

# 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**



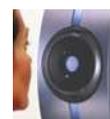
**Telecomunicações**



**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 Bezeza Carvalho

Blog:

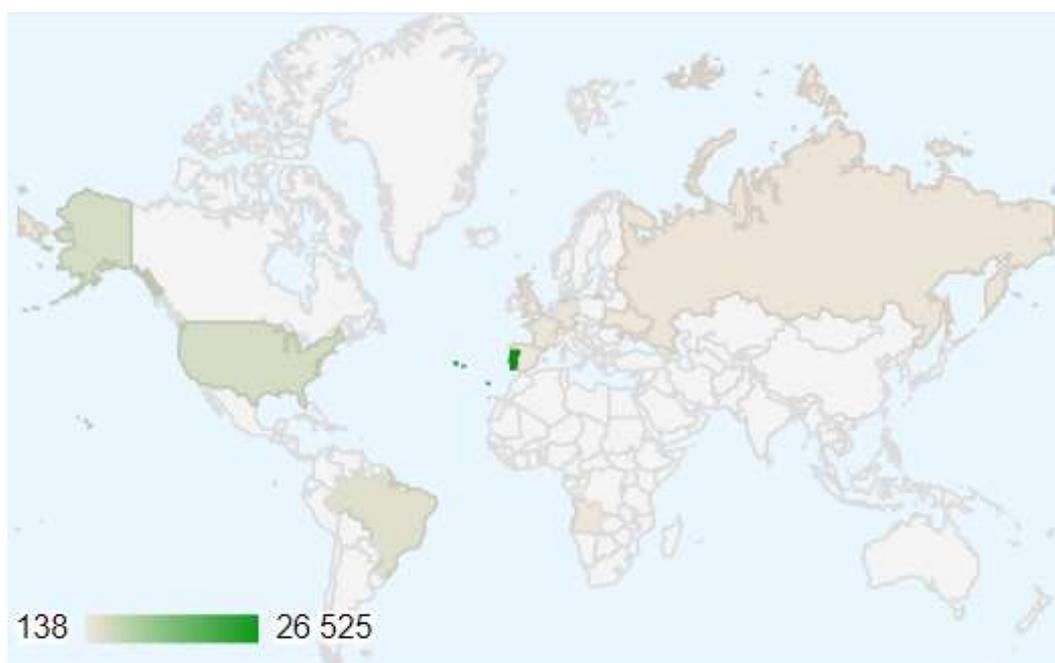
[www.neutroaterra.blogspot.com](http://www.neutroaterra.blogspot.com)

### 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



## CONTROLO DOS SISTEMAS ELÉTRICOS DE ENERGIA

### 1 Introdução

Um dos principais objetivos do controlo de um Sistema Elétrico de Energia (SEE) interligado com sistemas vizinhos são os de escalonar as unidades de produção, estabelecer um despacho ótimo e garantir um eficaz equilíbrio entre a produção e o consumo, considerando as perdas na rede e os valores contratualizados para as interligações. Isto não será viável se não existir um método eficaz de controlo sobre os geradores, sobre a frequência e a tensão na rede e, também, sobre o transito de energia nas linhas de interligação.

De facto, no passado, o controlo dos geradores foi o primeiro problema existente no controlo das redes elétricas. Os métodos desenvolvidos para controlo automático dos geradores, assim como o controlo da energia que transita nas interligações, têm atualmente um papel fundamental nos modernos centros de controlo dos SEE.

Um gerador acionado por uma turbina pode ser representado como uma grande massa rotativa, com dois binários que atuam em oposição. Como se pode ver na figura 1,  $T_{mec}$ , o binário mecânico, atua de modo a aumentar a velocidade angular, enquanto  $T_{elec}$ , o binário eletromagnético elétrico, ou resistente, atua de modo a reduzir essa mesma velocidade.

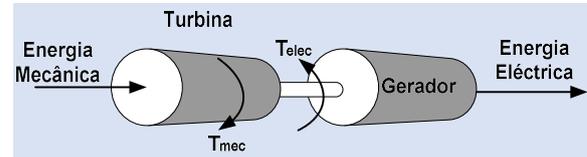


Figura 1: Binário mecânico e elétrico num grupo de produção

Quando o binário mecânico iguala em magnitude o binário eletromagnético, a velocidade angular  $\omega$  será constante. Se a carga elétrica aumentar de modo que  $T_{el}$  seja maior que  $T_{mec}$ , todo o sistema vai reduzir a sua velocidade. Como seria desastroso para a estabilidade da frequência deixar o sistema diminuir a sua velocidade, alguma coisa deve ser feita de modo a aumentar o binário mecânico  $T_{mec}$  para que o equilíbrio seja restabelecido, isto é, voltar a colocar o sistema a girar à velocidade nominal e igualar os binários, para que a velocidade volte a ser estabilizada e se mantenha constante.

Este processo deve ser efetuado sistematicamente devido às constantes variações da carga. Atendendo ao elevado número de geradores existentes num SEE, existem soluções que permitem distribuir as variações de carga por todos eles. Para isso, os geradores são equipados com sofisticados sistemas de controlo. Um controlador em cada unidade mantém constante a velocidade, enquanto o controlo

suplementar, normalmente efetuado por teleregulação a partir de um centro de controlo remoto, atua para distribuir a produção entre todos os geradores em serviço.

A figura 2 representa esquematicamente o princípio em que se baseia atualmente o controlo dos SEE.

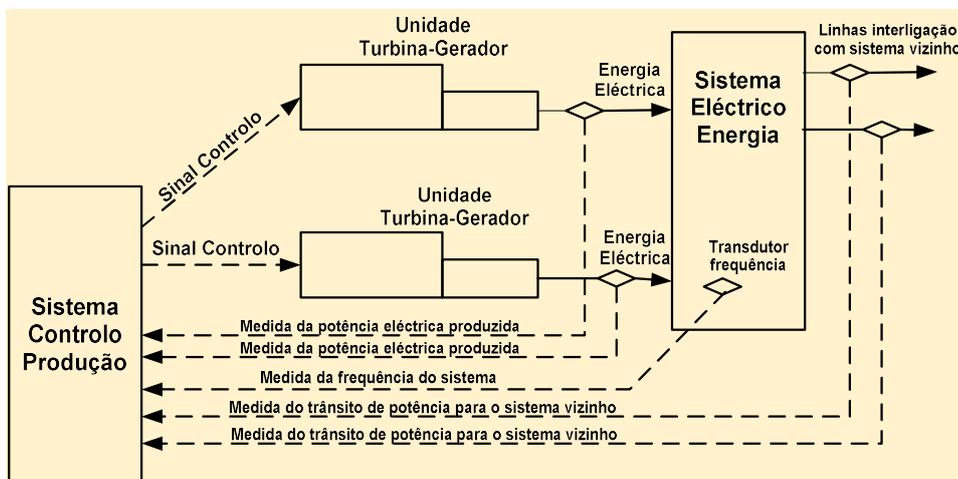


Figura 2: Controlo da produção em sistemas elétricos de energia interligados

## 2 Modelização dos geradores

Na teoria dos sistemas de controlo, é fundamental modelizar todos os equipamentos intervenientes. No caso dos SEE, para que as ações de controlo sejam efetuadas com sucesso, é de extrema importância conhecer com exatidão o modelo dos equipamentos sujeitos a ações de controlo com vista ao funcionamento estável e seguro dos SEE. Neste âmbito, inicialmente é importante definir-se alguns termos.

$\omega$	Velocidade angular (rad/seg)
$\alpha$	Aceleração angular
$\delta$	Ângulo de fase da máquina
$T_a$	Binário de aceleração da máquina
$T_{mec}$	Binário mecânico exercido na máquina pela turbina
$T_{elec}$	Binário elétrico exercido na máquina pelo gerador
$P_a$	Potência de aceleração
$P_{mec}$	Potência mecânica (entrada)
$P_{elec}$	Potência elétrica (saída)
$J$	Momento de inércia da máquina
$M$	Momento angular da máquina

Todas as quantidades, exceto o ângulo de fase, estão em “pu” do valor de base da máquina, ou, no caso de  $\omega$ , na frequência nominal do sistema.

No desenvolvimento a seguir, interessa considerar os desvios das grandezas do sistema em regime permanente. Os valores nominais ou de regime permanente têm o sobrescrito “0”.

Os desvios vão ser designados por  $\Delta$ .

Seguidamente, apresentam-se algumas relações fundamentais entre estas grandezas:

$$J \cdot \alpha = T_a \quad (1)$$

$$M = J \cdot \omega \quad (2)$$

$$P_a = \omega \cdot T_a = \omega(J\alpha) = M \cdot \alpha \quad (3)$$

Inicialmente considera-se apenas uma máquina rotativa.

Assume-se que inicialmente a máquina tem uma velocidade constante  $\omega_0$  e ângulo de fase  $\delta_0$ . Devido a efeitos de natureza elétrica, ou perturbações de natureza mecânica, a máquina vai estar sujeita a diferenças nos binários elétrico e mecânico, implicando uma aceleração ou desaceleração. O que vai interessar são os desvios da velocidade  $\Delta\omega$  e os desvios de fase  $\Delta\delta$  relativamente aos seus valores nominais. O desvio do ângulo de fase  $\Delta\delta$  é igual à diferença do ângulo de fase entre a máquina sujeita a uma aceleração  $\alpha$  e o eixo de referência da velocidade  $\omega_0$ . Se a velocidade da máquina em aceleração for  $\omega = \omega_0 + \alpha t$ , então:

$$\Delta\delta = \underbrace{\int (\omega_0 + \alpha t) dt}_{\text{ângulo de fase absoluto}} - \underbrace{\int \omega_0 dt}_{\text{ângulo de fase referência}} = \omega_0 t + \frac{1}{2} \alpha t^2 - \omega_0 t = \frac{1}{2} \alpha t^2 \quad (4)$$

O desvio da velocidade nominal,  $\Delta\omega$ , pode ser apresentado como:

$$\Delta\omega = \alpha t = \frac{d}{dt}(\Delta\delta) \quad (5)$$

A relação entre o desvio do ângulo de fase, o desvio de velocidade e o binário de aceleração é:

$$T_a = J\alpha = J \frac{d}{dt}(\Delta\omega) = J \frac{d^2}{dt^2}(\Delta\delta) \quad (6)$$

A seguir vai-se relacionar os desvios das potências elétricas e mecânicas com os desvios da velocidade de rotação e binário mecânico.

A relação entre a potência de aceleração e a potência elétrica e mecânica é:

$$P_a = P_{mec} - P_{elec} \quad (7)$$

Que pode ser escrita como a soma do seu valor em regime permanente com o valor do desvio:

$$P_a = P_{a0} + \Delta P_a \quad (8)$$

Onde:

$$P_{a0} = P_{mec0} - P_{elec0}$$

$$\Delta P_a = \Delta P_{mec} - \Delta P_{elec}$$

Então

$$P_a = (P_{mec0} - P_{elec0}) + (\Delta P_{mec} - \Delta P_{elec}) \quad (9)$$

De igual modo para os binários:

$$T_a = (T_{mec0} - T_{elec0}) + (\Delta T_{mec} - \Delta T_{elec}) \quad (10)$$

Usando a equação (3) pode-se obter:

$$P_a = P_{a0} + \Delta P_a = (\omega_0 + \Delta\omega)(T_{a0} + \Delta T_a)$$

Substituindo em (8) e (10), obtém-se:

$$(P_{mec0} - P_{elec0}) + (\Delta P_{mec} - \Delta P_{elec}) =$$

$$= (\omega_0 + \Delta\omega)[(T_{mec0} - T_{elec0}) + (\Delta T_{mec} - \Delta T_{elec})]$$

Assumindo que os valores permanentes podem ser fatorizados desde que:

$$P_{mec0} = P_{elec0}$$

$$T_{mec0} = T_{elec0}$$

E assumindo também que os termos de segunda ordem que envolvem produtos de  $\Delta\omega$  com  $T_{mec}$  e que  $\Delta T_{elec}$  podem ser desprezados, então:

$$\Delta P_{mec} - \Delta P_{elec} = \omega_0 (\Delta T_{mec} - \Delta T_{elec}) \quad (11)$$

Como se pode ver na equação (6), o binário de aceleração está relacionado com o desvio de velocidade da seguinte forma:

$$(T_{mec0} - T_{elec0}) + (\Delta T_{mec} - \Delta T_{elec}) = J \frac{d}{dt} (\Delta\omega) \quad (12)$$

Então como  $T_{mec0} = T_{elec0}$ , pode-se combinar as equações (11) e (12) para encontrar:

$$\Delta P_{mec} - \Delta P_{elec} = \omega_0 J \frac{d}{dt} (\Delta\omega) = M \frac{d}{dt} (\Delta\omega) \quad (13)$$

Aplicando a Transformada de Laplace obtém-se para a equação:

$$\Delta P_{mec} - \Delta P_{elec} = M s \Delta\omega \quad (14)$$

Esta equação e o respetivo sistema de controlo realimentado está representada no diagrama de blocos da figura 3.

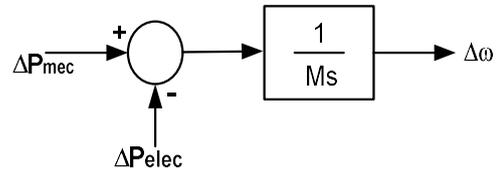


Figura 3: relação entre a potência mecânica e a potência elétrica e a variação de velocidade

As unidades de M são em Watt por radiano por segundo. Vai usar-se sempre a potência em “pu” face à velocidade em “pu” por segundo (“pu” nos valores de base da máquina).

### 3 Modelização da carga alimentada pelos geradores

As cargas ligadas a um sistema elétrico consistem num conjunto de equipamentos elétricos, alguns puramente resistivos, outros são motores com relações potência-frequência variáveis e, outros, apresentam as mais diversas características. Como os motores são a maioria das cargas de um SEE, há necessidade de modelizar o efeito das variações da frequência da rede nessas cargas. A relação entre as variações de carga com origem em desvios de frequência é obtida por:

$$\Delta P_{L(freq)} = D \Delta\omega$$

$$D = \frac{\Delta P_{L(freq)}}{\Delta\omega}$$

onde D representa o desvio da carga em percentagem, dividido por o desvio da frequência também em percentagem.

Por exemplo, se a carga variar 2% quando se verifica um desvio de 1% na frequência, D seria igual a 2. Contudo o valor de D usado para resolver respostas dinâmicas do sistema deve ser alterado se o valor de base MVA for diferente do valor nominal da carga. Por exemplo, D era referido para uma carga nominal de 1200 MVA e o problema dinâmico estava referido a uma base de 1000 MVA. Notar que D=2 diz que a carga varia em 2 pu para um desvio de 1 pu verificado na frequência. Isto é, a carga pode variar em  $2 \times 1200$  ou 2400 MVA para um desvio de 1% na frequência.

Quando expresso numa base de 1000 MVA, D fica igual a:

$$D_{1000MVA} = 2 * \left( \frac{1200}{1000} \right) = 2,4$$

O desvio de  $P_{elec}$  na figura 3, equação (15) é:

$$\Delta P_{elec} = \underbrace{\Delta P_L}_{\text{desvio insensível à frequência}} + \underbrace{D \cdot \Delta \omega}_{\text{desvio sensível à frequência}}$$

Incluindo esta abordagem no diagrama de blocos da figura 3 resulta num novo diagrama de blocos que se apresenta na figura 4.

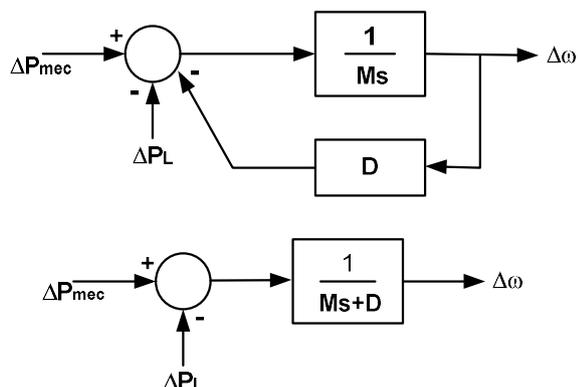


Figura 4: diagrama de blocos das massas girantes e da carga na forma como é visto pela máquina primária

Quando dois ou mais geradores estão ligados em paralelo num sistema, deve-se ter em consideração as diferenças angulares de fase ao longo da rede e analisar os respetivos desvios de frequência.

No entanto, para facilitar análise do funcionamento do controlador, assume-se que a frequência é igual em toda a rede. Assim, pode-se agrupar as massas rotativas das turbinas dos geradores num sistema equivalente, que é obtido pela soma das potências de saída das unidades individuais.

Isto é apresentado na figura 5, onde todas as unidades são agrupadas numa única massa rotativa equivalente,  $M_{equiv}$ .

De igual modo, todas as cargas individuais do sistema são agrupadas numa carga equivalente com coeficiente de amortecimento  $D_{equiv}$ .

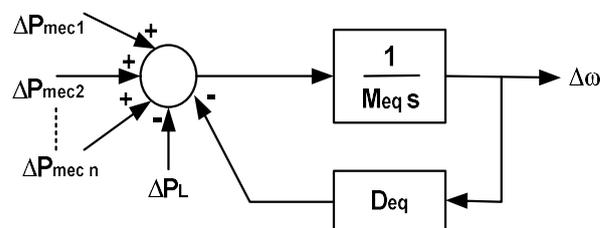


Figura 5: sistema equivalente a vários grupos geradores acionados por múltiplas turbinas

#### 4 Modelização das turbinas

O sistema que aciona o gerador pode ser uma turbina a vapor ou hidráulica. Os modelos para estes sistemas têm que ter em consideração o fornecimento de vapor e as características de controlo do sistema da caldeira, no caso da turbina a vapor, ou as características do distribuidor das turbinas hidráulicas. Vai-se considerar os sistemas mais simples.

O modelo destes sistemas mais simples, apresentado na figura 6, relaciona a posição da válvula que controla o fluxo de admissão de combustível, água, ou vapor, com a potência de saída da máquina, onde TCH é a constante de tempo, “tempo de carga” e  $\Delta P_{valv}$  é igual ao desvio da válvula do valor nominal em p.u..

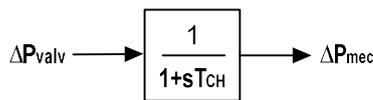


Figura 6: modelo das turbinas ou máquina primária

O modelo do sistema máquina primária – gerador – carga para um grupo gerador, pode ser construído juntando as figuras 4 e 6, como se apresenta na figura 7.

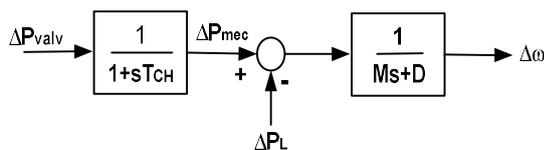


Figura 7: modelo da máquina primária, gerador e carga

### 5 Modelização do sistema de controlo

Supor uma unidade de produção a trabalhar com valor constante da potência mecânica fornecida pela turbina. Qualquer variação na carga resultará numa variação da velocidade, o que seria suficiente para que a carga sensível à frequência compensasse exatamente essa variação na carga.

Esta condição originará que a frequência do sistema possa desviar-se para além dos limites que estava sujeita. Este problema pode ser ultrapassado adicionando um mecanismo controlador que “mede” a velocidade da máquina e ajusta a válvula de admissão de fluido na turbina de modo a alterar a potência mecânica fornecida, compensando as variações da carga e restaurando a frequência para os valores nominais.

No passado usava-se um mecanismo com esferas em extremidades de hastes (regulador centrífugo de ação direta) que giravam e “sentiam” a velocidade da máquina e forneciam um movimento mecânico de resposta as variações da velocidade (reguladores centrífugos).

Os controladores modernos usam meios eletrónicos para medir desvios na velocidade e normalmente usam combinações de sistemas eletrónicos, mecânicos e meios hidráulicos para regular a posição da válvula de admissão.

O controlador mais simples “ISÓCRONO”, ajusta a posição da válvula para um valor que mantém a frequência sempre no seu valor nominal. Este sistema só é eficaz se controlar uma máquina isoladamente, caso contrário, os controladores vão “lutar” entre si. Por outro lado, os controladores não isócronos originam um desvio de frequência diferente de zero. Para forçar o erro da frequência para zero, é necessário efetuar uma ação de reposicionamento. Esta ação é conseguida integrando o erro de frequência (ou velocidade) que é a diferença entre a velocidade atual e a desejada ou de referência (nominal). Este mecanismo está representado na figura 8.

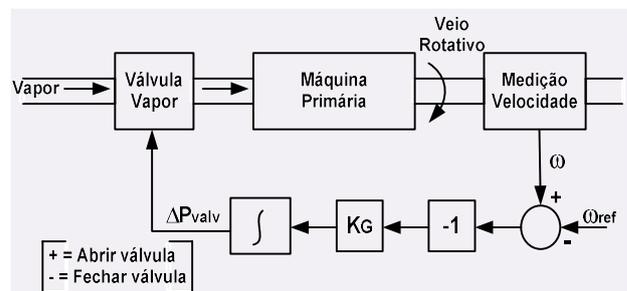


Figura 8: modelo do controlador isócrono

A saída do sistema de medição da velocidade,  $\omega$ , é comparado com a referência  $\omega_{ref}$  para produzir o sinal de erro  $\Delta\omega$ .

Este erro  $\Delta\omega$  é negado e amplificado com um ganho KG e integrado para produzir um sinal de controlo,  $\Delta P_{válv}$ , que faz com que a válvula de admissão abra ( $\Delta P_{posição\ válvula}$ ) quando  $\Delta\omega$  é negativo. Se, por exemplo, a máquina está a girar à velocidade nominal e a carga eléctrica aumenta,  $\omega$  vai baixar para valores inferiores a  $\omega_{ref}$  e  $\Delta\omega$  vai ser negativo.

A ação do amplificador e integrador vai ser a de abrir a válvula de admissão, fazendo com que a turbina aumente a potência mecânica, aumentando a velocidade  $\omega$  e, assim, aumentando a  $P_{elec}$  do gerador.

Quando  $\omega$  for igual a  $\omega_{ref}$  a válvula fica numa nova posição (mais aberta) permitindo ao grupo turbina-gerador produzir o suficiente para fazer face ao aumento da carga.

O controlador “isócrono” (velocidade constante) da figura 8 não pode ser utilizado se dois ou mais geradores estiverem eletricamente ligados ao mesmo sistema, visto que ambos teriam que ter a mesma velocidade ou “lutariam” para tentar trazer a frequência do sistema para o seu valor nominal.

Para ser possível ter dois ou mais geradores ligados em paralelo, os controladores estão equipados com uma malha de realimentação que faz com que o erro de velocidade seja anulado para os diferentes valores de produção do gerador. Isto pode ser realizado adicionando uma malha de realimentação à volta do integrador, como se apresenta na figura 9.

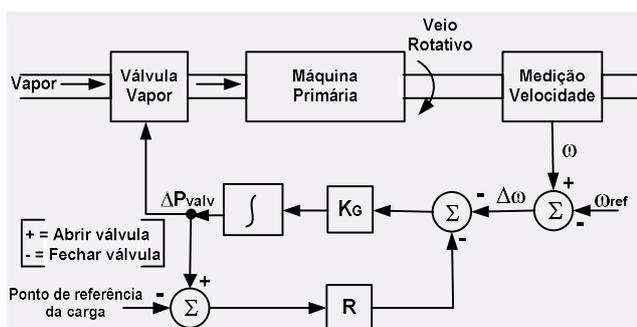


Figura 9: modelo do controlador com realimentação da queda de velocidade

Notar que se inseriu uma nova entrada, chamada “ponto de referência da carga”, que se abordará mais à frente. O diagrama de blocos deste controlador é mostrado na figura 10, onde se pode verificar a existência de um andar ganho de  $1/R$  e uma constante de tempo  $T_G$ .

O resultado de adicionar a malha de retorno com ganho  $R$  é uma característica como se apresenta na figura 11.

O valor de  $R$  determina o declive da característica. Isto é,  $R$  determina as alterações na saída da unidade para um determinado desvio na frequência. Prática comum é regular  $R$  em cada unidade de modo que a alteração de 0 a 100% da saída resulte na mesma variação da frequência em cada unidade de produção.

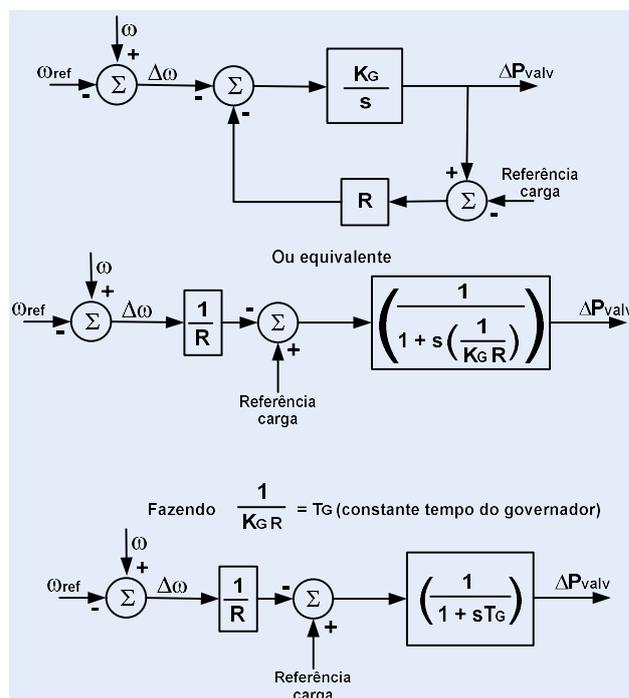


Figura 10: diagrama de blocos do modelo do controlador com queda de velocidade

Como resultado, alterações na carga elétrica do sistema serão compensadas por alterações na saída das unidades produtoras, proporcionais à potência nominal de cada uma delas.

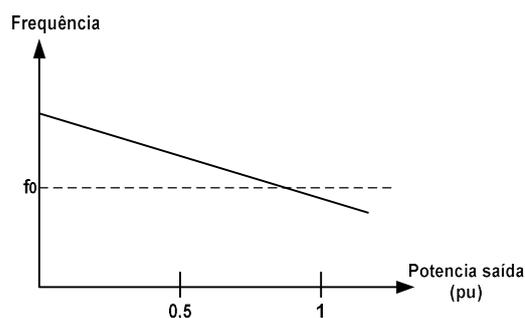


Figura 11: característica de velocidade dos grupos geradores

Se dois geradores com as respetivas características de velocidade apresentadas na figura 11 forem ligados a uma rede, a frequência será sempre constante e igual nos dois, pelo que eles irão partilhar a carga entre si. Isto é apresentado na figura 12, que apresenta duas unidades com características diferentes partilhando a carga entre si.

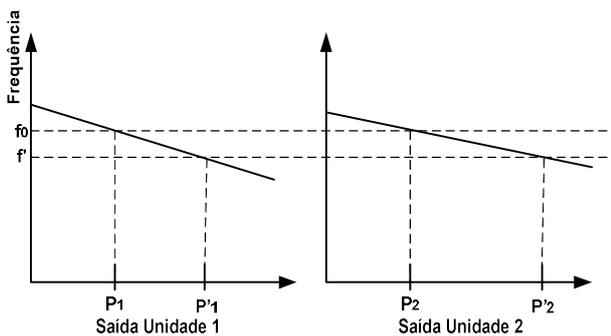


Figura 12: Distribuição da carga por dois grupos geradores

Como apresentado na figura 12, as duas unidades estão inicialmente à frequência nominal de valor  $f_0$ .

Quando a carga aumenta  $\Delta PL$ , a tendência é que cada unidade baixe a velocidade. Os controladores vão atuar aumentando a produção da unidade até encontrar uma nova frequência comum  $f'$ .

O valor de carga assumido por cada unidade é proporcional ao declive da sua característica.

A unidade 1 aumenta a sua produção de  $P_1$  para  $P'1$ , a unidade 2 aumenta a produção de  $P_2$  para  $P'2$ , de modo que a produção aumente  $P'1-P_1+P'2-P_2$ , igual a  $\Delta PL$ .

Notar que a frequência atual depende também da característica de regulação de cada unidade de produção.

A figura 9 apresenta uma entrada chamada “ponto de referência da carga”. Alterando este ponto de referência da carga, a característica do controlador pode ser ajustada de forma a obter a frequência de referência para qualquer valor de produção. Isto é apresentado na figura 13.

O ponto fundamental do controlo de uma unidade de produção é o ponto de referencia da carga. Ajustando este ponto de regulação em cada unidade, o despacho desejado para cada unidade pode ser mantido enquanto a frequência do sistema se mantiver próxima do valor desejado.

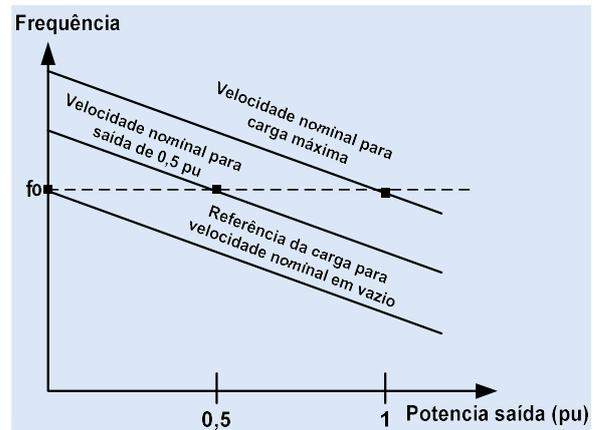


Figura 13: parâmetros para regulação da velocidade

Em regime permanente uma alteração em  $\Delta P_{\text{válvula}}$  de 1 pu necessita de uma variação de  $R$  pu no valor da frequência. Por exemplo, uma regulação de 3% de uma unidade indica que a uma alteração na válvula de 100% (1 pu ou alteração de 100% na saída da unidade) corresponde uma alteração de 3% na frequência.

Então,  $R$  é igual ao desvio da frequência (pu) dividida pelo desvio da saída (pu). Isto é:

$$R = \frac{\Delta \omega}{\Delta P} \text{ [pu]}$$

Assim, pode-se construir um diagrama de blocos da unidade de produção e do respetivo controlador da máquina primária/carga como apresentado na figura 14.

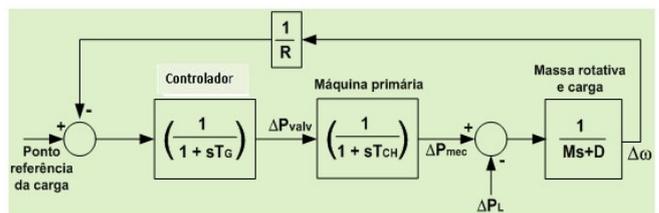


Figura 14: Diagrama de blocos, controlador, turbina e massas girantes

Supondo que o gerador sofre um aumento de carga  $\Delta PL(s)=\Delta PL/s$ , a função de transferência que relaciona a alteração da carga  $\Delta PL$ , com a variação da frequência  $\Delta \omega$  é:

$$\Delta\omega(s) = \Delta P_L(s) \left[ \frac{\frac{-1}{Ms+D}}{1 + \frac{1}{R} \left( \frac{1}{1+sT_G} \right) \left( \frac{1}{1+sT_{CH}} \right) \left( \frac{1}{Ms+D} \right)} \right]$$

O valor de  $\Delta\omega(s)$  em regime permanente pode ser encontrado por:

$$\Delta\omega_{regime\ permanente} = \lim_{s \rightarrow 0} [s\Delta\omega(s)] = \frac{-\Delta P_L \left( \frac{1}{D} \right)}{1 + \left( \frac{1}{R} \right) \left( \frac{1}{D} \right)} = \frac{-\Delta P_L}{\frac{1}{R} + D}$$

Notar que se  $D=0$  o desvio da velocidade seria simplesmente  $\Delta\omega = -R\Delta P_L$ .

Se vários geradores (cada com seu controlador e máquina primária) estiverem ligados à rede, o desvio da frequência será:

$$\Delta\omega = \frac{-\Delta P_L}{\frac{1}{R_1} + \dots + \frac{1}{R_n} + D}$$

## 6. Modelização das linhas de interligação

O trânsito de potência numa linha pode ser equacionado de uma forma simples usando o modelo DC. A equação seguinte permite obter o fluxo de potência numa linha de interligação em regime permanente.

$$P_{fluxo\ linha} = \frac{1}{X_{linha}} (\theta_1 - \theta_2)$$

Para efeito de análise, pode-se ajustar a equação de forma que esta traduza os desvios do valor da potência especificada (ou de referência), em função dos desvios dos respetivos ângulos de fase.

$$\begin{aligned} P_{f.linha} + \Delta P_{f.linha} &= \frac{1}{X_{linha}} [(\theta_1 + \Delta\theta_1) - (\theta_2 + \Delta\theta_2)] = \\ &= \frac{1}{X_{linha}} (\theta_1 - \theta_2) + \frac{1}{X_{linha}} (\Delta\theta_1 - \Delta\theta_2) \end{aligned}$$

Assim, a variação da potência numa linha de interligação pode ser obtida pela seguinte equação:

$$\Delta P_{f.linha} = \frac{1}{X_{linha}} (\Delta\theta_1 - \Delta\theta_2)$$

onde  $\Delta\theta_1$  e  $\Delta\theta_2$  são equivalentes a  $\Delta\delta_1$  e  $\Delta\delta_2$  definidos e apresentados na equação 5. Então, usando a relação apresentada na equação 5, obtém-se:

$$\Delta P_{f.linha} = \frac{T}{S} (\Delta\omega_1 - \Delta\omega_2)$$

Onde:

$$T = 377 \times 1 / X_{linha} \text{ (para 60Hz).}$$

$\Delta\theta$  tem que estar expresso em radianos para  $\Delta P_{linha}$  estar em “pu” de MW, mas  $\Delta\omega$  está em pu do desvio de velocidade. Por isso, tem-se que multiplicar  $\Delta\omega$  por 377 rad/seg (frequência de base em rad/seg a 60Hz,  $2\pi f$ ).  $T$  é o coeficiente de rigidez da linha, ou “stiffness”.

Considere-se agora um sistema interligado dividido em duas áreas, cada uma com seus geradores. As áreas estão interligadas por uma linha comum. O fluxo de potência na linha vai manifestar-se como uma carga positiva para uma área e carga igual, mas negativa para a outra área, ou vice-versa dependendo do sentido do fluxo de energia. O sentido do fluxo é determinada pelo ângulo de fase entre as áreas, que é determinado pelos desvios relativos da “velocidade elétrica” em ambas as áreas. Um diagrama de blocos representando esta ligação é apresentado na figura 15.

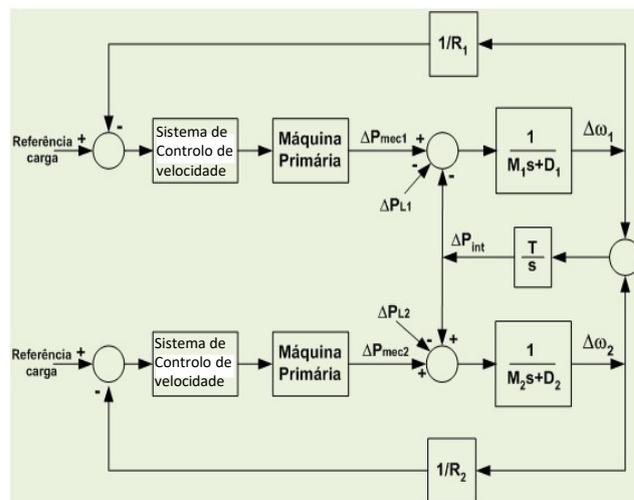


Figura 15: Diagrama de blocos de duas áreas interligadas

Notar que o fluxo de potência na linha foi definido ir da área 1 para a 2, então, o fluxo aparece como carga para a área 1 e como produção (carga negativa) para a área 2.

Assumindo que as potências mecânicas são constantes, as massas rotativas e a linha de interligação apresentam características oscilatórias amortecidas, conhecidas como oscilações de sincronização.

É muito importante analisar o desvio da frequência em regime permanente, os desvios do fluxo de potência nas linhas de interligação e a produção dos geradores depois de se manifestar variações na carga de qualquer uma das áreas. Supor uma variação na carga da área 1 de  $\Delta P_{L1}$ . Em regime permanente, depois das oscilações de sincronização terem sido amortecidas, a frequência será constante e de igual valor nas duas áreas. Então:

$$\Delta\omega_1 = \Delta\omega_2 = \Delta\omega \quad e \quad \frac{d(\Delta\omega_1)}{dt} = \frac{d(\Delta\omega_2)}{dt} = 0$$

$$\Delta P_{mec1} - \Delta P_{linha} - \Delta P_{L1} = \Delta\omega D_1 \quad (15)$$

$$\Delta P_{mec2} + \Delta P_{linha} = \Delta\omega D_2$$

Sendo:

$$\Delta P_{mec1} = \frac{-\Delta\omega}{R_1}$$

$$\Delta P_{mec2} = \frac{-\Delta\omega}{R_2}$$

Fazendo as substituições adequadas obtém-se:

$$-\Delta P_{linha} - \Delta P_{L1} = \Delta\omega \left( \frac{1}{R_1} + D_1 \right)$$

$$\Delta P_{linha} = \Delta\omega \left( \frac{1}{R_2} + D_2 \right)$$

Ou, finalmente obtém-se a equação:

$$\Delta\omega = \frac{-\Delta P_{L1}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + D_1 + D_2}$$

A partir da qual pode-se encontrar o desvio do fluxo de potência na linha de interligação:

$$\Delta P_{linha} = \frac{-\Delta P_{L1} \left( \frac{1}{R_2} + D_2 \right)}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + D_1 + D_2} \quad (16)$$

Notar que as condições consideradas nas equações anteriores são para as novas condições em regime permanente, após as variações verificadas na carga. O novo fluxo de energia na linha de interligação é determinado pelo desvio médio da carga e a produção de cada área. Não é necessário conhecer a rigidez da linha T para determinar o novo trânsito na linha, embora a rigidez determine a variação do ângulo de fase resultante do novo trânsito de potência na linha.

Caso seja pretendido analisar dinamicamente o comportamento nas 2 áreas, verificava-se que um desvio na carga resulta num erro de frequência. Isto é apresentado na figura 16, que mostra a resposta em frequência do sistema para um desvio da carga. Notar que a figura 16 apresenta apenas valores médios, omitindo qualquer oscilação de elevada frequência.

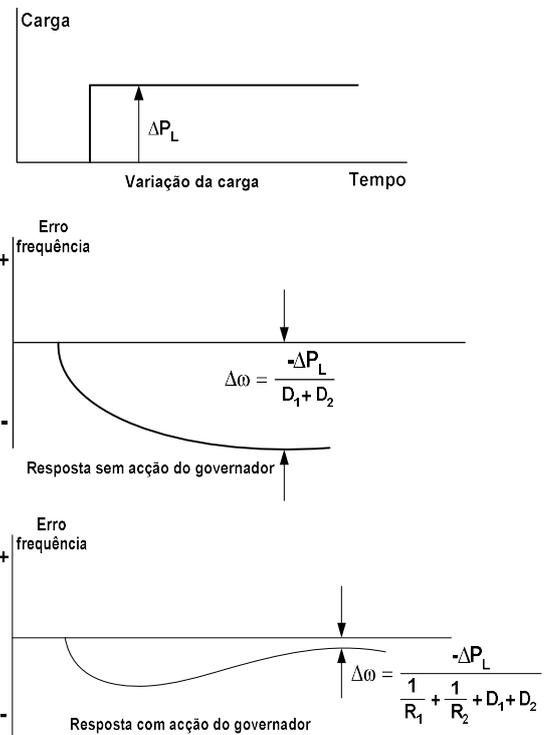


Figura 16: Resposta em frequência para uma variação de carga

## 7. Controlo automático da produção

Controlo Automático da Produção, ou *Automatic Generation Control (AGC)* é o nome atribuído a um sistema de controlo que tem três objetivos fundamentais

1. Manter a frequência do sistema dentro dos limites estabelecidos;
2. Manter os intercâmbios de potência entre áreas dentro dos valores estabelecidos;
3. Manter a produção de cada grupo no valor mais económico.

### 7.1 Controlo Suplementar

Para compreender cada um dos objetivos apresentados, vai assumir-se inicialmente que se tem apenas uma única unidade de produção a alimentar uma carga de um sistema isolado.

Como na figura 5, alterações na carga produzirão alterações na frequência, com uma amplitude que depende da característica de regulação do controlador e da sensibilidade das cargas à variação da frequência. Desde que ocorra uma alteração na carga, um controlo suplementar deve atuar para restaurar a frequência para o valor nominal.

Isto pode ser implementado adicionando um controlo de *reset* no controlador, como apresentado na figura 17.

A ação de *reset* do controlo suplementar vai forçar o erro de frequência para zero, ajustando o valor de referência da velocidade. Por exemplo, o erro ilustrado na figura 16 seria forçado para zero, ou anulado.

### 7.2 Controlo da potência nas linhas de interligação

Quando duas áreas interligam os seus sistemas fazem-no por várias razões. A primeira é permitir comprar ou vender energia ao sistema vizinho que permita custos de operação mais rentáveis.

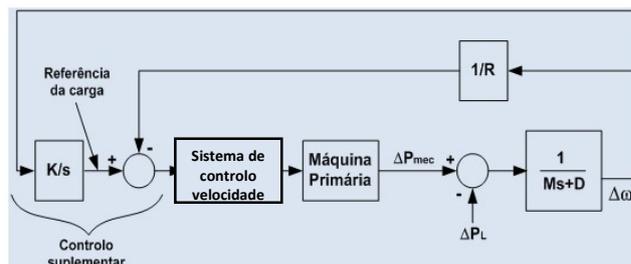


Figura 17: Controlo suplementar adicionado à produção dos geradores

Depois, mesmo que não haja fluxo de potência na linha, se um sistema sofrer uma perda repentina de uma unidade de produção, as unidades dos sistemas interligados irão sentir desvios na frequência, e podem ajudar a restaurar esse valor para o nominal.

As interligações apresentam um problema de controlo interessante no que diz respeito à distribuição da carga pelos geradores. A situação hipotética da figura 18 será usada para ilustrar o problema. Supor que os dois sistemas da figura têm características de produção e carga iguais ( $R_1=R_2$  e  $D_1=D_2$ ).

Assumir que o sistema 1 envia 100 MW para o sistema 2 sob um acordo feito entre os operadores dos dois sistemas. Agora, supor que o sistema 2 sofre um repentino aumento de carga de 30 MW.

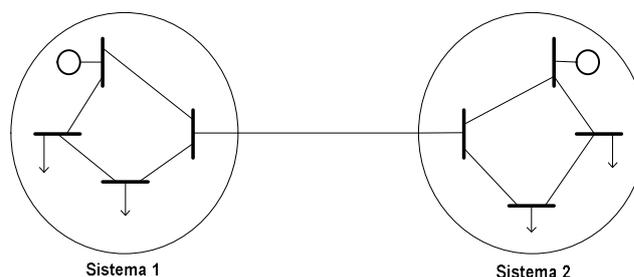


Figura 18: Sistema de duas áreas interligadas

Como as unidades têm características iguais, ambas vão sentir um aumento de 15 MW na carga, e a linha de interligação vai sofrer um aumento no trânsito de energia de 100 MW para 115 MW. Ou seja, o aumento de 30 MW na carga do sistema 2 vai ser compensado com um aumento na produção do sistema 2 de 15 MW mais um aumento do trânsito na linha de 15 MW para o sistema 2.

Isto seria bom, só que o sistema 1 tinha contratado vender apenas 100 MW e não 115 MW, e os seus custos de produção aumentaram sem que ninguém pague o extra produzido. Assim, torna-se necessário um sistema de controlo que reconheça que os 30 MW de aumento de carga ocorreram no sistema 2 e, por isso, aumente a produção do sistema 2 em 30 MW, restabelecendo a frequência do sistema no seu valor nominal. O controlo do sistema 1 também alteraria a produção do sistema 1 para a que tinha antes de se verificar o aumento repentino de 30 MW na carga do sistema 2.

Tal sistema de controlo deve usar dois circuitos de informação:

- A frequência do sistema;
- O fluxo de potência na linha de interligação.

Este esquema de controlo deveria, se necessário, reconhecer o seguinte:

1. Se a frequência baixar e se o trânsito de potência a sair do sistema aumentar, um aumento de carga ocorreu no sistema vizinho;
2. Se a frequência baixar e se o trânsito de potência a sair do sistema diminuir, um aumento de carga ocorreu no próprio sistema.

Isto também pode ser estendido para casos em que a frequência aumente.

Considerar o seguinte:

$P_{int}$  = Intercâmbio de potência na linha de interligação  
 (“+” para fluxo a sair da área, “-” para fluxo a entrar)

$P_{intcontratado}$  = Intercâmbio contratado.

$$\Delta P_{int} = P_{int} - P_{intcontr}$$

As ações de controlo podem ser resumidas na tabela 1.

Tabela 1: Ações de controlo

$\Delta\omega$	$\Delta P_{int}$	Alteração carga	Ação de controlo resultante
-	-	$\Delta PL_1$ + $\Delta PL_2$ 0	Aumento Pger sistema 1
+	+	$\Delta PL_1$ - $\Delta PL_2$ 0	Diminuição Pger sistema 1
-	+	$\Delta PL_1$ 0 $\Delta PL_2$ +	Aumento Pger sistema 2
+	-	$\Delta PL_1$ 0 $\Delta PL_2$ -	Diminuição Pger sistema 2

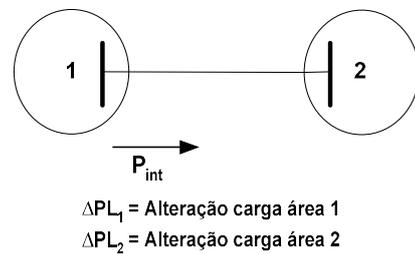


Figura 19: Ações de controlo na linha de interligação

Define-se controlo de área de um sistema interligado o local onde a produção e a carga são controlados como as regras apresentadas na tabela anterior.

As fronteiras do controlo da área são simplesmente as linhas de interligação, onde o fluxo de potência está a entrar ou a sair.

Todas as linhas que interligam áreas de diferentes SEE devem ser monitorizadas, para que o intercâmbio total entre áreas de controlo possa ser conhecido e contribuir para a estabilidade no controlo dos sistemas.

As regras aplicadas na tabela podem ser implementadas por um mecanismo de controlo que mede o desvio na frequência  $\Delta\omega$  e os desvios no valor do intercâmbio  $\Delta P_{int}$ .

A resposta da frequência e dos trânsitos de potência nas linhas de interligação resultantes de uma variação na carga  $\Delta PL_1$ , no sistema de 2 áreas da figura 15 são encontrados nas equações (15) a (16).

Estes resultados são representados da seguinte forma:

$$\Delta\omega = \frac{-\Delta P_{L1}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + D_1 + D_2} \quad (17)$$

$$\Delta P_{linha} = \frac{-\Delta P_{L1} \left( \frac{1}{R_2} + D_2 \right)}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + D_1 + D_2} \quad (18)$$

Relativamente à primeira linha da tabela tem-se:

$$\Delta P_{ger1} = \Delta P_{L1}$$

$$\Delta P_{ger2} = 0$$

A alteração necessária na produção, historicamente denominada Erro de Controlo de Área (ACE), representa o desvio na produção da área necessário para restaurar a frequência e o intercâmbio nas linhas de interligação para os valores desejados.

O Erro de Controlo da Área (ACE) pode ser expresso da seguinte forma:

$$ACE = (P_1 - P_0) - 10 \cdot B_f (f_1 - f_0) \pm B_t \Delta t$$

em que:

$P_1$  Intercâmbio que efetivamente se verifica (MW)

$P_0$  Intercâmbio previsto à frequência normal (MW)

$f_1$  Frequência que efetivamente se verifica (Hz)

$f_0$  Frequência desejada (Hz)

$B_f$  "Bias" da área (MW/0,1Hz): (variação da frequência com a carga)

$B_t$  "Bias" do erro temporal da área (MW/s)

$\Delta t$  Erro temporal (s), - para devagar e + para depressa

No caso dos dois sistemas interligados que estão a ser analisados, as equações para o ACE para cada área são:

$$ACE_1 = -\Delta P_{int1} - B_1 \Delta\omega$$

$$ACE_2 = -\Delta P_{int2} - B_2 \Delta\omega$$

Onde  $B_1$  e  $B_2$  são chamados fatores de influência da frequência "Bias". Pode-se ver a partir das equações (34) e (35) que estes valores podem obter-se da seguinte forma:

$$B_1 = \left( \frac{1}{R_1} + D_1 \right) \quad (19)$$

$$B_2 = \left( \frac{1}{R_2} + D_2 \right)$$

Resultando:

$$ACE_1 = \left( \frac{+\Delta P_{L1} \left( \frac{1}{R_2} + D_2 \right)}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + D_1 + D_2} \right) - \left( \frac{1}{R_1} + D_1 \right) \left( \frac{-\Delta P_{L1}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + D_1 + D_2} \right) = \Delta P_{L1}$$

$$ACE_2 = \left( \frac{-\Delta P_{L1} \left( \frac{1}{R_2} + D_2 \right)}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + D_1 + D_2} \right) - \left( \frac{1}{R_2} + D_2 \right) \left( \frac{-\Delta P_{L1}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + D_1 + D_2} \right) = 0$$

Este controlo pode ser continuado usando o esquema da figura 20. Notar que os valores  $B_1=B_2$  teriam que mudar cada vez que a unidade fosse ligada/desligada, de modo a obter os valores exatos dados pelas equações (19). Atualmente, a ação integral de controlo suplementar garante uma reposição do ACE para zero, mesmo quando  $B_1$  e  $B_2$  tomam valores incorretos.

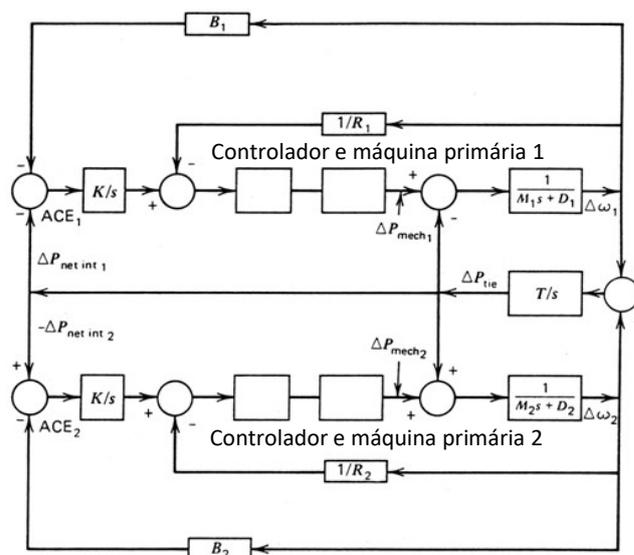


Figura 20: Controlo suplementar "Bias" na linha de interligação

### 8 Conclusão

Os sistemas elétricos de energia em corrente alternada constituem redes síncronas interligadas que funcionam com uma frequência comum que tem de ser regulada e controlada de uma forma rigorosa. Isto não será viável se não existir um método eficaz de controlo sobre os geradores, sobre a frequência e a tensão na rede e, também, sobre o transito de energia nas linhas de interligação. Este facto é tanto mais relevante quando se sabe que em corrente alternada a energia não pode ser eletricamente armazenada. 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-se assim a estabilidade da frequência e a exploração dos sistemas elétricos de uma forma segura.

## NOTAS DISPERSAS

---

**Massa:** Parte condutora de um equipamento elétrico suscetível de ser tocada, em regra, isolada das partes ativas mas podendo ficar em tensão em caso de defeito.

**Terra:** Massa condutora da Terra, cujo potencial elétrico é, em cada ponto, considerado, por convenção, igual a zero.

**Terra de proteção (Terra das massas):** Circuito de terra a que são ligados todos os elementos condutores da instalação normalmente sem tensão ou com tensões não perigosas, mas sujeitos a uma passagem fortuita de corrente que provoque diferenças de potencial perigosas e não previstas entre esses elementos (solo incluído). Comentário. - O presente regulamento permite que, em instalações que satisfaçam a condições especificadas, a terra de proteção possa desempenhar as funções de terra de serviço de alta ou de baixa tensão ou até de ambas, simultaneamente (terra geral). Fora de tais condições todas estas terras serão distintas.

**Terra de serviço (Terra da alimentação):** Circuito de terra a que são ligados unicamente pontos dos circuitos elétricos para influenciar as suas condições de exploração, quer limitando o potencial dos condutores em relação ao solo, quer permitindo o funcionamento das proteções

**Resistência de terra:** Resistência elétrica entre o eléctrodo de terra e a terra.

### Referências:

- [01] J. Sucena de Paiva, "Redes de Energia Eléctrica – uma análise sistémica", IST Press, 2014
- [02] J. Grainger, W. Stevenson, "Power System Analysis", McGraw-Hill International Editions, 1994
- [03] Rui Castro e Eduarda Pedro. "Redes e Sistemas de Energia Eléctrica", IST Press, 2014
- [04] Allen J. Wood; Bruce F. Wollenberg; Gerald B. Sheblé. "Power Generation, Operation, And Control". Third Edition. John Wiley & Sons, 2014
- [05] J. Beleza Carvalho, "O Controlo dos Sistemas Eléctricos de Energia", Apontamentos das aulas de Operação e Planeamento de Sistemas Eléctricos de Energia. ISEP, 2018.

**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

**Editora:** 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, seleccionar 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, seleccionar 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 (que-licenciado) 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 1998. Coordenador de Cursos na CEREBELUS – Engenharia de Segurança, entre 1997 e 1999. Sócio da empresa Neutro à Terra – Gabinete de Engenharia Ltda C252 e 2000. Prestação de serviços de formação e projetos técnicos associados em instalações em: âmbito das instalações elétricas, telecomunicações, segurança, gestão de energia, eficiência energética, a diversos entidades, nomeadamente NORVA – Consultores de Engenharia, Lda; Schmal – Engenharia e Serviços, Lda; ENERGO – Consultores de Engenharia, Lda; IQE – Instituto de Qualidade e Qualidade Quântica – fábrica de Químico Sintético, Lda; EP – Instituto Eletrotécnico Português; CENEFEEZ – 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 (que-licenciado) em Engenharia Industrial pela Escola de Engenharia da Universidade de Minho. Professor Adjunto no Departamento de Engenharia Eletrotécnica do Instituto Superior de Engenharia do Porto.

**José António Beleza Carvalho**

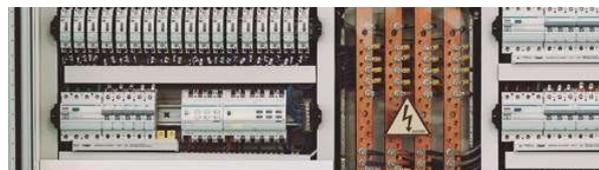
Bacharel e Licenciado em Engenharia Eletrotécnica pelo Instituto Superior de Engenharia do Porto. Mestre e Doutor em Engenharia Eletrotécnica na especialidade de Sistemas de Energia pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Professor Coordenador no Departamento de Engenharia Eletrotécnica 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 técnico-científica e integrada de artigos de papers, publicações de doutoramento e para a carreira do ensino superior.

Apoio à Edição  
**hager**

Parceiro de Comunicação  
**electricista**

Também disponível em formato e-book  
ISBN 9789898927620  
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.

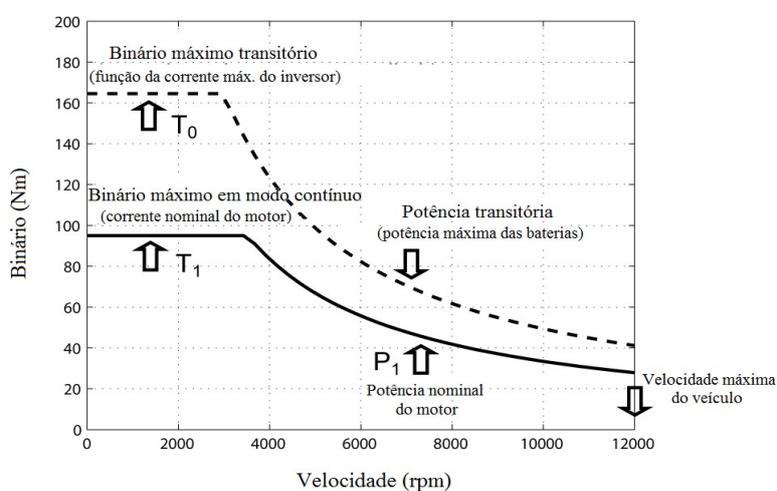


Figura 1 – Características dos sistemas de propulsão elétrica

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 ⇒ 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].

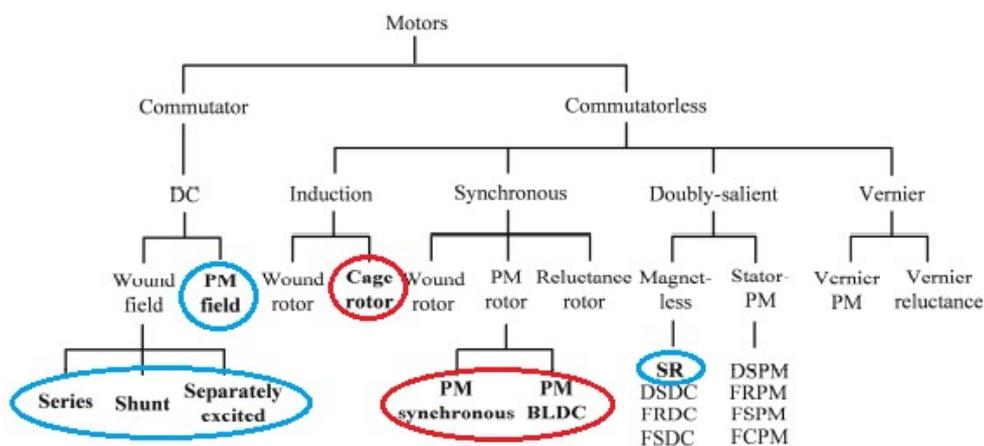


Figura 2 – Tipos de motores elétricos para propulsão

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).

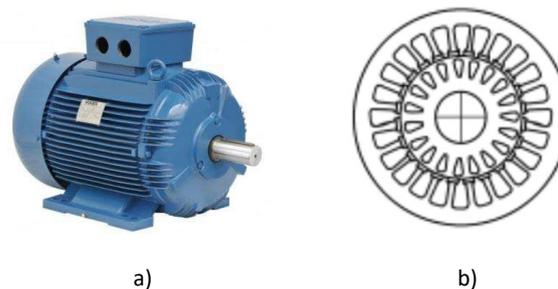


Figura 3 – MI: a) aspeto geral; b) corte seccional

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).

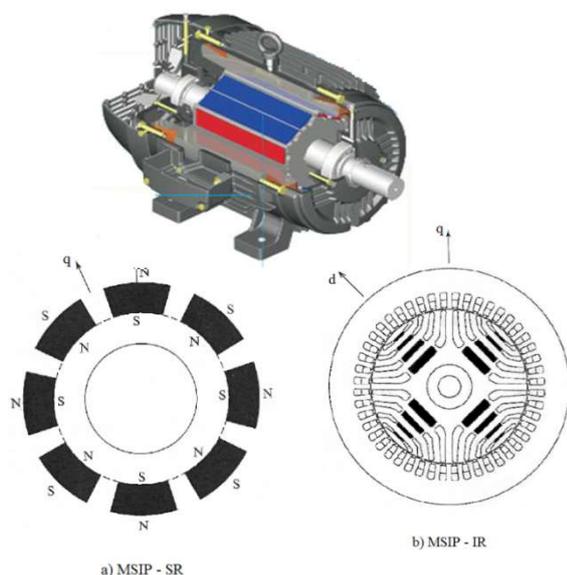


Figura 4 – MSIP: exemplo de aspeto geral; variantes rotóricas: SR (a) e IR (b)

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.,  $L_d \neq L_q$ )<sup>(1)</sup> – 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)<sup>(2)</sup>, 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.

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

<sup>(2)</sup> 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).

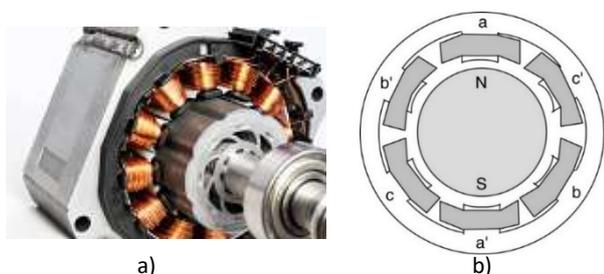


Figura 5 – MBDC: a) aspeto geral; b) corte seccional

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 estáticos 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 estáticas, 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)<sup>(3)</sup>.

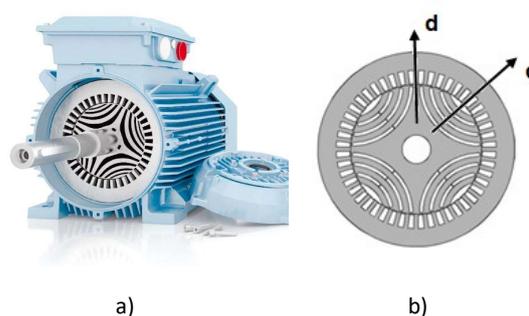


Figura 6 – MSrel: a) aspeto geral; b) corte seccional

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.

<sup>(3)</sup> 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).

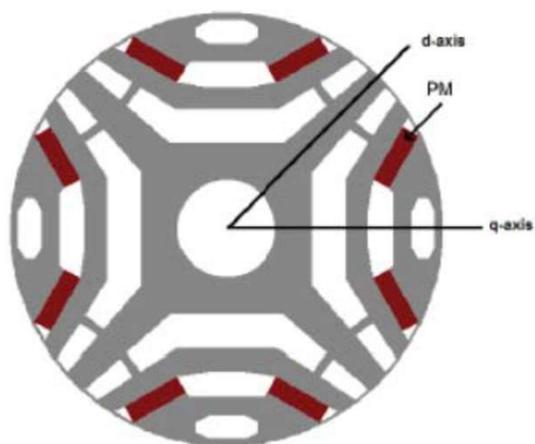


Figura 7 – Corte seccional de rotor de MSrel com IP [13]

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.

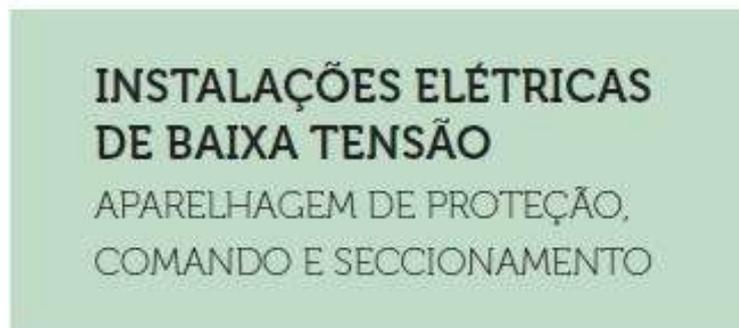
## HUMOR ELETRO



**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 **ELETROTECHNIA**

António Gomes  
 Sérgio Ramos  
 André Sá



## ESTRATÉGIA DE FLEXIBILIDADE DE VEÍCULOS ELÉTRICOS PARA ALÍVIO DE CONGESTIONAMENTO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO

### Resumo

*Devido à crescente preocupação com as questões ambientais e de sustentabilidade, o sistema de transporte está a passar por importantes mudanças em seu paradigma, com a crescente substituição de veículos de combustão interna por elétricos. Consequentemente, os sistemas elétricos precisam se adaptar à carga cada vez maior exigida da rede de distribuição e ao desafio de identificar padrões de comportamento dos utilizadores de veículos elétricos. Para preparar a rede para essas mudanças, é necessário estudar o comportamento dos usuários de VEs e desenvolver estratégias para lidar com a crescente demanda de veículos elétricos. Sabendo que os veículos elétricos passam por longos períodos estacionados nas estações de carregamento (acima do necessário para recarregar completamente a sua bateria), este trabalho de pesquisa propõe uma estratégia de carregamento de VEs, que visa explorar esses longos tempos estacionados nas estações de carregamento de maneira inteligente. Essa metodologia é aplicada em uma cidade inteligente realista com alta penetração de veículos elétricos para investigar melhor sua aplicação e resultados.*

**Palavras-Chaves** — Veículos Elétricos, Carregamento Inteligente, Sistema de Distribuição.

### I. INTRODUÇÃO

De acordo com o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), foi estabelecido um objetivo de limitar o aquecimento global a menos de 2 °C em relação aos níveis pré-industriais até o final do século 21 [1], e 195 países participarão ativamente para alcançar tal objetivo [2]. Para reduzir as emissões de gases poluentes e conter a crescente preocupação com o uso da energia de maneira mais sustentável, existe uma certa tendência no aumento da

participação de veículos elétricos (VE) na indústria automotiva, uma vez que os veículos com motores de combustão interna contribuem para cerca de 16% das emissões globais de dióxido de carbono feitas pelo homem [3].

É amplamente reconhecido que a mudança de automóveis a combustão interna para VEs tem muitas vantagens ambientais e econômicas. No entanto, o número crescente de VEs requer um desenvolvimento contínuo de novas infraestruturas para o carregamento de VEs, o que leva a uma crescente demanda de energia [4], [5]. Essas configurações de carregamento sobrecarregam o sistema de distribuição de energia [6] – [8], decorrente das altas demandas de energia nas estações de carregamento rápido de veículos elétricos.

Com a alta penetração dos VEs e a geração distribuída na rede, o sistema de distribuição de energia está a sofrer alterações em suas características, a colocar novos desafios ao Operador do Sistema de Distribuição (DSO) em termos de segurança e operação econômica da rede [7]. Os proprietários de VEs possuem um certo padrão de comportamento que pode ser explorado, por exemplo o fato de permanecerem longos períodos de tempo nas estações de carregamento (tempo este que é superior ao necessário para recarregar a bateria completamente). O DSO pode explorar esse comportamento e a coordenação do carregamento dos VEs, de tal forma que esta combinação possa ser utilizada para os serviços auxiliares, portanto, mantendo a rede mais estável.

Este artigo é organizado da seguinte forma: Seção II descreve a metodologia proposta; Seção III apresenta o estudo de caso, e a Seção IV apresenta as conclusões.

## II. METODOLOGIA PROPOSTA

Esta seção apresenta uma descrição detalhada da metodologia adotada, representada na Fig.1. Combina um simulador do comportamento dos utilizadores de VEs [8] com uma operação/reconfiguração inovadora de uma rede de distribuição inteligente baseada nos preços marginais localizados (LMP). Como este problema é classificado como programação não-linear inteira mista (MINLP), o método de decomposição de *Benders* foi utilizado para a resolução do problema de otimização [9], através do uso de um software especializado, o TOMLAB. Este trabalho é uma extensão do estudo descrito em [10], onde é apresentado o modelo matemático completo, referente ao problema de otimização, simulador do comportamento dos utilizadores de VEs, restrições da rede, subestação e do sistema de armazenamento de energia.

Para alcançar o objetivo declarado anteriormente, primeiro as cargas (incluindo os VEs) e as gerações distribuídas são mapeadas. Em seguida, o modelo de otimização pode carregar e iniciar.

Esse modelo de otimização fornece informações importantes, como: preços marginais localizados, topologia da rede, trânsito de potências, magnitude da tensão e perdas de energia. A partir dessas informações, foi desenvolvida a estratégia de carregamento dos VEs, que funciona de acordo com o fluxograma apresentado na Fig. 2. A cada 15 minutos, é realizada uma análise da rede para identificar se algum parâmetro está além de seus limites, por exemplo se a magnitude da tensão é muito baixa ou muito alta, linhas estão sobrecarregadas e assim por diante. Além desses dados obtidos no modelo de otimização, existem também os dados dos VEs, como suas localizações, estado de carga das baterias, viagens programadas e tempo necessário para carregar completamente. Combinando essas informações, existem dados do preço mínimo dos usuários do VE para parar de carregar o VE, ou seja, se o sistema estiver sobrecarregado e o VE tiver bateria suficiente para fazer a próxima viagem, o VE poderá suspender o seu processo de carregamento naquele período para manter a rede estável e dentro de seus limites de operação, mas, é claro, recebendo uma certa quantia de dinheiro do DSO.

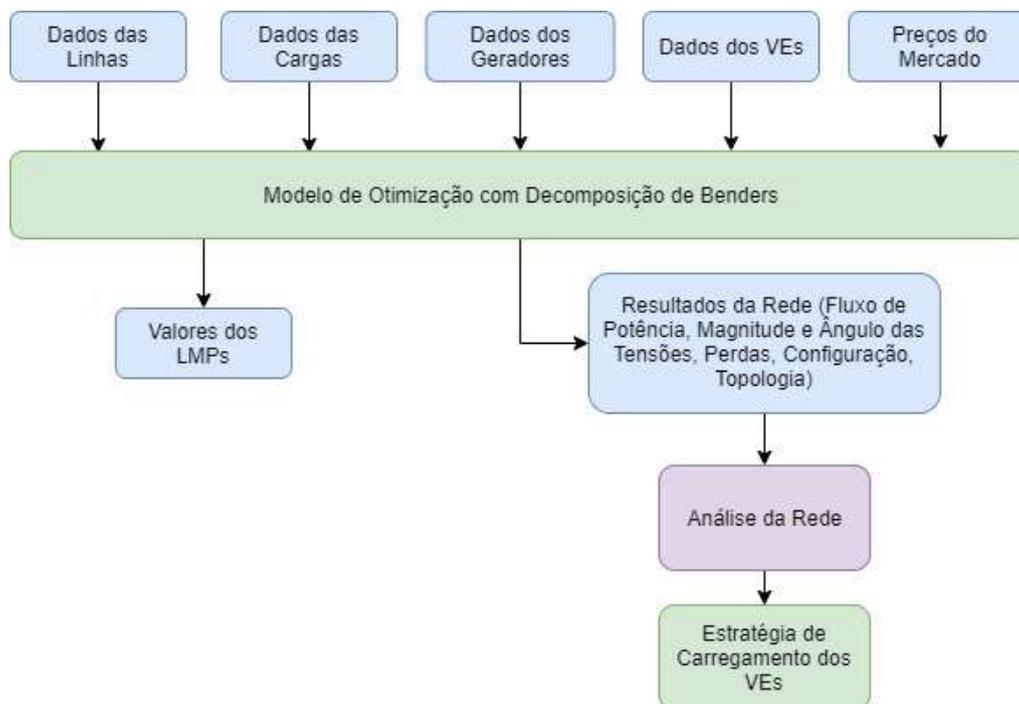


Figura 1. Metodologia proposta

Na estratégia proposta, o DSO só realizará essa escolha se a rede estiver sobrecarregada e se o preço do VE for inferior ao preço marginal da energia no barramento da estação de carregamento. Inicialmente, a função objetivo não leva em consideração o custo da flexibilidade dos VEs. Depois que a estratégia é aplicada e o valor a ser pago pelo DSO pela flexibilidade dos VEs é adicionado à função objetivo, para comparar com os resultados com e sem a aplicação da estratégia. É importante mencionar que no simulador do comportamento dos VEs, os VEs com estado de carga da bateria (SoC) igual ou inferior a 20% são imediatamente enviados para a estação de carregamento mais próxima e, para esses usuários, os preços da flexibilidade são alterados para valores superiores ao LMP da estação de carregamento em questão.

Com essa alteração, o DSO nunca solicitará que eles parem de carregar, mesmo que a rede esteja fora de seus limites.

Para acelerar o tempo computacional de simulação, cada VE neste trabalho representa 5 unidades. O motivo para não aumentar o número da população de VEs na rede foi devido à carga computacional, que foi alta o suficiente com uma população de 5000 VEs. Portanto, para fazer um VE representar 5, a capacidade da bateria de cada VE e a energia gasta durante cada viagem bem como o preço mínimo do VE para interromper seu carregamento foi alterada.

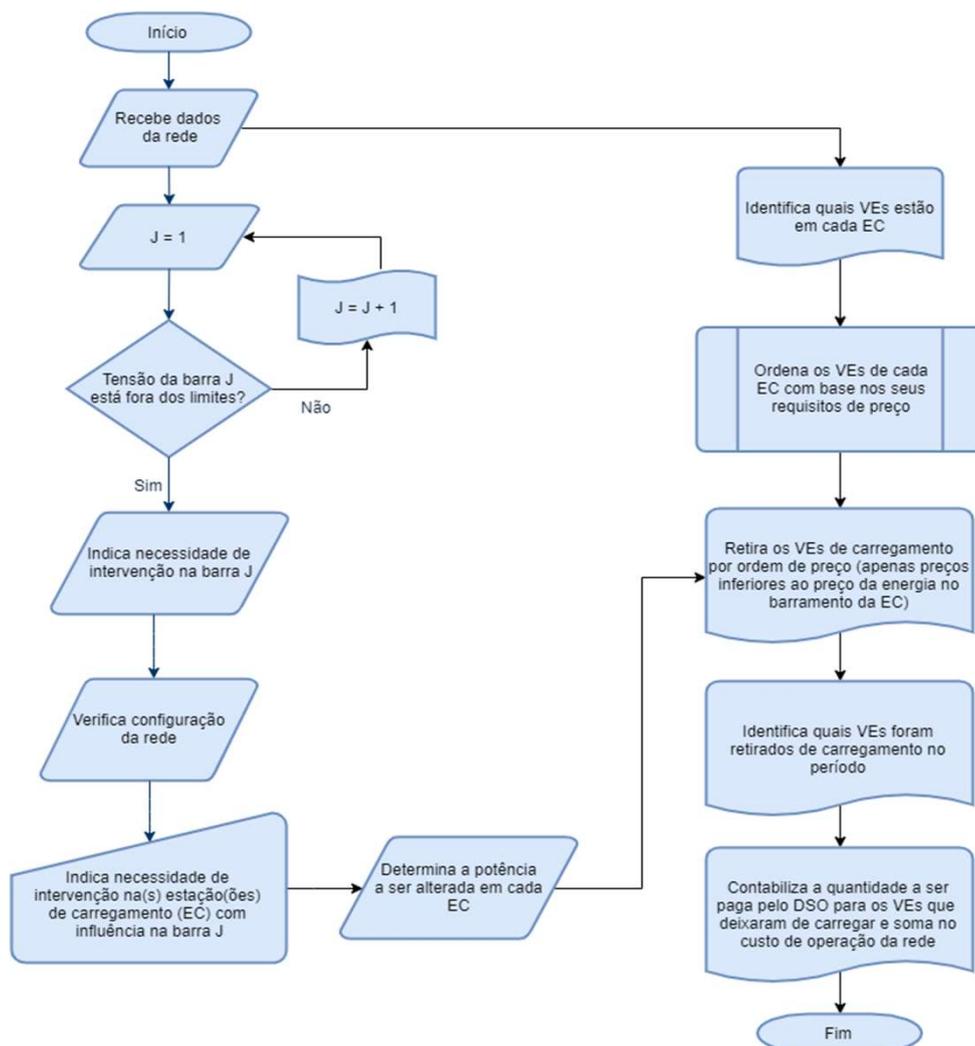


Figura 2. Fluxograma da Estratégia de carregamento dos VEs

### III. ESTUDO DE CASO

Nesta seção, o estudo de caso do trabalho é apresentado na Fig. 3, com base na rede mencionada acima. Para demonstrar a aplicação da metodologia proposta, foi utilizada a rede de distribuição modelo da cidade inteligente do laboratório BISITE, com 13 barramentos e alta penetração de recursos de energia distribuída.

Essa rede de distribuição possui uma subestação de 30 MVA, 25 pontos de carga (sem incluir os postos de carregamento de VEs), 4 estações de carregamento de VEs, 15 unidades de geração distribuída (2 parques eólicos e 13 parques fotovoltaicos) e 4 baterias de condensadores de 1 Mvar, que também pode ser visto na Fig. 3.

O estudo de caso foi dividido em 2 cenários, com o objetivo de aplicar a metodologia apresentada para posteriores análises dos resultados.

Os cenários são todos semelhantes, a alterar apenas o preço mínimo dos utilizadores de VEs para interromper seu carregamento, possibilitando observar a aplicabilidade da estratégia a diferentes preços de flexibilidade.

#### A. Cenário 1

Nesse cenário, a estratégia de carregamento apresentada no capítulo anterior foi aplicada na rede mostrada na Fig. 3, de forma que o preço médio dos usuários de VE que foram solicitados a interromper o carregamento resultassem em 0,095 € / kW.

O período mais crítico neste cenário (maior custo operacional) foi entre 20h30 e 20h45, com um custo operacional de 424,05 € (antes da estratégia). Portanto, escolhemos esse período para ser analisado em todos os outros cenários, a fim de comparar os resultados da metodologia proposta.

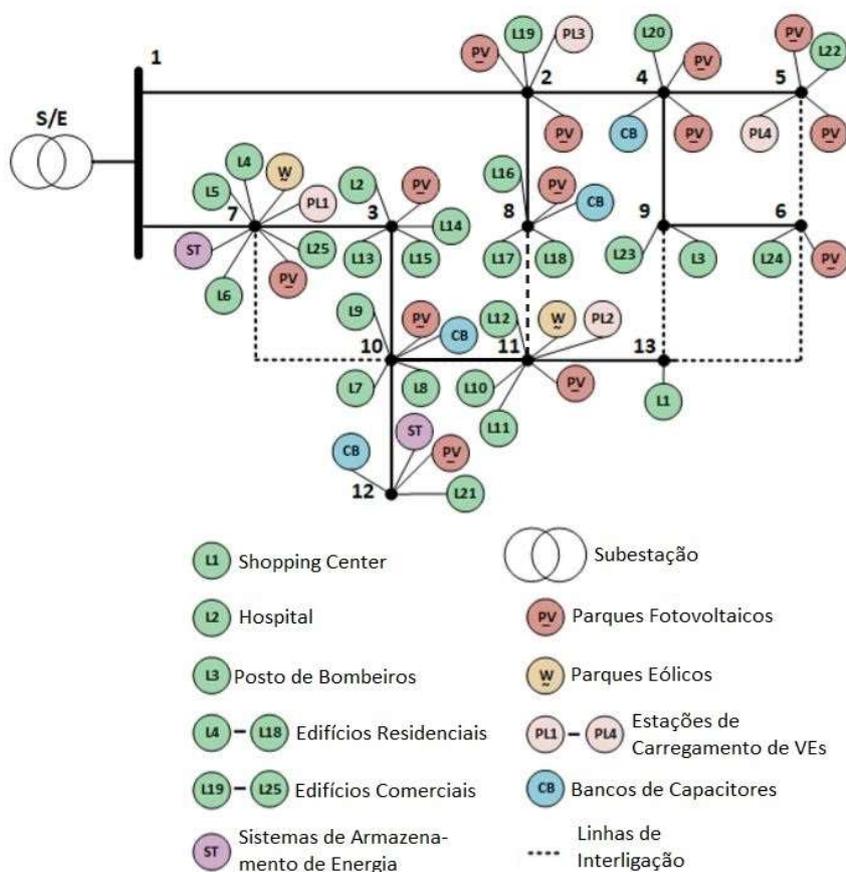


Figura 3. Diagrama Unifilar da Cidade Inteligente [10]

Para avaliar os resultados da aplicação desta estratégia, a magnitude da tensão em todos os barramentos antes e depois da estratégia é mostrada na Tabela I.

Tabela I – Magnitude da tensão no cenário 1

Número Barramento	Tensão Antes da Estratégia (p.u.)	Tensão Após a Estratégia (p.u.)
1	1	1
2	0.919	0.967
3	0.931	0.978
4	0.904	0.953
5	0.889	0.942
6	0.895	0.944
7	0.941	0.985
8	0.886	0.961
9	0.901	0.948
10	0.923	0.973
11	0.881	0.967
12	0.916	0.971
13	0.877	0.959

Para entender os resultados apresentados na Tabela I, é necessário identificar o número de VEs em cada estação de carregamento antes e depois da estratégia, de modo a saber quantos VEs foram retirados de carregamento no período. Estes dados são apresentados na Tabela II.

Tabela II – Distribuição dos VEs no cenário 1

Número da Estação de Carregamento	Número de VEs Antes da Estratégia	Número de VEs Depois da Estratégia	Número de VEs Retirados de Carregamento
1 (Normal)	50	35	15
2 (Normal)	160	125	35
3 (Rápido)	100	80	20
4 (Rápido)	70	60	10

Com essas informações, foi possível calcular a quantidade de energia alterada na rede, 1581 kW. Como mencionado anteriormente, o preço médio da flexibilidade foi de 0,095 €/kW, portanto o valor pago pelo DSO pela flexibilidade dos VEs foi de 150,19 €.

No entanto, como a utilização dessa estratégia implica uma redução nos custos de congestionamento e perdas de energia, que combinados, resultaram em uma redução de 38,45 €, fica evidente que a aplicação da estratégia com esses preços de flexibilidade dos VEs foi insuficiente para tornar a estratégia interessante pela perspectiva do DSO, uma vez que o custo de operação após a estratégia resultou em 535,79 €, enquanto o custo de operação antes da estratégia foi de 424,05 €.

Isso ocorre principalmente pois o custo de congestionamento (0.02 €/kW para linhas com mais de 50% de carregamento) foi significativamente menor que o custo de flexibilidade. O custo de congestionamento nesta rede é linear, o que não é verdade no mundo real, porque os custos de congestionamento das linhas normalmente obedecem o comportamento de uma função exponencial.

#### B. Cenário 2

Este cenário é semelhante ao anterior, mas agora o preço médio do preço mínimo para os usuários de VE parar seu carregamento é de 0,017 €/kW (apenas VEs que foram retirados de carregamento). O custo de operação antes da estratégia continua de 424,05 €. O número de VEs retirados de carregamento neste cenário é o mesmo que o do cenário 1, portanto as magnitudes de tensão nos barramentos antes e depois da estratégia são as mostradas na Tabela I. Consecutivamente, a distribuição dos VEs nesse cenário é igual à distribuição no cenário 1, apresentada na Tabela II.

Como o preço médio do preço de flexibilidade dos utilizadores de VEs retirados de carregamento foi de 0,017 €/kW e a potência alterada no sistema foi de 1581 kW, a quantia paga pelo DSO pela flexibilidade dos VEs foi de 26,87 €. Como este cenário é semelhante ao cenário 1, a redução de custos de congestionamento e a perda de energia é a mesma, 38,45 €. Portanto, neste cenário, o custo de operação após a estratégia resultou em 412,47 €, sendo inferior ao custo de operação antes da estratégia, 424,05 €.

Com essas informações, é possível afirmar que a estratégia se tornou interessante para o DSO, porque as magnitudes de tensão agora são melhores e por um preço mais baixo. Com esse cenário, ficou evidente que, à medida que os preços de flexibilidade dos VEs começam a se aproximar dos custos de congestionamento, a estratégia começa a se tornar interessante pela perspectiva do DSO.

#### IV. CONCLUSÕES

A metodologia proposta foi aplicada a um estudo de caso, realizado em um modelo de uma cidade inteligente com uma rede de distribuição com 13 barramentos. Os resultados mostraram que é possível fazer com que a rede funcione com menor custo operacional em alguns cenários. Isso é possível através do desenvolvimento de estratégias que podem ser benéficas tanto para o DSO quanto para os consumidores. Este trabalho explorou as estratégias desenvolvidas em torno das estações de carregamento de veículos elétricos públicas na cidade inteligente. A ideia é remover ou interromper o carregamento de alguns VEs em períodos em que o custo de operação da rede esteja alto e as linhas sobrecarregadas. Porém, para tornar essa estratégia interessante para todos, é necessário garantir que a remoção do VE de carregamento nesse período não afete as viagens programadas desses VEs e que os proprietários desses VEs recebam uma certa quantia em dinheiro pela flexibilidade disponibilizada.

Através da aplicação da estratégia na rede de distribuição apresentada, foi mostrado que as magnitudes de tensão podem ser melhoradas e diminuir o carregamento do sistema, mas essas melhorias nem sempre valem a pena em termos de custos. Para que os custos valham a pena, os preços da flexibilidade dos VEs devem estar pelo menos próximos da soma dos custos de congestionamento e perda de energia (por unidade de energia, kW por exemplo). É claro que esse custo depende da rede de distribuição, país, etc., e estudos adicionais são recomendados para explorar essa ou outras estratégias semelhantes em mais casos em nível local.

#### REFERÊNCIAS

- [1] Contribution of Working Groups I II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, "Climate Change 2014: Synthesis Report." Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC, Geneva, p. 151, 2015.
- [2] UNFCCC, "Adoption of the Paris Agreement," Paris, 2015.
- [3] Int. Org. of Motor Vehicle Manufacturers, "Climate Change and CO2: Automakers set out their global view," Leipzig, 2008.
- [4] M. M. Alam, S. Mekhilef, M. Seyedmahmoudian, and B. Horan, "Dynamic Charging of Electric Vehicle with Negligible Power Transfer Fluctuation," *Energies*, vol. 10, no. 5, 2017.
- [5] A. Foley, I. J. Winning, and B. P. O. Gallachoir, "State-of-the-art in electric vehicle charging infrastructure," in *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2010.
- [6] T. G. Heydt, "The Impact of Electric Vehicle Deployment on Load Management Strategies," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-102, no. 5, pp. 1253–1259, 1983.
- [7] S. Rahman and G. Shrestha, "An investigation into the impact of electric vehicle load on the electric utility distribution system," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 8, no. 2, pp. 591–597, 1993.
- [8] B. Canizes et al., "Electric Vehicles' User Charging Behaviour Simulator for a Smart City," *Energies*, vol. 12, no. 8, 2019.
- [9] J. Soares, T. Pinto, F. Lezama, and H. Morais, "Survey on Complex Optimization and Simulation for the New Power Systems Paradigm," *Complexity*, Aug. 2018.
- [10] B. Canizes, J. Soares, Z. Vale, and J. M. Corchado, "Optimal Distribution Grid Operation Using DLMP-Based Pricing for Electric Vehicle Charging Infrastructure in a Smart City," *Energies*, Feb. 2019.

## MOTOR DE TRACÇÃO PARA FORMULA STUDENT: A MELHOR OPÇÃO

### Resumo

A escolha de um motor para veículos de tração elétrica é uma das principais tarefas ao projetar um carro de competição elétrico, uma vez que o motor é o elemento que especifica as características dinâmicas do veículo. Neste artigo procede-se a uma análise dos diferentes tipos de motores utilizados atualmente na mobilidade elétrica, sendo que o mais favorável para a implementação no sistema propulsor elétrico do Formula Student é o motor síncrono de ímãs permanentes, o que garante elevada performance do veículo. É desenvolvido o estudo da propulsão elétrica, através do cálculo das forças dinâmicas que atuam num veículo, para se determinar as características mecânicas do motor elétrico e se optar pela tecnologia mais eficiente. É apresentada uma possível solução técnica do motor elétrico a implementar no sistema propulsor, selecionado a partir dos resultados obtidos da propulsão elétrica do Formula Student.

### 1 Introdução

A utilização de motorização elétrica em veículos, acarreta inúmeras vantagens face aos veículos providos de motores de combustão interna, nomeadamente, a possibilidade inerente aos motores elétricos de produzirem o binário máximo a partir do repouso, os seus tempos de resposta reduzidos, a possibilidade de regenerar a energia produzida durante a travagem, o controlo independente de cada roda e consumo (indireto) de energia disponível em fontes renováveis [1].

A Formula Student é uma competição automóvel entre universidades mundiais, organizada pelo *Institution of Mechanical Engineers*, com parceria da organização mundial *Society of Automotive Engineers*. Refere-se à conceção, desenho e fabrico de um pequeno Formula 1, tal como se pode visualizar na Figura 1, nas categorias de veículo elétrico, híbrido e combustão.

O projeto Formula Student é gerido e realizado integralmente por alunos com o propósito de complementar a formação académica, gerando assim profissionais bem preparados para o futuro, nomeadamente no ramo da indústria automóvel.

Este artigo expõe as diferentes tecnologias de motores passíveis de serem utilizados em veículos elétricos, efetuando-se, de seguida, uma seleção da melhor solução do motor a instalar no sistema propulsor elétrico do Formula Student. É igualmente apresentado o algoritmo da propulsão elétrica do veículo de competição, o que permite determinar as características mecânicas do motor a utilizar, sendo elas: a potência mecânica, a rotação e o binário, com o objetivo de exibir uma possível solução técnica a implementar no sistema propulsor do veículo.



Figura 1 – Formula Student da equipa TU Delft

### 2 Motores Elétricos: Critérios de Seleção

O motor elétrico é o componente principal num sistema de propulsão elétrica, sendo este um dos elementos com maior ponderação na construção de um veículo elétrico de competição.

É necessário que o motor possua boas características em alguns requisitos típicos de tração, tais como [2] e [3]:

- Alta densidade de binário e potência;

- Binário elevado em baixas velocidades para arranques rápidos e subidas;
- Ampla faixa de velocidades, incluindo regiões de binário constante e de potência constante;
- Alta eficiência na frenagem regenerativa;
- Alta eficiência sobre a ampla faixa de velocidades e binário.

Na Tabela 1, é feita uma comparação entre quatro tipos de motores elétricos, os mais utilizados atualmente na propulsão de veículos de tração elétrica, sendo eles: o motor de corrente contínua (DC), o motor de indução trifásico (IM), o motor de relutância variável trifásico (SRM) e o motor síncrono de ímãs permanentes (PMSM). São apresentadas na tabela as principais características para seleção do motor a implementar no sistema propulsor elétrico do Formula *Student*. Para cada característica presente na tabela é atribuído um valor entre 1 a 5, sendo que 1 corresponde a “fraco” e 5 a “bom”. Na última linha da tabela é efetuado um somatório de todos os valores atribuídos às características de seleção de cada motor correspondente [2] e [3].

Tabela 1 – Comparação qualitativa dos quatro motores elétricos

Tipos de Motores				
Características	DC	IM	SRM	PMSM
Densidade de Potência	2,5	3,5	3,5	5
Eficiência	2,5	3,5	3,5	5
Controlabilidade	5	5	3	4
Fiabilidade	3	5	5	4
Maturidade da Tecnologia	5	5	4	4
Custo	4	5	4	3
$\Sigma$ Total	 22	 27	 23	 25

Pela análise da Tabela 1, conclui-se que o PMSM é o motor apropriado para ser implementado no sistema propulsor elétrico do Formula *Student*.

Este motor garante uma elevada performance do veículo, uma vez que, possui uma alta densidade de potência e binário, bem como uma alta eficiência durante o seu funcionamento. Além disso, é um motor de pequenas dimensões e de peso reduzido, o que facilita o acréscimo deste tipo de motores no sistema de propulsão, de forma a obtermos tração dianteira, traseira ou integral [3].

### 3 Metodologia de Cálculo da Propulsão Elétrica

#### 3.1 Aspectos Teóricos

Uma vez selecionado o tipo de motor a utilizar no sistema propulsor do veículo, passamos ao algoritmo da propulsão elétrica que nos permite determinar as características mecânicas do motor elétrico a implementar no Formula *Student*. Para tal, é necessário realizar os cálculos da potência mecânica, do binário e da rotação do motor [4].

A potência mecânica solicitada ao motor é determinada pela Equação (1):

$$P_{mec} = \frac{n \times T \times 2\pi}{60} \quad (1)$$

O motor deve possuir um binário suficiente para vencer a resistência ao rolamento, o arrasto aerodinâmico, a resistência à aceleração e o declive dos percursos que o veículo se destina. Estas forças que se opõem ao movimento do bólido estão representadas através do esquema da Figura 2, cujas equações se apresentam a seguir [5].

$$F_{tr} = F_{roll} + F_{up} + F_{air} + F_{in} \quad (2)$$

$$F_{tr} = \frac{\eta_{tr} \cdot T \cdot i}{r} \quad (3)$$

$$F_{roll} = f_k \cdot m \cdot g \cdot \cos(\alpha) \quad (4)$$

$$F_{up} = m \cdot g \cdot \sin(\alpha) \quad (5)$$

$$F_{air} = 0,5 \cdot c_x \cdot \rho_{air} \cdot A \cdot V_{max}^2 \quad (6)$$

$$F_{in} = m \cdot a \cdot \sigma_r \quad (7)$$

$$\sigma_r = 1,04 + 0,0025 \cdot i^2 \quad (8)$$

$$f_k = f_0 \cdot (1 + A_f \cdot V_{max}^2) \quad (9)$$

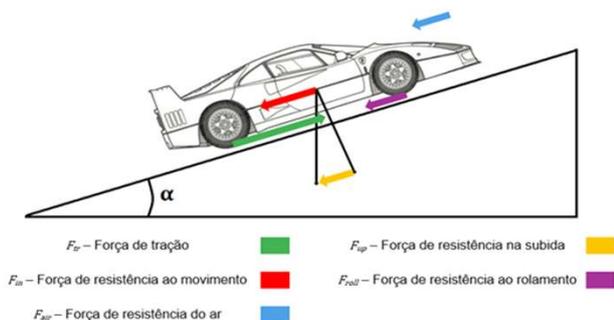


Figura 2 – Esquema das forças que atuam num veículo

Substituindo na Equação (2) pelas Equações (3), (4), (5), (6) e (7), e resolvendo em ordem ao binário, obtém-se o binário máximo do motor elétrico, de acordo com a Equação (10):

$$T = \frac{(f_k \cdot m \cdot g \cdot \cos(\alpha) + m \cdot g \cdot \sin(\alpha) + 0,5 \cdot c_x \cdot \rho_{air} \cdot A \cdot V_{max}^2 + m \cdot a \cdot \sigma_r) \cdot r}{\eta_{tr} \cdot i} \quad (10)$$

Geralmente, os veículos elétricos não têm uma caixa de velocidades porque o motor elétrico debita um elevado binário a baixas rotações. Estes possuem apenas um sistema de transmissão com uma única relação. Para calcular a rotação no eixo do motor utiliza-se a Equação (11):

$$n = \frac{V_{max} \cdot i \cdot 60}{r \cdot 2\pi} \quad (11)$$

A Tabela 2, representa a designação das siglas referentes às equações anteriores, assim como os respetivos valores dos coeficientes [5].

### 3.2 Cálculo da Propulsão Elétrica

O motor a instalar no sistema propulsor elétrico do Formula *Student* deve corresponder às especificações pretendidas pelo projetista, sendo elas: a aceleração e a velocidade máxima que o bólido atinge.

Tabela 2 – Tabela de siglas e coeficientes

$P_{mec}$	Potência mecânica que é solicitada ao motor (W)
$n$	Rotação no eixo do motor (RPM);
$T$	Binário no eixo do motor (Nm);
$\eta_{tr} = 0,9$	Rendimento do sistema de transmissão;
$i$	Relação de transmissão total;
$r$	Raio efetivo da roda (m);
$f_k$	Coefficiente de resistência ao rolamento do pneu numa superfície;
$f_0 = 0,015$	Coefficiente para o asfalto liso;
$A_f = 5,1 \times 10^{-4}$	Coefficiente de eficiência da velocidade na força de resistência ao rolamento ( $s^2/m^2$ );
$m$	Massa do carro, incluindo o peso do condutor (kg);
$g = 9,81$	Aceleração da gravidade ( $m/s^2$ );
$\alpha$	Inclinação da pista ( $^\circ$ );
$c_x = 0,5$	Coefficiente aerodinâmico do veículo;
$\rho_{air} = 1,202$	Densidade do ar sob condições normais ( $s^2/m^2$ );
$A = 1,6$	Área frontal do veículo ( $m^2$ );
$V_{max}$	Velocidade máxima do veículo elétrico (m/s);
$\sigma_r$	Coefficiente de compensação das massas rotativas.

Sendo assim, é necessário definir previamente alguns valores referentes às características dinâmicas, dimensão da roda e peso do veículo, tais como [3]:

- Aceleração Média 0 aos 100 km/h – 6,17 m/s<sup>2</sup> (t=4,5 s)
- Velocidade Máxima – 120 km/h
- Raio efetivo da roda – 0,21 m
- Peso do Formula *Student* (incluindo o condutor) – 300 kg

Posteriormente, será necessário atribuir valores na relação de transmissão, de forma a obter os valores das quantidades desejadas do binário máximo e da rotação máxima no eixo do motor.

### 3.3 Apresentação da Solução Técnica

De acordo com a metodologia da propulsão elétrica, a Tabela 3 indica os valores nominais das características mecânicas do motor a selecionar para o sistema propulsor elétrico do Formula *Student*, para os parâmetros das características dinâmicas do veículo definidos na secção anterior.

Tabela 3 – Resultado da simulação da propulsão elétrica

Relação de Transmissão Total	Inclinação da Pista (°)	Binário Motor (Nm)	Velocidade Motor (RPM)	Potência Mecânica (W)
1	0	591,25	1515,76	93849,57
1,5	0	395,07	2273,64	94063,90
2	0	297,25	3031,52	94363,97
2,5	0	238,77	3789,40	94749,77
3	0	199,96	4547,28	95221,31
3,5	0	172,40	5305,16	95778,58
3,5	+2	179,25	5305,16	99581,06
3,5	+4	186,08	5305,16	103375,79
3,5	+6	192,88	5305,16	107158,15
3,5	-2	165,55	5305,16	91972,97
3,5	-4	158,70	5305,16	88168,88
3,5	-6	151,87	5305,16	84370,94

Pela análise da Tabela 3, verifica-se que o binário no eixo do motor é desmultiplexado com o aumento do valor da relação de transmissão total. A potência mecânica numa aceleração dos 0 – 100 km/h é aproximadamente 100 kW, visto que varia consoante a inclinação da pista.

A escolha do motor parte da análise dos resultados de simulação da Tabela 3, onde se conclui pelos valores nominais da potência mecânica, rotação e binário do motor.

Perante estes resultados, a melhor opção será implementar o motor EMRAX 228 *Medium Voltage LC*, dado que os valores obtidos para uma relação de transmissão total de 3,5 não excedem os valores das características mecânicas do motor elegido. Os respetivos dados técnicos do EMRAX 228 *Medium Voltage LC* estão indicados na Tabela 4 [6].

O motor síncrono de ímanes permanentes foi a melhor opção para integrar no sistema propulsor deste veículo, apesar de ser um motor de elevado custo quando comparado a outros tipos de motores.

Tabela 4 - Dados técnicos do motor EMRAX 228 *Medium Voltage LC*

EMRAX 228 Medium Voltage LC	
Potência Máxima (kW)	100
Potência 3000 – 5000 RPM (kW)	28 - 42
Binário Máximo (Nm)	240
Binário Contínuo (Nm)	125
Rotação Máxima (RPM)	5500
Eficiência (%)	92 – 98
Tipo de Ligação	Estrela

## 4 Conclusão

O motor síncrono de ímanes permanentes foi o motor elegido para o sistema propulsor elétrico do Formula *Student*, que apesar do seu custo mais elevado, o investimento é compensado pela sua elevada eficiência e alta densidade de potência e binário, garantindo um elevado desempenho do veículo. O cálculo da propulsão elétrica permite determinar o binário de arranque, ou seja, o binário que resulta no momento da aceleração máxima do veículo que corresponde ao esforço máximo que será imposto ao motor. O binário de arranque deve ser desmultiplexado, sendo assim fez-se um estudo do valor da relação de transmissão que proporciona uma boa relação entre o binário e a velocidade do motor EMRAX 228 *Medium Voltage LC*. O rendimento da transmissão diminui à medida que a relação de transmissão total aumenta, provocando um aumento nas perdas mecânicas.

## Bibliografia

- [1] J. Pinto, "Formula Student- Sistema de Tração," 2014.
- [2] M. Zeraouia, "Electric motor drive selection issues for HEV propulsion study," pp. 1-10, 5 outubro 2010.
- [3] J. Rigor, "Estudo e Desenvolvimento de Sistema Propulsor para Veículo Elétrico," Porto, 2018.
- [4] S. D. Umans, Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley, Porto Alegre: AMGH, 2014.
- [5] O. U. D.S. Korobkov, "Choice of the Traction Motor for the Electric Racing Car "Formula," pp. 1-6, 2016.
- [6] EMRAX, "EMRAX Innovative E-Motors," agosto 2018. [Online]. Available: [http://emrax.com/wp-content/uploads/2017/10/user\\_manual\\_for\\_emrax\\_motors.pdf](http://emrax.com/wp-content/uploads/2017/10/user_manual_for_emrax_motors.pdf). [Acedido em 4 dezembro 2018].

## BATERIAS DE IÕES DE LÍTIO, A CHAVE DA ELETRIFICAÇÃO AUTOMÓVEL

### Resumo

A mobilidade da sociedade do século XXI levanta questões de sustentabilidade energética, tanto a nível da produção de energia como do seu armazenamento. As baterias de iões-lítio são um dos sistemas de armazenamento químico de energia mais relevantes da atualidade com aplicação nos mais diversos dispositivos elétricos e eletrónicos e, recentemente, nos veículos elétricos e híbridos. Comparativamente a outros sistemas, estas baterias destacam-se por serem leves e com elevado potencial elétrico, entre outras características vantajosas que se descrevem. Neste artigo são apresentadas e comparadas 3 tecnologias de baterias de iões de lítio utilizadas na indústria automóvel, com uma reflexão sobre as necessidades tecnológicas a desenvolver nos próximos anos.

**Palavras Chave:** Veículo Elétrico, Bateria de Iões de Lítio, LFP, NCA, NMC.

### 1. Introdução

A crescente preocupação com as questões ambientais tem aumentado exponencialmente o interesse na mobilidade elétrica em todo o mercado europeu, assistindo-se a uma gradual substituição dos veículos de combustão pelos veículos elétricos (VEs), como o meio rodoviário do futuro.

A importância que as baterias de iões-lítio têm no futuro da mobilidade elétrica obriga a uma análise das reservas de lítio existentes no planeta. Portugal é o país da União Europeia com as maiores reservas de lítio, e poderá ocupar um lugar destacado a nível desta matéria-prima porque 24% da produção mundial de lítio é consumido na Europa e 2% da produção mundial é atualmente fornecida por pequenas minas em Portugal [1].

A classificação dos veículos elétricos e sua divisão em categorias pode ser ter alguns contornos ligeiramente

distintos entre os autores, segundo a referência [2], os tipos de veículos elétricos existentes organizam-se em 3 categorias: veículo elétrico a baterias – BEV, veículo elétrico híbrido – HEV e veículo elétrico híbrido plug-in – PHEV.

O BEV é um veículo que utiliza um ou mais motores elétricos para se deslocar. Estes são alimentados por energia armazenada nas baterias, que podem ser carregadas através de um ponto de carregamento exterior ou da travagem regenerativa. O HEV combina um motor de combustão com um sistema de propulsão elétrico. A presença do sistema elétrico tem como objetivo obter poupanças de combustível relativamente às de um veículo que só contém um motor de combustão interno. O PHEV é um veículo elétrico híbrido no qual a bateria pode ser recarregada através de um ponto de carregamento exterior.

A tecnologia das baterias de iões-lítio é a escolha principal como fonte de energia para os veículos elétricos e híbridos, dada a sua elevada densidade energética e rápida capacidade de recarga.

Os BEV são compostos por um sistema propulsor, que integra uma ou mais máquinas elétricas primárias acionadas e controladas por um controlador eletrónico, um pack de baterias de tração, um sistema de gestão de baterias (BMS), um sistema diferencial mecânico e uma caixa de velocidades [3], de acordo com a Figura 1 [4].

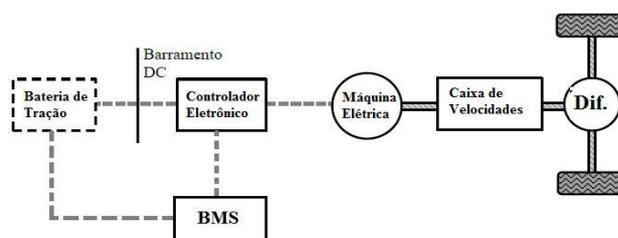


Figura 1- Diagrama do sistema propulsor e de tração elétrico de um BEV

Todavia, o desenvolvimento dos VEs está diretamente relacionado com o desenvolvimento das tecnologias de baterias e dos seus sistemas de monitorização e controlo. Comparando a tecnologia das baterias de iões de lítio com outras existentes, tais como as baterias de chumbo-ácido, de *nickel-cadmium* (Ni-Cd) e as de *nickel-metal hydride* (Ni-MH, utilizadas maioritariamente em HEV), as baterias de iões de lítio apresentam níveis de desempenho específico bastante superiores, o que significa que para a mesma quantidade de energia armazenada em qualquer uma das tecnologias referidas, as baterias de iões de lítio são menos volumosas e pesadas.

O objetivo deste artigo é apresentar e descrever os tipos associações químicas de baterias de iões de lítio mais utilizados em BEV.

## 2 Princípio de Funcionamento

O nome genérico “Li-ion” refere-se aos materiais ativos nas baterias, ainda que seja o elemento presente em menor quantidade. Estas baterias são classificadas consoante a sua composição química dos materiais que constituem o ânodo (elétrodo negativo) e o cátodo (elétrodo positivo). Cada combinação tem as suas vantagens e desvantagens no que diz respeito ao seu desempenho em termos de energia, potência, performance, custo e segurança. Normalmente, o ânodo deste tipo de baterias é composto por várias camadas folheadas de carbono poroso que proporciona uma elevada capacidade de armazenamento de iões de lítio e o cátodo constituído por óxidos de metais de litiados ou por fosfatos de metais litiados.

Tal como os outros tipos de baterias, as baterias de iões de lítio são um dispositivo eletroquímico composto por duas ou mais células, que convertem energia química em energia elétrica através de uma reação eletroquímica de oxidação-redução (*oxired*). Esta reação baseia-se na transferência de carga entre o ânodo, que perde eletrões ou oxida, e o cátodo, que ganha eletrões ou reduz.

Uma célula, unidade individual de uma bateria, é composta por 5 componentes essenciais, Tabela 1:

Tabela 1- Caracterização e descrição dos componentes de uma célula

Componentes	Descrição
Cátodo	Durante o ciclo de carga (reação não espontânea) os iões de lítio deslocam-se do ânodo para o cátodo, sendo necessário a utilização de uma fonte de energia elétrica externa para a sua concretização. Neste processo o cátodo recupera os eletrões cedidos na descarga, revertendo o processo de oxired até o conjunto da bateria atingir o estado químico inicial.
Ânodo	Durante o ciclo de descarga (reação espontânea) os iões de lítio presentes no ânodo são ionizados e dissolvidos no eletrólito. Neste processo, eles atravessam as cavidades microporosas do separador e fixam-se nos poros do material do cátodo. Quando ocorre esta transferência iónica, os eletrões do elétrodo positivo são libertados para o coletor positivo e conduzidos para um circuito elétrico exterior, produzindo corrente elétrica.
Eletrólito	Providencia o meio para a transferência de carga iónica, pode em estado líquido ou sólido.
Separador	Formado por membranas microporosas que permitem o transito iônico. Tem como função garantir a separação efetiva entre os elétrodos, prevenindo o curto-circuito
Coletores de corrente	Funcionam como um condutor elétrico entre o elétrodo e o circuito externo. Para cada elétrodo, cátodo e ânodo, são utilizados 2 metais, geralmente alumínio e cobre, respetivamente.

As baterias podem ser divididas em dois grupos: as primárias e as secundárias ou recarregáveis.

As de iões de lítio são uma tecnologia de baterias recarregáveis em que os iões se movem entre os coletores dos elétrodos negativo e positivo, através de um circuito externo.

O princípio de funcionamento das baterias de íons de lítio baseia-se no fenômeno de intercalação iônica. Este fenômeno é descrito pela difusão dos íons de lítio através da rede cristalina dos eletrodos, com a diferença que quando os íons são intercalados num eletrodo, no outro acontece o oposto, e vice-versa. A intercalação de um íon de lítio num eletrodo requer obrigatoriamente, para manter sua neutralidade, a liberação de um elétron, que circula por um circuito elétrico exterior através dos coletores de corrente, criando um fluxo de corrente elétrica [5], Figura 2 [6].

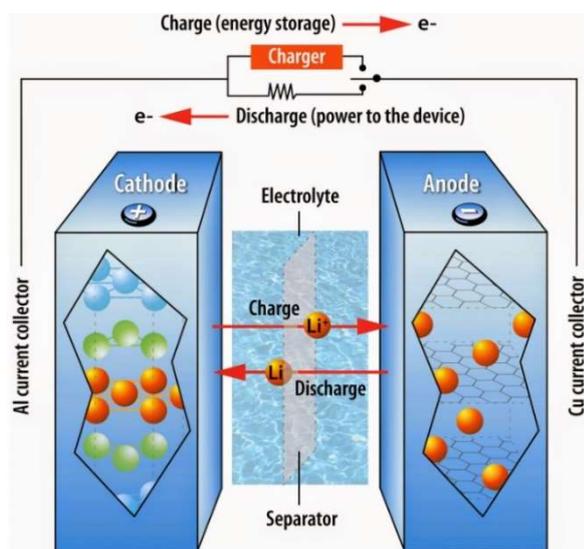


Figura 2 - Representação do processo de carga e de descarga de uma célula de íons de lítio

### 3 Tipos de células de íons de lítio

O cátodo ou eletrodo positivo, é a principal fonte de todos os íons de lítio ativos nas células. Para que esta possua elevados níveis de energia, o material que a constitui deverá absorver um elevado número de íons de lítio e apresentar bons níveis de condutividade elétrica e iônica.

Estes materiais não devem sofrer alterações estruturais durante as trocas reversíveis de íons de lítio com o eletrólito, caso contrário o tempo de vida útil da bateria diminuiria significativamente.

Para além destas propriedades, o material que constitui o eletrodo positivo deve possuir elevados níveis de eficiência de Coulomb, que representa a razão entre a percentagem de carga transferida para a bateria durante a carga, e a percentagem de carga cedida pela bateria durante a descarga [7]. Como foi dito anteriormente, os materiais mais utilizados como cátodos são compostos por óxidos de metais de transição litados ou fosfatos de metais de transição litados, de acordo com a Tabela 2 [8], [9].

Tabela 2- Tipos de baterias de íons de lítio e principais fabricantes

Tipo de células - Cátodo	Principais Fabricantes
Fosfato de Ferro de Lítio (LiFePO <sub>4</sub> ) – LFP	A123, BYD, GS, Hitachi Maxell, Yuasa, Lishen, Valence,
Óxido de lítio níquel cobalto alumínio (LiNiCoAlO <sub>2</sub> ) – NCA	A123, Greatbatch, 3M, Panasonic, Valence, BAK Technology
Óxido de Lítio Níquel Manganês Cobalto (LiNiMnCoO <sub>2</sub> ) – NMC	A123, AESC, EnerDel, Hitachi Maxell, LG Chem, Panasonic, Sanyo, Samsung

#### 3.1 Baterias de LFP

O estudo e desenvolvimento das primeiras baterias que contêm fosfatos no eletrodo positivo ocorreu na Universidade do Texas em 1997 [10]. A utilização de fosfatos no cátodo, proporciona uma boa estabilidade térmica e um bom desempenho eletroquímico. Estes materiais possuem uma resistência interna baixa, o que consequentemente dota as baterias de elevados níveis de densidade de potência, e são tolerantes a elevadas taxas de carga e descarga. De todas as associações químicas existentes, as células LFP são as que apresentam os melhores níveis de segurança, as que suportam um maior número de ciclos de vida e são as mais tolerantes em condições de sobrecarga. Para além disto, a bateria de LFP é composta por materiais não tóxicos (ferro e fosfato) que apresentam um custo relativamente baixo [4].

O principal problema deste tipo de células são os níveis de tensão nominal baixos (3,2V/célula), e consequentemente fracos níveis de energia específica. Porém, estes são os tipos de células mais utilizados em veículos de transporte coletivo e pesados, Figura 3.

Apesar dos fracos níveis de energia, como este tipo de transportes possuem compartimentos volumosos para armazenar os packs, um maior número de células por pack resolverá este problema.

### 3.2 Baterias de NCA

As células de NCA contemplam uma das melhores soluções de materiais usados em cátodos e foram desenvolvidas durante a década de 90 [11]. A mistura de óxido de cobalto e níquel-lítio com alumínio, mais barato que o manganês, estabiliza a resistência térmica e a transferência de carga, o que torna as baterias de NCA uma das soluções que oferece maior estabilidade térmica. Para além disto, como a tensão nominal das células é elevada e os elétrodos apresentam bons níveis de capacidade específica, esta configuração é dotada de níveis elevados de energia e potência específica, e ainda suportam um elevado número de ciclos de vida [11].

As principais desvantagens desta tecnologia estão relacionadas com a segurança na sua utilização, que requer a monitorização e controlo das células de modo a garantir que estas operam dentro do *Safe Operation Area* (SOA), e custo dos materiais para a sua fabricação.

Foi com este tipo de células (Panasonic 18650 NCA) que a fabricante Tesla equipou o pack de baterias quer do Model S e do Model X, Figura 4 [12].



Figura 4 - À esquerda: Tesla Model S; À direita: Respetiva Células Panasonic 18650 NCA

### 3.3 Baterias de NMC

Estas células baseiam-se numa combinação de níquel-manganês-cobalto no cátodo. O níquel é utilizado nas baterias porque proporciona valor de energia específica elevados, mas é pouco estável. Por sua vez, a utilização do manganês faz com que a resistência interna baixe, devido à estrutura tridimensional por ele criado, mas oferece baixos valores de energia específica. A associação destes dois materiais enriquece as características da bateria ao encarecer as limitações de ambos.

Estes tipos de células apresentam dos níveis mais elevados de energia específica e das que suportam um maior número de ciclos de vida, comparativamente aos outros tipos.



Figura 3- À esquerda: Autocarro BYD 100% elétrico; À direita: Respetivo Pack de baterias LFP

As células NMC desempenham uma elevada performance, nomeadamente por suportarem elevadas taxas de descarga a baixas temperaturas e por serem células de fácil monitorização térmica e elétrica [9]. Para além do baixo custo e da grande disponibilidade dos materiais que a compõe, estas apresentam níveis de segurança satisfatórios e neste âmbito existem alguns estudos que indicam que estão a ser desenvolvidas novas tecnologias de NMC capaz de atingir melhores níveis, tal como nas células LFP [13].

Foi com este tipo de células, da fabricante AECS, que a Nissan equipou o pack de baterias do novo modelo Nissan Leaf (2018), Figura 5 [14]



Figura 5 - Nissan Leaf 2018

#### 4 Comparação de tecnologias e discussão de resultados

A análise comparativa dos diferentes tipos de células é importante, de modo maximizar os requisitos técnico-práticos para o sistema de armazenamento de energia (SAE) em função da aplicação desejada.

As 3 tecnologias de células serão comparadas em termos de desempenho específico, níveis de segurança, número de ciclos de vida, custo e performance.

A Tabela 3 apresenta especificações técnicas genéricas das 3 células abordadas neste artigo [15].

No que diz respeito à quantidade de energia eletroquímica que podem armazenar, valores correlacionados com a tensão nominal, as células de LFP representam cerca de metade da quantidade de energia que as células NCA e NMC conseguem armazenar. Apesar disso, este tipo de célula apresenta o melhor nível de segurança, é a que possui maior número de ciclos de vida e apresenta elevada densidade de potência. Por outro lado, as células NCA e NMC possuem não só elevados níveis de energia específica, mas também de densidade de potência, valores expressos na tabela em função da taxa de carga e descarga (C-rate). As principais diferenças entre estes 2 tipos de células estão relacionadas com os níveis de segurança e com o tempo de vida útil, pelo que por estes 2 fatores, a célula NMC possui níveis mais favoráveis do que NCA.

Tabela 3 - Especificações técnicas genéricas das células LFP, NCA e NMC

Especificações técnicas	LFP	NCA	NMC
Tensão Nominal (V)	3,2	3,6	3,7
Tensão de Carga (V)	3,6	4,2	4,2
Energia Específica (Wh/kg)	100-160	200-300	200-300
Densidade Potência (C-rate)	30	20	20
Temperatura de funcionamento (°C)	-30 a 60	-20 a 60	-20 a 60
Rutura térmica (°C)	270	150	210
Níveis de Segurança	Excelente	Médio/Baixo	Médio
Ciclos de vida	5000 +	2000 +	2000 +

Tendo em conta todas as características e especificações técnicas enunciadas para as 3 células apresentadas, a Tabela 4 atribui uma classificação qualitativa aos indicadores característicos (Energia, Potência, Ciclos de Vida, Segurança, Performance e Custo).

Tabela 4- Comparação qualitativa dos tipos de células

	Energia	Potência	Ciclos de vida	Segurança	Performance	Custo
LFP	-	+++	+++	+++	+	++
NCA	+++	+++	++	+	++	+
NMC	+++	+++	++	++	++	++

## 5 Conclusão

Os VEs apresentam cada vez mais relevo com uma solução para a mobilidade sustentável e eficiente.

Neste artigo foram apresentadas e comparadas as tecnologias de baterias mais utilizadas em veículos ligeiros e pesados.

De todas as tecnologias existentes, as células LFP, NCA e NMC têm o melhor nível de maturidade tecnológica e são amplamente utilizadas em SAE de VEs.

Estas são caracterizadas por suportar elevadas taxas de carga e descarga, por suportar um elevado número de ciclos de vida, terem uma baixa necessidade de manutenção e por não possuírem efeito de memória.

As baterias de íões de lítio têm um enorme potencial, são uma tecnologia cada vez mais barata devido ao aumento da procura, possuem elevados níveis de energia e potência, assegurando uma elevada autonomia ao veículo e segurança.

## Bibliografia

- [1] A. Gören, C. Costa e S. Lanceros-Méndez, "Baterias de íões-lítio: a revolução na mobilidade elétrica?," *Gazeta de Física - Artigo Geral*, vol. 41, p. 7, 2018.
- [2] EDP Distribuição, "Tipos de veículos elétricos existentes," [Online]. Available: <https://www.edpdistribuicao.pt/pt-pt/redes-do-futuro/mobilidade-eletrica/veiculos-eletricos>. [Acedido em janeiro 2020].
- [3] S. Dhameja, *Electric Vehicle Battery Systems*, Newnes, 2001, p. 252.
- [4] H. Martins, "Estudo das Tecnologias de Baterias e Supercondensadores para Veículos Elétricos e desenvolvimento," 2018.
- [5] L. Chagas, A. Urbano e J. Scarminio, "Princípios Físicos e Químicos de Baterias de Íon Lítio," *Laboratório de Filmes Finos e Materiais*, 2000.
- [6] M. Lowe, S. Tokuoka, T. Trigg e G. Gereffi, "Lithium-ion Batteries for Electric Vehicles," CGGC researcher, 2010.
- [7] "BU-808c: Coulombic and Energy Efficiency with the Battery," janeiro 2020. [Online].
- [8] "Battery University," DEzembro 2019. [Online]. Available: [https://batteryuniversity.com/learn/archive/whats\\_the\\_best\\_batter](https://batteryuniversity.com/learn/archive/whats_the_best_batter).
- [9] ARB - California Air Resources Board, "Advanced Clean Transit Battery Cost for Heavy-Duty Electric Vehicles," 2016.
- [10] A. PadhiK, S. Nanjundaswamy e J. Goodenough, "Phospho-Olivines as Positive-Electrode Materials for Rechargeable Lithium Batteries," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 144, no. 4, p. 1188, 1997., vol. 144, p. 1188, 1997.
- [11] B. Xu, A. Oudalov, A. Ulbig, G. Andersson e D. Kirschen, "Modeling of Lithium-Ion Battery Degradation for Cell Life Assessment," *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vols. %1 de %299(2):1-1, June 2016.
- [12] Tesla, "Model S," janeiro 2020. [Online]. Available: [https://www.tesla.com/pt\\_PT/models](https://www.tesla.com/pt_PT/models).
- [13] IDTechEx, "Electric bus sector is game changer for battery market," dezembro 2019. [Online]. Available: <https://www.idtechex.com/ko/research-article/electric-bus-sector-is-game-changer-for-battery-market/9175>.
- [14] Nissan, "2018 Nissan LEAF = Best of Innovation Winner at CES 2018," 2020. [Online]. Available: <https://cleantechnica.com/2017/11/13/2018-nissan-leaf-best-innovation-winner-ces-2018/>.
- [15] B. U. Group, "Advantages and limitations of the Different Types of Batteries - Battery University," 2019. [Online].
- [16] Lighting Global, "Lithium-ion Batteries Part I: General Overview and 2019 Update," *TECHNICAL NOTES*, junho 2019.

# LIGHTING CONSUMPTION OPTIMIZATION IN A RESIDENTIAL HOUSE BASED ON ELECTRICITY PRICE

## Abstract

*The increment of the electricity consumption around the world has led many efforts on the network operators to reduce the consumption in the demand side and encourage to increase the use of renewable energies. Since the buildings have a significant part in energy consumption, and lighting systems have an important role in the energy consumption of the buildings, the optimization of the lighting system should be effective. Hence, the focus of this paper is to minimize the lamps consumption of a residential house based on electricity price and try to take advantages from photovoltaic generation as much as possible. The methodology of this work is proposed as a linear optimization problem that manages the generation of a renewable energy re-source, which supplies a part of the energy consumption of the house. For the case studies, the amount of the renewable energy generation, total consumption of building, consumption of the lights, and electricity price are considered.*

**Keywords:** Optimization, Renewable Energy, Photovoltaic

## 1 Introduction

Nowadays, the increment of electricity usage has become to a big global concern [1]. The environmental problems, such as global warming, and CO<sub>2</sub> emissions have drawn the attention to the Renewable Energy Resources (RER) and optimization strategies [2]. A significant part of electricity consumption is dedicated to all type of buildings including commercial, residential, and industrial [3]. Currently the demand of RER and Demand Response (DR) programs are increasing [4]. In the DR programs, consumers are emboldened to change their electricity consumption pattern based on the variation of electricity price, or technical commands from the network operators [5].

DR programs can be classified into two main incentive-based and price-based. Real-Time Pricing (RTP), Time-Of-Use (TOU), and Critical-Peak Pricing (CPP) are included in the price-based programs [6].

Due to environmental problems that have occurred aftermath of increasing electricity generation from fossil fuels, the attentions were drawn to the renewable energies [7]. Portugal also has investments on distributed generations and renewable energy. Recently in Portugal, the consumers are able to utilize the RER, consuming their own produced energy. In the past, they should inject all the generated power to the utility grid and pay for their consumption. However, with the new rules, the end-users are encouraged to consume their own produced energy [8].

In order to implement the DR programs in a building, the lighting system plays an important role. The lights are considered as dynamic and flexible loads some-how their consumption can be reduced or interrupted [9] [10].

However, the main purpose of this paper is to minimize the Electricity Bill (EB) of a residential house with optimizing the lamps consumption and interference of RER, specially a Photovoltaic (PV) system that supplies part of power demand of the building. The lighting system of the building should be controllable for reducing the illumination. The system may consist several laboratorial and commercial equipment and instruments, such as several Programmable Logic Controllers (PLCs) and several energy meters that these technical issues are out of scope of this paper.

This paper is proposed in five sections. After this introductory section, the system description is presented in Section 2. Section 3 demonstrates the case study surveyed in this paper considering two different scenarios, and the obtained results are described in the Section 4. Finally, the conclusions of this work are presented in Section 5.

## 2 System Description

The proposed system regarding the optimization of lamps consumption in the residential house is based on the electricity price variation and PV generation during a day. In this way, the consumption reduction for each lamp is limited, and since any room should not lose its light completely, a minimum value of light for each lamp, have been considered. The residents of the house can define their preference for each lamp as numbers between 0 and 1 that show which lamp is more important or less. The overall architecture of the presented optimization problem is illustrated in Fig. 1.

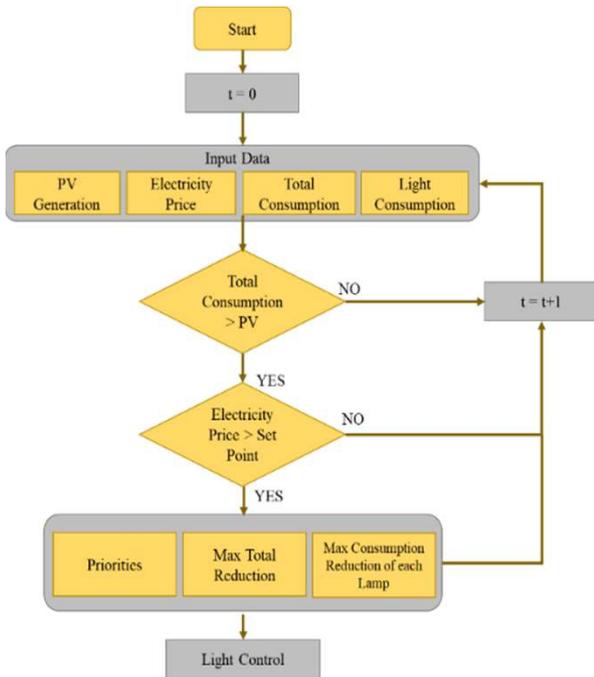


Fig. 1. The flowchart of the proposed optimization algorithm

As it can be seen in the Fig. 1, the optimization algorithm that is used in this paper is started with definition of input data including generation of the PV, total consumption of the building, electricity price, and the detail of the total consumption of the lighting system. Algorithm needs a set point price to decide for optimizing. This set point can be defined by residences or can be calculated as the average price by algorithm.

After checking the input data and conditions such as set point price and PV generation, if the desired condition is met, the optimization process is not required and should check the values again and again as long as the system is in the high consumption level or expensive price periods. Then, the program starts to optimize the consumption of the lamps to fulfill the system goal. Each lamp of the building has a priority based on its location and user preferences. After that, the required power reduction of whole lighting system, the maximum consumption reduction of each lamp, and the minimum required light intensity of each room are defined as several constraints for the pro-posed optimization problem.

This optimization algorithm is modeled as a linear problem which can be solved by software which has LP solver environment.

The objective function of the optimization problem is as in eq. (1):

$$\text{Minimize } \sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^L P_{(l,t)} \times C_{(t)} \times PR_{(l)} \quad (1)$$

$$\forall t \in \{1, \dots, T\}$$

$$\forall l \in \{1, \dots, L\}$$

$P$  is the power consumption of each lamp in each time period.  $C$  is the electricity cost in each time period.  $PR$  is the abbreviation of Priority of each lamp.  $L$  and  $T$  represent the total number of lamps and time periods, respectively.

The model constraints are as in eq. (2)-(4):

$$\sum_{l=1}^L P_{(l)} = RR \quad (2)$$

$$\forall l \in \{1, \dots, L\}$$

$$0 \leq P_{(l,t)} \leq MR \quad (3)$$

$$\forall l \in \{1, \dots, L\}$$

$$\forall t \in \{1, \dots, T\}$$

$$0 \leq PR_{(l)} \leq 1 \quad (4)$$

$$\forall l \in \{1, \dots, L\}$$

RR stands for Required consumption Reduction, and MR is abbreviation of Maximum consumption Reduction that is considered for each lamp for avoiding turning off any lamp completely. As it can be seen in Eq. 4, corresponded PR for each lamp is a number between 0, and 1. The lamps with priority numbers close to 0 are the lower important lamps than lamp with priority number close to 1. It should be noted that the lamps that are considered for lighting system are reducible.

### 3 Case study

This section represents the case study used for verifying the proposed optimization methodology. As it was mentioned, the main purpose of this paper is to optimize the consumption of the lamps of a residential house, based on the electricity price variation. The considered house consists of three bed rooms, one living room, one kitchen, and two bathrooms, and the corridor. The overall map of the house can be seen in Fig.2. According to Fig.2, there are 10 reducible lamps in the house with 100 W maximum power consumption. Regarding the RERs, there is a PV system located at the top roof of the building, which supplies a part of the consumption of the building. The maximum capacity of PV generation is 4 KW.

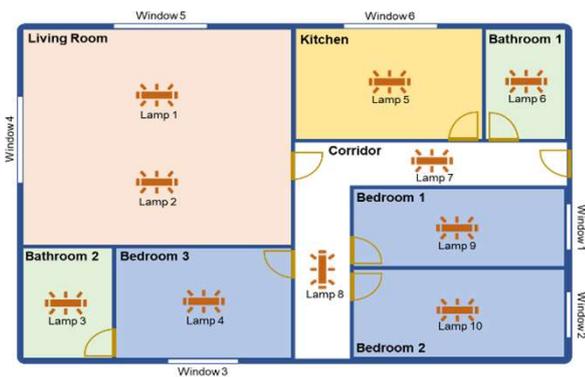


Fig. 2. Plan of the house

If all the lights are turned on with the maximum intensity, the maximum consumption of lighting system in this house will be 1000 W.

The total power consumption of the building, the power consumption of lighting system, and PV generation are shown in Fig. 3. This consumption profile refers to a daily profile in summer.

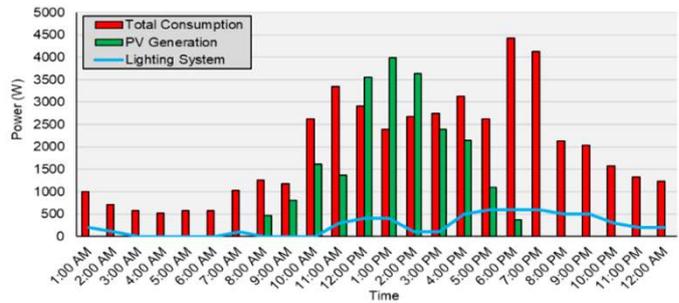


Fig. 3. Consumption and generation profile

As one can see in Fig. 3, the blue line indicates the part of the building consumption that belongs to the lighting system. As it is clear in Fig. 3, there are several moments that not only the PV generation (Green Columns) supplies the entire electricity demand of the building, but also the excess of the produced power can be injected to the utility grid, or store in energy storage if exist.

The electricity prices that are used for this study are the market prices for a summer day in 2018 and have been adapted from Portuguese sector of Iberian Electricity Markets [11]. The optimization algorithm checks the electricity price in each moment in order to calculate the set point price to make decision for running the optimization.

It is obvious that in the periods of day that PV generation can supply the electricity consumption completely, there is no need to reduce the lamps consumption despite the high electricity cost.

### 4 Results

This section represents the obtained results of proposed methodology. The consumption reduction of lighting system can be seen in Fig. 4.

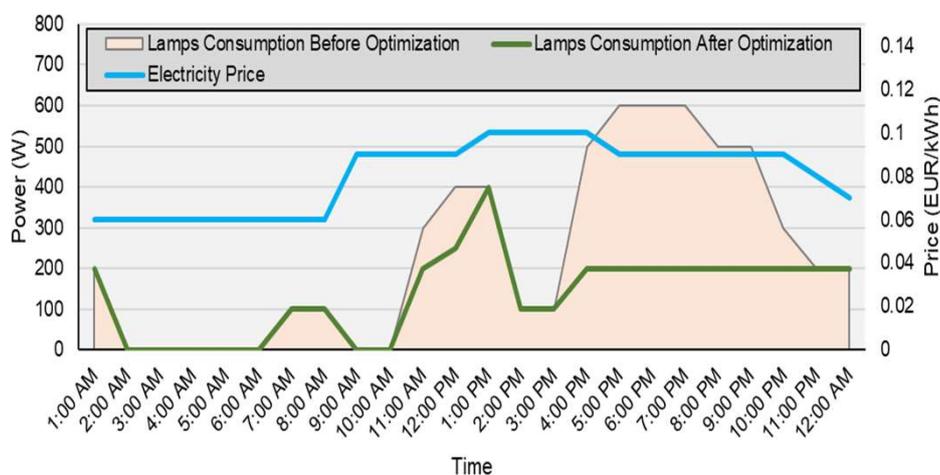


Fig. 4. Before optimization and after optimization

As it can be seen in Fig.4, the lamps consumption is reduced in the expensive prices such as 11 am, and 12 am, or from 4 pm to 11 pm. There is no power re-reduction in some periods such as 1 pm to 3 pm which PV generation is enough for supporting the house consumption, despite the expensive electricity price.

As a last result, Fig. 5 illustrates the effect of optimization in the energy bill of the building for one day.

As it can be seen in Fig. 5, the optimization process leads to reduce the energy cost of the house in one day from 0.509 EUR to 0.29 EUR, by respecting to the user's preferences.

## 5 Conclusions

In this paper, an optimization algorithm has been proposed for a residential house. This algorithm considered real-time pricing schemes and optimize the consumption of lighting system of a house in the periods that electricity price is greater than a specific value. The main purpose of the paper was to optimize the power consumption and reduce energy bill with take advantages of renewable energy resources.

The presented model can be solved via several software with a linear programming solver environment.

References



Fig. 5. Reduced energy cost after optimization

### References

- [1] L. Hernandez, C. Baladron, J. Aguiar, B. Carro, A. Sanchez-Esguevillas, J. Lloret, D. Chinarro, J. Gomez-Sanz and D. Cook, "A multi-agent system architecture for smart grid management and forecasting of energy demand in virtual power plants," IEEE Communications Magazine, 2013.
- [2] N. Borges, J. Soares and Z. Vale, "Multi-objective Particle Swarm Optimization to Solve Energy Scheduling with Vehicle-to-Grid in Office Buildings Considering Uncertainties," IFAC-PapersOnLine, 2017.
- [3] M. Khorram, P. Faria, O. Abrishambaf and Z. Vale., "Consumption Optimization of an Office Building using Different Approaches," in IEEE Symposium Series on Computational Intelligence, 2018.
- [4] M. H. Rehmani, M. Reisslein, A. Rachedi, M. Erol-Kantarci and M. Radenkovic, "Integrating Renewable Energy Resources Into the Smart Grid: Recent Developments in Information and Communication Technologies," IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018.
- [5] O. Abrishambaf, P. Faria, L. Gomes, J. Spínola, Z. Vale and M. J. Corchado, "Implementation of a Real-Time
- [6] P. Faria and Z. Vale, "Demand response in electrical energy supply: An optimal real time pricing approach," Energy, 2011.
- [7] H. Morais, T. Pinto, Z. Vale and I. Praca, "Multilevel Negotiation in Smart Grids for VPP Management of Distributed Resources," IEEE Intelligent Systems, 2012.
- [8] G. Santos, F. Femandes, T. Pinto, M. Silva, O. Abrishambaf, H. Morais and Z. Vale, "House management system with real and virtual resources: Energy efficiency in residential microgrid," in Global Information Infrastructure and Networking Symposium (GIIS), 2016.
- [9] F. Fernandes, H. Morais, Z. Vale and C. Ramos, "Dynamic load management in a smart home to participate in demand response events," Energy and Buildings, 2014.
- [10] S. Rotger-Griful, R. Jacobsen, R. Brewer and M. Rasmussen, "Green lift: Exploring the demand response potential of elevators in Danish buildings," Energy Research & Social Science, 2017.
- [11] "www.omie.es," Iberian Electricity Market. [Online].

## NOTAS DISPERSAS

### Decreto-Lei n.º 162/2019~, de 25 de outubro

#### Objeto

- Estabelece o regime jurídico aplicável ao autoconsumo de energia renovável, estabelecendo a disciplina da atividade de produção associada às instalações de utilização do autoconsumidor de energia renovável.
- Estabelece, igualmente, o regime jurídico das comunidades de energia renovável, procedendo, nesta parte, à transposição parcial para o direito interno da Diretiva 2018/2001 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 11 de dezembro de 2018, relativa à promoção da utilização de energia de fontes renováveis.

#### Norma revogatória

Revoga o Decreto-Lei n.º 153/2014, de 20 de outubro, sem prejuízo do disposto nos n.ºs 1 e 3 do artigo 29.º

**Título:** Instalações Elétricas de Média Tensão – Postos de Transformação e Seccionamento  
**Autor:** António Augusto Araújo Gomes, José António Beza Carvalho  
**Editora:** Publindústria  
**Data de Edição:** 2017  
**ISBN:** 9789897232541  
**Nº Páginas:** 195  
**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 projeto, execução e exploração de postos de transformação e seccionamento 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.

António Augusto Araújo Gomes  
 José António Beza Carvalho

**INSTALAÇÕES ELÉTRICAS DE MÉDIA TENSÃO**  
**POSTOS DE TRANSFORMAÇÃO E SECCIONAMENTO**

**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 projeto, execução e exploração de postos de transformação e seccionamento 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.

**Sobre os autores**

**António Augusto Araújo Gomes**

Bacharel em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas de Energia pelo Instituto Superior de Engenharia do Porto, Licenciado e Mestre (em Habilitação 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 Células na CEBIBRUS – Engenharia de Segurança, entre 1997 e 1999. Sócio da empresa Neutro à Terra – Gabinete de Engenharia Lda (2000 a 2006). Prestação de serviços de formação e/ou projeto e/ou assessoria e/ou consultoria no âmbito das instalações elétricas, interconexões, segurança, gestão de energia, eletrónica/energética, a diversas entidades, nomeadamente NERFAM – Consultores de Engenharia, SA, Schurnal – Engenharia e Serviços, Lda, ENERDO – Consultores de Engenharia, Lda, EQ – Instituto de Segurança e Qualidade, Quaternos – Indústria de Químicos Elétricos, SA, EP – Instituto Eletrotécnico Português, CENBITEC – Centro de Energia e Tecnologia/ANACOM – Autoridade Nacional das Telecomunicações, IIT – Instituto para o Desenvolvimento Tecnológico, IEM – Agência de Energia Entre Douro e Vouga.

**José António Beza 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 Vale de Camba como representante do Instituto Politécnico do Porto. É autor de vários artigos publicados em conferências nacionais e internacionais, diretor da revista Neutro à Terra e integrou vários juries de provas públicas de doutoramento e para a carreira do ensino superior.



## IMPACTO DA ILUMINAÇÃO PÚBLICA NA NATUREZA

### Resumo:

*A iluminação artificial veio iluminar o ambiente noturno dos seres vivos no Planeta, ao ponto de modificar os hábitos dos organismos e o bioma da região iluminada. Certos sistemas de Iluminação relacionam-se com problemas de saúde, tanto em humanos como noutros seres vivos, por causar distúrbios no ciclo biológico. Neste artigo é analisado o impacto da iluminação pública no ser humano e ainda em mais 4 espécies de animais, como é o caso das aves, peixes, tartarugas marinhas e morcegos.*

**Palavras-chave:** Iluminação Pública; Fauna

### 1 Introdução

A iluminação artificial tem sido utilizada com diversas vantagens nas plantas, a indústria de iluminação tem desenvolvido equipamentos específicos para estimular o crescimento das plantas em ambientes controlados. No entanto, as plantas também dormem, pelo que as interrupções no seu ciclo biológico interferem na sua reprodução durante a fase florada e na sua resistência a pragas e fungos, prejudicando sua saúde.

É necessário aprofundar estudos sobre a iluminação pública em áreas arborizadas, levando em consideração os fenómenos de “fotoinibição”, ou seja, ao stress fisiológico vegetal em situação de grande exposição à luz que prejudica a fotossíntese das plantas. Sobre uma constante exposição à luz, ocorre uma adaptação onde a fotossíntese da planta se estabiliza e passa a produzir substâncias prejudiciais ao seu crescimento [1].

A iluminação pública (IP) é um serviço prestado pelos municípios, através da concessionária da rede elétrica, com impacto na qualidade de vidas das populações: melhoria da segurança rodoviária, conforto para os utilizadores das vias e segurança pública.

Atualmente é comprovado que os níveis de criminalidade são influenciados pela IP [2] e, desta forma, a IP tem um papel fundamental na qualidade de vida das populações, para além do conforto, razão essencial para se analisar a sua influência nas diferentes espécies animais [3].

Apesar de todas as vantagens da IP, esta acarreta também impactos menos positivos, tanto na vida das pessoas como também na de outros animais. A vida noturna das populações acarreta uma forte poluição luminosa, com impacto na alteração dos ciclos funcionais dos animais. Cerca de 30% dos vertebrados e mais de 60% dos invertebrados são seres de hábitos noturnos, e todos correm o risco de sofrer os impactos da poluição luminosa [4]. Esta luminosidade, principalmente dos polos urbanos, vem afetar processos naturais de acasalamento, migração, alimentação e polinização das espécies, sem que elas tenham tempo de se adaptar.

Com a evolução económica e social torna-se impossível extinguir o impacto da Iluminação Pública, essencial ao quotidiano humano, no entanto, é possível arranjar soluções que respeitem o modo de vida de outros seres vivos. Por vezes, as soluções são simples, passando apenas por ligeiras adaptações no projeto luminotécnico.

### 2 Impacto da Iluminação Pública no Ser Humano

Desde a invenção da primeira lâmpada incandescente em 1870, a poluição luminosa tornou-se praticamente omnipresente, principalmente nas zonas de grande desenvolvimento económico. Os impactos causados pela poluição luminosa podem ser tanto sociais, económicos como ambientais. No que diz respeito aos impactos sociais e à saúde das pessoas, já foi comprovado que o efeito da luminosidade prejudica e leva ao desenvolvimento de alguns cancros, como o cancro da mama.

Estudos efetuados em humanos revelaram um baixo índice de cancro da mama em mulheres cegas e um alto em mulheres que trabalham de noite [5]. Sem falar que o excesso de luminosidade promove cansaço visual, causa sonolência, dores de cabeça e até stress [6]. Ao nível económico também são vários os impactos causados pela poluição luminosa, pois toda a luz direcionada acima da linha do horizonte é, única e exclusivamente energia desperdiçada, como mostra a Figura 1 .

As perturbações no sono exercidas pela luz têm sido também apontadas como incrementadoras do risco de obesidade, depressão e diabetes, entre outras.

### 3 Impactos da Iluminação Pública na Fauna

#### 3.1 Aves

Nem todos os animais vêem o mundo como os humanos.

O facto das aves sofrerem com o excesso de luz está relacionado com a forma como elas percebem a luz (Figura 2).

A maioria das aves são em muito prejudicadas devido à poluição luminosa, sendo disso exemplo as aves que migram sobretudo de noite utilizando a lua e as estrelas como meio de orientação, e que, ao encontrar em “barreiras” de luz artificial, são atraídas e posteriormente desorientadas.

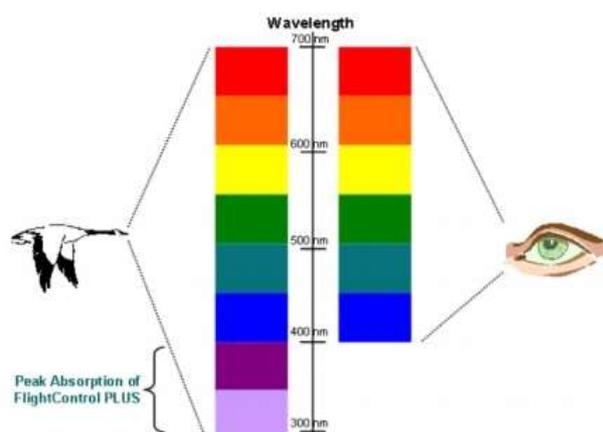


Figura 2 - Espectro visível das aves vs. olho humano

As aves também parecem ter excelente visão de cores, o que as atrai para a luz colorida. Têm cinco tipos diferentes de pigmento visual.



Figura 1- Poluição Luminosa em Portugal

Os longos comprimentos de onda, como vermelho e branco, têm efeitos desorientadores nas aves migratórias devido às frequências de luz. Dificilmente qualquer efeito perceptível na orientação foi registrado sob luz de curto comprimento de onda (como luz azul e verde). Dependendo do comprimento de onda, a luz artificial pode interferir com o funcionamento da bússola interna no cérebro de uma ave [7].

As aves sofrem essencialmente nas suas migrações, quando se orientam pela sua bússola magnética biológica e por vezes são equivocadas por luzes essencialmente brancas e vermelhas, o que seria de evitar em edifícios altos.

Atualmente os edifícios mais sofisticados utilizam sistemas de controlo de luz exterior inteligente, de forma a não perturbar as migrações das aves, reduzir a poluição luminosa e a reduzir o consumo de energia.

Idealmente não deveriam ser lançadas luzes para o ar apenas para efeito estético e nos edifícios altos as luzes deveriam ser desligadas por volta das 00:00h, pelo menos nos períodos de migração das aves. [8]

### 3.2 Peixes

Tal como os humanos os peixes têm fotorreceptores nos olhos, que lhes permite distinguir cores e adaptar-se ao brilho da luz. [9] Os comprimentos de onda mais longos (vermelho e laranja) são absorvidos no primeiro metro de água, enquanto que a luz com menor comprimento de onda (azul e verde) não é absorvida com tanta facilidade.

Portanto, luz artificial de iluminação de pontes pode ter um impacto significativo na migração de determinadas espécies, como é o caso do salmão que viaja entre os rios e o mar para desovar. As migrações são maioritariamente feitas pela noite por forma a evitar predadores. Observações comprovaram que a iluminação artificial em pontes possibilita armadilhas para o salmão, pois os seus predadores posicionam-se sob estas luzes para uma melhor localização da presa.

Derivado deste facto têm diminuído os casos de sucesso das migrações do salmão [10].

Como referido, as gamas de luz que penetram com maior facilidade a água são as brancas, azuis e verdes, como mostra a Fig. 3, pelas quais os peixes são atraídos e posteriormente desorientados, logo deve-se evitar colocar estas gamas focadas para a água.

O futuro luminotécnico das pontes, por exemplo, passa por sistemas inteligentes de controlo luminotécnico, que permitem regular as luzes independentemente ou até mesmo desligar alguns focos. Idealmente todos os focos direcionados para a água e todos os outros que a luz seja em grande parte refletida para a água também, mas para evitar um controlo tão brusco, pode-se aplicar este tipo de intervenções apenas nos meses das migrações.

Recomenda-se que os arquitetos deste tipo de estruturas evitem superfícies refletoras, como pinturas ou acabamentos metálicos, para diminuir o reflexo luminotécnico para a água. [8]

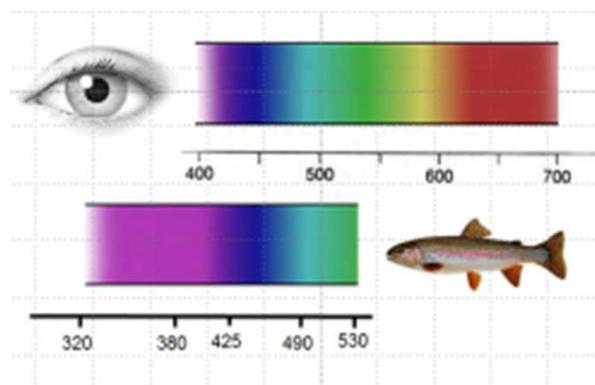


Figura 3 - Alcance visual entre o ser humano e o peixe

### 3.3 Tartarugas Marinhas

As tartarugas marinhas dependem de ambientes escuros para se locomoverem e o seu grande problema com a luz artificial começa com a seleção dos pontos de desova na praia e o seu posterior retorno ao mar.

Quando as crias saem dos ovos, naturalmente procuram progredir no sentido contrário aos locais escuros. Procuram a luz da lua e das estrelas refletida no mar. Infelizmente com a presença de iluminação artificial junto à costa, as pequenas crias não conseguem diferenciar os ambientes, resultando em desorientações, como mostra a Fig. 4. Se demorarem a alcançar o mar ficam expostas a predadores e podem mesmo morrer desidratadas. Existem também relatos de tartarugas atropeladas nas avenidas junto às praias ou a invadirem residências e restaurantes ao serem atraídas pela iluminação artificial [11]



Figura 4 - Prova do seguimento e desorientação das tartarugas com iluminação artificial

A fotoaxia negativa impede as tartarugas marinhas de chegarem à costa para a desova, o que, logo aí, se torna muito grave, pois pode não o chegar a fazer. A fotoaxia positiva dá-se quando as crias nascem e são atraídas por essa luz artificial. As únicas formas de reduzir este impacto são unicamente o redirecionamento destes focos de luz para o sentido contrário da praia e, idealmente, o mais baixos possível, para evitar contacto com este tipo de animais marinhos, como é demonstrado na Fig. 5 [12].

Este tipo de focos devem ter comprimentos de onda bastante grandes, entre 620 a 660 nm, onde na melhor das hipóteses a luz seria vermelha [8].



Figura 5 - Iluminação Adequada e não Adequada na orla marítima

### 3.4 Morcegos

A iluminação artificial potencia uma grande quantidade de alimentação aos morcegos, uma vez que atrai imensos insetos. Infelizmente isso não é satisfatório, pois em testes de laboratório foi demonstrado que os morcegos exploraram e consumiram muito menos a comida em locais escuros, quando havia alguma iluminação por perto, Fig. 6. O que altera em muito a alimentação desta espécie frugívora [13].



Figura 6 - Atração à luz em busca de alimento

Num cenário ainda mais infeliz, quando os morcegos circundam áreas relativamente iluminadas, isto, coloca-os automaticamente expostos a alguns predadores, como é o caso dos gatos, corujas e até dos automóveis nas estradas [14].

Para os morcegos a solução ideal seria mesmo viverem sem qualquer tipo de luz artificial. Sendo que isto não é possível, deve-se começar por evitar iluminar árvores, sebes, ou qualquer tipo de ramagem [15].

Relativamente aos focos devem-se implementar apenas os necessários e estes devem fazer uso de lâmpadas de alta eficiência luminosa com baixa ou inexistente emissão de luz ultravioleta ou azul. Neste caso podemos falar de lâmpadas de sódio de baixa ou alta pressão, que são bastante comuns. Os efeitos dos LED's ainda não foram bem estudados, mas pensa-se que terão bastante impacto negativo, mesmo assim, no caso do seu uso o mais recomendado serão cores mais quentes, ou seja, mais amareladas (entre os 1500 e os 3000 Kelvin) [14].

#### **4 Conclusão**

Qualquer invenção criada para conforto do homem terá, inevitavelmente, um impacto negativo na fauna e flora circundante. A iluminação em geral e a iluminação pública, neste caso em particular, têm um forte impacto nalgumas espécies aqui analisadas. Infelizmente a única forma possível para remediar esta situação seria a extinção da iluminação pública, o que não é possível. Desta forma as soluções gerais passam pela redução da iluminação onde não tenha grande importância e ajustá-la de forma a iluminar apenas o que será necessário e de forma mais rasteira possível.

Em edifícios específicos como prédios muito altos ou pontes sob rios com determinadas espécies em particular devem ser consultados biólogos, aquando do projeto luminotécnico.

#### **Referências**

- [1] S. Carneiro, "O impacto da iluminação artificial na natureza," 2018.
- [2] A. Aver, A relação Iluminação Pública e Criminalidade, janeiro 2013.
- [3] EDP Distribuição, ""Aparelhos de Iluminação Elétrica e Acessórios- Guia Técnico de iluminação pública",," 2017.
- [4] P. Bogard, Bringing Back the Night: A Fight Against Light Pollution, Agosto 2013.
- [5] Ciência e Saúde, "Mulher que trabalha à noite tem mais risco de câncer de mama," 2012.
- [6] S. Goulart, "Impacto da Poluição Luminosa nas Aves Marinhas da Ilha Terceira", 2014.
- [7] P. L. Design, "To light or not to light?," 2013.
- [8] K. M. Zielinska-Dabkowska, "Journey towards light – evolutionary adaptations of humans, flora and fauna.," novembro 2014.
- [9] B. J. M. B. Res, Environmental blue light prevents stress in the fish Nile tilapia, Agosto 2001.
- [10] T. L. Catherine Rich, Ecological Consequences of Artificial Night Lighting, 2005.
- [11] T. C., "As tartarugas marinhas e a poluição luminosa: aproveite o Dia Internacional das Tartarugas para entender o problema," 2013.
- [12] S. M. Campos, "O impacto da iluminação artificial na Natureza," 2017.
- [13] C. C. V. Daniel Lewanzik, "Artificial light puts ecosystem services of frugivorous bats at risk," março 2014.
- [14] P. D. Elena Patriarca, "Bats and light pollution," dezembro 2010.
- [15] J. Tardivel, "LIGHTING AND ITS EFFECT ON BATS, BIRDS AND INSECTS," março 2018.



**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**

Atualmente é investigador no GECAD - Grupo de Investigação em Engenharia e Computação Inteligente para a Inovação e o Desenvolvimento do ISEP/IPP. As suas áreas de investigação estão direcionadas para o planeamento e operação de redes elétricas de distribuição, "smart grids", gestão de recursos energéticos distribuídos, mobilidade elétrica, resposta ativa da carga e fiabilidade nos sistemas elétricos de energia.

**Edison A. C. Aranha Neto****earanha@ifsc.edu.br**

Edison. A. C. Aranha Neto received the Electrical Engineering degree from Federal University of Parana (UFPR), in 2003, Curitiba/PR, Brazil, and Master Eng. and Doctor Eng. degrees in Electrical Engineering from Federal University of Santa Catarina (UFSC), Florianopolis/SC, Brazil, in 2006 and 2012, respectively. Since 2013 he has been developing teaching/research activities at Federal Institute of Santa Catarina (IFSC), Florianopolis/SC, Brazil. His main fields of interest include power system planning, transmission and distribution systems.

**Henrique Fragoso 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**

Licenciado em Engenharia Informática e mestre em Engenharia Electrotécnica pelo ISEP, Politécnico do Porto. Obteve o seu doutoramento em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores na Universidade UTAD. Ele é investigador do GECAD - Grupo de Investigação em Engenharia e Computação Inteligente para a Inovação e o Desenvolvimento. Os seus interesses de pesquisa incluem otimização em sistemas energia, incluindo otimização heurística, híbrida e clássica.

**COLABORARAM NESTA EDIÇÃO:****José António Beleza Carvalho****[jbc@isep.ipp.pt](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto: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.

