

EUTRO À TERRA

Revista Técnico-Científica

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

Voltámos à vossa presença com a publicação de mais uma edição da nossa revista semestral. Esperamos satisfazer novamente as expectativas dos nossos leitores, publicando artigos de elevada qualidade técnico-científica, que seguramente suscitarão a curiosidade de todos os nossos habituais leitores, que nos privilegiam com o seu interesse desde o início das nossas publicações. Esta é a 22ª publicação em onze anos de existência. Ao longo destes anos fez-se um grande percurso e atingiram-se os objetivos definidos inicialmente: divulgar assuntos de natureza técnica e científica, com uma abordagem crítica, mas construtiva, de forma que esta publicação seja uma referência em assuntos relacionados com a Engenharia Eletrotécnica em que nos propomos intervir.

José Beleza Carvalho, Professor Doutor



Máquinas e Veículos Elétricos



Produção, Transporte e Distribuição Energia



Instalações Elétricas



Telecomunicações



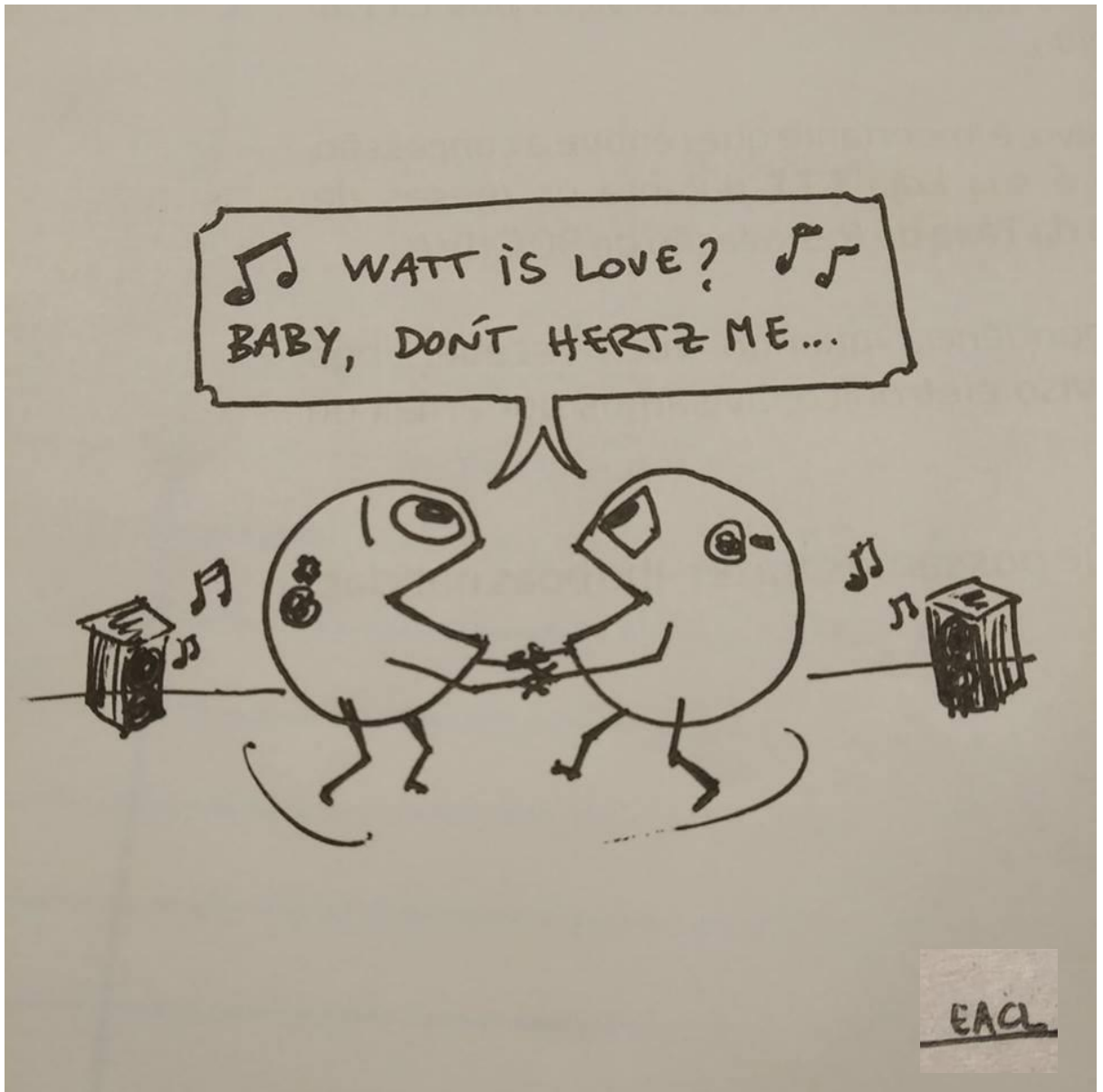
Segurança



Gestão de Energia e Eficiência Energética



Automação, Gestão Técnica e Domótica



- Editorial	5
- Simulador de carregamento para veículos elétricos	9
Aldo dos Anjos Faria Pestana Trindade	
- Motores elétricos para aplicações especiais	23
WEGeuro Indústria Eléctrica, S.A.	
- Características básicas do motor de relutância comutado	27
Pedro Miguel Azevedo De Sousa Melo	
- Power transformers diagnosis: Status evaluation	37
Teresa Nogueira, Carlos Lopes, Carlos Felgueiras, José Quadrado	
- Instalações de ligação à terra	47
António Augusto Araújo Gomes	
- Equipamentos de rede: Equipamentos passivos e ativos	55
Sérgio Filipe Carvalho Ramos	
- Autores	58

FICHA TÉCNICA

DIRETOR:	José António Beleza Carvalho, Doutor
SUBDIRETORES:	António Augusto Araújo Gomes, Eng. Roque Filipe Mesquita Brandão, Doutor Sérgio Filipe Carvalho Ramos, Doutor
PROPRIEDADE:	Área de Máquinas e Instalações Elétricas Departamento de Engenharia Electrotécnica Instituto Superior de Engenharia do Porto
CONTACTOS:	jbc@isep.ipp.pt ; aag@isep.ipp.pt
PUBLICAÇÃO SEMESTRAL:	ISSN: 1647-5496

Título: Instalações Elétricas de Baixa Tensão: Dimensionamento e Proteção de Canalizações Elétricas
Autor: António Augusto Araújo Gomes, Henrique Jorge de Jesus Ribeiro da Silva, José António Beleza Carvalho
Editora: Publindústria
Data de Edição: 2017
ISBN: 9789897232046
Nº Páginas: 114
Encadernação: Capa mole

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

SOBRE O LIVRO

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 em Engenharia Eletrotécnica e de Telecomunicações 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 da Obra na CEFIBRUS – Engenharia de Segurança, entre 1997 e 1999. Sócio da empresa Nicatso e Tera – Gabinete de Engenharia Lda (2002 a 2005). Prestação de serviços de formação e/ou projeto e/ou assessoria e/ou consultoria no âmbito das instalações elétricas, telecomunicações, segurança, gestão de energia, eficiência energética, e diversas atividades nomeadamente: NGHYVA – Consultores de Engenharia, S.A.; Schenkel – Engenharia e Serviços, Lda; ENERKO – Consultores de Engenharia, Lda; ESC – Instituto de Soldadura e Qualidade, Quilóscia – Fabrica de Quadros elétricos, S.A.; EP – Instituto Eletrotécnico Português; CENFREED – Centro de Energia e Tecnologia; ABAKOM – Autoridade Nacional das Telecomunicações; IET – 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 Mestrado em Engenharia de Instalações elétricas pela Faculdade de Engenharia da Universidade de Viana do Castelo. Professor Adj. no Departamento de Engenharia Eletrotécnica do Instituto Superior de Engenharia do Porto.

José António Beleza Carvalho

Bacharel 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 as funções de Diretor do Departamento. Integra a direção da Escola Tecnológica de Viana do Castelo como vice-reitor e do Instituto Politécnico do Porto. É autor de vários artigos publicados em conferências nacionais e internacionais, diretor da revista neutro-30ter e integrou vários júris de provas públicas de doutoramento e para a colação do ensino superior.

ENGEBOOK

Família Benetton
 Sociedade Anónima de Investimentos

Convidamos: **Life is On** **Schneider Electric** **Weidmüller**



Estimados leitores

Voltámos à vossa presença com a publicação de mais uma edição da nossa revista semestral. Esperamos satisfazer novamente as expectativas dos nossos leitores, publicando artigos de elevada qualidade técnico-científica, que seguramente suscitarão a curiosidade de todos os nossos habituais leitores, que nos privilegiam com o seu interesse desde o início das nossas publicações. Esta é a 22ª publicação em onze anos de existência. Ao longo destes anos fez-se um grande percurso e atingiram-se os objetivos definidos inicialmente: divulgar assuntos de natureza técnica e científica, com uma abordagem crítica, mas construtiva, de forma que esta publicação seja uma referência em assuntos relacionados com a Engenharia Eletrotécnica em que nos propomos intervir.

Atualmente, esta revista é um documento indispensável para alunos dos cursos de Engenharia Eletrotécnica, mas também para todos os profissionais desta área da engenharia e para muitas empresas do setor eletrotécnico, que sempre manifestaram interesse pelas nossas publicações. Outro fator importante que se verificou ao longo dos últimos anos, tem a ver com a internacionalização da revista, verificando-se elevado interesse pelas nossas publicações em países estrangeiros, destacando-se os Estados Unidos e os países de língua oficial Portuguesa. Assim, com grande satisfação, podemos afirmar que os objetivos iniciais foram atingidos, e são e continuarão a ser cumpridos.

O interesse pela nossa revista por parte de leitores de países estrangeiros levou-nos a publicar com alguma regularidade artigos em língua Inglesa. Nesta edição publicamos um artigo intitulado “Power Transformers Diagnosis: Status Evaluation”. Neste artigo, apresenta-se uma metodologia de avaliação do estado de funcionamento dos transformadores de potência, que equipam as subestações das redes de transporte de energia em muito alta tensão. O estudo baseia-se na análise de cinco índices parciais, que refletem as condições de trabalho mais críticas do equipamento: óleo isolante, papel isolante celuloso, bobinagem e núcleo ferromagnético, isoladores e sistemas de arrefecimento.

Um assunto muito importante e atual, tem a ver com a mobilidade elétrica e, particularmente, com os veículos elétricos. Nesta edição da revista, publica-se um interessante artigo científico que permite analisar o comportamento dos utilizadores de veículos elétricos, e perceber qual o impacto que a variação dos preços da energia elétrica tem sobre os mesmos. Baseia-se no desenvolvimento de uma ferramenta que simula viagens de veículos elétricos e o carregamento destes, considerando alguns comportamentos dos seus utilizadores. Este artigo científico baseia-se no trabalho de dissertação de mestrado realizado no ISEP pelo autor.

O motor de indução trifásico continua a ser a principal opção nos sistemas de força-motriz, mas outros tipos de motores têm vindo a conquistar espaço. O motor de relutância comutado é uma alternativa possível em certas aplicações. Trata-se de uma máquina não convencional, simples e robusta, com capacidade de funcionar em altas velocidades. O seu funcionamento é caracterizado por binários pulsantes e ruído acústico, sendo os principais inconvenientes desta máquina. Nesta edição da revista Neutro-à-Terra, apresenta-se um interessante artigo sobre as principais características do motor de relutância comutado. Ainda no âmbito das máquinas elétricas, apresenta-se também um importante artigo da responsabilidade da WEGeuro Indústria Eléctrica, S.A., sobre Motores Eléctricos para Aplicações Especiais.

Nesta edição da revista destacam-se ainda a publicação de outros interessantes artigos técnicos, nomeadamente no âmbito das Instalações Eléctricas e no âmbito das Infraestruturas de Telecomunicações, que são sempre um assunto importante e alvo de várias publicações na nossa revista ao longo dos últimos anos.

No âmbito das instalações elétricas publica-se um interessante artigo sobre Instalações de Ligação à Terra, onde são abordadas as tecnologias adotadas neste tipo de instalações, enquadrando-as regulamentarmente. No âmbito das Infraestruturas de Telecomunicações apresenta-se um artigo que analisa os diferentes equipamentos necessários para a interligação em rede de equipamentos utilizados nas comunicações eletrónicas, fazendo, neste âmbito, uma distinção clara entre equipamentos Passivos e equipamentos Ativos.

Estando certo que nesta edição da revista “Neutro à Terra” apresenta-se novamente interessantes artigos técnicos 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 2019.

Porto, dezembro de 2018

José António Beleza Carvalho

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.



INSTALAÇÕES ELÉTRICAS DE BAIXA TENSÃO

APARELHAGEM DE PROTEÇÃO, COMANDO E SECCIONAMENTO

ENGEBOOK **ELETRÓTECNIA**

António Gomes
Sérgio Ramos
André Sá



Blog:

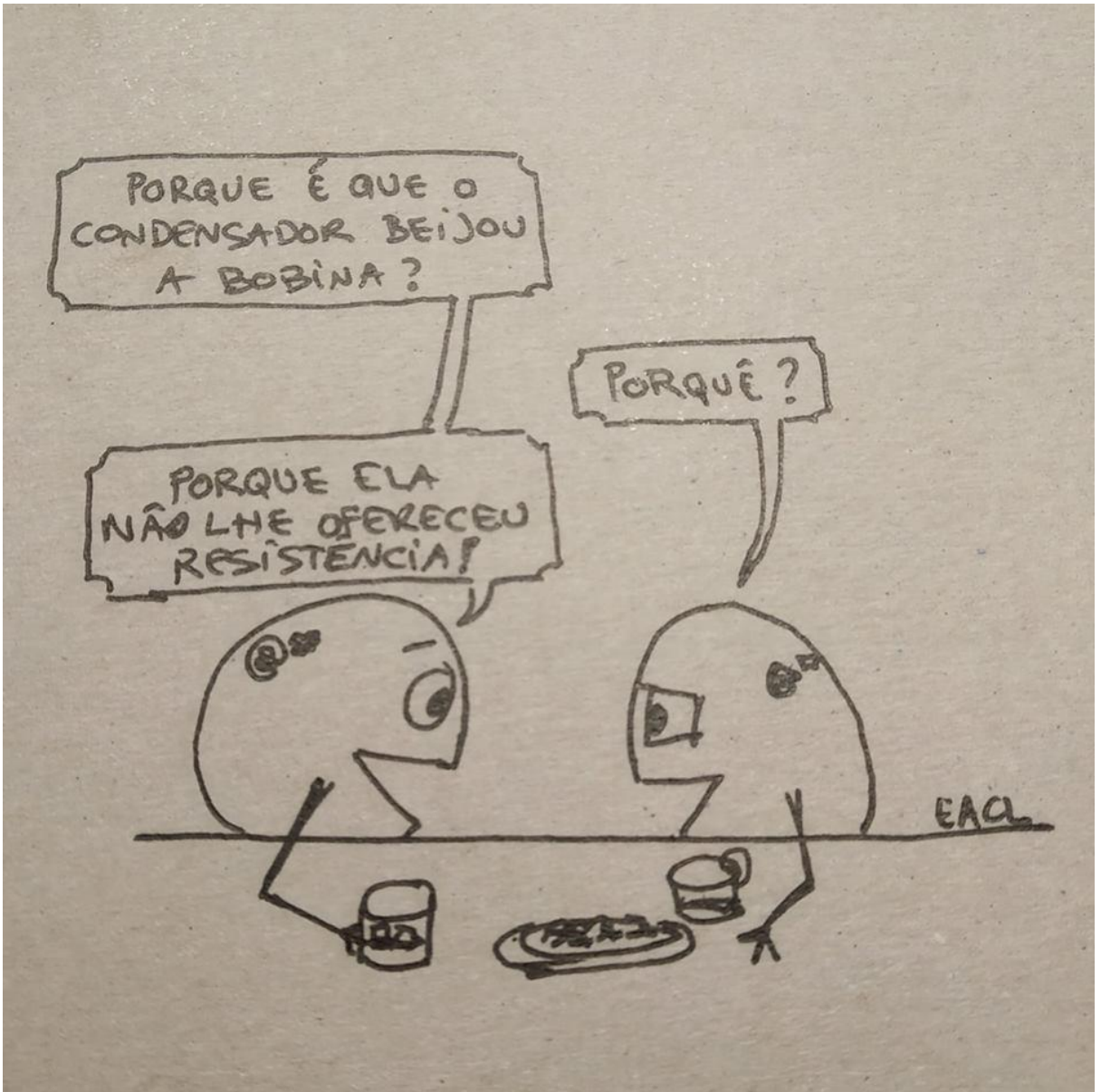
www.neutroaterra.blogspot.com

Histórico de visualizações

32 298

Entrada	Visualizações de páginas
Portugal	24130
Estados Unidos	2803
Brasil	1854
Alemanha	488
França	443
Rússia	406
Angola	230
Reino Unido	187
Ucrânia	184
Espanha	126





CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DO MOTOR DE RELUTÂNCIA COMUTADO

Resumo

O motor de indução trifásico continua a ser a principal opção nos sistemas de força-motriz, mas outros tipos de motores têm vindo a conquistar espaço. O motor de relutância comutado é uma alternativa possível em certas aplicações. Trata-se de uma máquina não convencional, simples e robusta, com capacidade de funcionar em altas velocidades. O seu funcionamento é caracterizado por binários pulsantes e ruído acústico, sendo os principais inconvenientes desta máquina.

Este artigo pretende ser uma introdução ao MRC, focando-se em algumas das suas características construtivas básicas e princípio de funcionamento. A modelização e dificuldades inerentes são abordadas, sendo apresentado um modelo linear.

1. Introdução

Atualmente, o consumo de energia dos acionamentos eletromecânicos é estimado em cerca de 46% da energia elétrica consumida mundialmente [1].

Os motores de indução trifásicos (MIT) continuam a ser dominantes, mas há outras opções cuja relevância tem vindo a aumentar, sendo de destacar os motores de ímanes permanentes.

Um exemplo imediato são os veículos híbridos e elétricos, onde a opção por motores síncronos de ímanes permanentes (MSIP) ultrapassa o MIT.

Com efeito, apresentam maiores densidade de potência e rendimento, sobretudo na gama das baixas e médias velocidades. Por seu turno, o preço, robustez e fiabilidade dos MIT são as suas principais vantagens [2].

A disponibilidade e elevado custo dos elementos de terras raras (e.g., NdFeB e SmCo) – constituintes essenciais dos ímanes permanentes (IPs) que compõem os MSIP – têm motivado uma procura crescente de alternativas que prescindam ou, pelo menos, limitem a necessidade desses elementos [3].

Os motores de relutância comutados (MRC) têm vindo a ser identificados como uma alternativa aos MSIP e MIT. São máquinas simples, baratas, robustas e com elevada tolerância a falhas. No rotor não existem IPs nem enrolamentos, não necessitando de anéis e escovas [4]. Podem atingir velocidades muito elevadas (> 50 000 rpm), o que permite funcionar numa ampla zona de potência constante, com rendimentos elevados.

A Figura 1 compara os três tipos de motores nas zonas de maiores rendimentos.

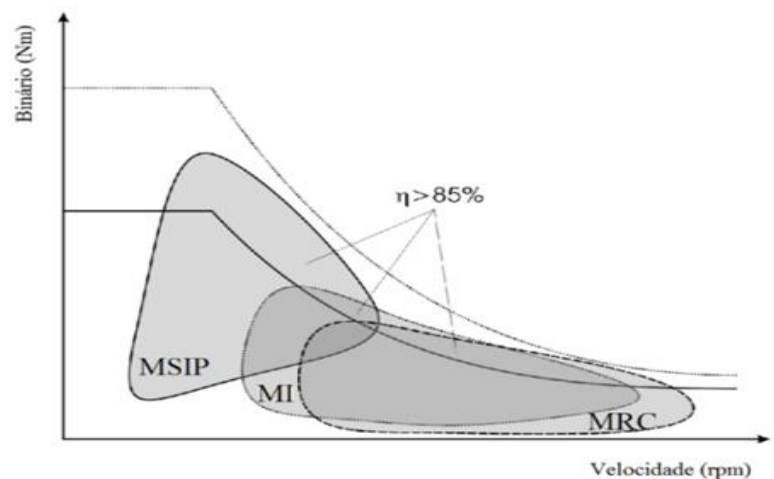


Figura 1– MSIP, MI e MRC: Zonas de Funcionamento com Elevados Rendimentos

O MRC tem vindo a ser usado na indústria automóvel, em eletrodomésticos e em sistemas de ar condicionado. É também reconhecido o seu potencial para os veículos elétricos. No entanto, a sua operação apresenta algumas desvantagens, sendo de destacar o ruído sonoro e binários pulsantes. Estes inconvenientes têm motivado consideráveis esforços, com vista a eliminá-los ou, pelo menos, mitigá-los [5]. Tal verifica-se ao nível da configuração do motor [6], do conversor de potência [7] e estratégias de controlo [8], [9].

É também de destacar a necessidade de conversores de potência com arquiteturas e métodos de controlo específicos, distintos das máquinas convencionais. Um aspeto chave está no facto do MRC, o conversor e respetivo controlador serem um sistema único, tal como ilustrado na Figura 2.

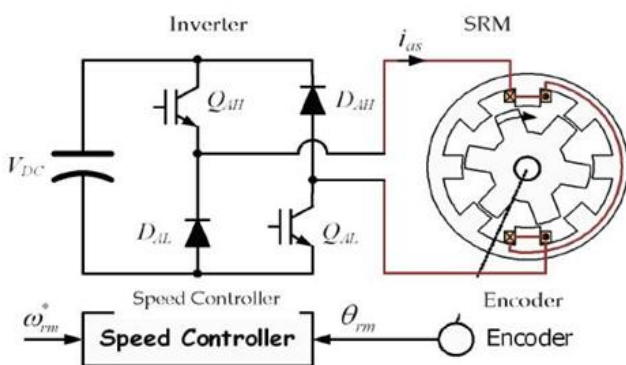


Figura 2– Drive de MRC (estrutura do inversor para uma fase)

Deste modo, a referência ao MRC tem implícita o próprio drive. O seu rendimento é indissociável das características do motor, da topologia do conversor e do tipo de controlo.

Neste texto somente o MRC será abordado. Os diferentes tipos de conversores e métodos de controlo serão temas a tratar em futuras oportunidades. O presente artigo está estruturado do seguinte modo:

A secção 2 refere algumas das características comuns das máquinas de relutância, em particular MRC e motores síncronos de relutância (MSR).

Na Secção 3 são abordados os princípios básicos do funcionamento do MRC. A Secção 4 refere-se à modelização do MRC e suas dificuldades. A conversão de energia é abordada através de um modelo linear. Finalmente, a Secção 5 trata das conclusões.

2. MOTORES DE RELUTÂNCIA

Em qualquer motor de relutância, a produção de binário está associada à tendência do rotor se alinhar segundo uma posição de relutância mínima, associada ao trajeto das linhas de força do campo magnético desenvolvido. O seu princípio de funcionamento é distinto das máquinas ditas convencionais – corrente contínua, indução, síncronas com enrolamento de excitação (rotor cilíndrico): nestas, o binário desenvolvido resulta da combinação de dois campos magnéticos distintos, no estator e no rotor.

Em geral, existem apenas enrolamentos no estator (concentrados ou distribuídos pelas suas ranhuras), formando vários enrolamentos de fase, independentes entre si. Podem ser alimentados separadamente (e.g., MRC e motor de passo de relutância variável) ou em simultâneo (e.g., MSR e MRC).

O rotor é constituído por chapas de material ferromagnético, eletricamente isoladas entre si, não havendo enrolamentos ou IP; A geometria/constituição das chapas tem como objetivo maximizar a variação do coeficiente de autoindução das fases do estator, em função da posição do rotor. Por outras palavras, trata-se de circuitos magnéticos fortemente anisotrópicos, sendo esta uma característica fundamental destas máquinas.

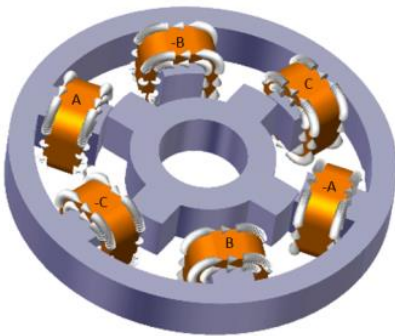
A simplicidade do rotor é a principal vantagem das máquinas de relutância, quando comparada com outras. Tal reflete-se num menor custo, elevada robustez e fiabilidade; Uma vez que as perdas ocorrem principalmente no estator, a sua refrigeração torna-se mais fácil [10]. Como tal, são máquinas indicadas para ambientes agressivos, com temperaturas elevadas (e.g., veículos híbridos e elétricos).

2.1. Aspetos Construtivos do MRC e do MSR

Na Figura 3 estão representadas duas configurações distintas do MRC.



a) MRC trifásico: 12 polos no estator e 8 no rotor (12/8)



b) MRC trifásico: 6 polos no estator e 4 no rotor (6/4)

Figura 3– Motores de Relutância Comutados

Os enrolamentos de cada fase são do tipo concentrado, colocados em torno dos polos do estator (normalmente, 2 polos/fase – ver Tabela 1). O rotor é composto por polos salientes, sendo constituído apenas por chapas de material ferromagnético, isoladas eletricamente entre si.

Nas máquinas de construção regular, normalmente verificam-se as seguintes condições:

- Nº polos do estator (N_s) > nº de polos do rotor (N_r) [N_s e N_r são nº pares];
- Arco polar rotórico \geq arco polar estatórico.

Existem várias combinações possíveis de polos no estator e rotor, bem como de nº de fases (m). Na Tabela 1 estão indicadas as mais usuais.

Tabela 1 – Configurações de MRC

m	N_s	N_r
3	6	4
3	12	8
4	8	6
5	10	8
6	12	10
7	14	12

Em geral, quanto mais elevados forem N_s e N_r , maior será o binário médio desenvolvido, sendo menor o *ripple*. No entanto, o conversor necessitará de um maior número de semicondutores e as perdas no ferro serão mais elevadas, para uma dada velocidade. Com efeito, a frequência (f_s) dos impulsos da corrente numa fase é dada por: $f_s = \omega_r \cdot N_r$ (f_s [Hz]; ω_r : velocidade do rotor [s^{-1}]).

O MRC tem uma estrutura semelhante à do motor de passo de relutância variável. No entanto, há diferenças significativas: o MRC tem normalmente um menor número de polos e o rotor roda em modo contínuo; a sua operação requer o conhecimento da posição instantânea do rotor. Finalmente, têm potências muito superiores às dos motores de passo [10].

Na Figura 4 é ilustrado um exemplo de um MSR, incluindo uma vista segundo um corte seccional.



Figura 4– Motor Síncrono de Relutância trifásico (4 polos)

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 4), que lhe conferem características anisotrópicas, isto é, propriedades magnéticas distintas segundo as direções radiais d e q . Ao contrário do MRC, o nº de polos no estator e rotor são iguais. 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. PRINCÍPIO E CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMENTO DO MRC

O seu desenvolvimento e aplicação devem-se à revolução tecnológica associada aos semicondutores de potência de estado sólido (inícios da década de 1960), bem como ao desenvolvimento dos sistemas de controlo digital.

No que se refere à capacidade de conversão de energia, os MRC têm uma limitação estrutural, associada à ausência de IPs e enrolamentos no rotor (limitação comum às máquinas de relutância). A sua densidade de potência está limitada pela alimentação dos enrolamentos estatóricos, mas também pelas suas características geométricas, magnéticas e pelo tipo de controlo aplicado [11]. A geometria particular do circuito magnético torna o MRC muito sensível aos efeitos dos campos magnéticos na periferia dos polos e da saturação magnética – esta última tem uma influência importante na capacidade de conversão de energia.

Nos MRC de construção regular a indutância mútua entre fases apresenta valores baixos. Este é também uma característica muito relevante desta máquina: as fases são magneticamente independentes entre si, ao contrário das máquinas polifásicas convencionais. As consequências são várias, sendo de destacar os cenários de avarias. Por exemplo, um curto-circuito numa fase não afeta as restantes; o impacto da falta de uma fase fica circunscrito, sendo possível manter o funcionamento da máquina sem alterações significativas – maior tolerância a falhas.

Naturalmente, o número de fases da máquina e as condições de carga são determinantes (quanto maior o número de fases, menor o impacto da fase afetada).

Nas altas velocidades, os cenários são diferentes: as correntes em fases adjacentes podem coexistir por períodos consideráveis. Os fluxos de ligação entre as fases poderão ter efeitos não desprezáveis, pelo que deverão ser considerados.

3.1. Análise Qualitativa

Com base na máquina elementar da Figura 5, os princípios de criação de binário no MRC são a seguir descritos. Nos 4 cenários considerados, a bobina estatórica (1-1') é percorrida por corrente.

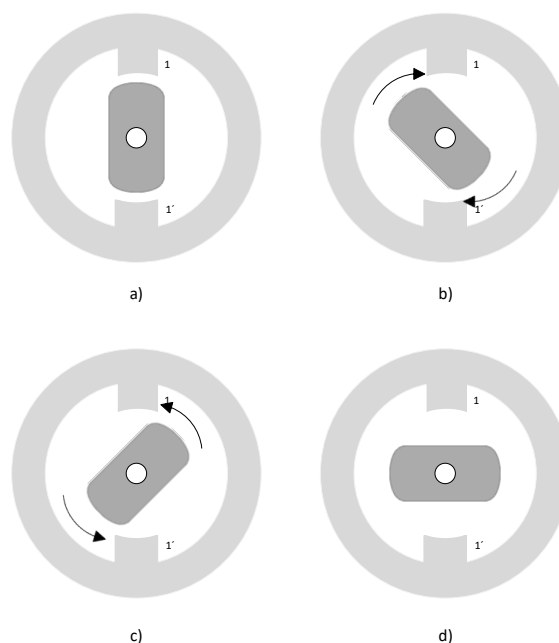


Figura 5– MRC elementar

Cenário a): os polos do rotor e do estator estão totalmente alinhados entre si, pelo que a relutância equivalente do circuito magnético do motor é mínima. Como tal, o binário é nulo;

Cenários b) e c): o binário desenvolvido tende a colocar o rotor na posição “a)”. O binário tem sentidos contrários em b) e c), o que revela a importância crucial de alimentar as fases do estator, consoante a posição do rotor;

Cenário d): o rotor está posicionado segundo a direção correspondente à relutância máxima do circuito magnético (eixos magnéticos dos polos do estator e do rotor em quadratura (desalinhados)). Sendo uma posição de equilíbrio (tal como a)), o binário desenvolvido é nulo. Mas trata-se de um equilíbrio instável, ao contrário de a): uma perturbação na posição do rotor, leva ao desenvolvimento de um binário conducente ao cenário a). A mesma perturbação no cenário a) faz desenvolver um binário que tende a manter o rotor na posição inicial (equilíbrio estável).

Estes cenários evidenciam algumas características essenciais do funcionamento do MRC:

- i) De modo a evitar as situações a) e d), tem de se verificar a condição: $N_s \neq N_r$;
- ii) O binário desenvolvido resulta da alimentação sequencial das fases do estator, em função da posição do rotor. Cada fase deve ser alimentada para posições do rotor que correspondam a uma variação do seu coeficiente de auto-indução (L_s) entre os valores mínimo ($L_{\text{não_alinhado}}$) e máximo (L_{alinhado}) (Motor) ou entre L_{alinhado} e $L_{\text{não_alinhado}}$ (Gerador).
- iii) A polaridade dos impulsos de corrente em cada fase não tem influência no sentido do binário desenvolvido (binário de relutância).

3.2. Características Geométricas: Impacto no Funcionamento do MRC

O valor de L_s é dependente da corrente (devido ao efeito da saturação) e da posição angular do rotor (θ). Os valores não saturados de $L_{\text{não_alinhado}}$ e L_{alinhado} têm uma importância de “primeira linha” para qualquer MRC, em particular a razão $L_{\text{alinhado}}/L_{\text{não_alinhado}}$ [10]. As características geométricas assumem particular importância, sendo de destacar a forma e dimensões dos polos do estator e do rotor, bem como os entreferros. Na Figura 6 estão indicadas algumas das características mais relevantes.

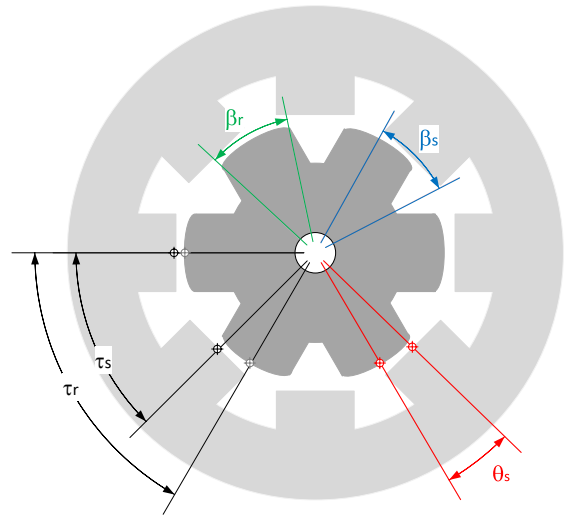


Figura 6– Características de L_s , corrente (motor & gerador) e zonas de binário (referidas a uma fase), em função de θ

Para além de evidenciar os arcos polares do estator (β_s) e do rotor (β_r), os restantes ângulos são definidos do seguinte modo:

$$\tau_s = \frac{2\pi}{N_s} \quad (1)$$

$$\tau_r = \frac{2\pi}{N_r} \quad (2)$$

$$\theta_s = 2\pi \left(\frac{1}{N_r} - \frac{1}{N_s} \right) \quad \text{sendo: } N_r < N_s \quad (3)$$

Os passos polares estatórico e rotórico são, respetivamente, τ_s e τ_r . O ângulo θ_s corresponde ao desfasamento espacial entre indutâncias de fases consecutivas. De notar que este é igual ao deslocamento angular mínimo (ε - stroke angle), associado a um impulso de corrente numa fase. Considerando o cenário de 2 polos/fase, a expressão (3) pode ser apresentada do seguinte modo:

$$\varepsilon = \frac{1}{m} \frac{2}{N_r}, \quad m: n^\circ \text{ de fases} \quad (4)$$

De notar que o número total de impulsos numa rotação corresponde ao denominador de ε .

Na Figura 7 são analisados os princípios básicos do funcionamento da máquina, relacionando-os com as suas características geométricas. Com efeito, os impulsos de corrente e binário estão representados de modo a evidenciarem a correlação com $L_s(\theta)$, isto é, com a posição do rotor. De referir que esta representação assume condições ideais (ausência de saturação no núcleo e e resistência nula do enrolamento de fase).

É visível que $L_s(\theta)$ varia periodicamente com a posição do rotor (θ), sendo o período igual a τ_r . De notar que a origem considerada para $L_s(\theta)$ na Figura 3 é coincidente com a posição desalinhada.

Assim, tem-se:

$$\theta_1 = \frac{\pi}{N_r} - \left(\frac{\beta_s + \beta_r}{2} \right) \quad (5)$$

$$\theta_2 - \theta_1 = \beta_s \quad (6)$$

$$\theta_3 - \theta_2 = \beta_r - \beta_s \quad (7)$$

$$\theta_4 - \theta_3 = \beta_s \quad (8)$$

$$\theta_5 - \theta_4 = \frac{\pi}{N_r} - \left(\frac{\beta_s + \beta_r}{2} \right) \quad (9)$$

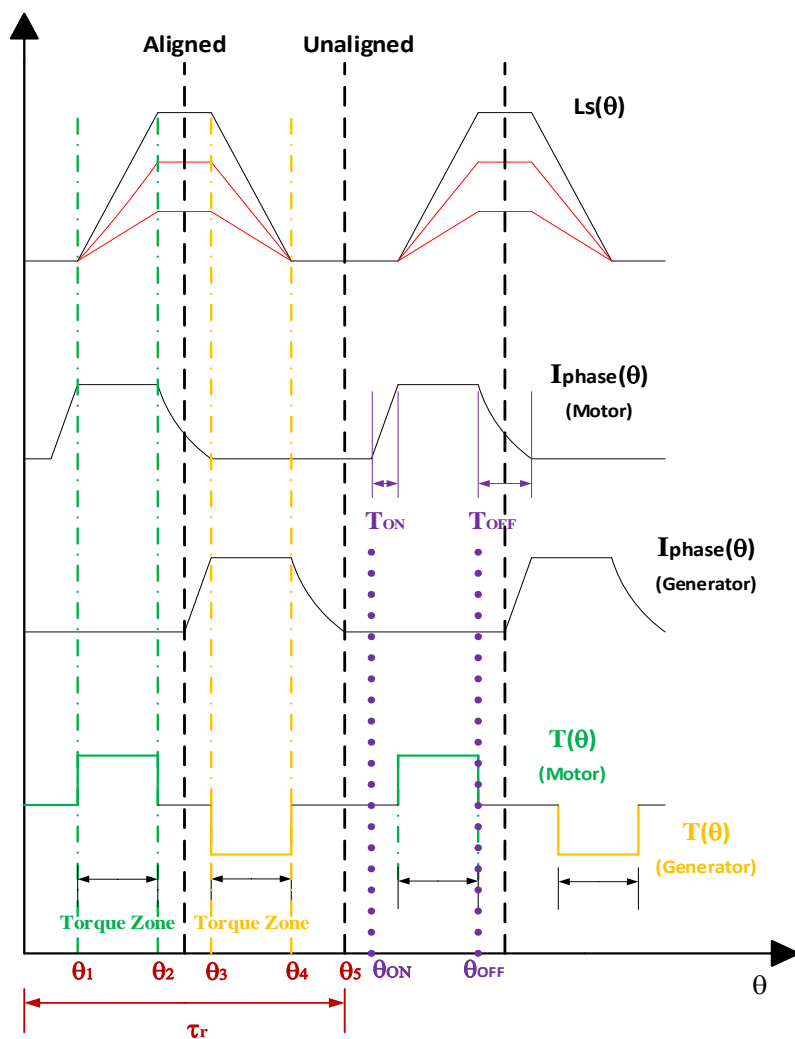


Figura 7– Características de L_s , corrente (motor & gerador) e zonas de binário (referidas a uma fase), em função de θ

No funcionamento da máquina (Motor e Gerador)⁽¹⁾, os binários desenvolvidos surgem nas zonas caracterizadas por: $dL_s/d\theta \neq 0$ (i.e., quando há sobreposição de pólos). As correntes de fase são comutadas eletronicamente, em função da posição do rotor. Como consequência, surgem campos magnéticos pulsantes, responsáveis pelo *ripple* no binário resultante.

É de realçar a importância dos ângulos de comutação dos impulsos da corrente (T_{ON} e T_{OFF}), bem como dos períodos de subida (T_{ON}) e descida (T_{OFF}): idealmente, a corrente deverá atingir o valor máximo no início da zona de binário (torque zone, na Figura 7); por seu turno, a corrente deve anular-se antes de ser atingida a região caracterizada por $dL_s/d\theta < 0$. Caso contrário, surge um binário frenante. Estes são alguns dos desafios colocados ao conversor e controlador do drive do MRC.

Em síntese, o seu funcionamento está intimamente associado às características geométricas e magnéticas do núcleo, da arquitetura do conversor e do algoritmo de controlo. O conhecimento instantâneo de θ e a forma dos impulsos da corrente, em particular, os instantes de comutação, têm um papel fulcral no desempenho do MRC. Finalmente, importa ainda referir que a análise anterior é extensível ao modo de funcionamento como gerador.

4. MODELIZAÇÃO E CONVERSÃO DE ENERGIA NO MRC

Os fluxos magnéticos têm evoluções temporais e distribuições não sinusoidais, que dependem das características de cada máquina e do sistema de controlo. Mesmo numa determinada máquina, as formas de onda dos fluxos magnéticos variam consoante o troço do núcleo considerado. Como tal, a sua modelização traz desafios complexos, exigindo abordagens diferentes das máquinas convencionais [12].

4.1. Modelização

Sendo um conversor eletromecânico, a modelização do MRC pode ser feita com base num conjunto de equações diferenciais de parâmetros concentrados, semelhante aos modelos dinâmicos amplamente usados nas máquinas elétricas convencionais. Deste modo, tem-se:

Equação de Tensão

$$V_{fase} = R_s \cdot i + \frac{d(i, \theta)}{dt} \quad (10)$$

V_{fase} : tensão instantânea aplicada aos terminais de fase;

R_s : a resistência de uma fase do estator;

i : a corrente instantânea na fase;

$\Psi(i, \theta)$: fluxo magnético total de uma fase.

Equação Magnética

$$\Psi = L_s(i, \theta) \cdot i \quad (11)$$

$L_s(i, \theta)$: coeficiente de autoindução de uma fase do estator.

Equação Eletromecânica (binário instantâneo)

$$T = \sum_{j=1}^m \frac{\partial W_c^j(i, \theta)}{\partial \theta}, \quad i = \text{constante} \quad (12)$$

W_c^j : co-energia associada à fase j , sendo m o nº de fases do motor.

Para $i=i_1$, a função co-energia (W_c) é definida como:

$$W_c(i_1, \theta) = \int_0^{i_1} (i, \theta) \cdot di \quad (13)$$

(1) De notar o mesmo sentido da corrente em ambos os modos de funcionamento.

Equação Mecânica (Motor)

$$T - T_{carga} = J \frac{d\omega_r}{dt} + K_f \omega_r \quad (14)$$

T_{carga} : binário da carga;

J : momento de inércia equivalente do sistema mecânico;

ω_r : velocidade angular do rotor;

K_f : coeficiente de viscosidade (função do tipo de rolamentos e fluido lubrificante).

A maior dificuldade na modelização do MRC reside na equação magnética, fortemente não-linear e dependente da posição do rotor (θ). A Figura 8 representa as curvas de magnetização ($\Psi=f(i, \theta)$), para uma fase do estator.

A zona de binário está bem definida, limitada pelas posições “alinhado” e “não alinhado” dos polos do estator e do rotor. O efeito da saturação é bem visível, o que torna exigente a modelização e controlo. Há outras dificuldades a considerar (e.g., distribuição não uniforme do campo magnético pelo núcleo, função do modo de operação do motor), mas esses assuntos não serão abordados neste texto. De referir que as características da Figura 8 são normalmente obtidas com recurso a métodos de elementos finitos (MEF) ou ensaios experimentais. Ambos são exigentes, quer do ponto de vista da formulação numérica, capacidade de processamento requerida na sua aplicação (MEF), bem como de tempo requerido.

De modo a simplificar a análise, as perdas da máquina não serão consideradas.

4.2. Conversão de Energia: Aproximação Linear

Em cada instante, o princípio da conservação de energia (1ª lei da termodinâmica) rege a conversão de energia no interior da máquina. No modo motor, uma variação infinitesimal da energia elétrica absorvida por uma fase ($dW_{fonte}(i, \theta)$) corresponderá a uma variação infinitesimal da energia armazenada no campo magnético da referida fase ($dW_{mag}(i, \theta)$), bem como uma variação infinitesimal da energia mecânica convertida ($dW_{mec}(i, \theta)$):

$$dW_{fonte}(i, \theta) = dW_{mag}(i, \theta) + dW_{mec}(i, \theta) \quad (15)$$

$$\text{Sendo: } dW_{fonte}(i, \theta) = i \cdot d(i, \theta) \quad (16)$$

e

$$d(i, \theta) = \frac{\partial(i, \theta)}{\partial i} di + \frac{\partial(i, \theta)}{\partial \theta} d\theta \quad (17)$$

Na ausência de saturação magnética, as características de magnetização correspondem a retas. Na Figura 9 estão representadas duas características magnéticas, correspondentes à posição inicial θ_0 e a um deslocamento infinitesimal ($d\theta$), a partir daquela posição, para $i=i_1$.

Sendo $\Psi(i, \theta) = L_s(\theta) \cdot i$, através de (17) tem-se:

$$d(i_1, \theta) = i_1 \cdot dL_s(\theta) \quad (18)$$

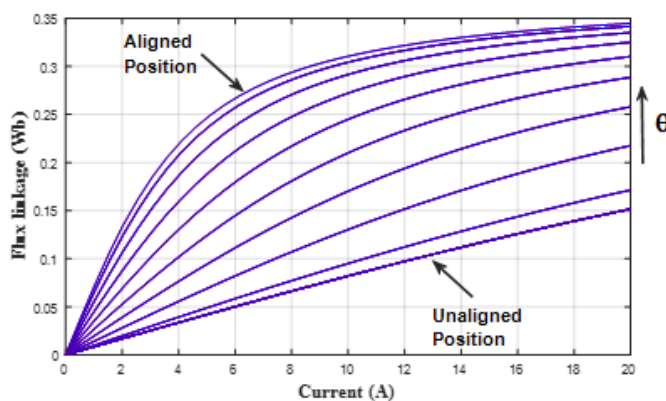


Figura 8 – Características magnéticas do MRC, em função da posição do rotor (θ)

Pelo que (16) pode ser formulado como:

$$dW_{fonte}(i_1, \theta) = i_1^2 \cdot dL_s(\theta) \quad (19)$$

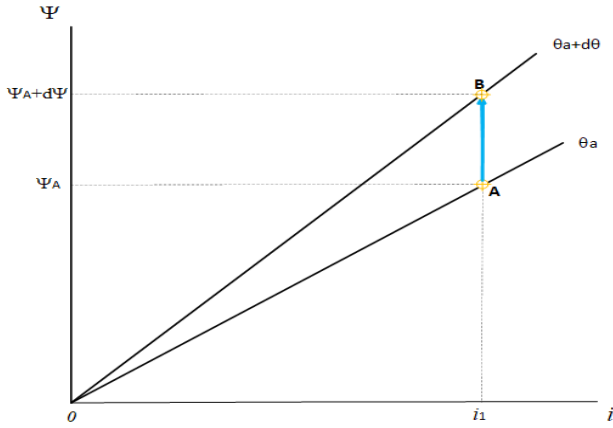


Figura 9 – Características magnéticas para θ_a e $\theta_a+d\theta$

Com base em (16), é evidente que a diferença entre as áreas dos retângulos $(0-\Psi_A+d\Psi-B-i_1)$ e $(0-\Psi_A-A-i_1)$ é igual a $dW_{fonte}(i_1, \theta)$. Por outro lado, a diferença entre as áreas das diagonais superiores dos dois retângulos, corresponde à variação da energia armazenada no campo magnético da fase ($dW_{mag}(i_1, \theta)$) entre as posições rotóricas θ_a e $\theta_a+d\theta$. Com base em (15), verifica-se que a diferença entre as áreas das diagonais inferiores dos retângulos corresponde a $dW_{mec}(i_1, \theta)$.

Atendendo à simetria das áreas superior e inferior dos retângulos, tem-se:

$$dW_{mag}(i_1, \theta) = dW_{mec}(i_1, \theta) \quad (20)$$

Pelo que a variação da energia absorvida pela fase, entre θ_a e θ_b , é decomposta em:

$$dW_{fonte}(i_1, \theta) = \underbrace{\frac{1}{2} i_1^2 \cdot dL_s(\theta)}_{dW_{mag}(i_1, \theta)} + \underbrace{\frac{1}{2} i_1^2 \cdot dL_s(\theta)}_{dW_{mec}(i_1, \theta)} \quad (21)$$

Esta aproximação linear permite obter uma expressão analítica geral, para o binário desenvolvido numa fase (T_f).

Com efeito, sendo:

$$T_f = \frac{dW_{mec}}{d\theta} \quad (22)$$

Vem que:

$$T_f = \frac{1}{2} \frac{dL_s(\theta)}{d\theta} \cdot i^2, \quad i = \text{constante} \quad (23)$$

De notar que esta expressão de T_f pode ser obtida através de (13) e (12), sabendo que $\Psi(i, \theta) = L_s(\theta) \cdot i$.

Esta expressão evidencia algumas das observações feitas na secção 3.1:

- A polaridade da corrente de fase não tem impacto no sentido do binário desenvolvido. Esta é uma característica importante, pois a operação do MRC pode ser feita com impulsos de corrente (e fluxo magnético) unidirecionais. Isto permite o uso de conversores e controladores mais simples do que os usados noutras máquinas;
- Binários não nulos (i.e., a conversão de energia) ocorrem quando $dL_s/d\theta \neq 0$; o modo como varia (crescente ou decrescente) condiciona o binário desenvolvido (motor ou frenante).

5. CONCLUSÕES

Sendo uma máquina simples, barata, robusta e com elevada tolerância a falhas, o MRC é claramente uma opção a considerar em diversas aplicações.

As principais desvantagens na sua operação são os binários pulsantes e o ruído, limitações que continuam a motivar a procura de soluções mais eficazes.

É também de destacar a necessidade de conversores de potência com arquiteturas distintas das máquinas convencionais, bem como métodos de controlo específicos. As características do circuito magnético do MRC fazem com que os modos de operação sejam fortemente não-lineares. Como tal, a sua modelização e controlo têm exigências particulares. De notar que sendo o MRC+conversor+controlador um sistema único e indissociável, a integração da máquina e do conversor, juntamente com o método de controlo usado, tornam este assunto ainda mais complexo.

Este artigo abordou apenas o MRC, procurando contribuir para uma introdução a este motor não convencional. Em oportunidades futuras incidir-se-á também nas características do conversor e nos tipos de controlo.

REFERÊNCIAS

- [1] P. Waide and C. U. Brunner, "Energy-efficiency policy opportunities for electric motor-driven systems," 2011.
- [2] 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.
- [3] I. Boldea, L. N. Tutelea, L. Parsa, and D. Dorrell, "Automotive electric propulsion systems with reduced or no permanent magnets: An overview," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 61, no. 10, pp. 5696-5711, 2014.
- [4] R. Vrenken et al., "Switched reluctance motor drive for full electric vehicles-part I: Analysis," in *Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, 2013 8th International Conference and Exhibition on, 2013, pp. 1-7: IEEE.
- [5] J.-W. Ahn, "Switched Reluctance Motor " Torque Control, Prof. Moulay Tahar Lamchich (Ed.), ISBN:978-953-307-428-3, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/torque-control/switched-reluctance-motor>, p. 53, 2011.
- [6] T. Ishikawa, Y. Hashimoto, and N. Kurita, "Optimum design of a switched reluctance motor fed by asymmetric bridge converter using experimental design method," *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 50, no. 2, pp. 781-784, 2014.
- [7] J. Ye and A. Emadi, "Power electronic converters for 12/8 switched reluctance motor drives: A comparative analysis," in *Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, 2014 IEEE, 2014, pp. 1-6: IEEE.
- [8] H. Hannoun, M. Hilaret, and C. Marchand, "Design of an SRM speed control strategy for a wide range of operating speeds," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 57, no. 9, pp. 2911-2921, 2010.
- [9] V. P. Vujicic, "Minimization of torque ripple and copper losses in switched reluctance drive," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 27, no. 1, pp. 388-399, 2012.
- [10] T. J. E. Miller, *Switched reluctance motors and their control*. Magna Physics Lebanon, OH, 1993.
- [11] R. Krishnan, *Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design, and applications*. CRC press, 2001.
- [12] J. Faiz, B. Ganji, C. Carstensen, and R. De Doncker, "Loss prediction in switched reluctance motors using finite element method," *European Transactions on Electrical Power*, vol. 19, no. 5, pp. 731-748, 2009.

COLABORARAM NESTA EDIÇÃO:**Aldo dos Anjos Faria Pestana Trindade****aldopestanatrindade@gmail.com**

Licenciado em Engenharia Eletrotécnica – Ramo Sistemas de Energia, pelo Instituto Superior de Engenharia de Coimbra (ISEC). Mestre em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia, pelo Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP) onde integrou o Grupo de Investigação em Engenharia do Conhecimento e Apoio à Decisão (GECAD) e desenvolveu um simulador para carregamento de carros elétricos ao abrigo da Dissertação de Mestrado. Atualmente, é Engenheiro de Manutenção e Sistemas da equipa operacional de Smart Grids na empresa EFACEC.

**António Augusto Araújo Gomes****aag@isep.ipp.pt**

Mestre (pré-bolonha) em Engenharia Eletrotécnica e Computadores, pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Professor do Instituto Superior de Engenharia do Porto desde 1999. Coordenador de Obras na CERBERUS - Engenharia de Segurança, entre 1997 e 1999. Prestação, para diversas empresas, de serviços de projeto de instalações elétricas, telecomunicações e segurança, formação, assessoria e consultadoria técnica.

Carlos Silva Lopes**José Carlos Quadrado****jcq@sc.ipp.pt**

Professor coordenador com agregação na área da engenharia eletrotécnica. Pró-Presidente para a internacionalização do Instituto Politécnico do Porto (P.Porto), Portugal. Bacharel em Energia e Sistemas de Potência, Licenciado em Engenharia Eletrotécnica, Mestre e Doutor em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores pelo Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa. Titular de uma agregação em Engenharia Eletrotécnica pela Universidade da Beira Interior. Membro sénior em várias sociedades de engenharia e em sociedades de ensino de engenharia em vários continentes, incluindo a Sociedade de Engenheiros de Instrumentação e Controlo, SICE (Japão), e o Instituto de Engenheiros Eletrotécnicos e Eletrónicos, IEEE (EUA). Também é professor visitante em várias universidades nos diferentes continentes. Tem mais de 200 publicações internacionais (incluindo revistas e capítulos de livros), várias patentes e alguns prémios internacionais de tecnologia e de impacto no ensino superior. Editor e editor-chefe de várias revistas técnicas. Desenvolveu vários projetos internacionais de educação em engenharia bem como projetos de engenharia nas áreas de energias renováveis (projeto de uma das maiores centrais fotovoltaicas nacionais, central fotovoltaica da Amareleja), sustentabilidade (impulsionador de pilhas de combustível em Portugal), veículos elétricos (líder científico do projeto VEECO, primeiro veículo elétrico comercial Português e respetiva fábrica) e de controlo inteligente (responsável pela introdução de segways in Portugal).

COLABORARAM NESTA EDIÇÃO:

**Manuel Carlos Malheiro de Carvalho Felgueiras****mcf@isep.ipp.pt**

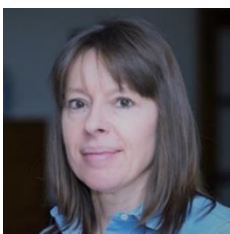
Licenciado e Doutoramento em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal. Iniciou a carreira profissional em 1987 como engenheiro de projeto para sistemas de automação. Mais tarde, foi convidado a supervisionar um laboratório de testes para verificar a compatibilidade das Normas Europeias em eletrodomésticos termoelétricos. Docente do Departamento de Engenharia Eletrotécnica do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP) Instituto Politécnico do Porto (P.Porto), Portugal, desde 1993. Investigador do CIETI-Laboris desde 2001. Áreas de interesses de investigação: incluem Projeto para Depuração e Teste de circuitos de Sinais Mistos, Experimentação Remota, e-learning, Fontes de Energia Renovável e Edifícios Inteligentes. Membro da Associação Portuguesa de Engenheiros e também do Global Online Laboratory Consortium (GOLC). Autor ou coautor de cerca de 80 artigos. Tem vindo a incluir o comité científico de algumas conferências internacionais.

**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 Electrotécnica 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-TECNOPOP.

**Sérgio Filipe Carvalho Ramos****scr@isep.ipp.pt**

Mestre em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, na Área Científica de Sistemas Elétricos de Energia, pelo Instituto Superior Técnico de Lisboa. Doutor em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores no Instituto Superior Técnico de Lisboa. Docente do Departamento de Engenharia Eletrotécnica do Instituto Superior de Engenharia do Porto desde 2001. Prestação, para diversas empresas, de serviços de projeto de instalações elétricas, telecomunicações e segurança, formação, assessoria e consultoria técnica. Investigador do GECAD (Grupo de Investigação em Engenharia do Conhecimento e Apoio à Decisão), do ISEP, desde 2002.

**Teresa Alexandra Ferreira Mourão Pinto Nogueira****tan@isep.ipp.pt**

Licenciatura e mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, área científica de Sistemas de Energia, pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Doutoramento em Engenharia Electrotécnica e Computadores, pela Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. Docente no Departamento de Engenharia Eletrotécnica, curso de Sistemas Elétricos de Energia do ISEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto. 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, qualidade de energia, produção de energia e eficiência energética

WEGeuro Indústria Eléctrica, S.A.

