os núcleos estendidos apresentaram um desempenho inferior aos demais, porém, seu volume de ferrite é menor. Além disso, devido à altura estendida, há vantagens quanto à versatilidade, permitindo acrescentar enrolamentos no seu interior, sendo atrativo para

múltiplos enrolamentos.

## 5 | CONCLUSÕES

O estudo mostrou que os resultados obtidos para os núcleos pote e XS são promissores, pois todas as características avaliadas: indutância de dispersão, fator de acoplamento, indutância magnetizante e perdas no núcleo são melhores que os demais. Os núcleos estendidos necessitam de melhores avaliações, porém suas características também se mostraram promissoras, pois apesar do alongamento do seu caminho magnético, suas características foram similares aos demais, apresentando potencial para aplicações com múltiplos enrolamentos em barramentos magnéticos.

## AGRADECIMENTOS

A equipe agrade a Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, o Instituto de Eletrônica de Potência, a CAPES, o CNPq e ao FINEP.

## REFERÊNCIAS

BAEK, S.; BHATTACHARYA, S. Analytical modeling of a medium-voltage and high-frequency resonant coaxial-type power transformer for a solid state transformer application. Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Anais...: 2011.Phoenix: IEEE, 2011

BASU, K. et al. A single-stage solid-state transformer for pwm ac drive with source-based commutation of leakage energy. IEEE Transactions on Power Electronics, v. 30, n. 3, p. 1734–1746, mar. 2015.

BOGUSLAW, G. et al. The experimental coaxial transformer - technology and characteristics. European Conference on Power Electronics and Applications. Anais...: 2005.Dresden: IEEE, 2006

CHEN, H.; DIVAN, D. High-frequency transformer design for the soft-switching solid state transformer (S4T). Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Anais...: 2017.Tampa: IEEE, mar. 2017

CHEN, H.; PRASAI, A.; DIVAN, D. Dyna-C: A Minimal topology for bidirectional solid-state transformers. IEEE Transactions on Power Electronics, v. 32, n. 2, p. 995–1005, fev. 2017.

DE LEON, F.; PURUSHOTHAMAN, S.; QASEER, L. Leakage inductance design of toroidal transformers by sector winding. IEEE Transactions on Power Electronics, v. 29, n. 1, p. 473–480, jan. 2014.

DONCKER, R. W. A. A. D.; DIVAN, D. M.; KHERALUWALA, M. H. A three-phase soft-switched high-power-density DC/DC converter for high-power applications. IEEE Transactions on Industry Applications, v. 27, n. 1, p. 63–73, 1991.

FALCONES, S.; AYYANAR, R.; MAO, X. A DC-DC multiport-converter-based solid-state transformer integrating distributed generation and storage. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 28, n. 5, p. 2192–2203, 2013.

FALCONES, S.; MAO, X.; AYYANAR, R. Topology comparison for Solid State Transformer implementation. *Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE. Anais...* jul. 2010

FILCHEV, T. et al. Design of high voltage high frequency transformer for pulsed power applications. *Pulsed Power Conference. Anais...*: 2009.Geneva: IET, set. 2009

HERNANDEZ, I.; DE LEON, F.; GOMEZ, P. Design formulas for the leakage inductance of toroidal distribution transformers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 26, n. 4, p. 2197–2204, out. 2011.

HURLEY, W. G.; WÖLFLE, W. H. *Transformers and inductors for power electronics*. Noida: Noida, 2013.

JESZENSZKY, S. History of transformers. *IEEE Power Engineering Review*, v. 16, n. 12, p. 9, 1996.

KADAVELUGU, A. et al. High-frequency design considerations of dual active bridge 1200 V SiC MOSFET DC-DC converter. *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Anais...*: 2011.Fort Worth: IEEE, mar. 2011

KAZIMIERCZUK, M. K. *High-frequency magnetic components*. 2. ed. Ohio: Ohio, 2013.

KHERALUWALA, M. H.; NOVOTNY, D. W.; DIVAN, D. M. Design considerations for high power high frequency transformers. *Annual IEEE Conference on Power Electronics Specialists. Anais...*: 1990.San Antonio: IEEE, 2002

MANJREKAR, M. D.; KIEFERNDORF, R.; VENKATARAMANAN, G. Power electronic transformers for utility applications. *Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy. Anais...*: 2000.Rome: IEEE, 2002

MICHON, M. et al. A three-port bi-directional converter for hybrid fuel cell systems. *Annual Power Electronics Specialists Conference. Anais...*: 2004.Aachen: IEEE, 2004

ORTIZ, G. et al. Medium frequency transformers for solid-state-transformer applications: Design and experimental verification. *International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS). Anais...*: 2013.Kitakyushu: IEEE, abr. 2013

PEREZ, M. A. et al. A new topology for high voltage, high frequency transformers. *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Anais...*: 1995.Dallas: IEEE, 2002

QIANG, M.; WEI-YANG, W.; ZHEN-LIN, X. A multi-directional power converter for a hybrid renewable energy distributed generation system with battery storage. *International Power Electronics and Motion Control Conference. Anais...*: 2006.Shangai: IEEE, 2009

RAULS, M. S.; NOVOTNY, D. W.; DIVAN, D. M. Design considerations for high-frequency coaxial winding power transformers. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 29, n. 2, p. 375–381, mar. 1993.

ROTHMUND, D. et al. 10kV SiC-based isolated DC-DC converter for medium voltage-connected solid-state transformers. Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Anais...: 2015. Charlotte: IEEE, mar. 2015

SHE, X.; HUANG, A. Q.; BURGOS, R. Review of solid-state transformer technologies and their application in power distribution systems. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, v. 1, n. 3, p. 186–198, set. 2013.

SHUAI, P.; BIELA, J. Design and optimization of medium frequency, medium voltage transformers. European Conference on Power Electronics and Applications (EPE). Anais...: 2013.Lille: IEEE, set. 2013

STEIGER, U.; MARIETHOZ, S. Method to design the leakage inductances of a multiwinding transformer for a multisource energy management system. Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). Anais...: 2010.Lille: IEEE, 2011

TAO, H. et al. Family of multiport bidirectional DC-DC converters. IEE Proceedings - Electric Power Applications, v. 153, n. 3, p. 451–458, maio 2006.

THORNTON. Materiais. Disponível em: <http://www.thornton.com.br/materiais.htm>. Acesso em: 10 out. 2017.

WALTRICH, G.; DUARTE, J. L.; HENDRIX, M. A. M. Multiport converters for fast chargers of electrical vehicles - Focus on high-frequency coaxial transformers. International Power Electronics Conference (ECCE ASIA). Anais...: 2010.Sapporo: IEEE, jun. 2010

## ÍNDICE REMISSIVO

### A

ADMI 106, 108

Alimentadores 90, 91, 92, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 104, 105

Angulação 140, 141, 142, 143, 144, 147, 150, 151

Aprendizagem baseada em projetos 115, 118

Atenuação de riscos 114, 115

### B

Balanco energético 20, 90, 91, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104

Barramento magnético 184, 185, 186, 187, 188, 189, 190, 191, 192

Bomba centrífuga 33, 35, 41, 46

Borracha sintética 199

### C

Circuitos digitais 21

Cliente 106, 108, 110, 112, 113

Controle adaptativo 50

Conversor CA/CC 153, 158

Conversor MAB 184, 187, 188

Correntes de Foucault 153, 155, 162

### D

Densidade de ligações cruzadas 198, 199, 200, 201, 202, 204, 205, 206, 209

Descargas atmosféricas 119, 127, 128, 129, 130, 133, 134, 137, 138, 139

Direcionamento 140, 141, 143, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151

### E

Economic feasibility 15

Eficiência energética 33, 35, 40, 41, 140, 151

Electronic spreadsheet 15

Energia solar 20, 113, 140, 141, 143, 145, 150, 151, 152

Engenharia elétrica 49, 61, 62, 114, 115, 138, 152, 182, 184, 210

Engine knock 1, 2, 3, 13, 14

### F

Filtros probabilísticos 61, 62, 63, 72

Flory-Rehner 199, 201, 202, 204, 205

Freio eletromagnético 153, 154, 156, 158, 159, 161, 165, 166, 181, 182

Fuzzy cognitive maps 50, 51, 58, 59, 60

## I

Inversor de frequência 33, 34, 35, 39, 40, 43

## L

Localização 61, 62, 63, 64, 68, 69, 70, 71, 72, 132, 143, 144

Logistic regression 1, 2, 3, 4, 14

## M

Machine learning 1, 4

Medição de alimentadores 90

Misturador industrial 50

Model based design 1

Mooney-Rivlin 199, 202, 204, 205, 207

## N

Núcleos magnéticos 184

## O

Operações modulares 21

Ouvidoria 106, 108, 109, 110, 111, 112, 113

## P

Perda de energia 90

Photovoltaic energy 15, 16, 20

Prazos serviços comerciais 106

Processamento digital de sinais 21

## Q

Qualidade de energia 90, 91, 92, 167

## R

Red de distribución eléctrica 74

Responsabilidade social 115, 116, 118

Robótica 61, 62, 63, 64, 67, 68, 72, 73, 162

## **S**

Satisfação 106, 108, 109, 111, 112, 113

SBR 198, 199, 200, 201, 206, 207, 208

Sistema de distribuição de água 33, 34, 35, 40, 41, 42, 43, 46

Sistemas de proteções contra descargas atmosféricas 128

Smart grid 74, 75, 86, 88

## **T**

Transformador de estado sólido 184

## **V**

Vehículo eléctrico 74, 75, 76, 77, 79, 81, 82, 83, 84, 85, 87, 88

Videoaulas 61, 62, 72

 [www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)  
 [contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)  
 @atenaeditora  
 [www.facebook.com/atenaeditora.com.br](http://www.facebook.com/atenaeditora.com.br)

*Collection:*

# APPLIED ELECTRICAL ENGINEERING

  
Ano 2022

 [www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)  
 [contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)  
 @atenaeditora  
 [www.facebook.com/atenaeditora.com.br](http://www.facebook.com/atenaeditora.com.br)

*Collection:*

# APPLIED ELECTRICAL ENGINEERING

  
Ano 2022