

NEUTRO À TERRA

Revista Técnico-Científica

<http://www.neutroaterra.blogspot.com>

Voltamos à vossa presença com a publicação da 24ª Edição da nossa revista “Neutro à Terra”. Como tem sido habitual em todas as publicações da nossa revista, esperamos que a qualidade dos artigos publicados nesta edição vá ao encontro das expectativas e do interesse dos nossos leitores, que nos privilegiam com o seu interesse desde o início das nossas publicações. Esta é a 24ª publicação em doze anos de existência, em que sem interrupções temos honrado o compromisso que temos com todos os nossos leitores. É com grande satisfação que temos verificado que a nossa revista é atualmente um documento indispensável para alunos de vários cursos de Engenharia Eletrotécnica, mas também para muitos profissionais desta área da engenharia e para muitas empresas do setor eletrotécnico, que sempre manifestaram elevado interesse pelas nossas publicações.

José Beleza Carvalho, Professor Doutor



Máquinas e Veículos Elétricos



Produção, Transporte e Distribuição Energia



Instalações Elétricas



Telecomunicações



Segurança



Gestão de Energia e Eficiência Energética



Automação, Gestão Técnica e Domótica

- Editorial	3
- Controlo dos Sistemas Eléctricos de Energia José António Belezinha Carvalho	5
- Motores de propulsão em veículos eléctricos: tipos, características e perspectivas de evolução Pedro Miguel Azevedo de Sousa Melo	19
- Estratégia de Flexibilidade de Veículos Eléctricos para Alívio de Congestionamento em Redes de Distribuição Lucas B. G. Gomes, João Soares, Bruno Canizes, Edison A. C. Aranha Neto	29
- Motor de Tração para Formula Student: A Melhor Opção João Rigor, Teresa Nogueira	35
- Baterias de Iões de Lítio, a chave da Eletrificação Automóvel Henrique Fragoso, Teresa Nogueira	39
- Lighting Consumption Optimization in a Residential House Based on Electricity Price Mahsa Khorram, Teresa Nogueira	45
- Impacto da Iluminação Pública na Natureza André Sousa, Teresa Nogueira	51
- Autores	57

FICHA TÉCNICA

DIRETOR:	José António Belezinha Carvalho, Doutor
SUBDIRETORES:	António Augusto Araújo Gomes, Eng. Roque Filipe Mesquita Brandão, Doutor Sérgio Filipe Carvalho Ramos, Doutor
PROPRIEDADE:	Área de Máquinas e Instalações Eléctricas Departamento de Engenharia Electrotécnica Instituto Superior de Engenharia do Porto
CONTATOS:	jbc@isep.ipp.pt ; aag@isep.ipp.pt

Estimados leitores

Voltamos à vossa presença com a publicação da 24ª Edição da nossa revista “Neutro à Terra”. Como tem sido habitual em todas as publicações da nossa revista, esperamos que a qualidade dos artigos publicados nesta edição vá ao encontro das expectativas e do interesse dos nossos leitores, que nos privilegiam com o seu interesse desde o início das nossas publicações. Esta é a 24ª publicação em doze anos de existência, em que sem interrupções temos honrado o compromisso que temos com todos os nossos leitores. É com grande satisfação que temos verificado que a nossa revista é atualmente um documento indispensável para alunos de vários cursos de Engenharia Eletrotécnica, mas também para muitos profissionais desta área da engenharia e para muitas empresas do setor eletrotécnico, que sempre manifestaram elevado interesse pelas nossas publicações.

Na última edição publicou-se um interessante artigo sobre o funcionamento dos Sistemas Elétricos de Energia e a Rede Nacional de Transporte. Dando seguimento a este assunto, nesta edição publica-se um artigo de natureza mais científica sobre o Controlo dos Sistemas Elétricos de Energia. Neste artigo, apresenta-se os conceitos fundamentais associados às ações de controlo dos sistemas elétricos de energia interligados. Baseia-se na modelização de todos os equipamentos constituintes aos quais se aplicam ações de controlo, com vista a garantir o equilíbrio entre a produção de energia e o consumo, as perdas nas redes de transmissão e a potência especificada para as linhas de interligação, garantindo a estabilidade da frequência e a exploração dos sistemas elétricos de uma forma segura.

Um assunto muito importante e atual, tem a ver com a mobilidade elétrica e, particularmente, com os veículos elétricos. Nesta edição da nossa revista, publica-se um interessante artigo que analisa e compara os sistemas de propulsão baseados em motores síncronos de ímanes permanentes e motores de indução, que têm sido as principais opções dos fabricantes para veículos híbridos e veículos elétricos. De modo não exaustivo, o autor analisa o desempenho destes motores e compara com os tradicionais motores de combustão interna. O artigo faz ainda referência às principais tecnologias emergentes, como os motores com polos salientes no estator e no rotor, os motores sem ímanes permanentes e os motores *Vernier*.

Nesta edição da revista, também no âmbito das máquinas elétricas e dos veículos elétricos, apresenta-se um interessante artigo sobre o dimensionamento de um veículo elétrico para competição, o *Formula Student*. Este veículo enquadra-se num projeto que é gerido e realizado integralmente por alunos de engenharia com o propósito de complementar a formação académica, permitindo assim profissionais bem preparados para o ramo da indústria automóvel. Ainda neste âmbito, publica-se também nesta edição um artigo sobre as baterias de íões Lítio. Estas baterias são um dos sistemas de armazenamento químico de energia elétrica mais relevantes da atualidade, com aplicação nos mais diversos dispositivos elétricos e eletrónicos e também nos veículos elétricos e híbridos. Neste artigo são apresentadas e comparadas 3 tecnologias de baterias de íões de lítio utilizadas na indústria automóvel.

O crescente interesse pela nossa revista por parte de leitores de países estrangeiros leva-nos a publicar com alguma regularidade artigos em língua inglesa. Nesta edição publica-se um artigo intitulado “*Lighting Consumption Optimization in a Residential House Based on Electricity Price*”. Neste artigo, apresenta-se uma metodologia que, através da formulação de um problema de otimização linear, permite minimizar o consumo de energia elétrica em iluminação em habitações residenciais, baseando-se nos preços da energia elétrica e tirando vantagens da produção fotovoltaica.

Nesta edição da nossa revista merecem ainda destaque alguns artigos de elevado valor técnico e científico, como “O Impacto da Iluminação Pública na Natureza”, onde é analisado o impacto da iluminação pública na saúde humana e em alguns animais, devido a distúrbios no respetivo ciclo biológico destes seres vivos. Outro interessante artigo científico sobre “Estratégia de Flexibilidade de Veículos Elétricos para Alívio de Congestionamento em Redes de Distribuição”, onde é apresentada uma estratégia de carregamento de veículos elétricos, que visa aproveitar de forma inteligente os longos tempos que estes veículos estão estacionados nos postos de carregamento.

Estando certo que nesta edição da revista “Neutro à Terra” apresenta-se novamente interessantes artigos técnicos e científicos para todos os profissionais do setor eletrotécnico, satisfazendo assim as expectativas dos nossos leitores, apresento os meus cordiais cumprimentos e votos de um Excelente Ano de 2020.

Porto, 31 dezembro de 2019

José António Beza Carvalho

Blog:

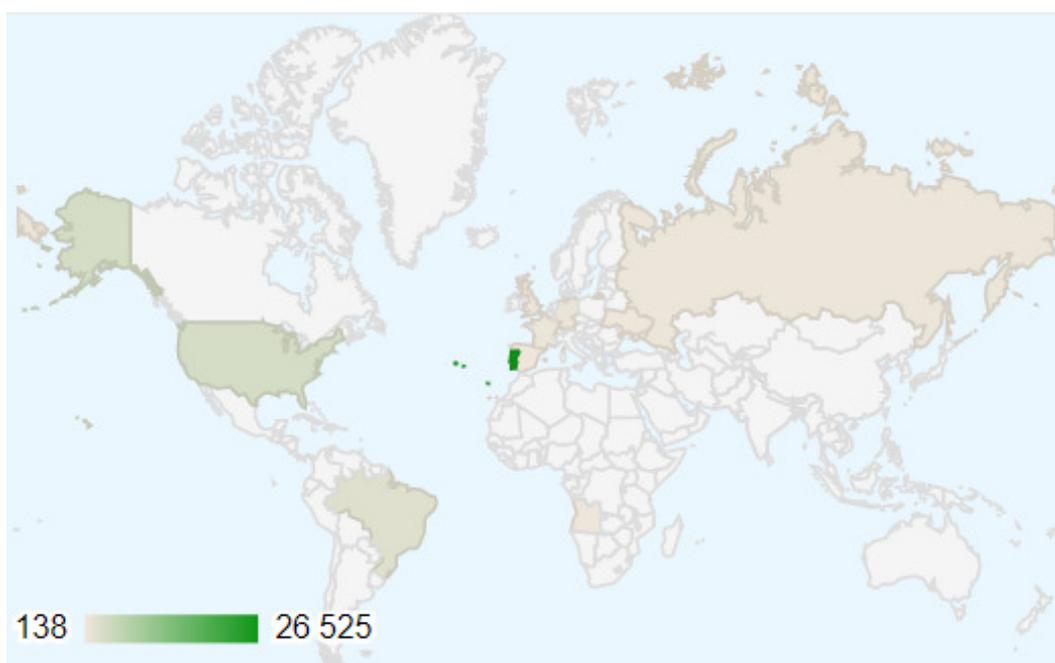
www.neutroaterra.blogspot.com

Histórico de visualizações

35 589

Entrada	Visualizações de páginas
Portugal	26525
Estados Unidos	3059
Brasil	2019
Alemanha	570
Rússia	481
França	446
Angola	244
Reino Unido	215
Ucrânia	194
Espanha	138

Público



Título: Instalações Elétricas de Baixa Tensão: Dimensionamento e Proteção de Canalizações Elétricas
2ª Edição

Autor: António Augusto Araújo Gomes, Henrique Jorge de Jesus Ribeiro da Silva, José António Beleza Carvalho

Editores: Engebook

Data de Edição: 2019

ISBN: 9789898927620

Nº Páginas: 202

Sinopse:

Esta obra pretende ser, acima de tudo, uma ferramenta didática de apoio aos alunos de cursos de engenharia eletrotécnica, bem como a técnicos responsáveis pelo projeto, execução e exploração de instalações elétricas.

Pretende ser ainda uma ferramenta prática de estudo e de trabalho, capaz de transmitir conhecimentos técnicos, normativos e regulamentares sobre o dimensionamento e proteção de canalizações elétricas aos diversos agentes eletrotécnicos, tornando-os capazes de, para cada instalação nas quais sejam intervenientes, selecionar o tipo de canalização e o modo de instalação mais adequados, de forma a maximizar a segurança, a fiabilidade e a funcionalidade, assim como os custos de execução e exploração das instalações.

INSTALAÇÕES ELÉTRICAS DE BAIXA TENSÃO
 DIMENSIONAMENTO E PROTEÇÃO DE CANALIZAÇÕES ELÉTRICAS

António Gomes, Henrique Ribeiro Da Silva, José Beleza Carvalho

Sobre a obra

Esta obra pretende ser, acima de tudo, uma ferramenta didática de apoio aos alunos de cursos de engenharia eletrotécnica, bem como a técnicos responsáveis pelo projeto, execução e exploração de instalações elétricas. Pretende ser ainda uma ferramenta prática de estudo e de trabalho, capaz de transmitir conhecimentos técnicos, normativos e regulamentares sobre o dimensionamento e proteção de canalizações elétricas aos diversos agentes eletrotécnicos, tornando-os capazes de, para cada instalação nas quais sejam intervenientes, selecionar o tipo de canalização e o modo de instalação mais adequados, de forma a maximizar a segurança, a fiabilidade e a funcionalidade, assim como os custos de execução e exploração das instalações.

Sobre os autores

António Augusto Araújo Gomes

Bacharel em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas de Energia pelo Instituto Superior de Engenharia do Porto. Licenciado e Mestre (pre-Bolonha) em Engenharia Eletrotécnica e Computadores pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Professor adjunto no Departamento de Engenharia Eletrotécnica do Instituto Superior de Engenharia do Porto desde 1999. Coordenador de Obras na CERBERUS – Engenharia de Segurança, entre 1997 e 1999. Sócio da empresa Neutro à Terra – Gabinete de Engenharia Lda (2002 e 2006). Prestação de serviços de formação e projeto no setor de assistência técnica consultativa em áreas das instalações elétricas, telecomunicações, segurança, gestão de energia, eficiência energética, e diversas entidades, nomeadamente NORGA – Consultores de Engenharia, Lda; Schumal – Engenharia e Serviços, Lda; ENERKO – Consultores de Engenharia, Lda, ISQ – Instituto de Soluções e Qualidade Químicas – Fábrica de Químicos Síntesis, S.A.; EP – Instituto Eletrotécnico Português; CENBTEC – Centro de Energia e Tecnologia; ANACOM – Autoridade Nacional das Telecomunicações; ICT – Instituto para o Desenvolvimento Tecnológico; EDV – Agência de Energia Entre Douro e Vouga.

Henrique Jorge de Jesus Ribeiro da Silva

Licenciado em Engenharia Eletrotécnica, ramo de Produção, Transporte e Distribuição de energia, pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e Mestre (pre-Bolonha) em Eletrónica Industrial pela Escola de Engenharia da Universidade do Minho. Professor Adjunto no Departamento de Engenharia Eletrotécnica do Instituto Superior de Engenharia do Porto.

José António Beleza Carvalho

Bacharel e Licenciado em Engenharia Eletrotécnica pelo Instituto Superior de Engenharia do Porto. Mestre e Doutor em Engenharia Eletrotécnica na especialidade de Sistemas de Energia pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Professor Coordenador no Departamento de Engenharia Eletrotécnica do Instituto Superior de Engenharia do Porto, desempenhando atualmente as funções de Diretor do curso de Mestrado em Sistemas Eléctricos de Energia. É autor de vários artigos publicados em conferências nacionais e internacionais, Diretor da revista neutro-à-terra e integrou vários júris de provas públicas de doutoramento e para a carreira do ensino superior.

Apoio à Edição

Parceiro de Comunicação

Também disponível em formato e-book

 ISBN 9789898927620

 www.engebook.pt



engebook



INSTALAÇÕES ELÉTRICAS DE BAIXA TENSÃO
 DIMENSIONAMENTO E PROTEÇÃO DE CANALIZAÇÕES ELÉTRICAS

ENGEBOOK **ELEKTROTECNIA**

António Gomes
 Henrique Ribeiro Da Silva
 José Beleza Carvalho

2ª EDIÇÃO



engebook

MOTORES DE PROPULSÃO EM VEÍCULOS ELÉTRICOS: TIPOS, CARACTERÍSTICAS E PERSPETIVAS DE EVOLUÇÃO

Resumo

Os sistemas de propulsão baseados em motores síncronos de ímanes permanentes (MSIP) e motores de indução (MI) têm sido as principais opções para veículos híbridos (VH) e elétricos (VE). As limitações das reservas e os elevados custos das terras-raras (constituente essencial dos ímanes permanentes (IP)) têm motivado o interesse por motores sem IP ou com menores quantidades de terras-raras. Várias configurações têm vindo a ser desenvolvidas e/ou aperfeiçoadas, com vista a ultrapassar as limitações dos MI, sendo que a otimização do seu projeto também tem sido alvo de atenção. De modo não exaustivo, o objetivo deste artigo é incidir sobre os tipos de motores atualmente aplicados na propulsão elétrica. No final, apresenta-se uma breve referência às principais tecnologias emergentes.

1. Introdução

A dependência dos meios de transporte relativamente aos combustíveis fósseis, bem como o aumento dos impactos ambientais, tem promovido, um crescente investimento no desenvolvimento de alternativas mais eficientes e ecológicas. Atualmente, os VH (sistema de propulsão composto por um motor de combustão interna (MCI), auxiliado por motor elétrico) e os VE (sistema de propulsão composto por motor(es) elétrico(s)) são as principais alternativas aos veículos convencionais, baseados em MCI – sobretudo os primeiros [1], [2]. Os principais fabricantes de automóveis têm vindo a desenvolver um número crescente de modelos híbridos e, mais recentemente, puramente elétricos.

As características dos sistemas de propulsão dos VE dependem de múltiplos fatores, sendo de destacar as restrições impostas pela estrutura do veículo, tipos de fonte de energia (e.g., baterias, supercondensadores, células de

combustível), características dos trajetos e requisitos do condutor. Os principais aspetos a considerar no dimensionamento de um sistema de propulsão elétrica são [3]:

- Tipo de motor, características do conversor de potência e método de controlo;
- Capacidades máximas de binário e velocidade, bem como dos níveis de tensão e corrente;
- Número de motores e tipos de transmissão de potência;
- Tipos de sistemas de armazenamento de energia e características (e.g., máxima energia, máxima potência instantânea);
- Sistema de carregamento e monitorização (e.g., *Battery Management System*).

Deste modo, os desafios colocados aos motores de propulsão dos VE são muito mais exigentes do que em aplicações industriais.

Até ao momento, os motores síncronos de ímanes permanentes (MSIP) e os motores de indução (MI) têm sido as escolhas dos principais fabricantes de VH e VE, com destaque para os primeiros (Tabela 1).

Tabela 1 – Motores de propulsão em VH e VE [3]

Make	Model	Traction Motor
Honda	EV Plus	DC Motor
Holden	Ecommodore	SRM
Nissan	Tino,Leaf,Altra	PMSM
Honda	Insight,Accord,Civic	PMSM
Toyota	Prius C & V	PMSM
Toyota	Highlander,Avalon	PMSM
Toyota	Camry	PMSM
Ford	Fusion SE Hybrid	PMSM
Ford	C Max Hybrid SEL	PMSM
Hyundai	Blueon	PMSM
Chevrolet	Volt & Energi	PMSM
Renault	Kangoo	IM
Chevrolet	Silverado	IM
Daimler Chrysler	Durango	IM
Tesla	Roadster	IM
Honda	Fit EV	IM
Toyota	Reva4	IM
REVA	NXR	IM
Ford	Focus Electric	IM
Ford	Transit Connect	IM
GM	EV1	IM
BMW	X5	IM

O preço e disponibilidade dos elementos de terras-raras, que compõem os ímãs permanentes (IP) com maiores densidades de energia, têm incentivado o desenvolvimento de máquinas sem aqueles componentes ou com IP sem terras-raras (e.g., Alnico e ferrites, que são materiais mais baratos). No entanto, a sua densidade de energia é substancialmente mais baixa do que a das terras-raras, o que coloca limitações à densidade de potência e rendimentos obtidos: a otimização do projeto dos motores é determinante na mitigação destas consequências, entre outras. Por outro lado, o desenvolvimento de novos materiais, arquiteturas de conversores de potência e sistemas de controlo tem estimulado o aparecimento de novas conceções de motores mais compactos (i.e., maiores densidades de potência e binário), com melhores rendimentos, mais robustas e tolerantes a falhas [3], [4].

Este artigo pretende incidir sobre as características gerais de diferentes tipos de motores para VE. Começa-se por abordar os MI e MSIP, seguindo-se outros motores com potencial para aplicações em VE e que se encontram em fases distintas de desenvolvimento. As características dos respetivos conversores e sistemas de controlo não serão aqui abordadas.

A estrutura do artigo é a seguinte: A secção 2 refere-se às características dos sistemas de propulsão dos VE, focando as exigências impostas aos motores.

Na secção 3 são apresentadas as características, vantagens e desvantagens dos motores que integram os VH e VE comercializados atualmente, bem como de outros tipos de motores em fase avançada de desenvolvimento.

A secção 4 faz uma breve referência às tecnologias emergentes que têm vindo a captar maior atenção.

Finalmente, na secção 5 são apresentadas algumas conclusões.

2. Características de Desempenho dos VE

Os sistemas de propulsão dos VE caracterizam-se por disponibilizarem elevados binários na zona das baixas velocidades, com uma zona ampla de altas velocidades (funcionamento com potência constante).

A Figura 1 ilustra as características de um sistema de propulsão concreto.

Entre outros aspetos, os ciclos de condução e desempenhos pretendidos são fundamentais no dimensionamento e desempenho dos sistemas de propulsão: do binário máximo disponível (modo contínuo) dependerá o desempenho do veículo em subidas; em trajetos planos, a velocidade máxima atingida (modo contínuo) é determinada pela potência fixada para a gama de altas velocidades.

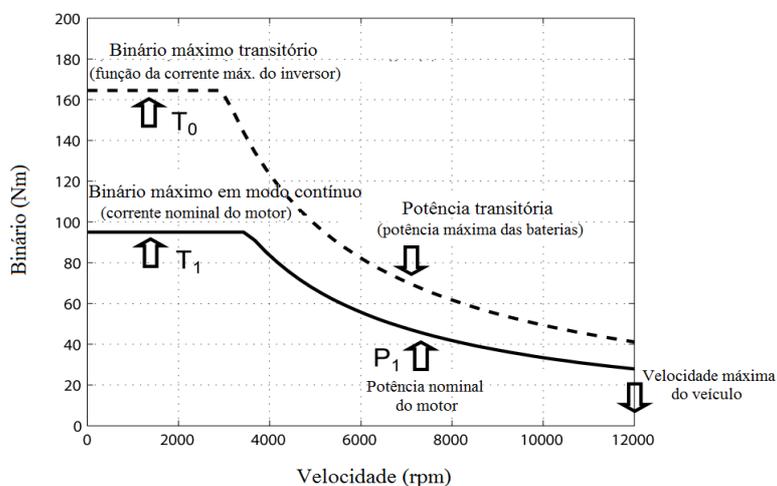


Figura 1 – Características dos sistemas de propulsão elétrica

A capacidade de funcionamento em sobrecarga dos motores elétricos (característica a tracejado da Figura 1) é uma mais-valia muito relevante sobre os MCI [5]. Com efeito, há a considerar um acréscimo do binário e potência máximos desenvolvidos, ainda que por períodos limitados (tanto menores quanto maior a sobrecarga): Surgem vantagens tanto em modo motor (possibilidade de desenvolver elevados binários em toda a gama de velocidades \Rightarrow maiores acelerações, bem como picos de velocidade), como em modo frenagem (aumento da capacidade de frenagem com recuperação de energia).

É de realçar a extrema importância das características do inversor do motor, bem como das baterias do sistema de propulsão. Em termos práticos, o acréscimo do binário máximo está limitado pela corrente nominal do inversor; por outro lado, no aumento da potência máxima devem estar presentes as limitações próprias das fontes de energia do veículo [5].

As características da Figura 1 são fundamentais para o dimensionamento dos motores que integram os sistemas de propulsão dos VE [6]. De referir ainda que o valor da tensão na entrada do inversor e a sua regulação têm um impacto direto na extensão da zona das altas velocidades.

Em síntese, as principais características dos motores que integram os VE são [3], [6]:

- Elevadas densidades de potência e binário;

- Rendimentos elevados em todas a gamas de binário e velocidade;
- Ampla zona de funcionamento com potência constante;
- Binário de arranque elevado;
- Sistemas de controlo flexível;
- Elevada robustez e tolerância a falhas;
- Elevada capacidade de sobrecarga (os intervalos entre sobrecargas consecutivas podem ser curtos);
- Elevadas respostas dinâmicas;
- Limitação das componentes oscilatórias do binário, bem como dos níveis de ruído;
- Custo moderado.

É de realçar que estas características não dependem apenas do motor, mas também da sua integração com o conversor de potência e sistema de controlo que compõem a drive de propulsão.

Este aspeto é fundamental na eficácia dos sistemas de propulsão elétrica (dispositivos de armazenamento de energia, drive, transmissão mecânica e sistemas de controlo), o que coloca desafios muito exigentes à sua conceção.

3. Motores Elétricos para Propulsão

Na Figura 2 são indicados os tipos de motores elétricos com maior potencial para a propulsão elétrica, incluindo algumas configurações emergentes [7].

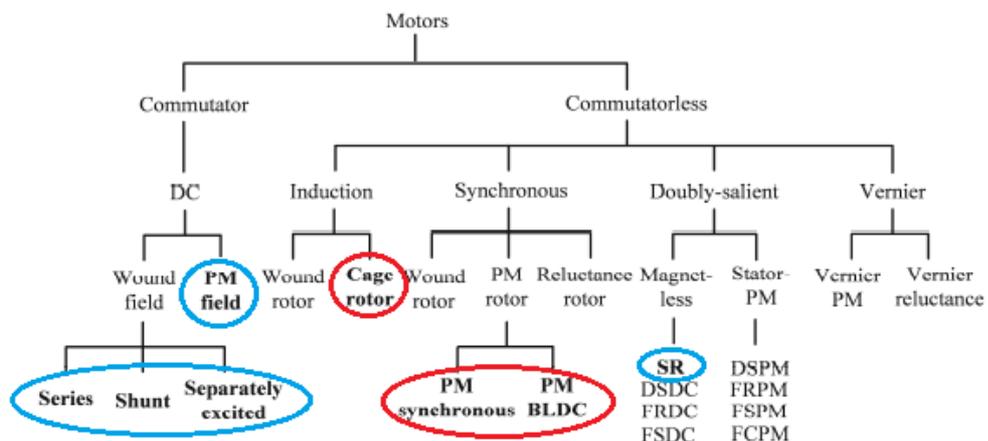


Figura 2 – Tipos de motores elétricos para propulsão

É evidente a eliminação dos comutadores mecânicos, anéis e escovas.

Os motores atualmente mais usados estão assinalados a vermelho e a azul as máquinas aplicadas residualmente. Os restantes são conceções em fase de desenvolvimento. Com exceção do motor síncrono de relutância, estes últimos são sumariamente referidos neste artigo.

3.1. Motor de Corrente Contínua (DC)

Historicamente, o início da tração elétrica esteve intimamente associado ao motor série DC. As principais razões prendem-se com a característica mecânica naturalmente adaptada às exigências dos sistemas de tração, bem como a simplicidade dos sistemas de controlo e sua implementação (controlo independente do campo magnético e do binário). São também de referir a utilização de outras variantes clássicas de motores DC: excitação independente e “shunt”. No entanto, os motores de corrente contínua convencionais apresentam rendimentos relativamente baixos e baixas densidades de potência, para além de exigirem elevados níveis de manutenção (fiabilidade reduzida). Para tal, muito contribui a existência do sistema coletor/escovas, o qual impõe também limites na velocidade.

Em certos casos, são usados motores DC de ímanes permanentes (o enrolamento de excitação é substituído por ímanes permanentes). Embora apresentem melhores rendimentos, não eliminam os inconvenientes do comutador mecânico (coletor/escovas). Os motores DC continuam a ser uma opção em aplicações que requerem potências baixas. Aliada às excelentes respostas dinâmicas destas máquinas, os conversores de potência tendem a ser mais simples, com menores custos [8].

3.2. Motor de Indução Trifásico

São muito utilizados, atendendo à sua simplicidade construtiva e robustez, principalmente a variante em gaiola de esquilo (Figura 3).

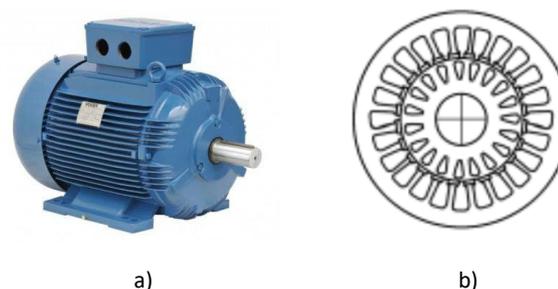


Figura 3 – MI: a) aspeto geral; b) corte seccional

Tipicamente, a zona de funcionamento com potência constante corresponde a 4-5 vezes a velocidade nominal, o que é vantajoso no contexto dos VE [3]. Por outro lado, os rendimentos mais elevados estão associados a esta zona: nesta máquina, as perdas por efeito de Joule são as dominantes, pelo que a menor corrente de magnetização (zona de enfraquecimento de campo) contribui para a sua diminuição. O funcionamento com deslizamentos baixos em toda a gama de velocidades é fundamental, uma vez que as perdas por efeito de Joule no rotor dependem desse valor.

As principais desvantagens do MI são os baixos fator de potência e densidade de potência (em comparação com o MSIP); nas baixas velocidades, os rendimentos vêm diminuídos, sobretudo para cargas reduzidas. A dificuldade em dissipar as perdas no rotor limita a capacidade de sobrecarga do MI. Os sistemas de ventilação forçada mitigam este efeito, mas aumentam o volume e complexidade da máquina.

A tecnologia associada aos MI apresenta um nível de maturidade muito elevado, o que não significa que esteja esgotado o espaço para novos desenvolvimentos [6]. Fundamentalmente, a aplicação de novos materiais e melhorias no projeto, bem como a implementação de métodos de otimização das perdas, apresentam um potencial considerável de desenvolvimento [9].

Os sistemas baseados no controlo vetorial – controlo por orientação de campo – permitem dotar o MI de excelentes desempenhos dinâmicos, possibilitando o funcionamento nas duas zonas indicadas na Figura 1.

3.3. Motor Síncron de Ímanes Permanentes

De modo distinto do MI (motor assíncrono), nestas máquinas a velocidade do rotor é igual à velocidade de sincronismo do campo girante Estatório (regime permanente). No rotor são colocados IP baseados em terras-raras (i.e., ligas compostas por neodímio (Nd), ferro (Fe) e boro (B)). Sendo ímanes com elevadas densidades de energia, obtêm-se máquinas mais compactas do que os MI, com melhores rendimentos e fator de potência. A ausência de enrolamentos rotóricos permite a eliminação (quase total) das perdas por efeito de Joule no rotor, o que contribui para os elevados rendimentos destas máquinas. Por outro lado, a refrigeração torna-se mais simples, uma vez que as perdas ocorrem sobretudo no estator. Atendendo às características dos ímanes, as perdas no ferro do estator podem atingir valores consideráveis [10]. Existem duas configurações distintas, tal como indicado na Figura 4:

- Ímanes montados na superfície do rotor (SR);
- Ímanes colocados no interior do rotor (IR).

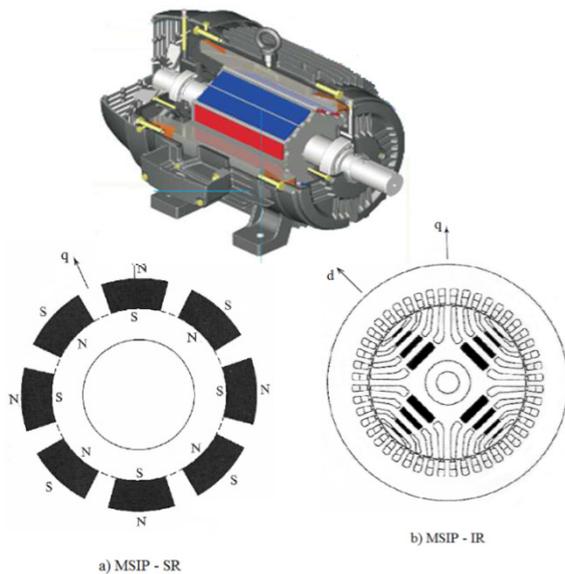


Figura 4 – MSIP: exemplo de aspeto geral; variantes rotóricas: SR (a) e IR (b)

Em termos construtivos, há a salientar a maior vulnerabilidade às forças centrífugas dos ímanes na variante SR (particularmente crítico nas altas velocidades). No caso IR, é necessária a inclusão de barreiras de fluxo (Figura 4-b)), o

que introduz uma maior complexidade e custo no seu fabrico [10]. As consequências mais importantes das diferenças entre estas duas variantes são:

- O circuito magnético IR apresenta características anisotrópicas (i.e., $L_d \neq L_q$)⁽¹⁾ – anisotropia inversa ($L_d < L_q$) –, pois a permeabilidade magnética dos ímanes é aproximadamente igual à do ar;
- O binário desenvolvido na configuração IR tem duas componentes: uma resultante da interação do campo magnético fixo com o campo de reação do induzido; uma segunda componente devida ao binário de anisotropia. O binário resultante é mais elevado, pelo que esta configuração é mais utilizada em VH e VE.

O rendimento é elevado na gama das baixas velocidades. Para o motor atingir velocidades superiores à nominal é necessário que i_d (componente longitudinal da corrente do estator)⁽²⁾, alinhada com a direção do campo magnético indutor (IP), crie um campo magnético de reação que se oponha a este (zona de enfraquecimento de campo). Assim, quanto maior for a velocidade pretendida, maior será o valor de i_d ; as perdas por efeito de Joule aumentam, o que leva à diminuição do rendimento. Importa ter presente que elevados valores de i_d podem ter um duplo efeito na desmagnetização dos ímanes, quer pela ação do campo criado, quer também pelo aumento da temperatura devido ao acréscimo das perdas Joule. Com efeito, as propriedades das terras-raras deterioram-se com temperaturas elevadas. Deste modo, a limitação do rendimento e o risco de desmagnetização dos IP limitam o funcionamento nas altas velocidades [11]. Em caso de falha na alimentação podem surgir sobretensões aos terminais da máquina; o seu valor depende da velocidade, pelo que na gama das altas velocidades a possibilidade de ocorrência destas falhas representa um sério risco para os ocupantes do veículo, bem como para os respetivos equipamentos [12]. Para além do maior custo, estas são as principais desvantagens dos motores com IPs.

⁽¹⁾ L_d e L_q são, respetivamente, os coeficientes de auto-indução longitudinal e transversal de um enrolamento de fase do estator.

⁽²⁾ De modo complementar, i_q é a componente transversal da corrente do estator associada ao binário desenvolvido.

De modo semelhante aos MIs, as estratégias de controlo vetorial são normalmente aplicadas aos MSIPs, com base nos objetivos pretendidos (e.g., maximização do binário, rendimento, fator de potência, etc).

3.4. Motor “Brushless” DC

Do ponto de vista construtivo, os motores “brushless” DC (MBDC) têm uma estrutura semelhante aos motores DC convencionais, sem o enrolamento da armadura (rotor) e o sistema coletor/escovas. Os enrolamentos do estator são do tipo concentrado, alimentados por uma fonte exterior. No rotor são colocados ímanes permanentes, à semelhança dos motores anteriores (Figura 5).

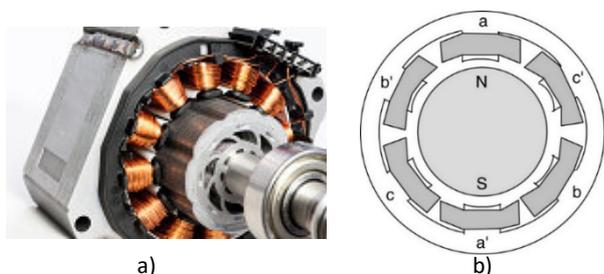


Figura 5 – MBDC: a) aspeto geral; b) corte seccional

Há dois aspetos essenciais a referir [10]:

- O coletor/escovas é substituído por um sistema de comutação eletrónica: as correntes no estator são comutadas em função da posição do campo magnético rotórico. Normalmente, são utilizados sensores de efeito de Hall para este fim;
- Atendendo à configuração deste tipo de motores, a distribuição espacial do campo magnético do rotor no entreferro é, em cada instante, do tipo retangular (mais precisamente, trapezoidal).

As correntes nos enrolamentos estatóricos têm uma evolução temporal do tipo trapezoidal. Em comparação com distribuições de campos magnéticos e correntes sinusoidais, com os mesmos valores de pico (motores anteriores), os binários desenvolvidos são consideravelmente mais elevados, atendendo aos maiores valores eficazes; no entanto, a componente alternada é maior.

Para além das vantagens comuns aos MSIPs – robustez, fiabilidade – há a salientar densidades de potência e rendimentos superiores [3]. As características referidas das correntes estatóricas, bem como a comutação eletrónica, implicam a inclusão de conversores de potência e sistemas de controlo dedicados. Estes últimos são bastante mais simples do que no caso dos MSIP [12]. Quanto às desvantagens, as mais relevantes são semelhantes às descritas na secção anterior.

3.5. Motor Síncrono de Relutância

Os motores síncronos de relutância (MSrel) procuram combinar as vantagens dos MSIP e MI: são máquinas robustas e sem IP, com rendimentos elevados, atendendo à (quase) ausência de perdas no rotor. O seu maior inconveniente é o baixo fator de potência [13].

O estator é semelhante ao das máquinas AC polifásicas convencionais: ranhurado na periferia interior, com enrolamentos de fase distribuídos, de modo sinusoidal, pelas ranhuras. Normalmente, no rotor são colocadas barreiras de fluxo axiais (visíveis na Figura 6), que lhe conferem características anisotrópicas, isto é, propriedades magnéticas distintas segundo as direções radiais (d e q)⁽³⁾.

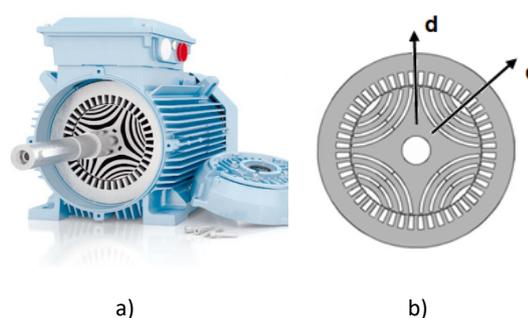


Figura 6 – MSrel: a) aspeto geral; b) corte seccional

Podem ser alimentados com tensões sinusoidais, simétricas e equilibradas. No entanto, é frequente serem alimentados através de um conversor de potência, de modo a regular a velocidade e otimizar a sua exploração.

⁽³⁾ Ao contrário do MSIP, tem-se $L_d > L_q$

O baixo fator de potência implica valores relativamente elevados de potência reativa, associados ao funcionamento destas máquinas, tendo um impacto direto no tamanho do conversor de potência. O fator de potência pode ser melhorado aumentando a razão L_d/L_q ; a forma, o posicionamento e número das barreiras de fluxo têm aqui um impacto determinante.

Com vista ao aumento do fator de potência e do rendimento, tem sido explorada a adição de IP no rotor (Figura 7).

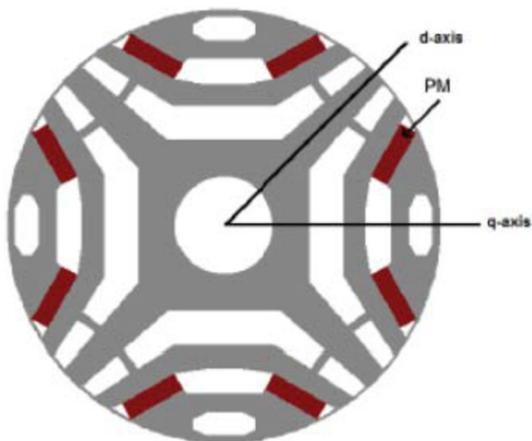


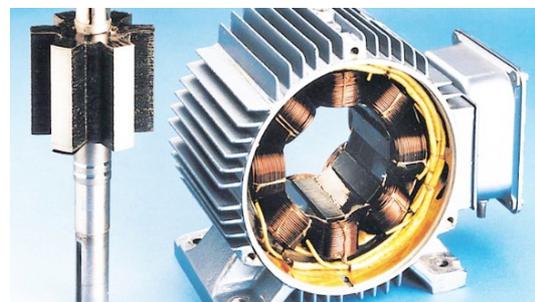
Figura 7 – Corte seccional de rotor de MSrel com IP [13]

De notar que as quantidades de IP são muito menores, pelo que o fluxo magnético é bastante menor do que nos MSIP. Em consequência, os problemas associados à desmagnetização dos IP e funcionamento a altas velocidades são atenuados. Torna-se também viável a opção por materiais magnéticos sem terras-raras, como foi já referido. Para além da robustez, são máquinas com boa tolerância a falhas. Quanto aos sistemas de controlo, são muito semelhantes aos dos MSIP.

3.6. Motor de Relutância Comutado

A sua estrutura é equivalente à dos motores de passo de relutância variável, necessitando de um conversor e controlador dedicados.

O motor de relutância comutado (MRC) é uma máquina com dupla configuração polar (i.e., os circuitos magnéticos do estator e do rotor têm polos salientes – normalmente, o nº de polos do estator é maior do que o nº de polos do rotor). Os circuitos magnéticos do estator e do rotor são formados por empilhamentos de chapas ferromagnéticas, isoladas entre si. Os enrolamentos das fases do estator são do tipo concentrado, colocados em torno dos respectivos núcleos polares. No rotor não existem enrolamentos nem ímãs permanentes [14]. A Figura 8 ilustra alguns pormenores do estator e rotor de uma configuração real (a) e o respetivo corte seccional (b).



a)



b)

Figura 8– MRC [4 fases - 6 polos no estator e 4 no rotor (6/4)]: a) aspeto geral; b) corte seccional

As fases do estator são alimentadas com impulsos de corrente, em função da posição do rotor, pelo que é fundamental conhecer-se a sua posição instantânea. Apresentam uma construção simples, robusta e fiável, à semelhança dos MI. Têm boa tolerância a falhas, que aumenta com o nº de fases. São máquinas anisotrópicas, cujo princípio de funcionamento assenta no desenvolvimento de binários de relutância. Apresentam excelentes características para a tração – binários muito elevados nas baixas velocidades e zona de funcionamento com potência constante caracterizada por intervalos alargados de velocidades.

Os sistemas de controlo são bastante complexos, atendendo aos níveis de saturação que ocorrem no circuito magnético, particularmente, nas extremidades dos pólos do estator. O binário desenvolvido não é constante; existe uma componente alternada (ripple), principalmente nas velocidades baixas, que tende a diminuir com o número de fases do motor. Uma outra desvantagem é o ruído acústico. Aqui, as componentes mecânicas do motor têm também um papel importante na sua diminuição [14].

4. Configurações Emergentes de Motores para VE

Com vista ao aumento das densidades de potência e binário, bem como rendimentos e robustez elevados, diversas configurações de máquinas têm vindo a ser desenvolvidas, sendo de destacar as seguintes [15] (ver Figura 2):

i. Motores com polos salientes no estator e rotor

- Com IP (normalmente no estator):
 - *Doubly-salient PM* (DSPM);
 - *Flux reversal PM* (FRPM);
 - *Flux switching PM* (FSPM);
 - *Flux-controllable PM* (FCPM) – inclui um enrolamento no estator, alimentado em DC, o que permite regular o fluxo magnético.
- Sem IP (substituídos por enrolamentos DC):
 - *Switched Reluctance Motor* (SR) – Motor de Relutância Comutado;
 - *Doubly-salient DC* (DSDC) – neste caso, o estator possui dois enrolamentos (AC e DC);
 - *Flux reversal DC* (FRDC);
 - *Flux switching DC* (FSDC).

ii. Motores Vernier:

O seu funcionamento assenta no efeito Vernier, com vista ao aumento do binário nas baixas velocidades, permitindo obter densidades de binário superiores à generalidade dos motores com IP.

Finalmente, importa referir que as configurações referidas podem ser aplicadas a máquinas de fluxo radial (convencional), fluxo axial ou fluxo transversal, influenciando as densidades de potência obtidas.

5. Conclusões

A propulsão elétrica coloca níveis de exigência aos motores (elétricas, térmicas, mecânicas, ambientais, ...) muito acima das aplicações industriais. São de destacar elevadas densidades de potência e binário, zona ampla de funcionamento com potência constante, rendimentos elevados, robustez e tolerância a falhas, etc. A otimização do projeto das máquinas (elétrico, magnético e térmico), combinada com a arquitetura do conversor, métodos de controlo e tecnologias de fabrico, são determinantes para a melhoria contínua do desempenho das drives dos sistemas de propulsão elétrica.

Os MSIPs e os MIs têm sido as escolhas preferenciais, principalmente os primeiros. As elevadas densidades de potência e binário, com altos rendimentos, são as principais justificações. No entanto, o custo e disponibilidade dos elementos de terras-raras tem incentivado o interesse e desenvolvimento de motores elétricos sem IPs ou que não possuam terras raras.

Pela sua maturidade, o MI tem sido a principal alternativa comercial. Atendendo às suas limitações, o potencial de outras configurações (algumas recentes, outras nem tanto) está a ser explorado. São de destacar o motor síncrono de relutância, os motores com polos salientes no estator e rotor (e.g, MRC) e os motores Vernier.

Em termos gerais, este artigo procurou incidir, de modo não exaustivo, sobre os tipos de motores atualmente aplicados na propulsão elétrica (ou próximos disso), com uma breve referência às tecnologias emergentes mais promissoras.

Bibliografia

- [1] D. Bucherl, R. Nuscheler, W. Meyer, and H.-G. Herzog, "Comparison of electrical machine types in hybrid drive trains: Induction machine vs. permanent magnet synchronous machine," in 2008 18th International Conference on Electrical Machines, 2008, pp. 1-6: IEEE.
- [2] P. Miller, "xEV market trend and prospect," in 2012 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2012, pp. 1095-1099: IEEE.
- [3] S. J. Rind, Y. Ren, Y. Hu, J. Wang, and L. Jiang, "Configurations and control of traction motors for electric vehicles: A review," Chinese Journal of Electrical Engineering, vol. 3, no. 3, pp. 1-17, 2017.
- [4] R. Poole, "Rare earth metals in short supply?," IET E&T, vol. 7, no. 4, 2012.
- [5] A. Vagati, G. Pellegrino, and P. Guglielmi, "Comparison between SPM and IPM motor drives for EV application," in The XIX International Conference on Electrical Machines-ICEM 2010, 2010, pp. 1-6: IEEE.
- [6] Y. A. Alamoudi, A. Ferrah, R. Panduranga, A. Althobaiti, and F. Mulolani, "State-of-the Art Electrical Machines for Modern Electric Vehicles," in 2019 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET), 2019, pp. 1-8: IEEE.
- [7] K.-T. Chau, C. Jiang, W. Han, and C. H. Lee, "State-of-the-art electromagnetics research in electric and hybrid vehicles," Progress in electromagnetics research, vol. 159, pp. 139-157, 2017.
- [8] P. Bhatt, H. Mehar, and M. Sahajwani, "Electrical Motors for Electric Vehicle—A Comparative Study," Available at SSRN 3364887, 2019.
- [9] A. M. Bazzi and P. T. Krein, "Comparative evaluation of machines for electric and hybrid vehicles based on dynamic operation and loss minimization," in 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2010, pp. 3345-3351: IEEE.
- [10] P. M. A. d. S. Melo, "Veículos eléctricos. Características e tipos de motores," Neutro à Terra, pp. 13-22, 2009.
- [11] F. Un-Noor, S. Padmanaban, L. Mihet-Popa, M. N. Mollah, and E. Hossain, "A comprehensive study of key electric vehicle (EV) components, technologies, challenges, impacts, and future direction of development," Energies, vol. 10, no. 8, p. 1217, 2017.
- [12] G. Pellegrino, A. Vagati, B. Boazzo, and P. Guglielmi, "Comparison of induction and PM synchronous motor drives for EV application including design examples," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 48, no. 6, pp. 2322-2332, 2012.
- [13] K. Rajashekara, "Present status and future trends in electric vehicle propulsion technologies," IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 1, no. 1, pp. 3-10, 2013.
- [14] P. Sousa Melo, "Características Básicas do Motor de Relutância Comutado," Neutro à Terra, 2018.
- [15] I. Boldea and L. Tutelea, Reluctance Electric Machines: Design and Control. CRC Press, 2018.

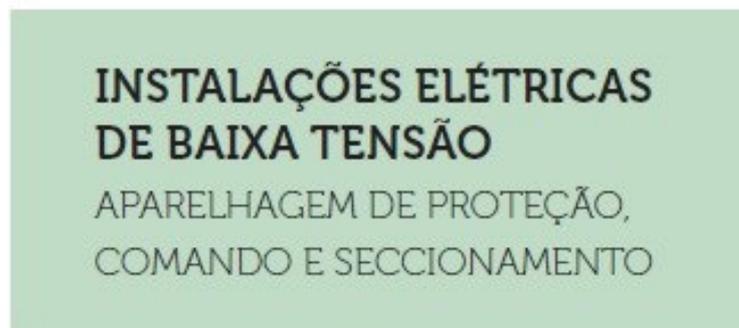
HUMOR ELETRO



Título: Instalações Elétricas de Baixa Tensão - Aparelhagem de Proteção, Comando e Seccionamento
Autor: António Augusto Araújo Gomes, Sérgio Filipe Carvalho Ramos, André Fernando Ribeiro de Sá
Editora: Publindústria
Data de Edição: Engebook
ISBN: 9789898927187
Nº Páginas: 226
Encadernação: Capa mole

Sinopse:

A obra Instalações Elétricas de Baixa Tensão - Aparelhagem de Proteção, Comando e Seccionamento pretende ser, acima de tudo, uma ferramenta didática de apoio aos alunos de cursos de Engenharia Eletrotécnica, bem como a Técnicos Responsáveis pelo projeto, execução e exploração de instalações elétricas. Pretende ser, ainda, uma ferramenta prática de estudo e de trabalho, capaz de transmitir conhecimentos técnicos, tecnológicos, normativos e regulamentares sobre a aparelhagem de proteção, comando e seccionamento de baixa tensão, aos diversos agentes eletrotécnicos, tornando-os capazes de, para cada instalação na qual sejam intervenientes, maximizar a segurança, a fiabilidade e a funcionalidade, assim como reduzir os custos de execução e exploração das instalações.



ENGEBOOK **ELEOTECNIA**

António Gomes
 Sérgio Ramos
 André Sá



COLABORARAM NESTA EDIÇÃO:



André Tiago Alves Sousa

1180363@isep.ipp.pt

Licenciado em Engenharia Eletromecânica pelo Instituto Superior de Engenharia de Coimbra. Aluno do Mestrado de Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia pelo Instituto Superior de Engenharia do Porto.



Bruno Miguel da Rocha Canizes

brmrc@isep.ipp.pt

GECAD – Politécnico do Porto

Edison A. C. Aranha Neto

earanha@ifsc.edu.br

Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil



Henrique Fragoço Martins

1121211@isep.ipp.pt

Licenciado em Engenharia Eletrotécnica, área científica de Sistemas de Energia, pelo Instituto Superior de Engenharia. Estudante do curso de mestrado em Engenharia Eletrotécnica, área científica de Sistemas de Energia no Instituto Superior de Engenharia do Porto.

Áreas de interesse: Sistemas de Armazenamento de Energia, Produção de Energia, Fontes de Energia Renovável, Eletrónica de Potência e Eficiência Energética.



João Gualter Machado Rigor

1151326@isep.ipp.pt

Licenciado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia, pelo Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP) em 2018. Recebeu um diploma de mérito como parte integrante do Quadro de Honra do Departamento de Engenharia Eletrotécnica (DEE). Atualmente, é estudante finalista do curso de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia no ISEP.



João André Pinto Soares

jan@isep.ipp.pt

GECAD – Politécnico do Porto, Porto, Portugal

COLABORARAM NESTA EDIÇÃO:



José António Beleza Carvalho

jbc@isep.ipp.pt

Nasceu no Porto em 1959. Obteve o grau de B.Sc em engenharia eletrotécnica no Instituto Superior de Engenharia do Porto, em 1986, e o grau de M.Sc e Ph.D. em engenharia eletrotécnica na especialidade de sistemas de energia na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, em 1993 e 1999, respetivamente.

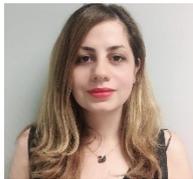
Atualmente, é Professor Coordenador no Departamento de Engenharia Eletrotécnica do Instituto Superior de Engenharia do Porto, desempenhando as funções de Diretor do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia.



Lucas B. G. Gomes

1180452@isep.ipp.pt

Mestre em Engenharia Eletrotécnica - Sistemas Elétricos de Energia no ISEP ao abrigo do Protocolo de Dupla Titulação entre o ISEP e Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.



Mahsa Khorram Ghahfarrokhi

Received the B.Sc. degree in electrical engineering from the Azad university of Najaf Abad, Iran, 2013. She is currently studying toward the M.Sc. degree in power system in the IPP-ISEP, Porto, Portugal. She is a Researcher with GECAD — Research Group on Intelligent Engineering and Computing for Advanced Innovation and Development, Polytechnic Institute of Porto, Portugal. Her research interests include energy management in buildings, energy efficiency, and demand response programs.



Pedro Miguel Azevedo de Sousa Melo

pma@isep.ipp.pt

Mestre em Automação, Instrumentação e Controlo pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Aluno do Programa Doutoral em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Docente do Instituto Superior de Engenharia do Porto desde 2001. Desenvolveu atividade de projetista de instalações elétricas de BT na DHV-TECNOPOR.



Teresa Alexandra Nogueira

tan@isep.ipp.pt

Fez a Licenciatura e Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, área científica de Sistemas de Energia, pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Fez o Doutoramento em Engenharia Eletrotécnica e Computadores, pela Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. É docente no Departamento de Engenharia Eletrotécnica do ISEP - Instituto Superior de Engenharia do Porto e investigadora no CIETI - Centro de Inovação em Engenharia e Tecnologia Industrial. Áreas de interesse: Projeto de transformadores, mercados de energia, operação do sistema de gás natural, energias renováveis, sustentabilidade, qualidade de energia, produção de energia e eficiência energética.

