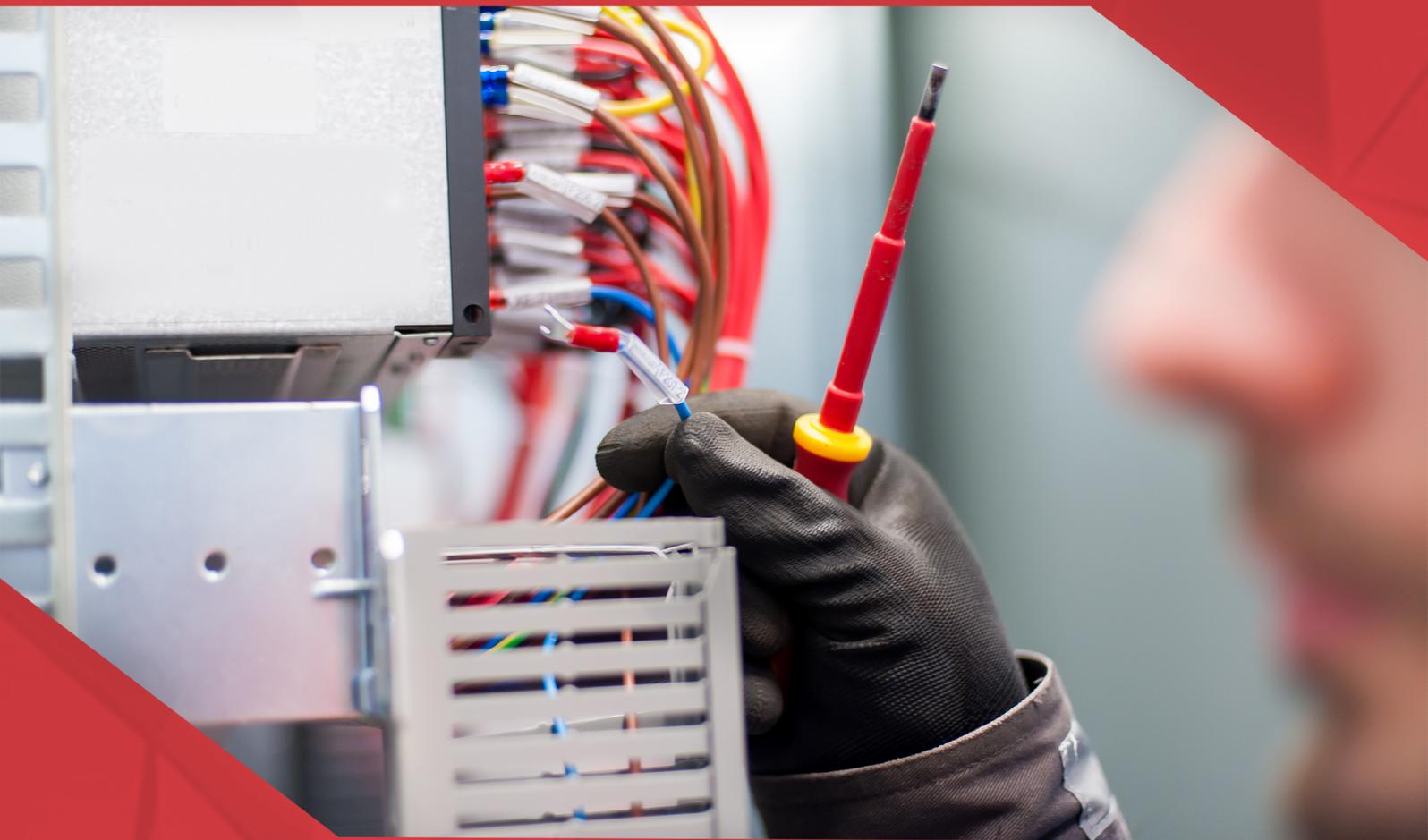


A Aplicação do Conhecimento Científico na Engenharia Elétrica

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 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 |
| 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 |

COMO SELECIONAR TRANSISTORES DE POTÊNCIA PARA APLICAÇÕES EM CONVERSORES ESTÁTICOS?

Data de submissão: 14/10/2019

Data de aceite: 03/01/2020

Edemar de Oliveira Prado

Universidade Federal de Santa Maria - UFSM

Santa Maria – RS

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

Pedro Cerutti Bolsi

Universidade Federal de Santa Maria - UFSM

Santa Maria – RS

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

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>

Hamiltom 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>

metodologia para seleção de transistores de potência para aplicações em conversores estáticos, avaliando perdas e comparando diferentes tecnologias. Esta análise baseia-se nos modelos térmicos e elétricos dos IGBTs e MOSFETs de Silício (Si), Carboneto de Silício (SiC) e Nitreto de Gálio (GaN) para determinar suas perdas, onde é avaliado o comportamento de cada tecnologia em diferentes faixas de frequência, níveis de potência e diferentes tempos de condução (duty cycles). Para isto foi desenvolvido um algoritmo capaz de calcular perdas por condução e comutação nos dispositivos, por meio de um processo de varredura de frequência, considerando diferentes níveis de potência e tempos de condução. Os resultados mostram as faixas de frequência, níveis de corrente e tempos de condução em que cada tecnologia apresentou melhor desempenho (menores perdas), indicando a tecnologia mais apropriada a ser utilizada em cada aplicação específica.

PALAVRAS-CHAVE: Conversores, frequência, perdas, Transistores de potência.

HOW TO SELECT POWER TRANSISTORS FOR STATIC CONVERTERS APPLICATIONS?

ABSTRACT: This paper presents a methodology for select power transistors for static converters applications evaluating losses behavior and

RESUMO: Este artigo apresenta uma

comparing different technologies. This analysis is based on thermal and electric models for determination of power losses in IGBTs and Silicon (Si), Silicon Carbide (SiC), CoolMOS and Gallium Nitride (GaN) MOSFETs, evaluating the behavior of each technology towards different frequency ranges, power levels, and different conduction times (duty cycle). For this, an algorithm was developed, which is able of modeling conduction losses and switching losses in the devices, through a scanning process for frequencies, considering different power levels and conduction times. Results show which frequency ranges, power levels and duty cycle where each technology presents better behavior (lower losses), indicating the most appropriate technology to be used in each specific application.

KEYWORDS: Converters, Frequency, Losses, Power transistors.

1 | INTRODUÇÃO

Nos últimos anos um assunto bastante abordado por engenheiros e projetistas é o aumento da densidade volumétrica de potência em conversores estáticos (BUSQUETS-MONGE et al., 2004) (BIELA, KOLAR e DEBOY, 2010) (SARTORI, HEY e PINHEIRO, 2009) (SARTORI, 2015). Para isto, a operação em maiores frequências pode ser uma solução no que diz respeito à redução da área dos componentes magnéticos (em muitos casos, aparecem como o maior componente do circuito), entretanto, este aumento da frequência acaba resultando em maiores perdas no transistor de potência, podendo reduzir a eficiência total do sistema (BIELA, BADSTUEBNER e KOLAR, 2009) (SARTORI, BELTRAME e PINHEIRO, 2011).

Estudos elaborados por (ERICKSON, 2007) e (WANG, 2013), mostram que desde as primeiras fontes chaveadas, diferentes tecnologias de transistores foram utilizadas como elemento de chaveamento, como é o caso do transistor bipolar de junção, tiristores, entre outros. Porém com a demanda por maiores níveis de corrente e por maiores frequências de comutação, estes dispositivos passaram a ser gradualmente substituídos por IGBTs e MOSFETs.

Embora os MOSFETs apresentassem melhor rendimento em alta frequência do que outras tecnologias de transistores, em meados da década 90 eram comumente utilizados em aplicações de menores potências e em tensões de bloqueio de até 200 V, por apresentarem comportamento resistivo do canal quando em condução e de suportarem menores tensões de bloqueio. Já os IGBTs aumentavam seu espaço no mercado da eletrônica de potência, sendo utilizados em operações de maiores potências, bem como tensões de bloqueio de até 3 kV (SHENAI, 2009) e (BALIGA, 2010).

Nesse sentido, a indústria passou a desenvolver MOSFETs com diferentes estruturas e tecnologias de semicondutores para as mais diversas aplicações e faixas de operação (SARTORI, 2013) e (RASHID, 2017). Hoje em dia, o desenvolvimento de tecnologias a base de semicondutores de *wide bandgap*, como é o caso do Carboneto

de Silício (SiC), e mais recentemente o Nitreto de Gálio (GaN), tornam possível que a operação em alta frequência, maiores potências e em maiores tensões de bloqueio ocorram de forma eficiente (WANG, 2013), (SARTORI, 2013) e (HU, 2015). Para dispositivos a base de Silício, a saída encontrada foi a modificação na estrutura do dispositivo. Criada pela fabricante Infineon®, a geração de dispositivos de superjunção CoolMOS, apresenta redução significativa na resistência de condução, tempos de comutação menores e aumento na capacidade de bloqueio de tensão (SARTORI, 2013) e (INFINEON, 2015).

A utilização da tecnologia SiC em transistores de potência, está diretamente associada a características físico-químicas do material, como a alta condutividade térmica, elevado campo elétrico de ruptura e a ampla banda proibida, o que torna sua utilização atrativa para situações onde há necessidade de operação em altas temperaturas, frequências e potências, aliados a elevadas tensões de bloqueio (RASHID, 2017) e (MILLÁN, 2013). Os semicondutores do tipo GaN possuem campo elétrico de ruptura e banda proibida similares aos dispositivos SiC, mas apresentam maior mobilidade dos portadores e menor condutividade térmica (MILLÁN, 2013). A influência dos portadores reduz os tempos de comutação e a capacitância de saída. Neste contexto, a tecnologia GaN apresenta uma certa vantagem em operações de alta frequência, já sua menor condutividade térmica traz desvantagens em situações onde há a necessidade de operação em altas potências, pois a temperatura de junção é diretamente proporcional a potência dissipada pelo dispositivo (SARTORI, 2013), (RASHID, 2017) (BALIGA, 2013) e (HUANG, 2013).

Com advento destas tecnologias de MOSFETs, a faixa de aplicações até então ocupada pelos IGBTs passa a também ser ocupada pelos transistores de efeito de campo, trazendo o desafio de definir qual tecnologia apresenta melhores resultados (menores perdas) para uma dada aplicação. Neste sentido, este artigo apresenta uma análise comparativa entre as tecnologias de transistores de potência supracitados, onde são avaliadas diferentes faixas de potência e frequências de operação.

O objetivo deste estudo é definir as faixas de frequência e níveis de potência onde cada tecnologia de transistor apresenta menores perdas em comparação direta, apontando claramente qual tecnologia apresenta melhor desempenho para uma aplicação específica. Para tanto, uma análise computacional para o estudo de caso de um conversor Boost CC-CC foi desenvolvida, onde as perdas em estado de condução e as perdas de comutação associadas a IGBTs e MOSFETs (Si, Superjunção, SiC e GaN) são avaliadas para potências de 500 W, 1500 W e 4500 W (diferentes níveis de corrente) e frequências de até 500 kHz para diferentes ganhos (afetam diretamente nas perdas por condução do dispositivo).

Para a análise comparativa, o conversor foi considerado operando em modo de condução contínua (MCC), com *ripple* de corrente de 20% (pico a pico). Maiores *ripples* de corrente resultam em maiores correntes RMS, podendo resultar em maiores perdas em condução no transistor, deste modo, as condições de simulação também

foram avaliadas para um *ripple* de 40 % (pico a pico). Considerando que a potência e os tempos de condução são fixos em cada simulação, a indutância varia de acordo com a frequência de chaveamento, de modo a manter o *ripple* de corrente constante (SARTORI, BELTRAME, e PINHEIRO, 2011). Nesta análise o dissipador de calor foi projetado para manter a temperatura de junção em 100°C (outros valores podem ser utilizados).

Este artigo é organizado da seguinte forma: A Seção II descreve a metodologia de cálculo de perdas em MOSFETs e IGBTs. A Seção III mostra os critérios de seleção utilizados para elaborar o banco de dados. Seção IV apresenta a metodologia proposta para seleção e a Seção V mostra os resultados e as faixas de operação em que cada tecnologia apresentou melhor desempenho.

2 | CÁLCULO DE PERDAS

Transistores de efeito de campo e de porta isolada tem o contato de gate isolado do material semiconductor por meio de uma interface de dióxido de silício (SiO₂), fazendo com que estes dispositivos apresentem alta impedância de entrada. Como este contato é isolado do restante do dispositivo, não há fluxo de corrente no *gate*, sendo assim, as perdas são dadas particularmente por condução e comutação. Estas perdas podem ser definidas com base em informações retiradas das folhas de dados do dispositivo (*datasheet*) (ERICKSON, 2007) e (SARTORI, 2013).

A. Perdas por condução

Os MOSFETs têm comportamento resistivo quando em condução, assim, a potência dissipada no dispositivo pode atingir níveis elevados, resultando em perdas significativas quando em condução (SARTORI, 2013). Estas perdas podem ser obtidas por meio de

$$P_{COND_MOS} = R_{DS} I_{RMS}^2, \quad (1)$$

onde RDS é a resistência *drain-to-source* em estado ligado e IRMS é a corrente RMS no MOSFET. O comportamento da resistência em função da temperatura de junção é definido através da regressão da curva *drain-to-source* (a curva RDS é disponibilizada pelo fabricante na folha de dados do dispositivo) (ERICKSON, 2007) e (RASHID, 2017).

Como os BJTs e os IGBTs apresentam comportamento similar ao do diodo, as perdas por condução nestes dispositivos são calculadas pela queda de tensão em função da corrente, obtidos nas das curvas VCE x ICE presentes na folha de dados do dispositivo (BUSQUETS-MONGE et al., 2004), (BALIGA, 2010) e (RASHID, 2017), assim

$$P_{COND_IGBT} = V_{CE} I_{MED} \quad (2)$$

onde VCE é a queda de tensão em função da corrente e da temperatura de junção no transistor.

A razão cíclica corresponde ao tempo de condução do transistor e pode ser obtido por

$$D = 1 - \frac{V_I}{V_O} \quad (3)$$

onde VI e VO são as tensões de entrada e saída do conversor respectivamente. A corrente RMS no conversor Boost é obtida pela seguinte relação

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_{SW}(t)^2 dt} \quad (4)$$

B. Perdas por comutação

As perdas na entrada em condução (*turn-on*) são compostas pela sobreposição de tensão e corrente (*overlap*) somadas as perdas capacitivas. Por outro lado, as perdas na saída de condução (*turn-off*) são compostas somente pela sobreposição de tensão e corrente. Os tempos em que ocorrem estas sobreposições são proporcionais a cargas e descargas de capacitâncias parasitas no transistor, e são determinantes para o cálculo das perdas.

Sendo assim, por meio dos tempos de subida (*tr*) e de queda (*tf*) fornecidos pelo fabricante, que são os tempos em que ocorrem as sobreposições de tensão e corrente no dispositivo, as perdas podem ser calculadas de forma simplificada em cada transição. Para a entrada em condução as perdas são obtidas de acordo com (5), e na saída por meio de (6) (BELTRAME, 2013):

$$P_{ON} = \frac{1}{2} I_{DEV} V_O t_{Rf} f_s + \frac{1}{2} C_{OSS} V_O^2 f_s \quad (5)$$

$$P_{OFF} = \frac{1}{2} I_{DEV} V_O t_{ff} f_s \quad (6)$$

onde IDEV é a corrente de comutação instantânea no transistor e COSS é a capacitância de saída do transistor (COES para os IGBTs), estes dados são disponibilizados na folha de dados do dispositivo. A principal diferença na determinação das perdas por comutação entre MOSFETs e IGBTs está na saída de condução do IGBT, que apresenta uma corrente de cauda devido à recombinação dos portadores minoritários na junção PN (similar ao diodo), esta corrente de cauda implica no aumento

do *fall time* da corrente (SHENAI, 1989) (BALIGA, 2010) e (SARTORI, 2013).

C. Perdas totais

Para determinar as perdas totais em cada transistor, é necessário estimar a parcela de perdas por condução e por comutação, assim, a potência total dissipada é representada por (7). As perdas por recuperação reversa no diodo podem influenciar nas perdas totais no transistor. Como esta análise pode ser aplicada em diferentes situações (diferentes topologias) as perdas por recuperação reversa não são avaliadas

$$P_{TOTAIS} = P_{COND} + P_{ON} + P_{OFF} \quad (7)$$

3 | SELEÇÃO DOS TRANSISTORES

A seleção dos transistores inclui as tecnologias até então apresentadas: IGBTs, e MOSFETs (Si, SiC, Superjunção e GaN), considerando os mesmos valores de potência, tensão de bloqueio e corrente no transistor para a temperatura de junção de 100°C. Devido à grande variedade de dispositivos presentes no mercado, a resistência *drain-to-source* (para os MOSFETs), as curvas ID X VCE (para os IGBTs), capacitância de saída e tempos de overlap foram utilizados como critério de seleção, por influenciarem diretamente nas perdas por condução e comutação respectivamente.

Obedecendo estes critérios um vasto banco de dados foi elaborado para correntes de até 60 A com temperatura de junção de 100°C e tensões de bloqueio na faixa de 200 V a 1200 V. Vale ressaltar, que o algoritmo proposto pode realizar a varredura de perdas para diferentes temperaturas de junção, desde que não exceda os limites estabelecidos na folha de dados.

A fim de exemplificar, a Tabela I mostra algumas características importantes de cada tecnologia (estes dispositivos são alguns dos que compõem o banco de dados). A resistência em estado de condução e a capacidade de corrente para a temperatura de junção especificada foram obtidas por meio da regressão das curvas disponibilizadas pelo fabricante, e para o caso dos IGBTs, a queda de tensão no canal foi obtida através da interpolação das curvas de 25°C e 175°C. Este procedimento foi adotado para todos os dispositivos que compõem o banco de dados, servindo como ponto de partida para realizar a análise comparativa entre os transistores.

| <i>Part Number</i> | IXFR 36N60P | IPZ65 R095C7 | SCT 3120AL | NTP8G 206N | IKP08N65F 5 |
|--|------------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|
| Tecnologia | Si | CoolMOS | SiC | GaN | IGBT |
| Fabricante | IXYS® | Infineon® | ROHM® | ONsemi® | Infineon® |
| Tensão de bloqueio [V] | 600 | 700 | 650 | 600 | 650 |
| Capacidade de condução a 100 °C [A] | 13 | 15 | 15 | 12 | 11 |
| R_{DS} a 100 °C [Ω] | 0.42 | 0.18 | 0.14 | 0.24 | - |
| V_{CE} [V] | - | - | - | - | 1.7 |
| C_{OSS} p[F] | 570 | 33 | 35 | 44 | 16 |
| T_R n[s] | 25 | 8 | 21 | 4.5 | 3 |

Tabela I. Características de cada tecnologia.

4 | ANÁLISE COMPUTACIONAL

Para a análise computacional, foi desenvolvido um algoritmo capaz de realizar uma varredura de perdas nos transistores que compõem o banco de dados em diferentes pontos de operação, com base nos procedimentos de cálculo de perdas apresentados até o momento e as características dos dispositivos selecionados, bem como diferentes tempos de condução.

O tempo de condução (3) no conversor Boost, está relacionado aos níveis de tensão de entrada e saída do sistema e influencia diretamente nas perdas por condução, como mostrado em (1) e (2). A fim de simplificar a análise de perdas, o algoritmo pode ser dividido em duas etapas principais: Na primeira etapa as simulações são realizadas para potências de 500 W, 1500 W e 4500 W (diferentes níveis de corrente), onde as perdas são calculadas de acordo com (1), (2), (5) e (6) por meio de uma varredura de perdas para frequências de até 500 kHz e tensões de entrada e saída na ordem de 200 VCC e 400 VCC respectivamente. Na segunda etapa a tensão de entrada é 100 VCC, em vista de analisar o comportamento de cada tecnologia em diferentes tempos de condução e níveis de corrente, seguindo o mesmo procedimento listado acima.

A análise computacional pode ser descrita de acordo com o fluxograma apresentado na Figura 1: Inicialmente as variáveis de entrada são definidas pelo projetista (tensão de entrada e saída, potência e ripple de corrente no indutor, de acordo com a aplicação desejada), em seguida o algoritmo calcula a corrente no transistor e faz uma busca pelo banco de dados, selecionando os transistores que atendem as condições especificadas (tensão de bloqueio e nível de corrente), calculando as perdas individuais em cada dispositivo selecionado. Como o banco de dados é composto por uma grande quantidade de dispositivos de cada tecnologia, uma nova varredura é realizada, onde os dispositivos que apresentam menores perdas em cada faixa de frequência de cada tecnologia, são selecionados (a verificação é feita em *steps* de 1

kHz).

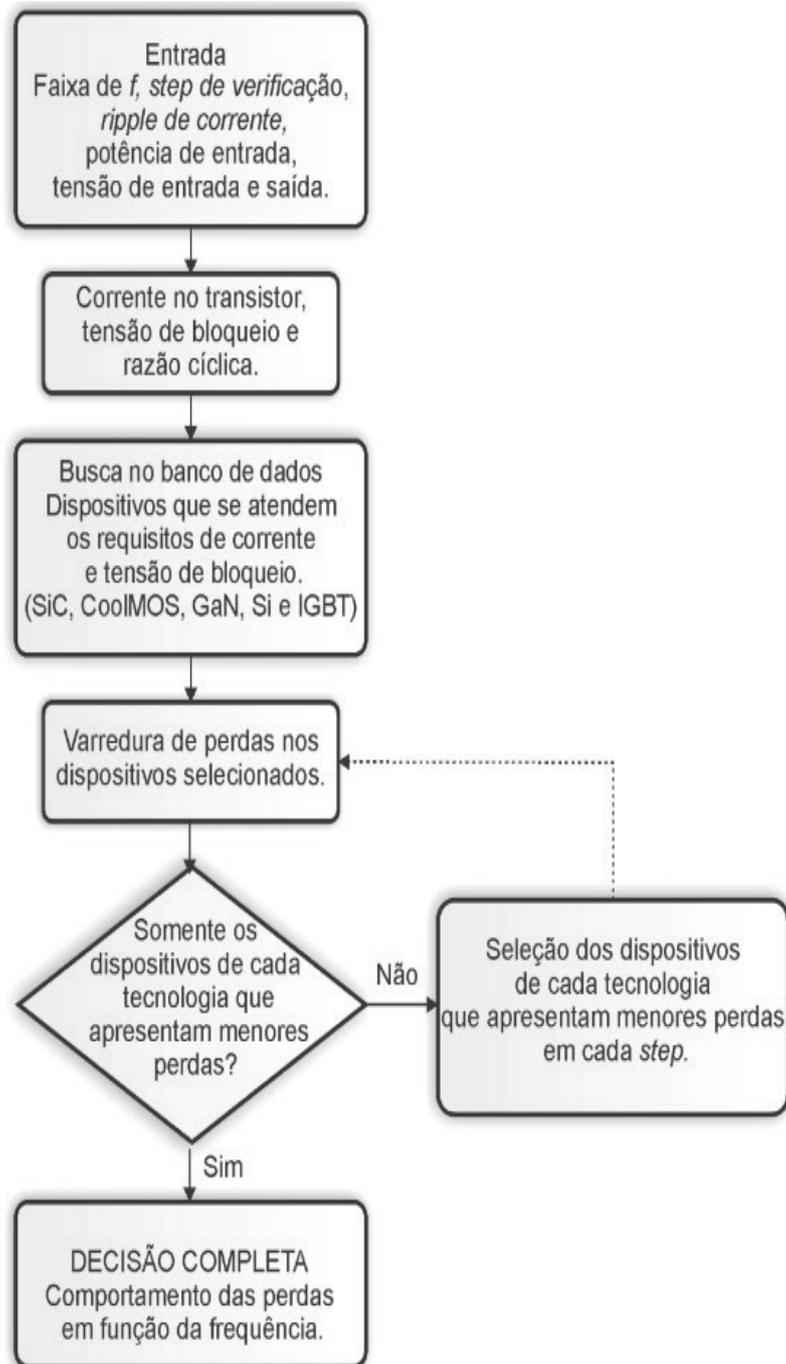


Figura 1: Fluxograma da simulação.

5 | RESULTADOS

Primeira etapa: O comparativo entre diferentes tecnologias de MOSFETs e IGBTs em cada ponto de operação para uma entrada de 200 Vcc (razão cíclica de 50%) e potências de 500 W, 1500 W e 4500 W são mostrados na Figura 2. (a), (b) e (c), respectivamente.

Para as condições utilizadas na Figura 2 (a) com 500 W, a tecnologia de MOSFETs Si apresenta maiores perdas em frequências de até 300 kHz. Acima de 300 kHz, o IGBT é quem apresenta maiores perdas. Como pode ser visto, a tecnologia de MOSFETs GaN (NTP8G206N) mostra desempenho superior entre

0 e 500 kHz, neste caso a corrente média na entrada é de 2,5 A.

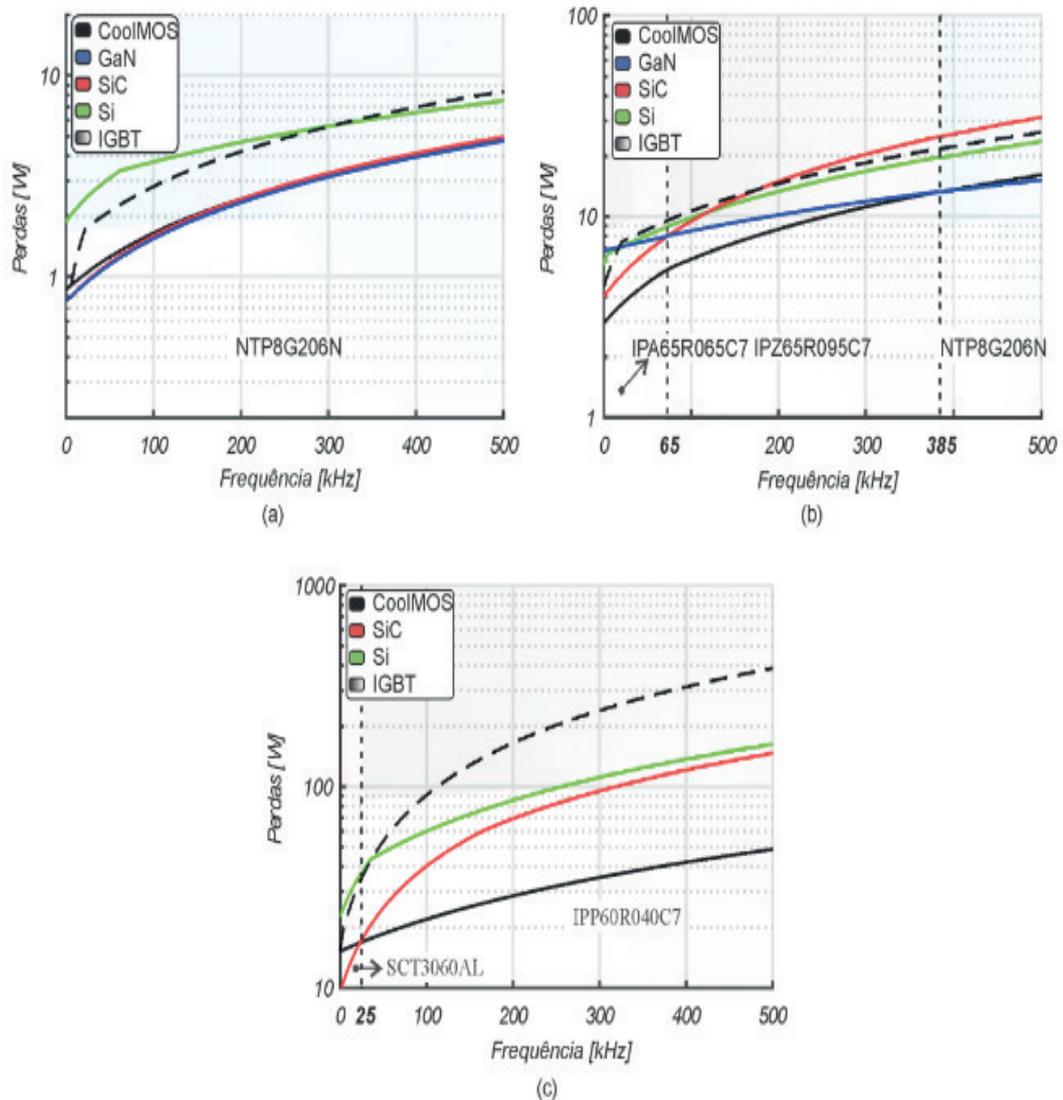


Figura 2: Perdas para 200 VCC: (a) 500 W, (b) 1500 W e (c) 4500 W.

Na Fig. 2. (b) as tecnologias com maior desempenho são CoolMOS (IPA65R065C7) até 65 kHz, CoolMOS (IPZ65R095C7) até 385 kHz e GaN (NTP8G206N) acima de 385 kHz. Neste caso, a razão cíclica é a mesma do caso anterior, porém com corrente de 7,5 A. Com o aumento da corrente, a tecnologia de transistores GaN mostra uma queda na eficiência, devido a maior resistência no canal (Tabela I), porém em maiores frequências, tem desempenho superior se comparado com as demais tecnologias, devido aos menores tempos de *overlap* no dispositivo.

Na Fig. 2 (c), o sistema é simulado com potência de 4500 W, correspondendo a uma corrente de 22,5 A. Como o GaN é a tecnologia mais recente entre as demais tecnologias, além de ser uma tecnologia ainda em desenvolvimento, a alta resistência no canal e consequentemente as maiores perdas em condução impõe limitações de corrente do transistor, portanto, não há transistores com esta capacidade de condução de corrente no banco de dados para esta tecnologia.

Por outro lado, características intrínsecas da tecnologia SiC proporcionam

melhor desempenho em maiores níveis de corrente por apresentarem menores perdas por condução. Estas características podem ser observadas na Fig. 2 (c), onde a tecnologia SiC (SCT3060AL) apresenta melhor desempenho até 25 kHz e o CoolMOS (IPP60R040C7) acima de 25 kHz.

Segunda etapa: Nos resultados apresentados até o momento, cada tecnologia apresentou níveis de potência e faixas de frequência onde apresentam menores perdas. Como mostrado em (7), estas perdas são obtidas por meio da soma das parcelas de perdas por condução e comutação em cada transistor, sendo que a razão cíclica influencia diretamente nas perdas por condução. Esta etapa consiste em avaliar a faixas de melhor rendimento em cada tecnologia, com tensão de entrada de 100 VCC e mesma tensão de saída do caso anterior (400 VCC), com isso, o tempo de condução e os níveis de corrente no transistor são afetados, neste caso a razão cíclica é de 75% e as correntes de entrada são de 5 A, 15 A e 45 A, respectivamente.

Na Fig. 3 (a) para 5 A, o melhor desempenho é da tecnologia CoolMOS (IPA65R095C7) até 215 kHz e da tecnologia GaN (NTP8G206N) acima de 215 kHz.

Na Fig. 3 (b) com 15 A, o melhor desempenho é da tecnologia SiC (SCT3060AL) até 30 kHz e CoolMOS (IPW65R080CFD) acima de 30 kHz. Na Fig. 2 (c) a corrente no transistor é de 22,5 A, enquanto que na Fig. 3 (b) é de 15 A, fato que evidencia a influência da razão cíclica nas perdas dos dispositivos, já que, mesmo com menores níveis de corrente, com o aumento da razão cíclica de 50% para 75%, a tecnologia SiC tem a faixa onde apresenta melhor rendimento aumentada de 25 kHz para 30 kHz. Na Fig. 3 (c) com 45 A, a tecnologia SiC (SCT3022AL) apresenta melhor desempenho até 130 kHz. Para maiores frequências, o transistor CoolMOS (IPW65R037C6) apresenta menores perdas.

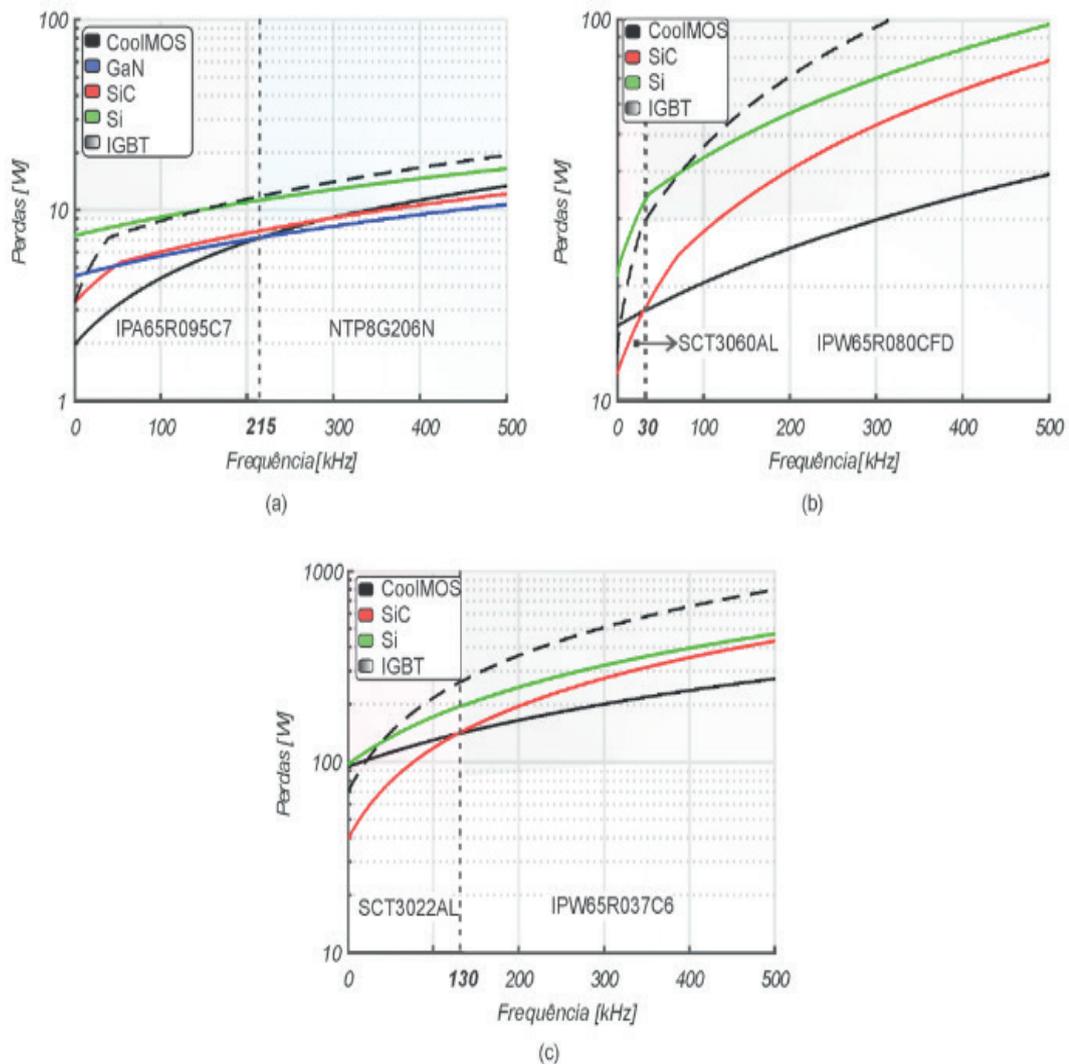


Figura 3: Perdas para 100 VCC: (a) 500 W, (b) 1500 W e (c) 4500 W.

6 | DISCUSSÕES

Como mostrado anteriormente, os IGBTs e os MOSFETs de Si, SiC, CoolMOS e GaN apresentam diferentes comportamentos de acordo com o nível de corrente e a faixa de frequência a que são submetidos. Os resultados da comparação apresentada na Seção V são mostrados na Tabela II.

Com o aumento da potência e do tempo de condução, a faixa em que os transistores CoolMOS e SiC apresentam melhor desempenho são expandidas, enquanto a tecnologia GaN tem sua faixa de melhor desempenho reduzida (Figura 2). Analisando a Tabela I pode-se observar que a tecnologia GaN apresenta maior resistência *drain-to-source* quando em condução, se comparado com as tecnologias SiC e CoolMOS. Entretanto, os tempos de overlap no dispositivo são relativamente menores, o que caracteriza um melhor desempenho em maiores frequências. Assim, com o aumento da frequência, o desempenho do MOSFET GaN tende a melhorar, devido as menores perdas por comutação (Tabela II).

| | SiC | CoolMOS | GaN | Si | IGBT |
|--------------------|-------------|------------------|------------------|----|------|
| 2,5 [A], D = 50 % | - | - | Até 500 kHz | - | - |
| 5 [A], D = 75 % | - | Até 215 kHz | Acima de 215 kHz | - | - |
| 7,5 [A], D = 50 % | - | Até 385 kHz | Acima de 385 kHz | - | - |
| 15 [A], D = 75 % | Até 30 kHz | Acima de 30 kHz | - | - | - |
| 22,5 [A], D = 50 % | Até 25 kHz | Acima de 25 kHz | - | - | - |
| 45 [A], D = 75 % | Até 130 kHz | Acima de 130 kHz | - | - | - |

Tabela II. Faixas de operação ($\Delta I = 20\%$).

Por outro lado, a tecnologia SiC tem maiores tempos de overlap e menor resistência *drain-to-source* em estado ligado (Tabela I). Estes fatores fazem com que esta tecnologia tenha desempenho superior em maiores níveis de corrente e maiores tempos de condução (Tabela II), porém maiores frequências de chaveamento resultam em perdas significativas nos dispositivos.

A tecnologia CoolMOS apresenta valores intermediários, entre a tecnologia SiC e GaN, tanto na resistência de condução como nos tempos de *overlap* (Tabela I). Este comportamento pode ser observado na Tabela II, por meio da análise das faixas onde esta tecnologia apresenta melhor desempenho.

As tecnologias convencionais de Si e o IGBT apresentam rendimento inferior em todos casos simulados, porém se um comparativo entre eles for feito, pode-se perceber que os IGBTs apresentam rendimento superior em frequências de até 30 kHz em menores níveis de corrente, e de pelo menos 50 kHz para maiores níveis de corrente, o que evidencia o crescimento e a superioridade destas novas tecnologias de transistores MOSFET neste campo de aplicações, onde há demanda por maiores capacidades de tensão de bloqueio, bem como maiores níveis de corrente no transistor.

Afim de analisar o impacto de diferentes *ripples* de correntes nas perdas dos transistores, a Tabela III traz um esboço das faixas de operação de cada tecnologia.

A análise feita para determinar estas faixas é a mesma que utilizada no caso anterior, porém com Δi de 40%. Maiores *ripples* de corrente acarretam em maiores perdas no transistor, isto fica evidente quando é feita a comparação entre a Tabela II (20% de *ripple*) com a Tabela III (40% de *ripple*). Em virtude de maiores correntes RMS, pode-se observar que a faixa dos dispositivos que apresentavam melhor desempenho em maiores níveis de corrente é expandida em todos os casos, devido a influência da corrente RMS nas perdas por condução.

| | SiC | CoolMOS | GaN | Si | IGBT |
|--------------------|-------------|------------------|------------------|----|------|
| 2,5 [A], D = 50 % | - | - | Até 500 kHz | - | - |
| 5 [A], D = 75% | - | Até 240 kHz | Acima de 240 kHz | - | - |
| 7,5 [A], D = 50 % | - | Até 400 kHz | Acima de 400 kHz | - | - |
| 15 [A], D = 75 % | Até 35 kHz | Acima de 35 kHz | - | - | - |
| 22,5 [A], D = 50 % | Até 30 kHz | Acima de 30 kHz | - | - | - |
| 45 [A], D = 75 % | Até 145 kHz | Acima de 145 kHz | - | - | - |

Tabela III. Faixas de operação ($\Delta I = 40\%$).

7 | CONCLUSÃO

A escolha da ideal tecnologia de transistor a ser utilizada em uma determinada aplicação não é tarefa simples. Parâmetros como frequência de operação, níveis de tensão, corrente, potência, razão cíclica, ondulação de corrente e temperatura de junção devem ser avaliadas. Os resultados obtidos neste artigo apontam a tecnologia de transistor SiC como a de menores perdas em situações onde há a necessidade de maior processamento de energia, menores frequências e maiores tempos de condução (ganhos). Já dispositivos CoolMOS apresentaram desempenho superior em situações onde há a demanda por maiores correntes e frequências. Dispositivos GaN demonstraram superioridade em menores potências e menores tempos de condução, apresentando melhores resultados em uma vasta faixa de frequências (Fig. 2).

Já os IGBTs apresentam melhor rendimento que o MOSFET tradicional (Si) para frequências de até 30 kHz em menores níveis de corrente e de até 50 kHz em maiores níveis de corrente, porém inferior ao rendimento das demais tecnologias avaliadas, fator que evidencia o crescimento e a superioridade destas novas tecnologias de transistores MOSFET onde há a demanda por maiores capacidades de tensão de bloqueio, bem como maiores níveis de corrente no transistor.

8 | AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao PPGEE PROEX/CAPES e ao projeto INCT-GD e aos órgãos financiadores (CNPq processo 465640/2014-1, CAPES processo no. 23038.000776/2017-54 - Código de Financiamento 001 e FAPERGS 17/2551-0000517-1).

REFERÊNCIAS

- BUSQUETS-MONGE, Sergio et al. Design of a boost power factor correction converter using optimization techniques. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 19, n. 6, p. 1388-1396, 2004.
- BIELA, J.; KOLAR, Johann W.; DEBOY, G. Optimal design of a compact 99.3% efficient single-phase PFC rectifier. In: **2010 Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)**. IEEE, 2010. p. 1397-1404.
- 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.
- BIELA, Juergen; BADSTUEBNER, Uwe; KOLAR, Johann W. Impact of power density maximization on efficiency of DC-DC converter systems. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 24, n. 1, p. 288-300, 2009.
- SARTORI, H. C.; BELTRAME, F.; PINHEIRO, J. R. A static converter comparative study taking into account semiconductor technologies and swith auxiliary circuits: Optimized design. In: **XI Brazilian Power Electronics Conference**. IEEE, 2011. p. 280-285.
- ERICKSON, Robert W.; MAKSIMOVIC, Dragan. **Fundamentals of power electronics**. Springer Science & Business Media, 2007.
- 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.
- SHENAI, Krishna; SCOTT, Robert S.; BALIGA, B. Jayant. Optimum semiconductors for high-power electronics. **IEEE transactions on Electron Devices**, v. 36, n. 9, p. 1811-1823, 1989.
- BALIGA, B. Jayant. **Fundamentals of power semiconductor devices**. Springer Science & Business Media, 2010.
- SARTORI, Hamiltom Confortin et al. Evaluation of an optimal design for a single-phase boost PFC converter (CCM) considering different magnetic materials core. In: **2013 Brazilian Power Electronics Conference**. IEEE, 2013. p. 1304-1310.
- RASHID, Muhammad H. (Ed.). **Power electronics handbook**. Butterworth-Heinemann, 2017.
- HU, Ji et al. Robustness and balancing of parallel-connected power devices: SiC versus CoolMOS. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 63, n. 4, p. 2092-2102, 2015.
- INFINEON. “**600 V CoolMOS™ C 7 Design Guide**”. [S.l.], p. 28. 2015.
- MILLÁN, José et al. A survey of wide bandgap power semiconductor devices. **IEEE transactions on Power Electronics**, v. 29, n. 5, p. 2155-2163, 2013.
- BALIGA, B. Jayant. Gallium nitride devices for power electronic applications. **Semiconductor Science and Technology**, v. 28, n. 7, p. 074011, 2013.
- HUANG, Xiucheng et al. Evaluation and application of 600 V GaN HEMT in cascode structure. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 29, n. 5, p. 2453-2461, 2013.

BELTRAME, Fernando et al. Efficiency optimization of DC/DC boost converter applied to the photovoltaic system. In: **IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society**. IEEE, 2013. p. 706-711.

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

