

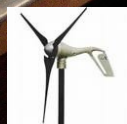
# NEUTRO À TERRA

Honrando o compromisso que temos convosco, voltamos à vossa presença com a publicação da 16ª Edição da nossa revista "Neutro à Terra". A terminar um ano que foi difícil, mas que a o mesmo tempo permitiu podermos viver sem a Troika, esperamos que por muito tempo, ou para sempre, a indústria eletrotécnica que não esteve imune às dificuldades que todos sentiram, manteve apesar de tudo uma dinâmica muito apreciável. No âmbito da nossa revista, esta dinâmica fez-se sentir fundamentalmente no interesse que algumas empresas do setor eletrotécnico manifestaram pelas nossas publicações, demonstrando vontade em colaborar connosco não só com a publicação de artigos técnicos, mas também colaborando no desenvolvimento de assuntos técnico-científicos em que vários dos autores da nossa revista se encontram envolvidos.

José António Beleza Carvalho, Professor Doutor



Máquinas e Veículos Elétricos  
Pag. 05



Produção, Transporte e Distribuição de Energia  
Pág. 23



Instalações Elétricas  
Pág. 37



Telecomunicações  
Pág. 51



Segurança  
Pág. 61



Gestão de Energia e Eficiência Energética  
Pág. 65



Automação, Gestão Técnica e Domótica  
Pág. 79



## Índice

### 03| Editorial

#### 05| Máquinas e veículos Elétricos

Requisitos do projeto elétrico de motores de indução para acionamento por variador de velocidade

Henrique Gonçalves

Types and construction of power transformers.

Manuel Bolotinha

Utilização de um veículo elétrico para abastecer uma residência no horário de ponta.

Horst Huldreish Ardila Hamada Marques, Fernando Maurício Dias

#### 23| Produção, Transporte e Distribuição de Energia

Impacto da introdução de baterias de armazenamento de energia em Smart Grids.

Diogo Soares, Judite Ferreira, José Puga

Previsão do diagrama de carga de subestações da REN utilizando redes neuronais.

Silvana Mafalda Rocha, Maria Teresa Costa, Manuel João Gonçalves

#### 37| Instalações Elétricas

Interruptores (mecânicos) para instalações elétricas fixas, domésticas e análogas.

António Augusto Araújo Gomes

Análise da Qualidade de Energia. Instalações elétricas com Miniprodução.

Carlos Silva, Roque Brandão

#### 51| Telecomunicações

ITD3 – Dimensionamento das redes de cabos coaxiais.

José Eduardo Pinho, Marco Rios da Silva, Sérgio Filipe Ramos

ITUR2 – Dimensionamento das redes de cabos coaxiais.

Sérgio Manuel Correia Vieira, Marco Rios da Silva, Sérgio Filipe Ramos

#### 61| Segurança

NFPA 850. Fire trace e os fogos em turbinas de vento.

Carlos Neves

#### 65| Gestão de Energia e Eficiência Energética

Tecnologias de produção de frio: Estudo e análise de medidas de eficiência energética.

Fernando Barrias, Teresa Nogueira, João Pinto

Redução de consumos na iluminação pública.

Pedro Caçote, Roque Brandão

#### 79| Automação, Gestão Técnica e Domótica

SMARTPANEL: Medição, controlo e monitorização num clique.

Luís Carvalho, Paulo Vaz

#### 85| Autores

## FICHA TÉCNICA

DIRETOR:

José António Beleza Carvalho, Doutor

SUBDIRETORES:

António Augusto Araújo Gomes, Eng.º  
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

Estimados leitores

Honrando o compromisso que temos convosco, voltamos à vossa presença com a publicação da 16ª Edição da nossa revista “Neutro à Terra”. A terminar um ano que foi difícil, mas que a o mesmo tempo permitiu podermos viver sem a Troika, esperamos que por muito tempo, ou para sempre, a indústria eletrotécnica que não esteve imune às dificuldades que todos sentiram, manteve a pesada carga da dinâmica muito apreciável. No âmbito da nossa revista, esta dinâmica fez-se sentir fundamentalmente no interesse que algumas empresas do setor eletrotécnico manifestaram pelas nossas publicações, demonstrando vontade de colaborar conosco não só com a publicação de artigos técnicos, mas também colaborando no desenvolvimento de assuntos técnico-científicos em que vários dos autores da nossa revista se encontram envolvidos.

Um facto importante, que se deve destacar, é o crescimento exponencial que se tem verificado da procura e visualização da revista “Neutro à Terra” um pouco por todo o mundo, destacando-se nestes casos os Estados Unidos. Assim, mantemos o compromisso de publicar um artigo de natureza mais científica em língua inglesa, nesta edição um interessante artigo sobre Transformadores, “Types and Construction of Power Transformers”, da autoria do Engenheiro Manuel Bolotinha.

Ainda num âmbito mais científico, destaca-se a publicação do artigo “Requisitos do Projeto Elétrico de Motores de Indução para Acionamento por Variador de Velocidade”, da autoria do Doutor Henrique Gonçalves, um investigador sobre o assunto e que também exerce as suas atividades na WEG – Euro Indústria Elétrica, SA.

Nesta edição da revista merecem particular destaque vários assuntos que corresponderam a trabalhos de investigação realizados no ISEP, muitos deles em colaboração com várias Empresas, tendo vários deles correspondido a trabalhos realizados no âmbito de dissertações de mestrado.

Destacam-se ainda a publicação de outros interessantes artigos no âmbito das Instalações Elétricas (Interruptores mecânicos para instalações elétricas fixas, domésticas e análogas), no âmbito das Telecomunicações (ITUR2 – Dimensionamento das redes de cabos coaxiais), no âmbito da Segurança (NFPA 850. Fire trace e os fogos em turbinas de vento) e no âmbito da Gestão de Energia e da Eficiência Energética, com um artigo sobre tecnologias de produção de frio e outros sobre redução de consumos de energia elétrica na iluminação pública.

Estando certo que esta edição da revista “Neutro à Terra” apresenta artigos de elevado nível técnico e científico, como elevado interesse para todos os profissionais do setor eletrotécnico, satisfazendo assim novamente as expectativas dos nossos leitores, apresento os meus cordiais cumprimentos e desejo a todos um Bom Ano de 2016.

Porto, 29 dezembro de 2015

José António Beleza Carvalho

### Visualização de páginas por país

---

Entrada	Visualizações de páginas
Portugal	15729
Estados Unidos	2353
Brasil	1070
Alemanha	337
Angola	142
Rússia	128
Reino Unido	127
França	80
Andorra	75
Espanha	73



## REQUISITOS DO PROJETO ELÉTRICO DE MOTORES DE INDUÇÃO PARA A CIONAMENTO POR VARIADOR DE VELOCIDADE

### Resumo

O acionamento de motores elétricos de indução por inversores estáticos de frequência (comercialmente denominados variadores de velocidade) é uma solução já amplamente utilizada na indústria. Contudo, sendo, há ainda muito para ser, feito, estudado e compreendido principalmente ao nível da interação entre o variador e o motor, para que tais aplicações sejam efetivamente vantajosas em termos de eficiência energética e atrativas em termos de custo. Neste artigo são expostos os principais desafios que são colocados aos fabricantes de motores e que resultam da alimentação dos mesmos por uma fonte de tensão PWM com elevadas frequências de comutação. São apresentadas algumas considerações normativas e apresentadas algumas soluções comumente utilizadas para mitigar os problemas sentidos.

### 1. Introdução

De todos os tipos de motores de indução, o mais usado, quer no setor industrial quer no setor comercial.

O seu baixo custo, uma simples e robusta construção, a elevada fiabilidade, a reduzida manutenção e os níveis de eficiência conseguidos com as atuais tecnologias de controlo fazem dele um elemento de conversão eletromecânica muito apetecível. Contudo, é já hoje unanimemente aceite que o desempenho do motor de indução é diferente quando este é alimentado por um conversor estático de potência (variador de velocidade), ou quando alimentado diretamente pela tensão da rede. Em aplicações onde o desempenho exigido não é elevado a utilização de motores com uma construção padrão tem resultados satisfatórios, mas quando é requerido elevado desempenho é mais apropriado um motor com uma concepção específica que vai atenuar as restrições construtivas associadas às aplicações de velocidade constante.

Os variadores de velocidade podem utilizar um controlo escalar ou vetorial. Em ambos os casos a tensão que geram é do tipo PWM (Pulse Width Modulation) com um conteúdo harmónico e gradientes de tensão cujos efeitos no motor assumem grande relevância e que necessitam de ser considerados no projeto do motor. Os efeitos dos elevados gradientes de tensão são particularmente importantes quando o motor é alimentado por cabos longos, pois a impedância dos cabos de alimentação reduz o gradiente de tensão aos terminais do motor mas cria aí um efeito de onda amortecida onde as sobretensões podem servir várias vezes superiores à tensão nominal, reduzindo a vida útil do isolamento dos enrolamentos do motor. Para mitigar este problema alguns autores defendem a utilização de filtros [1]. Os harmónicos de tensão e corrente apesar de não contribuírem para um aumento do binário do motor, uma vez que não aumentam o fluxo fundamental no entreferro que gira à velocidade síncrona, aumentam a perda no ferro e no cobre, respetivamente [2,3,4]. Para agravar o problema o acionamento a velocidades mais baixas reduz a ventilação do motor. A conjugação destes dois fatores trás problemas adicionais ao nível do isolamento dos enrolamentos, podendo mesmo ser excedido o limite de temperatura definido pela classe de isolamento com que o motor foi construído. Este aumento da temperatura pode não provocar danos imediatos mas provocará, com certeza, uma diminuição do tempo de vida do motor. Para maiores detalhes atuais isolantes uma aumento da temperatura de 10°C resultará numa redução em 50% do tempo de vida esperado do mesmo [5].

Para além dos efeitos anteriormente referidos, podem aparecer outros efeitos, que não se devem especificamente aos harmónicos, mas que são também relevantes se não forem desprezados, tais como a circulação de corrente pelos enrolamentos [6] e o aumento dos níveis de vibração e ruído [7,8].

## 2. Considerações Normativas

Analogamente a vários outros aspectos construtivos, também as condições de acionamento do motor de indução por variador de velocidade estão normalizadas.

Os principais organismos normalizadores internacionais dedicam vários capítulos das suas normas de máquinas elétricas rotativas inteiramente a esta temática, o que demonstra também a importância do tema. Assim, destacam-se:

- IEC: 60034-17: Rotating Electrical Machines- Cage induction motors when fed from converters - application guide;
- IEC 60034-25: Rotating Electrical Machines- Guide for the design and performance of cage induction motors specifically designed for converter supply;
- NEMAMG1-Parte 30: Application considerations for constant speed motors used on a sinusoidal bus with harmonic content and general purpose motors used with adjustable-voltage or adjustable-frequency controls or both;
- NEMSMG1-Parte 31: Definite purpose inverter-fed polyphase motor.

### 2.1. Conteúdo Harmônico

Os valores limitados de distorção harmônica da tensão gerada pelo variador de velocidade, e consequentemente da corrente, não estão normalizados. No entanto, as normas consideram o aumento das perdas do motor devido ao uso do variador.

A norma IEC 60034-17 exemplifica o aumento das perdas do motor devido ao uso de um variador com o caso prático de um motor com uma carga de 315, com valores nominais de binário e velocidade, apresentando para estas condições de perda 15% maiores, sendo a maior contribuição das perdas no ferro com 12% desses quinze. No capítulo IEC 60034-17 é comparado o acionamento à carga nominal e em vazio de um motor de 37 kW alimentado com tensão de variação entre 20 e 100 Hz, sendo apontada a solução para mitigar o aumento de perdas verificado.

ANEMAMG1-Parte 30 considera uma redução percentual do binário do motor (derating factor) para evitar o excesso de aquecimento de um motor alimentado por um inversor, que estará sujeito a correntes harmônicas decorrentes do conteúdo harmônico da tensão PWM.

### 2.2. Gradiente de tensão

As definições de tempo de subida (rise time) são diferentes na norma IEC e NEMA, o que gera divergências de interpretação e conflitos entre fabricantes e consumidores.

Segundo a IEC 60034-25 o tempo de subida corresponde ao tempo que a tensão leva para subir de 10 a 90% da tensão do barramento DC. Pelo critério NEMA deve-se tomar o valor da tensão do barramento, enquanto que pelo IEC deve-se usar o valor de pico da tensão ao término do motor. Este último leva em consideração o efeito do cabo de alimentação, podendo por isso ser mais preciso, mas também mais difícil de ser previsto ou estimado a priori.

### 2.3. Isolamento dos enrolamentos

Relativamente aos efeitos sobre o isolamento dos enrolamentos dos motores, tanto a IEC 60034 como a NEMA MG1 apresentam tabelas e gráficos com os valores da tensão de pico e tempo de subida da tensão (rise time) que os isolamentos devem suportar. Para motores com tensões de alimentação mais elevadas sugerem o reforço do isolamento e a instalação de filtros na saída do inversor para limitar as tensões de pico. Garantindo que a tensão de saída do inversor não exceda os limites apresentados na norma assume-se que não haverá significativa redução na vida útil do isolamento por stress de tensão.

### 2.4. Correntes de circulação pelos enrolamentos

Os problemas de tensão/corrente induzida no eixo são agravados pela forma de onda da tensão PWM gerada pelos variadores de velocidade, devido a estas serem tendencialmente desequilibradas e portarem componentes de alta frequência [9].

AIEC60034 recomenda o uso de filtros para redução da componente de sequência zero, a redução do  $V/dt$  e o isolamento dos rolamentos e sem motores com carcaças acima da 315 e ou potências superiores a 400 kW. Recomenda ainda a utilização de escovas de aterramento no eixo.

ANEMAMG1 refere a maior ocorrência de correntes de circulação nos rolamentos e sem motores com carcaças mais pequenas, menores que 500. Sugere o isolamento de ambos os rolamentos, ou alternativamente a utilização de escovas de aterramento no eixo para desviar as correntes dos rolamentos.

### 3. Considerações Relativas aos Harmónicos

Tal como referido anteriormente o motor de indução acionado por um variador de velocidade recebe nos seus terminais uma tensão PWM, pelo que estará sujeito a harmónicos que afetam o seu desempenho, nomeadamente, um aumento de perdas e de temperatura de funcionamento. A influência do variador sobre o motor depende de uma série de fatores relacionados como controlo, tais como a frequência de comutação, a largura

efetiva dos pulsos, o número de pulsos, entre outros.

A Figura 1 ilustra a forma de onda típica da tensão composta e respetivo espectro de frequências de uma alimentação PWM. É visível o elevado conteúdo harmónico, com componentes até cerca dos 50 kHz.

Estas componentes harmónicas não contribuem para a produção de binário motor, uma vez que não aumentam o fluxo fundamental no entreferro, que gira à velocidade síncrona. Contudo, são responsáveis por um aumento das perdas, uma vez que para frequências mais elevadas as perdas por histerese aumentam, assim como o aumento da saturação efetiva do núcleo. Concomitantemente, as correntes harmónicas aumentam as perdas por efeito Joule nos condutores.

A operação do motor a velocidades de rotação mais baixas promove uma redução na ventilação e consequente perda de transferência de calor (em motores autoventilados), contribuindo também para a elevação da temperatura de estabilização térmica.

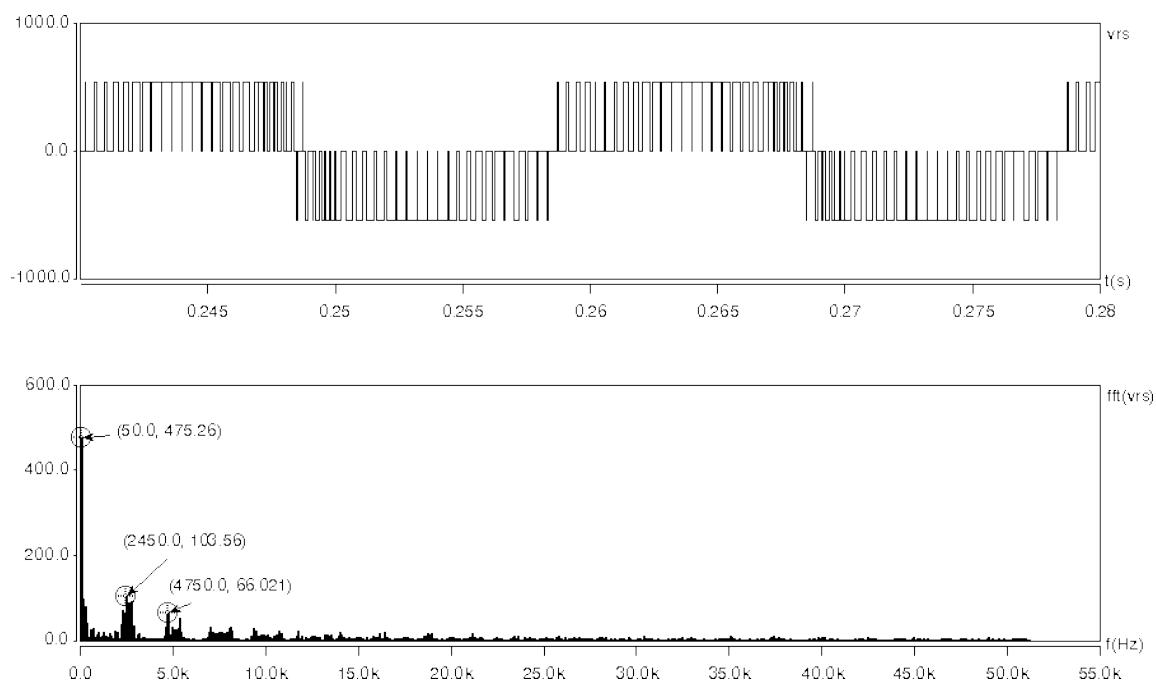


Figura 1. Tensão composta e respetivo espectro de frequências

Portanto, quando a operação com variador de velocidade, e por efeito da influência conjunta dos fatores supracitados, devem ser consideradas medidas para mitigação do sobreaquecimento do motor, nomeadamente:

- Redução do binário nominal (sobredimensionamento do motor);
- Utilização de um sistema de ventilação independente;
- Utilização do “fluxo ótimo” (solução patenteada pela WEG [4]).

Na Figura 2 é apresentada uma curva típica de sobredimensionamento aplicável a motores de produção em série com projeto padrão..

Na Tabela 1 são apresentadas algumas medidas, genéricas, para mitigação do conteúdo harmónico da tensão gerada por variadores de velocidade.

Tabela 1. Métodos de redução de harmónicos da tensão gerada por variadores de velocidade (fonte [10])

Método de redução de harmónicos	Características da solução
Instalação de filtros passivos de saída	Aumento do custo da instalação
	Restrições para operação nos modos vetoriais
	Queda de tensão (redução da potência do motor)
Utilização de inversor com mais níveis	Aumento de custos
	Redução de fiabilidade do inversor
	Aumento da complexidade do controlo
Melhoria na qualidade da modulação PWM	Space Vector Modulation
	Não aumenta custos
	Melhoria no controle de tensão
	Maior rendimento do conjunto (motor + inversor)
Aumento da frequência de comutação	Redução do rendimento do inversor (aumento das perdas por comutação)
	Aumento das correntes de fuga para a terra

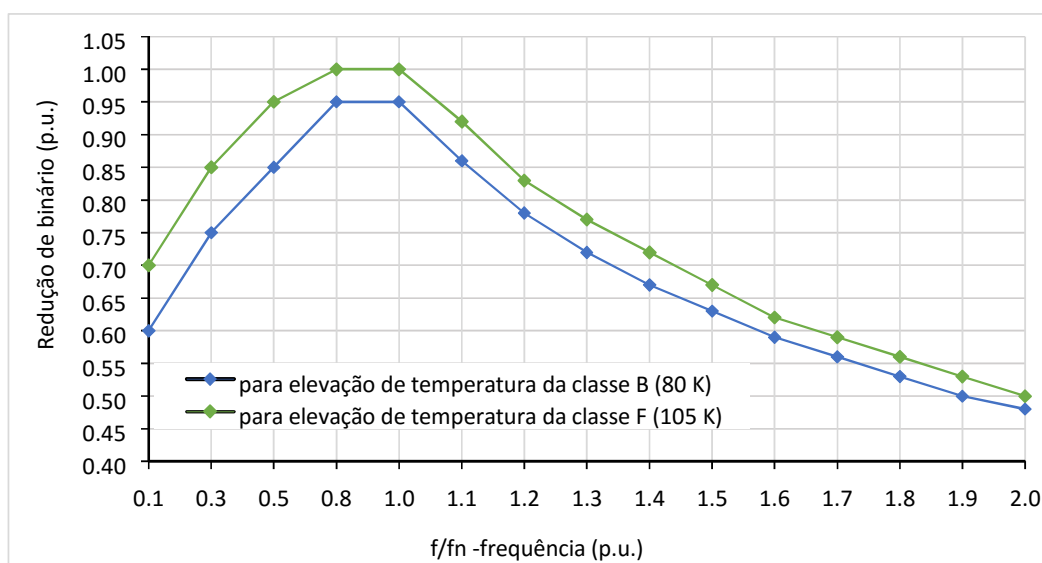


Figura 2. Curva típica de sobredimensionamento aplicável a motores de produção em série com projeto padrão



#### 4. Considerações Relativas ao Isolamento dos Enrolamentos do Motor

A evolução dos semicondutores de potência tem levado à criação de transistores de potência mais eficientes e mais rápidos. Consequentemente, os conversores eletrônicos de potência operam a frequências de comutação superiores e com vantagens. Contudo, do ponto de vista do motor acarreta algumas consequências indesejáveis, tais como o aumento da emissão eletromagnética e a provável incidência de picos de tensão, bem como o elevado dos valores de  $V/dt$  (taxa de variação da tensão no tempo) a o término dos motores alimentados por variadores de velocidade.

Dependendo das características do controle, da modulação PWM adotada, da impedância do cabo do motor, podem-se gerar sobreensões, repetitivas, a o término do motor. Estes pulsos de tensão podem reduzir a vida do motor pela degradação do seu sistema de isolamento.

O cabo do motor podem ser considerados um circuito ressonante excitado pelos pulsos retangulares de tensão modulada gerada pelo variador de velocidade. Assim, as sobreensões são determinadas, basicamente, pelos seguintes fatores: tempo de subida dos pulsos de tensão, tempo mínimo entre pulsos, comprimento do cabo de ligação do motor, e frequência de comutação do variador.

##### 4.1. Tempo de Subida

Para subir do valor mínimo até o valor máximo, a tensão PWM requer um certo tempo, denominado de tempo de subida ("risetime"). Os avanços no desenvolvimento dos semicondutores de potência estão a tornar esse tempo cada vez menor e com grande repetibilidade, resultado do crescimento da frequência de comutação dos mesmos. Como consequência a(s) primeira(s) espira(s) da primeira bobina de cada fase fica(m) submetida(s) a um valor de tensão elevado e repetitivo, originando-se uma maior diferença de potencial entre espiras o que degrada mais rapidamente o isolamento dos enrolamentos do motor, pelo que este deve possuir características dielétricas reforçadas.

Devido às características indutivas e capacitivas dos enrolamentos do motor, ocorre um amortecimento do pulso nas bobinas subsequentes.

##### 4.2. Comprimento do Cabo

Em muitas aplicações industriais o conversor e o motor têm de estar separados, algumas dezenas ou mesmo centenas de metros. Devido à natureza distribuída da impedância dos cabos, especialmente os mais longos, estes podem apresentar, em função do tempo de subida do pulso de tensão, da frequência de comutação e do seu comprimento, um comportamento igual a o de uma linha de transmissão onde surgem ondas de tensão incidentes e refletidas [11].

Os pulsos de tensão deslocam-se a uma velocidade aproximadamente igual a metade da velocidade da luz ( $150\text{--}200\text{ m}/\mu\text{s}$ ). Se um pulso de tensão demorar mais do que um terço do tempo de subida a percorrer o cabo, desde o variador ao motor, ocorrerá uma reflexão total a o término da mesma amplitude de tensão ou irá aproximadamente duplicar [11].

É importante salientar que como cada vez menores tempos de subida dos conversores modernos, um comprimento de cabo relativamente pequeno pode já apresentar este comportamento. De acordo com [12] as sobreensões começam a aparecer em cabos a partir de, aproximadamente, 3 m podendo chegar a 2 vezes o valor da tensão da fonte para comprimentos de cabo de 15 m, e a valores superiores a esse, para comprimentos de cabo acima de 120 m.

Na Figura 3 pode-se observar o valor das sobreensões de um cabo com 30 m de comprimento e uma impedância característica por metro:  $R_c = 20\text{ m}\Omega/\text{m}$ ,  $L_c = 1.18\text{ }\mu\text{H}/\text{m}$ ,  $C_c = 32.8\text{ pF}/\text{m}$ , alimentado por um pulso de tensão com uma amplitude de 600 V e um tempo de subida  $t_r = 0.1\text{ }\mu\text{s}$ .

Confirma-se o pressuposto inicial de que a amplitude da tensão irá aproximadamente duplicar.

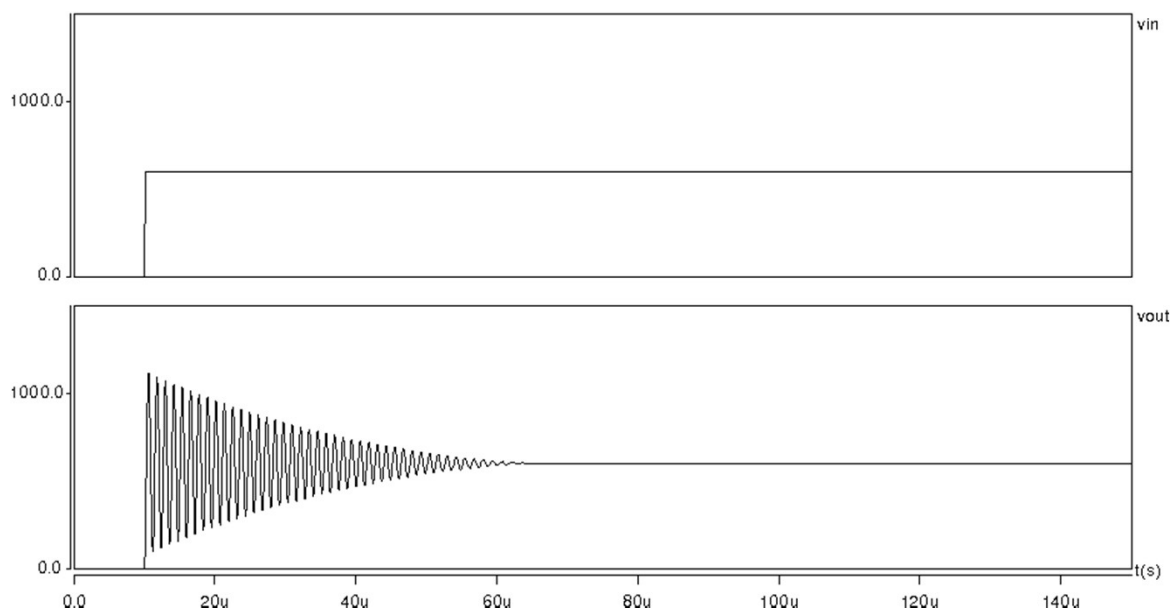


Figura 3. Tensão de entrada e de saída de um cabo elétrico alimentado com um pulso de tensão

Por forma a minimizar estas sobretensões podem ser implementados diferentes tipos de soluções, nomeadamente a introdução de uma bobina em série como variador de motor. Esta bobina limita a corrente, filtra a tensão PWM e reduz o ruído elétrico. Contudo, dada a elevada indutância necessária, afeta o desempenho dinâmico do conjunto, é volumosa e cara comparativamente com outras soluções.

Uma segunda solução é o já referido reforço do isolamento dos enrolamentos do motor e também a implementação de filtragem [13]. A filtragem pode utilizar diversas topologias e ser implementada do lado do variador ou do motor.

#### 4.3. Efeito Corona

Dependendo da qualidade/homogeneidade do sistema de impregnação, o material impregnante pode conter bolhas de ar (vazios), que podem levar, em conjugação com as sobretensões, ao aparecimento de Descargas Parciais que por sua vez podem levar ao rompimento do isolamento entre espiras. Um fenómeno complexo decorrente do efeito Corona. Este efeito resulta do campo elétrico criado pela diferença de potencial entre condutores adjacentes.

Se for estabelecido um campo elétrico suficientemente alto (mas abaixo da tensão de rutura do material isolante), a rigidez dielétrica do ar pode ser rompida, e o oxigénio ( $O_2$ ) é ionizado e o ozono ( $O_3$ ). O ozono é altamente agressivo e ataca os componentes orgânicos do isolamento dos enrolamentos, deteriorando-os. Para que isso ocorra, o potencial nos condutores precisa exceder um valor limiar denominado CIV (Corona Inception Voltage), que é a rigidez dielétrica do ar "local" (dentro da bolha). O CIV depende do projeto do enrolamento, do tipo de isolamento, da temperatura, das características superficiais e da humidade. A erosão resulta na diminuição da espessura do material isolante, acarretando progressivas perdas de propriedades dielétricas, que acabam por levar à falha do isolamento.

#### 4.4. Tempo Mínimo entre Pulsos Consecutivos e Frequência de Comutação

Tal como no modo de modulação PWM sugere, o valor eficaz da tensão que é aplicada ao motor é controlado por variação da largura dos pulsos e pelo tempo entre eles. Acontece porém que o efeito das sobretensões é agravado quando o tempo entre os pulsos é mínimo. Condição que ocorre durante regimes transitórios, como aceleração e desaceleração do motor.

Se o tempo entre pulsos for menor que 3 vezes o período ressonante do cabo (tipicamente  $0,2 \mu s$  para cabos industriais), ocorrerá um acréscimo na sobre-tensão.

Associada aos efeitos originados pelo tempo de subida e tempo mínimo entre pulsos consecutivos, está a frequência com que os mesmos são produzidos. Atualmente são já comuns frequências de comutação na ordem dos 20 kHz. Porém, há estudos que indicam que quanto maior for a frequência de comutação mais rápida será a degradação do isolamento dos enrolamentos. A relação de dependência entre o tempo de vida útil do isolamento e a frequência de comutação não é uma relação simples.

Resultados experimentais mostram que para frequências de comutação menores, ou iguais, a 5 kHz a probabilidade de falha do isolamento é diretamente proporcional à frequência de comutação, enquanto que para frequências de comutação maiores que 5 kHz a probabilidade de falha do isolamento é diretamente proporcional ao quadrado da frequência de comutação.

Por outro lado, o aumento da frequência de comutação melhora o conteúdo harmónico da tensão injetada no motor, tendendo, dessa forma, a melhorar o desempenho do motor em termos de temperatura a ruído.

##### 5. Corrente de Circulação nos Rolamentos

O problema da tensão/corrente induzida no eixo gravou-se como advento dos variadores de velocidade. Assim, a vetorial instantânea das três fases da tensão PWM da saída do variador de velocidade não é igual a zero, mas igual a um potencial elétrico de alta frequência relativamente a um ponto comum de referência, usualmente a terra ou o polo negativo do barramento DC, denominada, por isso, de tensão de modo comum. Havendo capacidades parasitas do motor para a terra, ocorre a circulação de uma corrente de modo comum indesejada que atravessa o rotor, eixo, rolamento e também a terra.

Portanto, as causas da tensão induzida no eixo devem ser as

variáveis de velocidade do motor, a saber, a inércia do motor (por exemplo, desbalanceamento eletromagnético causado por assimetria) e que também provoca a circulação de corrente nos rolamentos.

Estas correntes desgastam as esferas e a pista dos rolamentos, dando origem a pequenos furos, que começam a sobrepor-se, e que com o passar do tempo promovem a formação de sulcos (Figura 5), reduzindo a vida útil dos rolamentos e podendo mesmo provocar a falha do motor.

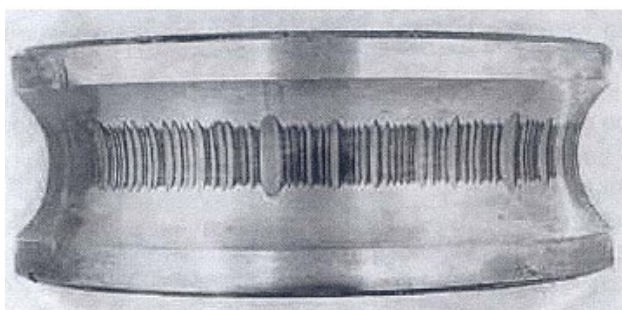


Figura 5. Pista de rolamento danificada devido à circulação de corrente elétrica (fonte [4]).

Estes efeitos podem ser mitigados utilizando rolamentos isolados e introduzindo escovas de aterramento entre o rotor e a carcaça do motor por intermédio de uma escova deslizante de grafite.

##### 6. Conclusões

O rápido desenvolvimento da eletrônica de potência tem permitido que os motores de indução, tradicionalmente acionados a velocidade constante, sejam utilizados com sucesso em aplicações de velocidade variável. Nestes casos, o motor é alimentado por um variador de velocidade.

Estes sistemas apresentam grandes vantagens tanto energéticas quanto económicas, quando comparados com outras soluções existentes para aplicações industriais de velocidade variável. No entanto, o uso do variador traz consequências para o motor, fazendo com que os fabricantes de motores precisem de estratégias.

## Referências

- [1] C. Choochuan., "A survey of output filter topologies to minimize the impact of PWM inverter waveform on three-phase AC induction motors," em 7th International Power Engineering Conference- IPEC 2005, 2005.
- [2] E. N. H. a. H. Roehrdanz, "Losses in three-phase induction machines fed by PWM converter," IEEE Transaction on Energy, 2001.
- [3] T. C. G. a. A. C. S. Carlos A. Hernandez-Aramburo, "Estimating rotational iron losses in an induction machine," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 39, 2003.
- [4] H. N. K. - H. H. J. - P. H. a. D. - H. H. Jeong-Jong Lee, "Loss distribution of three-phase induction motor fed by pulsewidth-modulated inverter," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 40, 2004.
- [5] A. M. J. S. S. B. a. G. L. S. Mike Melfi, "Effect of surge voltage rise time on the insulation of low-voltage machines fed by PWM converters," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 34, p. 766–775, 1998.
- [6] S. Chen, T. Lipoe D. Novotny, "Circulating type motor bearing current in inverter drives," em Thirty-First IAS Annual Meeting, IAS'96, 1996.
- [7] S. Ueda, K. Honda, T. Ikimi, M. Hombue A. Ueda, "Magnetic noise reduction technique for an AC motor driven by a PWM inverter," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 6, pp. 470–475, Jul 1991.
- [8] N. Hashemi, R. Lisner e D. Holmes, "Acoustic noise reduction for an inverter-fed three-phase induction motor," em 39th IAS Annual Meeting Industry Applications Conference, 2004.
- [9] WEG Equipamentos Elétricos S.A., "Guia Técnico- Motores de indução alimentados por inversores de frequência PWM," Jaraguá do Sul, 2009.
- [10] H. G. G. M. Waldiberto de Lima Pires, "Minimização de Perdas em Motores de Indução Alimentados Por Conversores de Frequência – Solução Fluxo Ótimo," Jaraguá do Sul - Barsil, 2006.
- [11] P. E. a. W. G. A. von Jouanne, "Application issues for PWM adjustable speed motor drives," IEEE Industry Application Magazine, 1996.
- [12] NEMA Standards Publication, "Application Guide for AC Adjustable Speed Drive Systems," National Electrical Manufacturers Association, Rosslyn, 2007.
- [13] P. T. Finlayson, "Output filters for PWM drives with induction motors," IEEE Industry Applications Magazine, p. 46–52, 1998.

## Notas soltas:

Grandezas físicas		Unidade	
Denominação	Símbolo	Denominação	Símbolo
Capacidade	C	Farad	F
Carga elétrica	Q	Coulomb	C
Comprimento	L	metro	m
Corrente elétrica	I	Ampère	A
Densidade de corrente	J	Ampère/m <sup>2</sup>	A/m <sup>2</sup>
Energia	E	Joule	J
Fluxo magnético	f	Weber	Wb
Força	F	Newton	N
Frequência	F	Hertz	Hz
Impedância	Z	Ohm	Ω
Indutância	L	Henry	H
Potência elétrica	P	Watt	W
Pressão	P	Pascal	Pa
Resistência elétrica	R	Ohm	Ω
Resistividade	r	Ohm x metro	Ω x m
Tensão elétrica	V	Volt	V



## COLABORARAM NESTA EDIÇÃO :



António Augusto Araújo Gomes

aag@isep.ipp.pt

Mestre 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 consultoria técnica.



Carlos André Rodrigues da Silva

1030399@isep.ipp.pt

Mestre em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia pelo Instituto Superior de Engenharia do Porto.

Diretor Técnico de Projeto e Gestão de Centrais Fotovoltaicas da empresa CAPA.



Carlos Valbom Neves

c.neves@tecnisis.pt

Com formação em Engenharia Eletrotécnica, pelo Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, e licenciatura em Gestão de Empresas, tendo colaborado como FESTO, PHILIPS, ABB–Asea Brown Boveri, Endress & Hauser e TECNISIS. É especialista em Instrumentação, Controlo de Processos Industriais e em Sistemas de Aquecimento e Tração Elétrica. Tem cerca de 25 anos de experiência adquirida em centenas de projetos executados nestas áreas. Vive no Estoril, em Portugal.

### TECNISIS

Tecnisis é especialista em Sistemas de extinção automática de incêndios, em instrumentação industrial, em sistemas para zonas perigosas ATEX e em medição de visibilidade e deteção de incêndios em túneis rodoviários. A Tecnisis tem 25 anos de atividade em Portugal com milhares de aplicações em todos os segmentos da indústria.  
www.tecnisis.pt



Diogo Filipe Pinto Dantas Soares

diogodantas.soares@gmail.com

Licenciado e Mestre em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia, pelo Instituto Superior de Engenharia do Porto.

Estagiário na EDPP Produção, Direção e Gestão de Obras – Gestão de Obras e Equipamentos (DGO–GOEQ), desde Junho 2015.



Fernando Jorge Justo Taveira Barrias

1070157@isep.ipp.pt

Licenciado e Mestre em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia, pelo Instituto Superior de Engenharia do Porto.

Realizou um estágio curricular na empresa SKK – Refrigeração e Climatização, Lda sobre a temática da eficiência energética nos sistemas de refrigeração, resultando na dissertação de mestrado.



Fernando Mauricio Teixeira De Sousa Dias

fmd@isep.ipp.pt

Doutor em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, na Área Científica de Sistemas Elétricos de Energia. Título de Especialista na área de Eletricidade e Energia.

Professor Adjunto no Instituto Superior de Engenharia do Porto, departamento de Engenharia Eletrotécnica.

Diretor da Revista ELEVAR e da área de equipamentos de elevação. Membro da Comissão Técnica CT-63 Ascensores e Montagem de Cargas. Presidente da Assembleia Geral da ONG Engenho & Obra.

## COLABORARAM NESTA EDIÇÃO :

Henrique Nuno Baptista Gonçalves

ngoncalves@gmail.com

Doutoramento em Engenharia Eletrotécnica de Computadores.

Desde 2015 até à data: Engenheiro – Pesquisa, Desenvolvimento e Certificação, WEGeuro-Indústria Eléctrica, S.A.. De 2009 a 2014, Investigador Auxiliar no Grupo de Eletrónica de Potência e Energia – Centro Agoritm – Universidade do Minho. De 2006 a 2009, Professor de Informática, Ministério da Educação – Direção Regional de Educação do Norte. De 1999 a 2006, Docente no Instituto Politécnico de Bragança – Departamento de Eletrotécnica. De 1998 a 1999, Investigadora na EFACEC Universal Motors S.A. – Departamento de Estudos Estratégicos.

Horst Huldreish Ardila Hamada Marques

ho\_huldreish@hotmail.com



Brasileiro, ingressou entre os 5 primeiros alunos no curso técnico de mecânica em 2008, na Escola Técnica Estadual Prof. Basílio de Godoy. Formado com bolsa de estudos integral em Engenharia Elétrica – Sistemas de Potência, Energia e Automação pela Universidade Presbiteriana Mackenzie, UPM, ganhou prêmios pela 3ª melhor média geral do curso e 3º melhor Trabalho de Conclusão de Curso dos formandos daquele semestre. Mestre em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia pelo Instituto Superior de Engenharia do Porto, ISEP, foi o 1º aluno deste curso a concluir o acordo bilateral de Dupla Titulação celebrado entre UPM e ISEP, fazendo uma dissertação conjunta com orientadores brasileiro e português. Atualmente, trabalha como Engenheiro de Compras na Siemens LTDA."

João Paulo Pinto

jpp@skk.pt



Licenciado em Eng. Mecânica na FEUP, tem um DES pelo Institut Français du Pétrole, um MBA pelo então Instituto Superior de Estudos Empresariais da Universidade do Porto e tendo realizado várias formações executivas em diversas escolas, em particular, em Harvard, MIT e Insead. Depois de ter sido consultor na Accenture, esteve 18 anos no Grupo Sonae onde foi administrador de várias empresas, em vários setores de atividade e em vários países. Em Março de 2014 fundou a SKK, Lda empresa da qual é CEO

José Eduardo Mendes Saavedra De Pinho

1060398@isep.ipp.pt



Frequentou a Licenciatura em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia (LEE-SEE) no Instituto Superior de Engenharia do Porto – Instituto Politécnico do Porto (ISEP/IPP), tendo completado o grau em 2014/2015. As suas áreas de interesse estão vocacionadas para as telecomunicações, bem como o energias renováveis.

José Ricardo Teixeira Puga

jtp@isep.ipp.pt



Doutoramento em Engenharia Eletrotécnica de Computadores.

Professor da unidade curricular de Eletromagnetismo, no Instituto Superior de Engenharia do Porto. Detém ainda responsabilidades de vice-diretor da Licenciatura de Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia e de Vice-Diretor do Centro de Prestação de Serviços – TID.

Luis Ricardo Matos Cunha Vianade Carvalho

luiscunhacarvalho@gmail.com



Licenciado em Engenharia Eletrotécnica de Computadores pela Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, e Mestre em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia pelo Instituto Superior de Engenharia do Porto. Desde Outubro de 2015 que desempenha funções na Schneider Electric Portugal, como Field Sales Specialist Engineer.

## COLABORARAM NESTA EDIÇÃO :



Manuel Bolotinha

manuelbolotinha@gmail.com

Licenciou-se em 1974 em Engenharia Eletrotécnica no Instituto Superior Técnico, onde foi Professor Assistente.

Tem desenvolvido a sua atividade profissional nas áreas do projeto, fiscalização de obra e gestão de contratos de empreitadas de instalações elétricas, não só em Portugal, mas também em África, na Ásia e na América do Sul.

Membro Sênior da Ordem dos Engenheiros e Membro da Cigré, é também Formador Profissional, credenciado pelo IEPF, conduzindo cursos de formação, de cujos manuais é autor, em Portugal, África e Médio Oriente.



Manuel João Dias Gonçalves

mdg@isep.ipp.pt

Licenciado em Engenharia Eletrotécnica de Computadores, pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

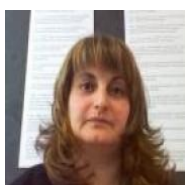
Exerce funções docentes no Instituto Superior de Engenharia, na categoria de Professor Adjunto, no Departamento de Engenharia Eletrotécnica.



Marco Aurélio Rios da Silva

masi@isep.ipp.pt

Mestre em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia (MEESEE) no Instituto Superior de Engenharia do Porto – Instituto Politécnico do Porto (ISEP/IPP). Desde outubro de 2007 que desempenha funções no GECAD, como investigador. As suas áreas de investigação são relacionadas com gestão dos recursos energéticos distribuídos.



Maria Judite Madureira da Silva Ferreira

mju@isep.ipp.pt

Doutoramento em Engenharia Eletrotécnica de Computadores.

Professora de diversas unidades curriculares em Engenharia Eletrotécnica, no Instituto Superior de Engenharia do Porto. É também detentora do cargo de diretora da Licenciatura de Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia e de diretora do Centro de Prestação de Serviços – TID.



Maria Teresa do Valle Moura Costa

mco@isep.ipp.pt

Licenciada em Engenharia Eletrotécnica de Computadores, pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, recebeu o grau de Mestre em Investigação Operacional e Engenharia de Sistemas, pelo Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa e o grau de Doutora em Ciências de Engenharia, pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Exerce funções docentes no Instituto Superior de Engenharia, na categoria de Professor Adjunto, no Departamento de Matemática. Ocupa o cargo de Diretor de Curso de Licenciatura em Engenharia de Sistemas.

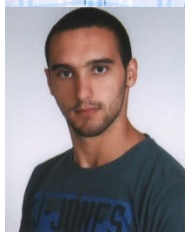


Paulo Martins Vaz

paulo.vaz@schneider-electric.com

Licenciatura em Engenharia Eletrotécnica – Ramo de Eletrónica, Instrumentação e Computação pela Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real.

Key Account Panel Builders na Schneider Electric – Acompanhamento Técnico-Comercial Rede de Fabricantes de Quadros Elétricos, aconselhamento de produtos e soluções à escala das necessidades do mercado.



Pedro Miguel Soares Caçote

1130264@isep.ipp.pt

Mestre em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia pelo Instituto Superior de Engenharia do Porto.

## COLABORARAM NESTA EDIÇÃO :



Roque Filipe Mesquita Brandão

rfb@isep.ipp.pt

Doutorem Engenharia Eletrotécnica de Computadores, na Área Científica de Sistemas Elétricos de Energia, pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.  
Professor Adjunto no Instituto Superior de Engenharia do Porto, departamento de Engenharia Eletrotécnica.  
Consultor técnico de alguns organismos públicos na área da eletrotecnia.



Sérgio Filipe Carvalho Ramos

scr@isep.ipp.pt

Doutorado em Engenharia Eletrotécnica de Computadores pelo Instituto Superior Técnico de Lisboa. Docente do Departamento de Engenharia Eletrotécnica do curso de Sistemas Elétricos de Energia do Instituto Superior de Engenharia do Porto. Prestação, para diversas empresas, de serviços de projeto de instalações elétricas, telecomunicações e segurança, formação, assessoria e consultoria técnica. Investigador no GECAD (Grupo de Investigação em Engenharia e Computação Inteligente para a Inovação e o Desenvolvimento), do ISEP.



Sérgio Manuel Correia Vieira

1110096@isep.ipp.pt

Licenciado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia no ISEP (2015). Estágio curricular no GECAD onde desenvolveu uma aplicação de auxílio ao dimensionamento de redes de cabos coaxiais nas ITUR Privadas (2015). Aluno do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia no ISEP. Curso Profissional de Técnico de Instalações Elétricas na Escola Secundária Carlos Amarante em Braga (2011). Estágio na empresa OTISE Elevadores, delegação de Braga, na área de manutenção e reparação de elevadores (2011).



Silvana Mafaldada Silva Rocha

1131360@isep.ipp.pt

Mestre em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia no Instituto Superior de Engenharia do Porto – Instituto Politécnico do Porto (ISEP/IPP). Elicenciada em Ciências de Engenharia – Perfil de Engenharia Eletrotécnica na Faculdade de Ciências da Universidade do Porto (FCUP). As suas áreas de interesse estão vocacionadas para as energias renováveis e sistemas elétricos de energia.



Teresa Alexandra Ferreira Mourão Pinto Nogueira

(tan@isep.ipp.pt)

Doutoramento em Engenharia Eletrotécnica e uma experiência de 20 anos de docência no ISEP. Desde 2010 é diretora do curso de mestrado em Eng.ª Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia. Áreas de trabalho: mercados de eletricidade, energias renováveis, eficiência energética e qualidade de serviço elétrico.  
Trabalhou 5 anos como projetista de máquinas elétricas: transformadores e aparelhos elétricos.



