

Continuamos a missão de intervir na área científica da Engenharia Eletrotécnica, através da publicação de vários artigos técnicos e científicos que procuram promover a discussão e contribuir para a mitigação de problemas, de uma forma particular os que se relacionam com a produção e utilização mais eficiente, sustentável e responsável da energia elétrica.

*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

## ÍNDICE

|                                                                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| - Editorial                                                                                                                             | 3  |
| - <b>Máquina Síncrona de Corrente Alternada</b>                                                                                         | 5  |
| José Beleza de Carvalho                                                                                                                 |    |
| - <b>Efeitos Fisiopatológicos da Corrente Elétrica no Corpo Humano</b>                                                                  | 15 |
| Carolina de Almeida Costa; Catarina Magalhães Silva; Maria José Almeida; José Beleza Carvalho                                           |    |
| - <b>Wi-Fi 6E e Wi-Fi 7: Impacto no Projeto de Redes Internas em Edifícios</b>                                                          | 27 |
| Sérgio Ramos                                                                                                                            |    |
| - <b>Células Solares de Perovskite</b>                                                                                                  | 33 |
| Nuno Vicente, Teresa Nogueira                                                                                                           |    |
| - <b>O papel da energia nuclear na descarbonização e na transição económica global: oportunidades e desafios</b>                        | 37 |
| João Pires, Teresa Nogueira                                                                                                             |    |
| - <b>Ligação de Centrais Mini-hídricas à Rede Elétrica</b>                                                                              | 45 |
| Pedro Conceição, Teresa Nogueira                                                                                                        |    |
| - <b>Sistemas de Armazenamento de Energia em Baterias Ligadas à Rede Elétrica com Possibilidade de Prestação de Serviços Auxiliares</b> | 53 |
| André Amorim, Rui Brito                                                                                                                 |    |
| - Lista de Autores                                                                                                                      | 63 |

Os artigos não substituem a legislação, regulamentos, normas ou outros documentos, nem exclui a sua consulta, ou a consulta das entidades neles mencionadas, uma vez que apesar de todo o esforço dos autores na sua elaboração, são suscetíveis de conter imprecisões e omissões, além de poder não abranger todos os aspetos relevantes das temáticas tratadas.

## FICHA TÉCNICA

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

Estimados leitores

Como tem sido habitual nos últimos 18 anos, voltamos a publicar mais uma edição da revista “Neutro-à-Terra”. Continuamos a missão de intervir na área científica da Engenharia Eletrotécnica, através da publicação de vários artigos técnicos e científicos que procuram promover a discussão e contribuir para a mitigação de problemas, de uma forma particular os que se relacionam com a produção e utilização mais eficiente, sustentável e responsável da energia elétrica. Neste âmbito, a nossa revista destina-se aos professores e alunos dos cursos de engenharia eletrotécnica e, de uma forma geral, a todos os profissionais desta área da engenharia.

O mundo vive novamente mais uma situação de profunda crise energética devido ao conflito que se desenrola no Golfo Pérsico. Adicionando o conflito na Ucrânia, o mundo é cada vez mais instável e imprevisível, gerando insegurança e receio pelo futuro. As estas situações acrescem os problemas climáticos e ambientais, que nos deixam a todos preocupados sobre o que será a vida neste planeta num futuro próximo. Os problemas ambientais, a sustentabilidade e a eficiência cuidada e racional na utilização das diferentes formas de energia, em particular da energia elétrica, tomam uma importância acrescida e determinante para o nosso futuro.

Nesta edição publica-se um artigo muito interessante sobre o perigo do choque elétrico e os efeitos fisiopatológicos da corrente elétrica no corpo humano. Apesar da eletricidade ser uma forma de energia muito fácil de usar, é cómoda e segura, desde que as instalações elétricas estejam bem dimensionadas e respeitem a normalização internacional sobre a proteção das pessoas. Na realidade, todos os anos se verificam óbitos. Acidentes devido a ignorância, mas também devido a algumas instalações defeituosas que não respeitam as regras definidas na legislação em vigor. Neste artigo desenvolve-se os efeitos fisiopatológicos da corrente no corpo humano, de acordo com o percurso e a magnitude da corrente e o tipo de lesões associadas ao acidente elétrico.

A máquina síncrona de corrente alternada é uma máquina fundamental na produção de energia elétrica ao nível mundial. São máquinas girantes, reversíveis, normalmente de elevada potência. A vantagem de ser possível variar a sua corrente de excitação magnética torna esta máquina extremamente flexível no seu funcionamento em regime de fator de potência, quer indutivo quer capacitivo. Esta situação, aliada ao facto destas máquinas serem constituídas por cilindros girantes de coeficiente de inércia muito elevado, permitem o funcionamento estável das redes elétricas ao nível da tensão e da frequência. Na realidade, a diminuição destas máquinas no sistema de produção, devido há penetração crescente de energias renováveis, nomeadamente a solar fotovoltaica e a eólica, sem inércia, de natureza intermitente e não despachável coloca desafios à gestão da rede elétrica, em particular no que diz respeito ao equilíbrio entre produção e consumo, originando uma diminuição crítica da inércia do sistema elétrico, colocando as redes elétricas interligadas internacionalmente em risco de apagão. Nesta edição da revista apresenta-se um artigo sobre a constituição, princípio de funcionamento e utilização desta importante máquina, quer no seu funcionamento gerador, quer no funcionamento motor.

Uma forma de evitar apagões na rede elétrica é recorrer a tecnologias *grid forming*, que assentam na utilização de baterias para armazenamento da energia elétrica e no respetivo controlo por conversores de eletrónica de potência, conseguindo-se assim de forma virtual simular o desempenho dos geradores síncronos convencionais. Nesta edição da nossa revista apresenta-se um artigo muito interessante sobre sistemas de armazenamento de energia elétrica em baterias com a possibilidade de prestação de serviços auxiliares, como regulação de frequência e controlo de tensão.

Nesta edição apresenta-se, também, um artigo muito interessante sobre telecomunicações que aborda a temática do Wi-Fi, utilizada por produtos certificados que pertencem à classe de dispositivos de rede local sem fios (WLAN) baseados no padrão IEEE 802.11, cujo nome deriva de uma abreviação de *wireless field*, ou “área sem fio”, mais concretamente, o Wi-Fi 6E e Wi-Fi 7 e o seu impacto no projeto de redes internas em edifícios. O artigo analisa as principais características técnicas destas duas normas, o seu impacto no projeto de redes internas e os desafios colocados ao projetista de infraestruturas de telecomunicações, com particular atenção ao contexto regulatório português e europeu.

Nesta edição apresenta-se ainda outros artigos muito interessantes, que traduzem o trabalho desenvolvido e realizado por alunos do mestrado do ISEP em Sistemas Elétricos de Energia. Destaca-se um artigo sobre Células Solares de Perovskite, um artigo sobre O Papel da Energia Nuclear na Descarbonização e na Transição Económica Global, e um artigo sobre Ligação de Centrais Mini-hídricas à Rede Elétrica.

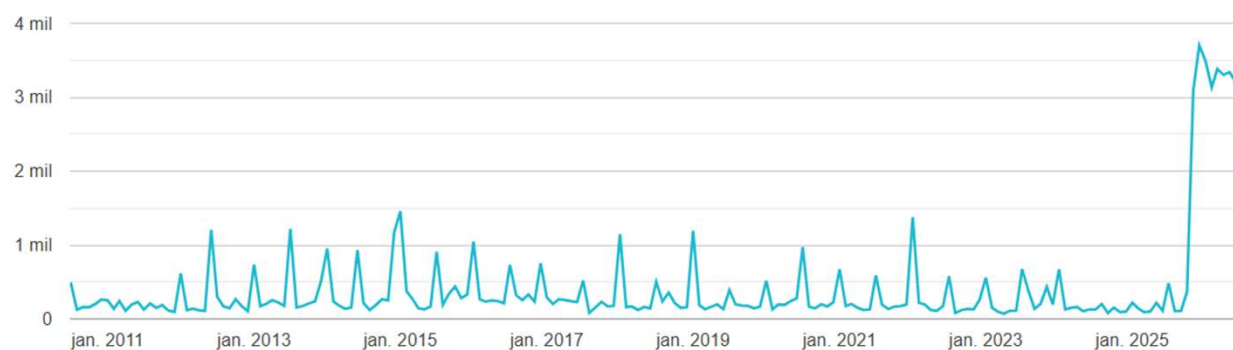
Desejando que esta edição da revista “Neutro à Terra” satisfaça novamente as habituais expectativas dos nossos estimados leitores, apresento os meus cordiais cumprimentos.

Porto, 30 de junho de 2026  
José António Beleza Carvalho

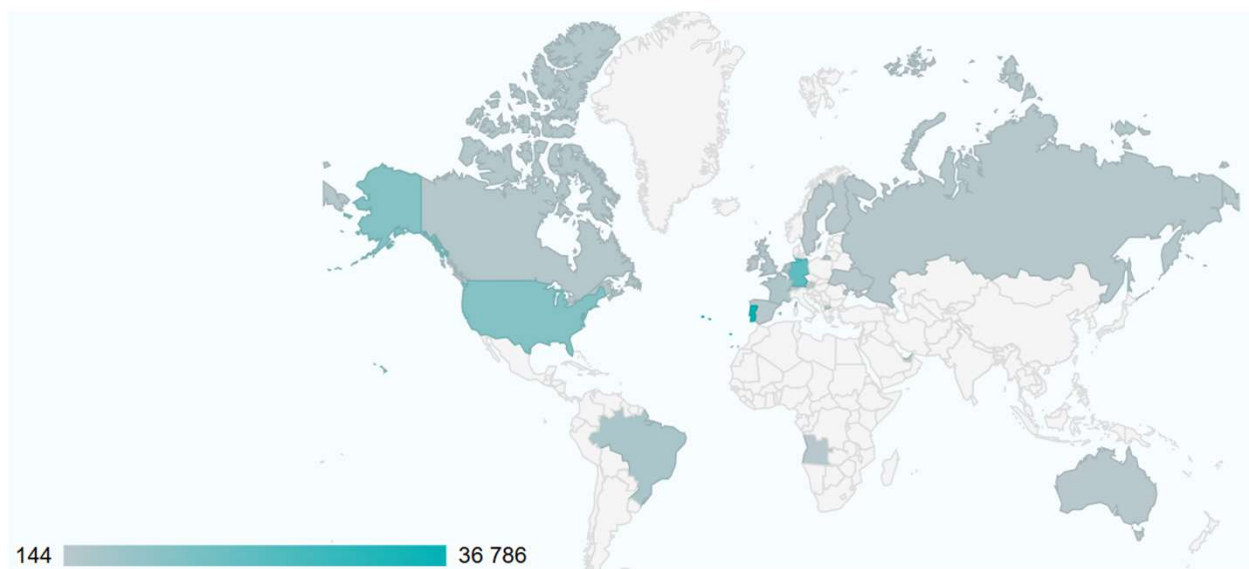
[www.neutroaterra.blogspot.com](http://www.neutroaterra.blogspot.com)



**Histórico de visualizações: 80 726**



**Localizações principais de visualizações**



## MÁQUINA SÍNCRONA DE CORRENTE ALTERNADA

### 1. Introdução

A máquina síncrona de corrente alternada é uma das máquinas elétricas convencionais de corrente alternada. A outra é a máquina assíncrona de indução. Ambas as máquinas elétricas são conversores eletromecânicos reversíveis, ou seja, podem converter energia mecânica em energia elétrica e funcionam como geradores, ou convertem energia elétrica em energia mecânica e funcionam como motores. As máquinas síncronas giram a uma rotação constante em regime permanente. Ao contrário da máquina assíncrona de indução, o rotor da máquina síncrona gira em sincronismo e á mesma velocidade do campo magnético girante que se faz sentir no entreferro da máquina, designada por rotação ou velocidade síncrona. Estas máquinas podem ser monofásicas ou trifásicas. Normalmente, as máquinas de maior potência nominal são trifásicas.

A máquina assíncrona de indução é fundamentalmente utilizada como motor, embora já tenha uma utilização relevante como gerador, em especial como aerogerador, em aproveitamentos eólicos. Como motor, na versão trifásica, é considerada a carga típica de corrente alternada, consumindo 60 a 70% da energia elétrica que é mundialmente produzida.

A máquina síncrona de corrente alternada é fundamentalmente utilizada como gerador, ou alternador síncrono. São geralmente máquinas de grande porte, com potências nominais de várias centenas e até já milhares de MVA (megavolt-ampères) que geram energia elétrica em centrais hidroelétricas, nucleares ou térmicas, mas também em parques eólicos, embora aqui de muito menor potência. Atualmente, são os principais geradores de energia elétrica em corrente alternada em todo mundo.

A máquina síncrona também é utilizada como motor. Em grandes dimensões (centenas ou milhares de quilowatts), os

motores síncronos são utilizados em bombagem em centrais hidroelétricas com esta capacidade e, em pequenas dimensões (frações de cavalo-vapor), são utilizados em relógios elétricos, temporizadores e de uma forma geral, onde se pretende uma velocidade de rotação constante. Na indústria, os motores síncronos são utilizados principalmente onde se pretende rotação constante. Nos acionamentos industriais, portanto, os motores síncronos não são tão amplamente utilizados como os motores de indução. Na realidade, ao contrário do motor assíncrono de indução trifásico, o motor síncrono de corrente alternada não tem arranque direto, necessita de meios auxiliares de arranque, que atualmente são conversores de eletrônica de potência. No entanto, há atualmente uma utilização crescente destes motores síncronos nas versões de pólos de ímanes permanentes e motores síncronos de relutância. Estes motores, conjuntamente com os motores de relutância comutados, são atualmente muito utilizados em veículos elétricos.

Uma característica importante de um motor síncrono é que pode consumir corrente reativa, tanto indutiva como capacitiva, do sistema de alimentação em corrente alternada. Uma máquina síncrona é uma máquina duplamente excitada. Os pólos do rotor são excitados por uma corrente contínua e os seus enrolamentos estatóricos são ligados à rede elétrica em corrente alternada. O fluxo magnético no entreferro é, portanto, o resultado dos fluxos devidos tanto à corrente do rotor como à corrente do estator. Nas máquinas de indução, a única fonte de excitação (indutor) é a corrente estatórica, porque as correntes do rotor são correntes induzidas. Portanto, os motores de indução operam sempre com um fator de potência indutivo, porque é necessária corrente reativa indutiva para estabelecer o fluxo na máquina.

Por outro lado, num motor síncrono, se o enrolamento indutor do rotor apenas fornecer a excitação necessária, o estator não consumirá corrente reativa, ou seja, o motor irá

funcionar em regime de fator de potência unitário. Se a corrente de excitação do rotor for reduzida, será consumida uma corrente reativa indutiva da alimentação em corrente alternada, para auxiliar a magnetização pela corrente de excitação do rotor, e a máquina funcionará com um fator de potência indutivo. Se a corrente de excitação do rotor for aumentada, será consumida uma corrente reativa capacitiva da alimentação em corrente alternada, para se opor à magnetização pela corrente de excitação do rotor, e a máquina funcionará com um fator de potência capacitivo. Assim, alterando a corrente de excitação rotórica, o fator de potência do motor síncrono pode ser controlado. Se o motor não estiver em carga, mas simplesmente flutuar no sistema de alimentação em corrente alternada, comportar-se-á como um indutor ou condensador variável à medida que a sua corrente de excitação rotórica for alterada.

Uma máquina síncrona sem carga, alimentada em corrente alternada pela rede elétrica é designada por condensador síncrono, ou compensador síncrono. Pode ser utilizado em sistemas de transmissão de energia para regular e estabilizar a tensão de linha. Na indústria, os motores síncronos são por vezes utilizados com outros motores de indução e operados em modo sobrecarregado para que consumam corrente capacitiva para compensar a corrente indutiva consumida pelos motores de indução, melhorando assim o fator de potência global da instalação. A Figura 1 apresenta uma máquina síncrona trifásica de pólos salientes, de um par de pólos (a), dois pares de pólos (b) e bobinagem estatórica ligada em estrela (c) [1].

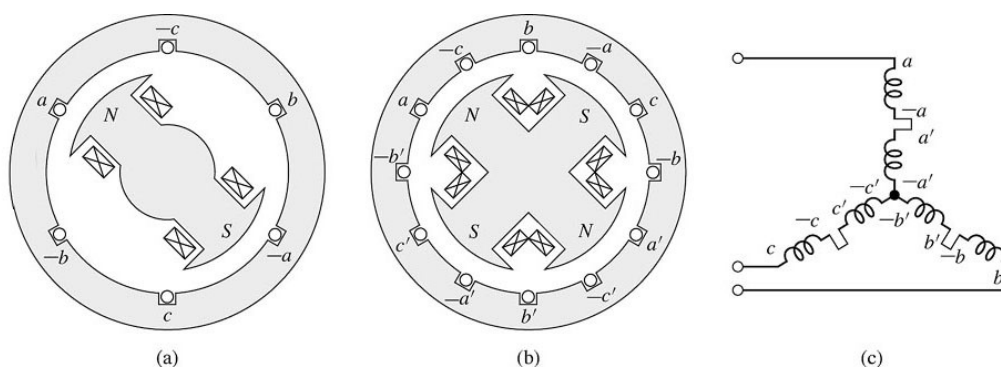


Figura 1. Estrutura básica de uma máquina síncrona, trifásica, de pólos salientes

## 2. Princípio de funcionamento

A máquina síncrona de corrente alternada é uma máquina elétrica convencional, que tem o seu princípio de funcionamento baseado nas leis da indução eletromagnética. Este princípio de funcionamento assenta na interação de dois campos magnéticos:

- O campo magnético dos pólos rotóricos, obtido por excitação em corrente contínua da bobinagem que os envolve, denominada circuito indutor ou de excitação;
- O campo magnético criado pela corrente que circula na bobinagem estatórica, denominada de induzido, ou armadura. Este campo também é denominado de reação magnética do induzido, ou armadura.

A Figura 2 representa uma máquina síncrona, monofásica de um par de pólos, a funcionar como gerador.

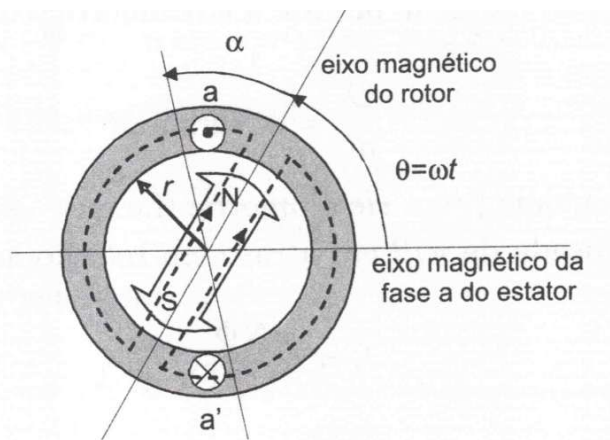


Figura 2. Funcionamento da máquina síncrona como gerador [2]

No movimento de rotação o campo dos pólos rotóricos “corta” a bobinagem estatórica, manifestando-se a Lei da Faraday com uma força eletromotriz induzida na bobinagem estatórica do induzido. Assumindo como sinusoidal a distribuição espacial da indução B, então:

$$B = B_{\max} \times \cos \varphi \quad (1)$$

O fluxo magnético por pólo será:

$$\Phi_p = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} B_{\max} \cos \alpha \cdot l \cdot r \cdot d\alpha = 2B_{\max} \cdot l \cdot r \quad (2)$$

Para uma máquina com “p” pares de pólos:

$$\Phi_p = \frac{2B_{\max} \cdot l \cdot r}{p} \quad (3)$$

O fluxo ligado que “corta” a fase a do estator será:

$$\lambda_a = N \cdot \Phi_p \cdot \cos \theta = N \cdot \Phi_p \cdot \cos \omega t \quad (4)$$

Pela Lei de Faraday, a força eletromotriz (f.e.m.) induzida em cada uma da bobinagem trifásica do induzido, desfasadas no espaço cilíndrico de  $120^\circ$ , devido ao campo girante produzido pelos pólos rotóricos será então:

$$e_a = - \frac{\partial \lambda_a}{\partial t} = N \cdot \omega \cdot \Phi_p \cdot \sin \omega t \quad (5)$$

$$e_a = E_{\max} \sin \omega t$$

$$e_b = E_{\max} \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$e_c = E_{\max} \sin(\omega t + 120^\circ)$$

$$E = \frac{E_{\max}}{\sqrt{2}} = \frac{N \cdot \omega \cdot \Phi_p}{\sqrt{2}} = 4,44 N \cdot f \cdot \Phi_p \cdot K_w$$

Verifica-se assim, que o valor eficaz da f.e.m. induzida E na bobinagem estatórica é alternada e sinusoidal, e depende do número de espiras da bobinagem N, da frequência alternada f, do fluxo magnético por pólo  $\Phi$  e do fator de bobinagem  $K_w$ . Este fator de bobinagem corrige a f.e.m. induzida de uma bobinagem com todas as espiras na mesma ranhura

(enrolamento concentrado), como nas Figuras 1 e 2, para a situação real das espiras estarem distribuídas por um determinado número de ranhuras (enrolamento distribuído).

Como se afirmou na secção anterior, estas máquinas são caracterizadas por funcionarem com uma rotação constante, em que o rotor gira em sincronismo com o campo girante que se faz sentir no entreferro da máquina. Esta rotação síncrona (ns em rotações por segundo) está relacionada com a frequência da corrente alternada (f) e com o número de pares de pólos da máquina (p), de acordo com a seguinte equação:

$$f = n_s \cdot p \quad (6)$$

Se a máquina funcionar como gerador, a frequência da corrente alternada vai depender da velocidade de rotação do gerador. Verifica-se assim que, para se obter 50 Hz, a máquina de um par de pólos tem de girar a 50 r.p.s., ou 3000 r.p.m.

O campo girante que se faz sentir no entreferro é justificado pelo teorema de Ferraris, que diz que a composição no entreferro de três campos estacionários e pulsantes no tempo, criados pela corrente que circula na bobinagem do induzido, e, portanto, desfasadas no espaço e no tempo de  $120^\circ$ , originam um campo girante de amplitude constante e igual a  $3/2$  do campo estacionário criado por cada uma das bobinagens de fase do induzido [3]. A velocidade de rotação vai obviamente depender da frequência da tensão de alimentação da bobinagem estatórica, de acordo com a equação (6).

Como já se afirmou, o funcionamento desta máquina convencional, como em outras máquinas elétricas convencionais, assenta na interação de dois campos magnéticos, o campo do indutor e o campo do induzido. O campo do induzido, obviamente que só se manifesta quando a bobinagem do induzido é percorrida por corrente, ou seja, com a máquina em carga, quer esteja a funcionar como gerador ou como motor.

Na máquina síncrona esta questão é particularmente importante, pois interessa saber como o campo de reação do induzido produzido pela bobinagem estatórica se compõe com o campo produzido pelos pólos rotóricos. Isto leva à consideração das seguintes hipóteses simplificativas:

- Hipótese de Behn Eschemburg: todo o fluxo do campo de reação do induzido é considerado como de fugas;
- Hipótese Rothert: não há fluxo de fugas, todo o campo de reação do induzido se compõe com o campo indutor;
- Hipótese Potier: uma parte do campo de reação do induzido compõe-se com o campo indutor e outra parte é de fugas;
- Hipótese Blondel: a variação do fluxo de fugas é função do entreferro.

Na prática a hipótese que é normalmente adotada na análise do funcionamento desta máquina é a de Behn Eschemburg, pelo que será esta que se vai adotar ao longo deste documento.

Assim, o fluxo ligado de reação do induzido, ou reação magnética da armadura, visto da fase  $a$  é o seguinte:

$$\lambda_{r_a} = L \cdot i_a + M_{ab} \cdot i_b + M_{ac} \cdot i_c \quad (7)$$

Como o coeficiente de autoindução mútua entre as bobinas é:  $M_{ab} = M_{ac} = M$  e  $i_a + i_b + i_c = 0 \Rightarrow i_a = -(i_b + i_c)$ , então:

$$\lambda_{r_a} = L \cdot i_a + M(i_b + i_c) \quad (8)$$

Pela Lei de Faraday:

$$e_{ar} = -\frac{\partial \lambda_r}{\partial t} = -(L - M) \frac{\partial i_a}{\partial t} \quad (9)$$

Em carga, a tensão aos terminais do gerador será:

$$v_t = e_f + e_{ar} = e_f - (L - M) \frac{\partial i_a}{\partial t} \quad (10)$$

Facilmente, na máquina como gerador e considerando o fluxo de fugas  $X_{al}$ :

$$V_t = E_f - j\omega(L - M)I = E_f - jX_{ar}I - jX_{al}I \quad (11)$$

$X_s$  é a reatância síncrona (Behn Eschemburg) que associa o fluxo de reação do induzido que se compõe com o campo indutor ( $X_{ar}$ ) e o fluxo de fugas ( $X_{al}$ ).

$$X_s = X_{ar} + X_{al} \quad (12)$$

A queda de tensão na reatância (fictícia)  $X_{ar}$  traduz a f.e.m.  $E_{ar}$  devido ao campo de reação magnética da armadura que se compõe com o campo indutor.

O circuito equivalente desta máquina, por fase, na hipótese simplificada de Behn Eschemburg, é o que se apresenta na Figura 3, onde:

$E_f$ : é a f.e.m. induzida na bobinagem estatórica devido ao campo girante do entreferro, resultante da composição do campo indutor e do campo de reação do induzido,  $E_r = E_{ar} + E_f$ , (Fig. 3 a));

$E_f$ : é a f.e.m. induzida na bobinagem estatórica devido ao campo indutor principal, produzido pelos pólos rotóricos,  $E_a = E_f - jX_{ar}I_a - jX_{al}I_a = E_f - jX_s I_a$ , (Fig. 3 a));

$E_a$ : é a f.e.m. induzida total na bobinagem estatórica, devido à f.e.m. induzida pelo campo indutor, f.e.m. induzida devido ao campo de reação magnética da armadura e devido ao fluxo de fugas,  $E_a = E_f - jX_{ar}I_a - jX_{al}I_a = E_f - jX_s I_a$ , (Fig. 3b));

$R_a$ : é a resistência da bobinagem da armadura;

$I_a$ : é a corrente que circula na armadura, ou induzido, neste caso em situação de gerador.

$V_t$ : é a tensão aos terminais, situação gerador, (Fig. 3b)).

$$V_t = E_f - (R_a + jX_s)I_a = E_f - Z_s I_a \quad (13)$$

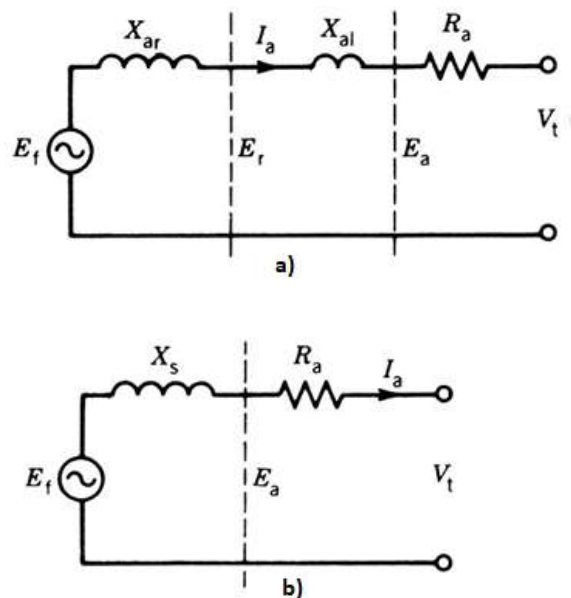


Figura 3. Circuito equivalente por fase da máquina síncrona [3]

Na Figura 4 apresenta-se os diagramas fasoriais da máquina síncrona correspondente ao esquema equivalente por fase da Figura 3 b). Destaca-se o ângulo de fase, ou ângulo de potência  $\delta$ , que é determinante e caracteriza o funcionamento desta máquina.

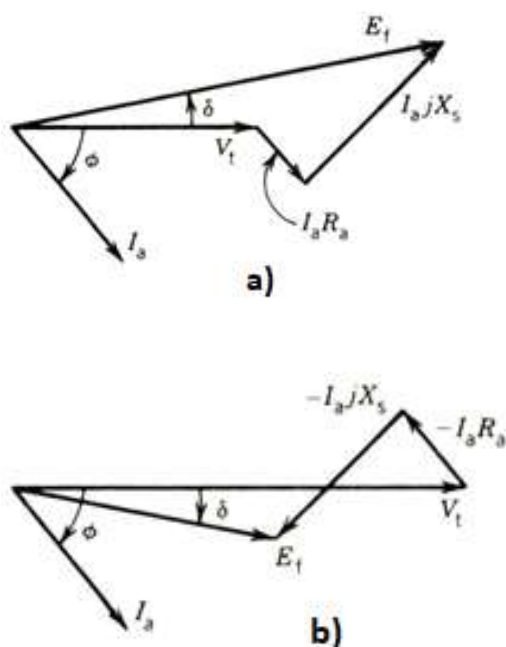


Figura 4. Diagramas fasoriais da máquina síncrona. a) gerador, b) motor. [3]

### 3. Máquina síncrona ligada à rede elétrica ou barramento infinito

Para que uma máquina síncrona como gerador possa ser ligada à rede elétrica, obriga há necessidade de sincronização com essa rede, também denominada de barramento infinito. Na realidade, sendo atualmente as redes elétricas de grandes dimensões, interligadas internacionalmente à mesma frequência, com uma potência de geradores e transformadores em paralelo de valor elevadíssimo, formam uma rede síncrona de potência teoricamente infinita. Esta rede de capacidade infinita impõe a qualquer aparelho que a ela se ligue a sua própria tensão e frequência.

Assim, para colocar o gerador síncrono em paralelo com esta rede é necessário garantir as seguintes condições (Figura 5):

- Igual frequência à da rede que vai ligar;
- Igual nível de tensão;
- Igual sequência de fases do gerador e da rede;
- Desfasamento nulo entre as fases do gerador e da rede.

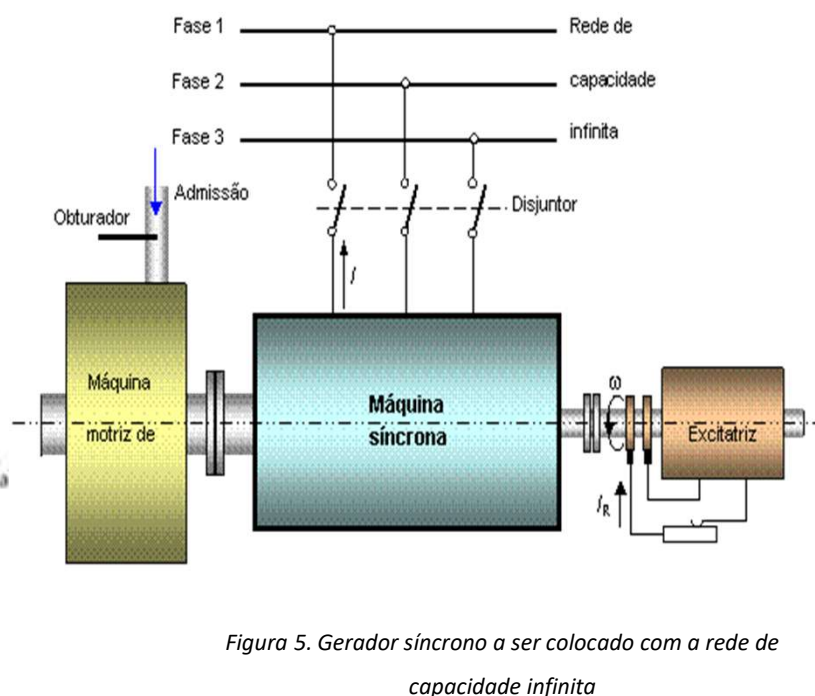
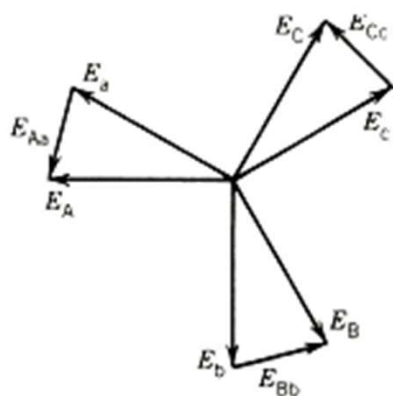
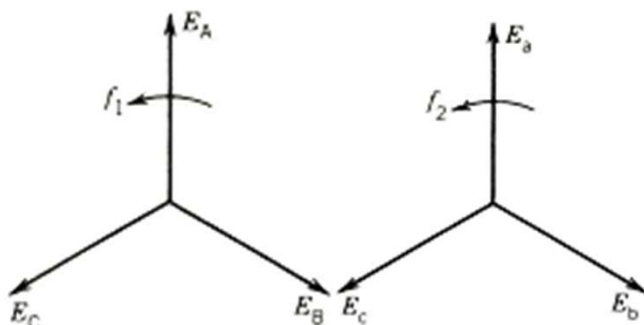


Figura 5. Gerador síncrono a ser colocado com a rede de capacidade infinita

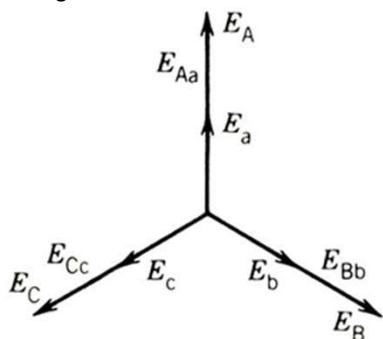
Os procedimentos, e a representação fasorial das tensões na rede (carateres maiúsculos) e tensões no gerador síncrono (carateres minúsculos), no ajuste da máquina síncrona (ou alternador), são os seguintes[3]:

- a) Frequências diferentes, mas as tensões e a sequência de fases são iguais



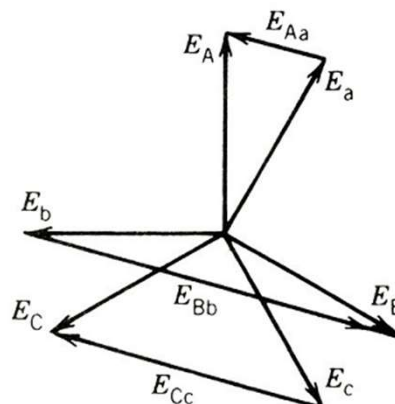
Procedimento: ajustar em simultâneo a velocidade e a corrente de excitação do alternador

- b) Tensões diferentes, mas a frequência e a sequência de fases são iguais



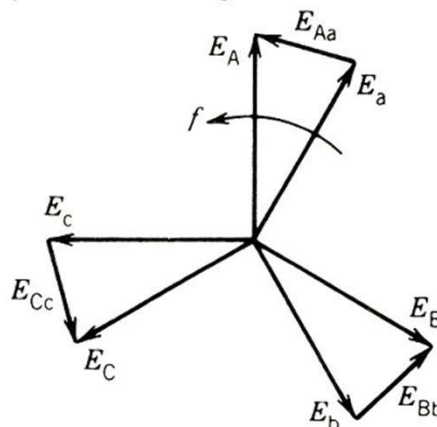
Procedimento: ajustar a corrente de excitação do alternador

- c) Sequência de fases diferentes, mas as tensões e a frequência são iguais



Procedimento: inverter a posição de 2 fases (A-B) aos terminais do alternador

- d) Fases diferentes, mas as tensões, a frequência e a sequência de fases são iguais



Procedimento: frequência do alternador ligeiramente ajustada

Apenas depois de estarem garantidas estas condições a máquina poderá ser ligada à rede. Atualmente, nas centrais elétricas, estas condições são realizadas de forma automática com equipamentos denominados sincroscópios. No entanto, numa situação mais expedita, é possível apenas com 3 lâmpadas. Cada lâmpada é ligada entre a fase da rede e a fase do alternador. O brilho da lâmpada vai depender da diferença de potencial entre a fase da rede e a fase do alternador. O sincronismo é conseguido quando as 3 lâmpadas se encontram simultaneamente apagadas. Momento em que se faz o paralelo da máquina com a rede.

No funcionamento como motor, os procedimentos de alimentação dos terminais da máquina síncrona pela rede elétrica são diferentes. Na realidade, como se referiu no início, esta máquina como motor não tem arranque direto.

Ao aplicar aos terminais do motor a tensão da rede, que deve ser a tensão nominal do motor, à frequência de 50 Hz, o campo girante que se vai manifestar no entreferro, de acordo com a equação (6), vai girar a 3000 rpm. A 50 Hz a polaridade do campo girante vai inverter-se a cada 10 ms, tornando impossível que o binário de sincronismo  $T$  desenvolvido pelos pólos rotóricos consigam sincronizar e alinharem-se com o campo girante, como se apresenta na Figura 6. O sentido deste binário vai inverter-se em intervalos de 10 ms.

Os métodos de arranque mais usuais do motor síncrono são os seguintes:

- Arranque com utilização de uma fonte de frequência variável, habitualmente um conversor eletrónico de frequência variável. Inicialmente a frequência da tensão de alimentação é muito reduzida, mas vai-se aumentando gradualmente, de forma que os pólos rotóricos possam acompanhar o campo girante;
- Arranque assíncrono da máquina, ou seja, como motor de indução. Neste caso, a bobinagem do indutor que envolve os pólos é curto-circuitada no período de arranque, ficando o motor síncrono numa situação

semelhante ao motor assíncrono de indução de rotor bobinado. A máquina é alimentada à tensão e frequência nominal e desenvolve o arranque assíncrono, ficando muito perto da rotação síncrona. Seguidamente, desfaz-se o curto-circuito e excita-se o indutor e o rotor facilmente sincroniza com o campo girante.

Outra possibilidade do arranque como assíncrono, é tirar partido dos amortecedores Leblanc, que normalmente equipam as máquinas síncronas de elevada potência, como se apresenta na Figura 7.

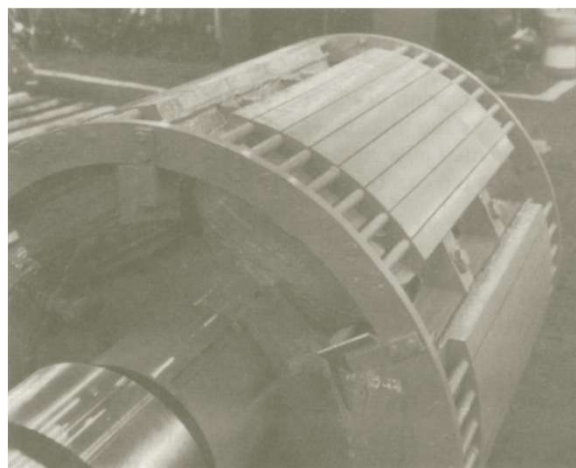


Figura 7. Amortecedores Leblanc da máquina síncrona [3]

A finalidade destes amortecedores é evitar que oscilações pendulares da máquina a possam fazer perder o sincronismo. Neste caso, no arranque, os amortecedores terão um comportamento semelhante ao rotor de gaiola do motor assíncrono de indução.

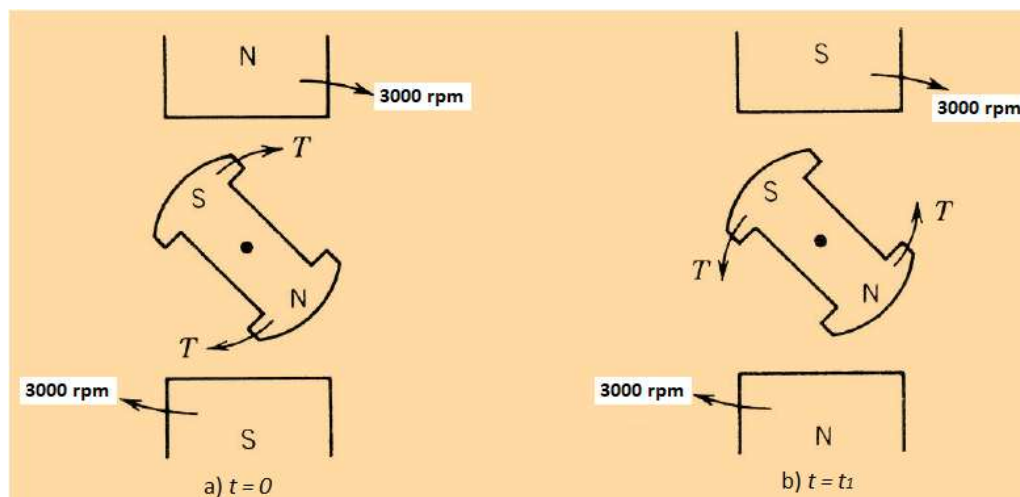


Figura 6. Binário de arranque desenvolvido pelo motor síncrono[4]

#### 4. Balanço energético de máquina síncrona com o barramento infinito.

Como se referiu anteriormente, quando a máquina síncrona está ligada à rede elétrica, ou barramento infinito, a frequência e a tensão aos terminais da máquina são impostas pela rede. Pelas Figuras 3 e 4, com a máquina a funcionar como gerador, ligada ao barramento infinito, obtém-se as seguintes equações:

$$\begin{aligned} V_t &= |V_t| \angle 0^\circ \\ E_f &= |E_f| \angle \delta \\ Z_s &= R_a + jX_s = |Z_s| \angle \theta_s \end{aligned} \quad (14)$$

A troca de potência com o barramento infinito, com  $E_0$  igual a  $E_f$  da Figura 3, ou seja, a f.e.m. em vazio, com  $V_t$  imposta pela rede, é obtida pelas seguintes equações por fase:

$$\begin{aligned} \bar{S} &= V_t \cdot I^* = P + jQ & Z_s &= R_a + jX_s = |Z_s| \angle \theta \\ I^* &= \left( \frac{E_0 - V_t}{Z_s} \right)^* = \frac{E_0^*}{Z_s^*} - \frac{V_t^*}{Z_s^*} = \frac{|E_0|^{-\delta}}{|Z_s|^{-\theta}} - \frac{|V_t|}{|Z_s|^{-\theta}} \\ \bar{S} &= V_t \cdot \left( \frac{|E_0|^{-\delta}}{|Z_s|^{-\theta}} - \frac{|V_t|}{|Z_s|^{-\theta}} \right) = \frac{|V_t| \times |E_0|^{\theta-\delta}}{|Z_s|} - \frac{|V_t|^2}{|Z_s|} \\ R_a &\ll X_s \Rightarrow Z_s \approx X_s & \theta &\approx 90^\circ \\ \bar{S} &= \frac{|V_t| (|E_0| \cos(90-\delta) + j|E_0| \sin(90-\delta))}{X_s} - \frac{j|V_t|^2}{X_s} \\ \bar{S} &= \frac{E_0 \cdot V_t \cdot \sin \delta}{X_s} + j \frac{E_0 \cdot V_t \cdot \cos \delta - V_t^2}{X_s} \end{aligned} \quad (15)$$

Da equação (15) obtém-se as equações da parte real da potência (potência ativa), e a parte imaginária da potência (potência reativa):

$$\begin{aligned} P &= \frac{E_0 \cdot V_t}{X_s} \sin \delta = P_{\max} \sin \delta \\ Q &= \frac{E_0 \cdot V_t \cdot \cos \delta - V_t^2}{X_s} \end{aligned} \quad (16)$$

O binário eletromagnético desenvolvido pela máquina síncrona trifásica, resistente se funcionar como gerador, ou motor se funcionar como motor síncrono, é obtido pela seguinte equação:

$$T = \frac{P}{\omega_s} = \frac{3}{\omega_s} \cdot \frac{|V_t| \cdot |E_0|}{X_s} \cdot \sin \delta = T_{\max} \cdot \sin \delta \quad (17)$$

Verifica-se assim, que a potência ativa e o binário desenvolvido pela máquina síncrona, como motor ou gerador, variam sinusoidalmente com o ângulo de fase (ou de potência)  $\delta$ .

A Figura 8 representa a variação da potência e do binário em função da rotação e do ângulo  $\delta$ .

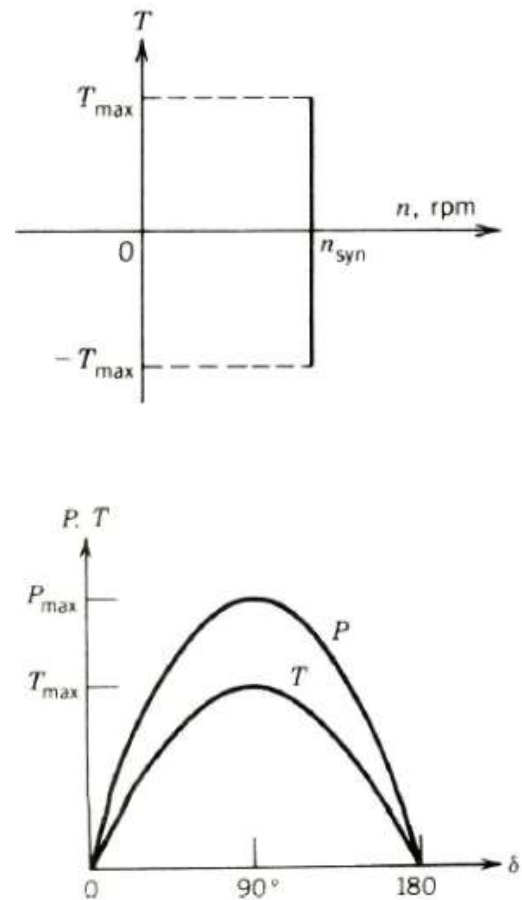


Figura 8. Características de potência e binário da máquina síncrona[4]

Relativamente ao comportamento em potência da máquina síncrona ligada ao barramento infinito, analisando as equações (16) pode-se constatar o seguinte[4]:

- Se  $\delta > 0$  a potência ativa desenvolvida pela máquina é positiva e a máquina funciona como gerador.
- Se  $\delta < 0$  a potência ativa desenvolvida pela máquina é negativa e a máquina funciona como motor.
- A máxima potência ativa gerada (ou absorvida) pela máquina verifica-se para  $\delta=90^\circ$ . Este ângulo de potência representa o limite de estabilidade em regime permanente da máquina.
- Se  $E_0 \cos \delta > V_t$  a máquina síncrona fornece potência reativa à rede. Do ponto de vista da rede, comporta-se como um condensador. Neste caso diz-se que a máquina está sobreexcitada.
- Se  $E_0 \cos \delta < V_t$  a máquina síncrona recebe potência reativa da rede. Do ponto de vista da rede, comporta-se como uma carga indutiva. Neste caso diz-se que a máquina está subexcitada.

Estas constatações permitem concluir que a máquina síncrona pode funcionar em 4 quadrantes, dois como

gerador (sobreexcitado e subexcitado), e dois como motor (sobreexcitado e subexcitado), como se apresenta na Figura 9, onde se despreza a resistência da armadura  $R_a$ . O eixo das ordenadas traduz a potência ativa e o das abcissas a potência reativa[4].

Uma característica importante da máquina síncrona é o facto de o ajuste da corrente de excitação poder definir o regime de fator de potência e o quadrante em que a máquina vai funcionar. Assim, a máquina pode funcionar a regime de fator de potência unitário, neste caso a máquina nem fornece nem consome energia reativa da rede a que está ligada. Pode funcionar sobreexcitada e, neste caso, injeta potência reativa na rede. Pode funcionar subexcitada e, neste caso, consome potência reativa da rede. Isto, independentemente de funcionar como motor ou gerador, como se pode ver na Figura 9.

A relação da corrente que circula na armadura em função da corrente de excitação, em vários regimes de carga é definida pelas curvas V, ou curvas de Mordey, como se apresenta na Figura 10.

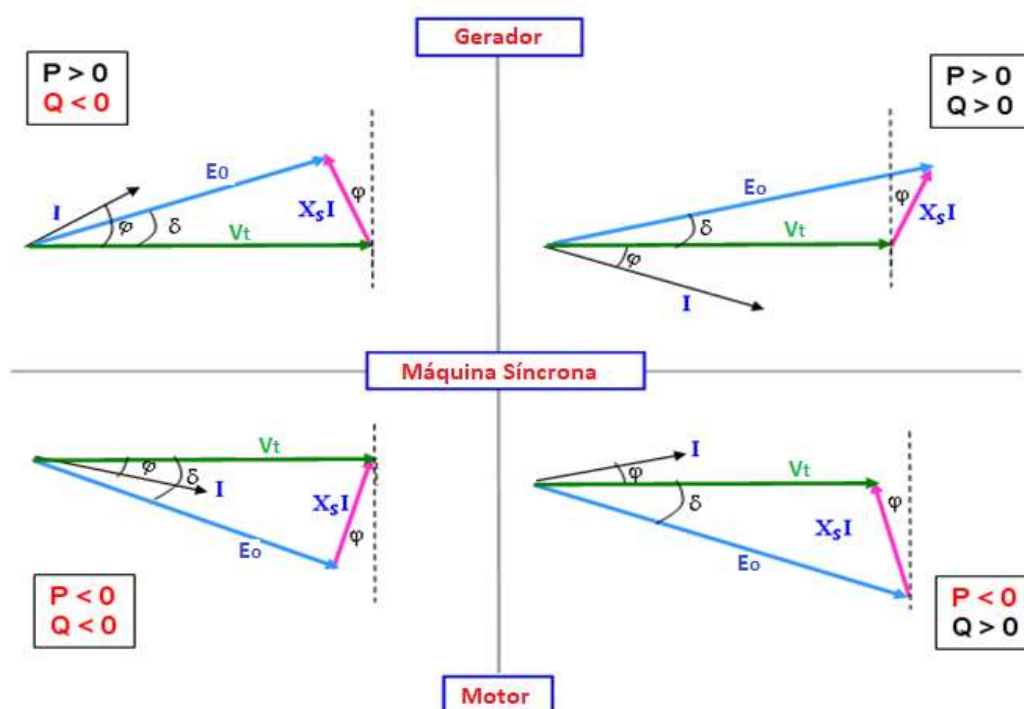


Figura 9. Funcionamento da máquina síncrona em quatro quadrantes

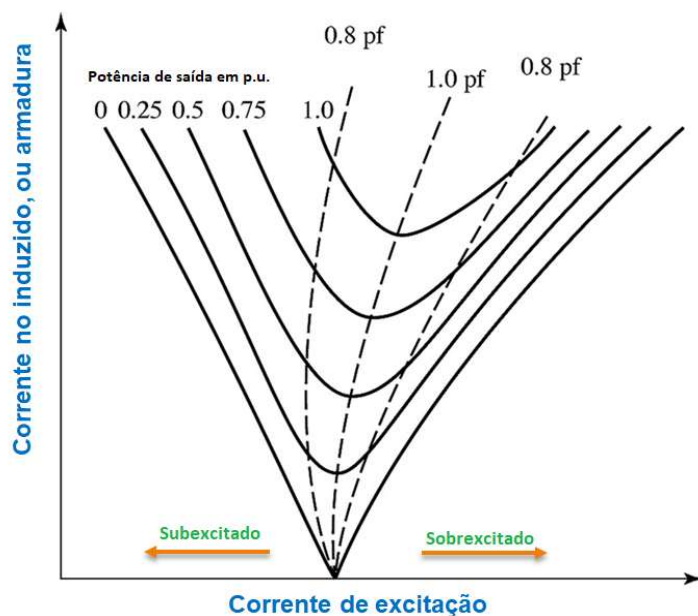


Figura 10. Curvas V, ou Mordey, da máquina síncrona em quatro quadrantes [4]

Verifica-se assim, quando a máquina síncrona funciona como gerador no 1º quadrante, está sobrecitada e em regime de fator de potência indutivo. A corrente aparece em atraso relativamente à tensão. Nesta situação injeta energia reativa na rede.

Quando a máquina síncrona funciona como gerador no 2º quadrante, está subexcitada e em regime de fator de potência capacitivo. A corrente aparece em avanço relativamente à tensão. Nesta situação absorve energia reativa da rede.

Quando a máquina síncrona funciona como motor no 3º quadrante, está subexcitada e em regime de fator de potência indutivo. A corrente aparece em atraso relativamente à tensão. Absorve energia reativa na rede.

Quando a máquina síncrona funciona como motor no 4º quadrante, está sobrecitada e em regime de fator de potência capacitivo. A corrente aparece em avanço relativamente à tensão. Injeta energia reativa na rede.

Quando a máquina síncrona funciona como motor sem carga no veio (em vazio) diz-se que funciona como compensador síncrono, pois há apenas troca de energia reativa com a rede. Embora possa estar subexcitada ou sobrecitada, habitualmente a máquina funciona sobrecitada injetando energia reativa na rede. Como consome sempre a potência ativa devido às perdas constantes, diz-se que funciona como compensador síncrono no 4º quadrante [4].

## 5. Motor síncrono.

Como se referiu logo no início, a máquina síncrona é uma máquina reversível, podendo funcionar como gerador ou motor.

Também pelas razões que já foram referidas, em potências elevadas, ela é fundamentalmente utilizada como gerador. No entanto, devido ao desenvolvimento tecnológico, particularmente da eletrónica de potência, a máquina síncrona já tem uma elevada utilização como motor, especialmente quando se pretende rotações constantes.

As principais especificidades desta máquina no funcionamento como motor, são as seguintes:

- Requer duas fontes de excitação: estatórica e rotórica;
- A fonte de corrente contínua (DC), de excitação do rotor, não transfere qualquer potência para a carga, controla essencialmente a potência reativa requerida pelos enrolamentos estatóricos, com efeitos evidentes no binário motor desenvolvido, como se verifica pela equação (17);
- O fator de potência, a corrente na armadura (induzido) e a potência reativa são facilmente controlados pela excitação DC do rotor, como se observa na Figura 11;
- Do ponto de vista da rede AC o motor comporta-se como uma indutância ou um condensador variável;
- Um motor síncrono pode funcionar com elevado fator de potência e elevado rendimento, pois não há perdas devido ao escorregamento, como se verifica no motor assíncrono de indução.

- Estes motores providenciam um binário variável a cargas que requerem uma velocidade constante, como se pode verificar na Figura 8;
- Apresentam a desvantagem, além da necessidade de excitação DC, o facto de perderem o sincronismo quando se verificam variações bruscas no binário de carga no veio. Os amortecedores Leblanc, em máquinas de elevada potência, ou um controlo eletrónico de velocidade “auto-pilotado”, podem atenuar esta situação;
- Custo mais elevado, devido a aspetos construtivos, comparativamente com o motor assíncrono de indução;
- Não possui capacidade de arranque, sendo utilizado métodos auxiliares para o efeito, como variadores de frequência, ou arranque como motor de indução, como se apresenta na secção 3;
- Em utilizações industriais, pode ser também utilizado na compensação do fator de potência da instalação em que está alimentado.
- A velocidade do motor síncrono pode ser controlada por variação da frequência da tensão de alimentação.
- Um controlo em que se mantém constante a relação entre a frequência e a tensão de alimentação, permite que mantenha sempre a mesma capacidade de máximo binário, independentemente da velocidade a que vai funcionar, como se pode constatar pela equação (17);
- Para qualquer valor fixo da frequência, a velocidade mantém-se constante, mesmo que se verifique variação da carga no veio do motor. A menos que o motor perca o sincronismo;
- O motor síncrono é muito adequado para utilizações onde se exige um controlo de velocidade preciso, também onde vários motores têm que funcionar em sincronismo entre si.

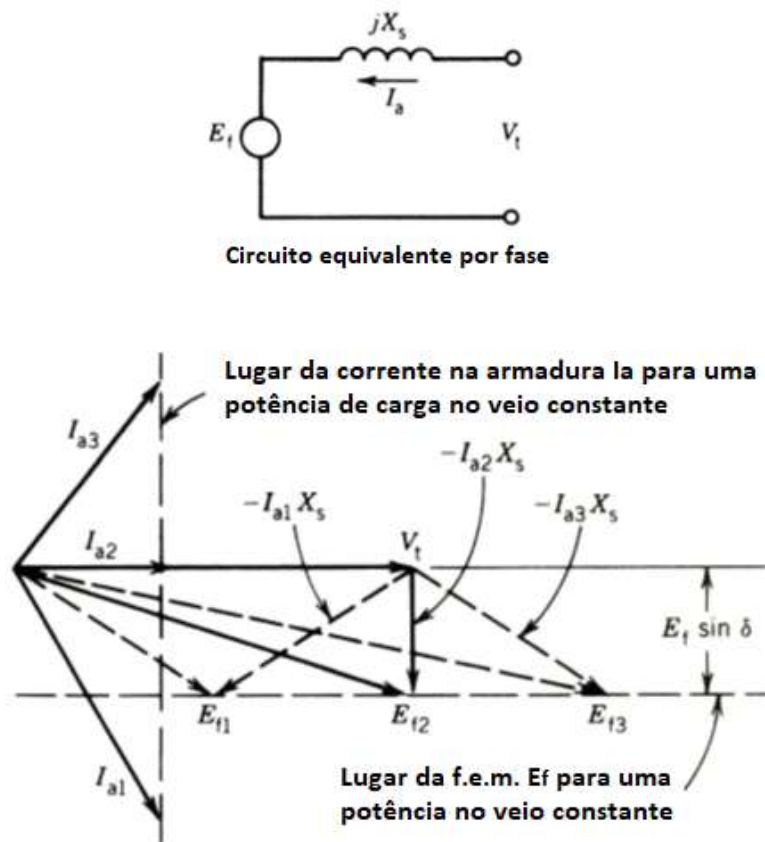


Figura 11. Circuito equivalente por fase do motor síncrono e diagramas fasoriais em regimes de fator de potência indutivo ( $I_{a1}$ ), unitário ( $I_{a2}$ ) e capacitivo ( $I_{a3}$ ), para uma carga mecânica constante no veio[3]

## 6. Conclusões

A máquina síncrona de corrente alternada é das máquinas elétricas convencionais mais importante das que existem atualmente. Ela é fundamentalmente utilizada como gerador nas grandes centrais de produção de energia elétrica, em potências muito elevadas, da ordem das centenas e até milhares de megavolt-ampéres.

Como todas as máquinas elétricas rotativas convencionais, ela é um conversor eletromecânico reversível, isto é, pode funcionar como gerador ou como motor. Este facto é muito importante, particularmente em centrais hidroelétricas com capacidade de bombagem, onde a máquina síncrona funcionará como gerador, mas também como motor, quando for necessário efetuar a bombagem da água novamente para montante do aproveitamento hídrico.

Como motor, a máquina também tem elevada utilização, especialmente quando são necessárias rotações constantes, mesmo em vários regimes de carga. A rotação depende da frequência da tensão de alimentação e do número de pares de pólos da máquina. No entanto, tem como limitação não ter arranque direto, sendo necessário meios auxiliares de arranque. Atualmente, o processo de arranque mais usual baseia em conversores eletrónicos de frequência variável. Estes conversores, também permitem controlar a velocidade do motor, sendo particularmente importante o facto de adaptarem a frequência da tensão de alimentação a valores compatíveis com a rotação da máquina, de forma que esta quando sujeita a variações de carga no veio não perca o sincronismo.

Uma característica importante das máquinas síncronas é que podem fornecer ou consumir corrente reativa, tanto indutiva como capacitiva, da rede em corrente alternada. Uma máquina síncrona é uma máquina duplamente excitada. O ajuste da excitação dos pólos em DC permite definir o regime de fator de potência em que a máquina poderá funcionar.

A máquina síncrona sem carga (em vazio), alimentada em corrente alternada pela rede elétrica é designada por condensador síncrono, ou compensador síncrono. Na realidade, ao ajustar a excitação da máquina em vazio, ela será vista pela rede como uma carga variável, indutiva (se for subexcitada), ou capacitiva (se for sobreexcitada), consumindo, ou fornecendo, energia reativa à rede. Isto é muito importante, sendo utilizado nos sistemas de transmissão de energia para regular e estabilizar a tensão nas redes elétricas.

As máquinas síncronas de elevada potência, que equipam as grandes centrais de produção de energia elétrica, constituem massas rotativas girantes de grandes dimensões. Ou seja, são máquinas com elevado coeficiente (momento) de inércia. A energia cinética armazenada nestas massas girantes, constitui um fator de estabilidade da frequência da rede a que estão ligadas, pois vai opor-se a perturbações originadas por variação mais ou menos brusca da carga aos terminais, como as saídas de serviço de geradores devido a contingências não esperadas.

A utilização das máquinas síncronas de elevada potência como compensadores síncronos, tem atualmente um papel determinante na estabilidade da tensão e da frequência dos sistemas elétricos de energia. Este facto é particularmente relevante quando se assiste a uma penetração crescente de energia oriunda de produção renovável eólica e fotovoltaica, cuja ausência de inércia fragiliza a estabilidade dos sistemas elétricos de energia.

### Referencias bibliográficas

1. A.E. Fitzgerald; Charles Kingsley. Electric Machinery. Edição: Mac-Graw-Hill
2. Sucena Paiva; Redes de Energia Elétrica. Uma Análise Sistémica. Editor: IST Press.
3. P. C. Sen; Principles of Electric Machines and Power Electronics. Editor: John Wiley & Sons.
4. José António Beleza Carvalho; Aulas de Máquinas Elétricas II. ISEP 2026.

## EFEITOS FISIOPATOLÓGICOS DA CORRENTE ELÉTRICA NO CORPO HUMANO

### Resumo

Nas instalações e equipamentos elétricos, a corrente elétrica circula preferencialmente por circuitos metálicos que lhe ofereça menor oposição, ou seja, menor resistência elétrica. Também no corpo humano a corrente elétrica procura fluir através de percursos com menor resistência elétrica, podendo sofrer desvios no interior do corpo, danificando os órgãos e tecidos circundantes. O seu percurso e a magnitude da corrente influenciam o tipo de lesões associadas ao acidente elétrico, normalmente queimaduras, que podem ser internas e externas.

Em todas as instalações elétricas se coloca a necessidade e a obrigatoriedade de implementação de sistemas de proteção eficazes, tendo como objetivo a sua exploração em condições de segurança. Nas Instalações Elétricas de Baixa Tensão (IEBT), as medidas de proteção que se devem considerar são a proteção contra sobretensões, a proteção contra sobrecorrentes, mas fundamentalmente a proteção das pessoas do risco de eletrocussão, evitando efeitos fisiopatológicos que podem ser irreversíveis.

### 1. Acidentes Elétricos

As consequências dos acidentes elétricos dependem de diversos fatores, entre os quais a) diferença de potencial ou tensão elétrica (Volts), b) intensidade de corrente (Amperes), c) resistência elétrica (Ohms), d) tipo de corrente elétrica (contínua ou alternada), e) percurso da corrente, f) humidade ambiente e g) duração da circulação de corrente (1,3).

De acordo com a norma CEI 60479-1, os efeitos fisiopatológicos da corrente alternada entre 15 e 100 Hz são apresentados na figura 1.

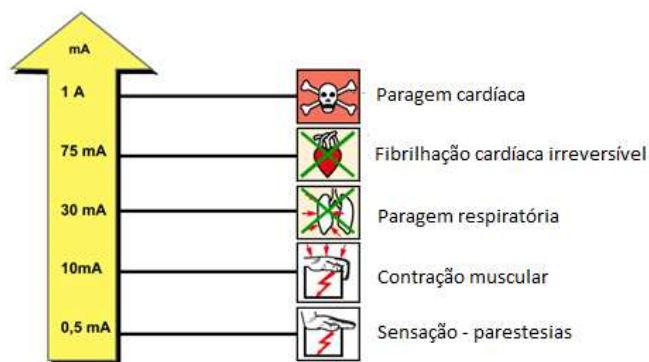


Figura 1. Valores críticos de corrente e respetivos efeitos fisiopatológicos

Considerando o tempo de duração da corrente através do corpo humano, a mesma norma CEI 60479-1 define zonas de tempo/corrente e relaciona-as com os efeitos fisiopatológicos da corrente alternada no corpo humano, quando a corrente passa entre a mão esquerda e o pé, como se apresenta na figura 2.

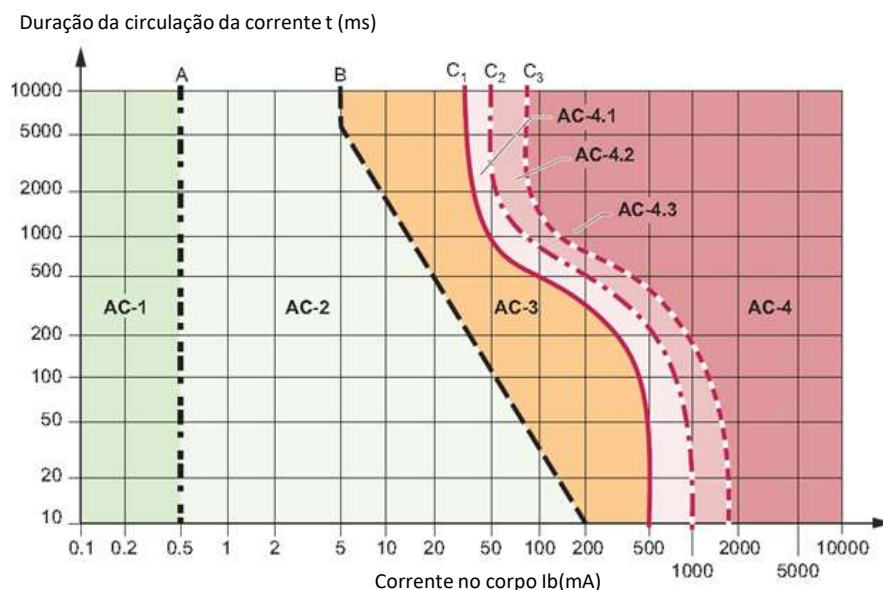


Figura 2. Zonas tempo/corrente e respetivos efeitos fisiopatológicos no corpo humano

Na zona AC-1 não se verifica qualquer percepção da corrente.

Na zona AC-2 já se manifesta percepção da passagem da corrente pelo corpo humano.

A zona AC-3 já é caracterizada pela manifestação de efeitos fisiopatológicos reversíveis, como a contração muscular.

Na zona AC-4 já se podem manifestar efeitos fisiopatológicos irreversíveis. A curva C1 é muito importante, pois delimita a zona dos efeitos fisiopatológicos reversíveis dos irreversíveis. Para valores de tempo/corrente à direita desta curva já se pode manifestar a fibrilhação ventricular. Essa probabilidade é de 5% à direita da curva C2, mas aumenta para 50% para valores de tempo/corrente à direita da curva C3.

Já quanto ao tipo de corrente, contínua ou alternada, verifica-se que a percepção do corpo humano é particularmente sensível à corrente alternada na frequência de 50 Hz, que é o valor da frequência da energia elétrica que é produzida e distribuída para utilização pelas redes elétricas europeias. Esta relação é apresentada na figura 3.

## 2. Efeitos fisiopatológicos da corrente elétrica no corpo humano

Os efeitos da corrente elétrica no corpo humano,

fundamentalmente queimaduras, internas ou externas, podem ser classificados, de acordo com o mecanismo fisiopatológico, em três tipos:

- lesão elétrica provocada pela própria corrente,
- lesão por arco elétrico, quando a corrente é transmitida da fonte para um objeto,
- lesão por chama. Podem também ocorrer lesões traumáticas, rotura do tímpano e contusões de órgãos internos [2].

Normalmente, a corrente elétrica flui por um caminho específico entre a entrada até ao ponto de saída, formando um circuito caracterizado por uma diferença de potencial entre a entrada e a saída. Os pontos de entrada mais frequentes são as mãos e a cabeça, e os pontos de saída são as mãos, os pés e as pernas [3]. No caso da corrente alternada, estes conceitos não são tão relevantes [3]. No entanto, existe um risco acrescido para a saúde quando se trata de corrente alternada, particularmente na faixa dos 50-60 Hz (figura 3), uma vez que esta está associada a espasmos musculares tetânicos e os sistemas cardiovascular e respiratório parecem ser os mais sensíveis a este tipo de corrente [3].

Os acidentes elétricos, de acordo com a sua gravidade, dividem-se em baixo e alto risco e distinguem-se de acordo com as seguintes características apresentadas na Tabela 1:

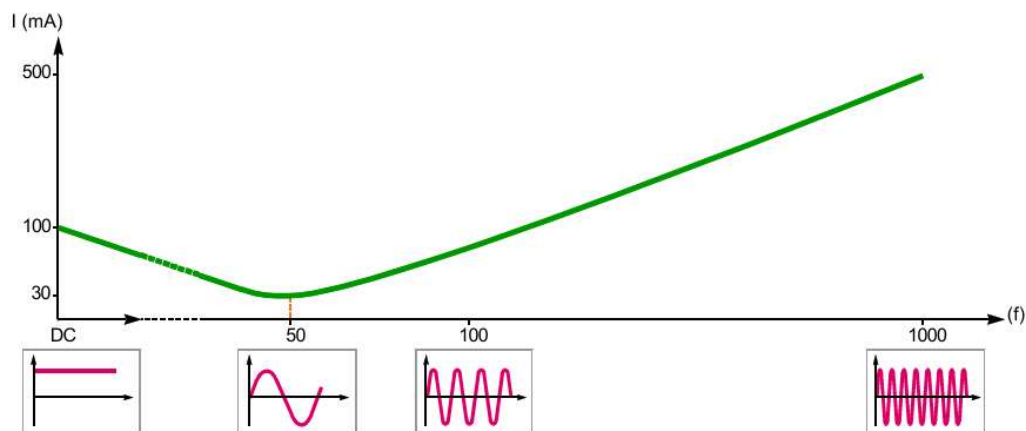


Figura 3. A sensibilidade mais elevada para o corpo humano situa-se nos valores de frequência de 50 Hz

Tabela 1: Comparação entre acidentes elétricos de elevado e baixo risco [1]

| Causas                                          | Baixo risco             | Elevado risco                                        |
|-------------------------------------------------|-------------------------|------------------------------------------------------|
| Tensão elétrica                                 | <1000 volts             | >1000 volts                                          |
| Tipo de corrente                                | Contínua                | Alternada                                            |
| Duração da exposição                            | Curto                   | Prolongado                                           |
| Estado de consciência                           | Com vigília             | (Inicialmente) Inconsciente                          |
| ECG (eletrocardiograma)                         | Patologia normal/prévia | Nova patologia                                       |
| Alterações na pele                              | Menor/nenhuma           | Profundo/extenso                                     |
| Alterações laboratoriais                        | Irrelevante             | Creatinaquinase (CK), creatinina e potássio elevados |
| Dispositivo CDI/IV (dispositivo desfibrilhação) | Não                     | Presente                                             |

### 2.1. Sistemas cutâneo-muscular e osteoarticular

A pele, o ponto de entrada mais comum em acidentes elétricos, caracteriza-se por uma elevada resistência à passagem da corrente. Esta resistência, no entanto, é reduzida pela humidade. Os espasmos musculares induzidos pela corrente elétrica e pela tetania podem resultar na incapacidade de libertar a fonte da corrente elétrica, conhecida como “fenómeno de não largar” [1].

Como o osso possui uma elevada resistência elétrica, a corrente é convertida mais facilmente em energia térmica, resultando em queimaduras e necrose [1,2]. A pele seca e a resistência oferecida pelo osso ao choque elétrico geram elevados gradientes de temperatura, um dos fatores que contribuem para a necrose muscular profunda [2,4]. Outros fatores incluem lesões vasculares difusas e o desenvolvimento da síndrome compartimental [4].

Em casos de lesões associadas a corrente devido a tensão elevada, os acidentados apresentam um maior risco de fratura da coluna vertebral devido à tetania. A tetania também pode ser provocada pela corrente alternada [2].

A necrose tecidual, as lesões arteriais e a rabdomiólise podem levar à amputação devido a perda funcional, síndrome compartimental e insuficiência renal [5].

### 2.2. Sistema Cardiovascular

As principais complicações cardíacas são as arritmias [2,6]. Estas podem desenvolver-se independentemente da magnitude da tensão [2]. Outras lesões cardiovasculares também relevantes incluem o espasmo da artéria coronária e danos no tecido miocárdico [2,6].

As arritmias mais frequentes em casos de acidentes elétricos variam, desde a taquicardia sinusal e extrassístoles ventriculares [6] até à fibrilhação ventricular e assistolia [2] ou fibrilhação auricular [7]. No entanto, existem casos de bradicardia sinusal, bloqueios de ramo ou bloqueios auriculoventriculares após choques elétricos. A maioria destes eventos ocorre imediatamente após o choque elétrico, mas há relatos de arritmias de início tardio [6].

O mecanismo de ação não está totalmente esclarecido, mas as biópsias de tecido miocárdico apontam para focos arritmogénicos associados a fibrose miocárdica irregular, aumento do número de bombas de sódio e potássio e alterações do potencial de membrana [6]. Consequentemente, as arritmias podem ser desencadeadas por áreas de heterogeneidade da repolarização, com aumentos anormais da automaticidade ou pós-despolarização, e podem desencadear atividade horas após a lesão. Áreas de necrose ou cicatrizes podem promover o desenvolvimento de arritmias de reentrada [6].

A corrente elétrica parece também exercer um efeito sobre os nós sinusal e auriculoventricular, tendo sido colocada a hipótese de que os seus canais iônicos são mais facilmente afetados e que a isquemia na zona irrigada pela artéria coronária direita torna estas zonas mais vulneráveis à corrente [6].

Curiosamente, as lesões na via de condução secundárias ao choque elétrico são a base para o desenvolvimento das técnicas de ablação. Em 1979, foi descrito o bloqueio auriculoventricular resultante de um choque elétrico externo que se propagou através de um eletrodo posicionado no feixe de His [6]. O leito vascular é um excelente condutor devido ao seu elevado teor em água. Os acidentes elétricos afetam com maior frequência os pequenos vasos sanguíneos. Normalmente, as artérias de grande calibre não são afetadas de forma aguda porque o seu fluxo rápido permite que o calor produzido pela corrente elétrica se dissipe. No entanto, estes vasos são suscetíveis à necrose da camada média, que pode resultar em aneurisma e consequente rutura [6].

Outras consequências cardiovasculares associadas a acidentes elétricos incluem:

- a) enfarte agudo do miocárdio (devido a espasmo coronário ou trombose),
- b) contusão miocárdica devido a reanimação cardiopulmonar,
- c) lesões mediadas pela libertação extensa de catecolaminas,
- d) redução do fluxo sanguíneo coronário secundária a hipotensão generalizada grave,
- e) padrão de Brugada,
- f) pericardite hemorrágica,
- g) hipertensão arterial transitória,
- h) disfunção autonómica transitória.

O diagnóstico destas alterações pode ser difícil devido à ausência de queixas típicas, como dor torácica, e alterações específicas no ECG [6].

Embora a função cardíaca geralmente volte ao normal após um choque elétrico, algumas anomalias cardíacas podem persistir ao longo do tempo. No entanto, a insuficiência cardíaca com fração de ejeção reduzida foi raramente reportada [6]. Na literatura referem-se critérios major e minor para a deteção da passagem de corrente elétrica no tecido cardíaco [8], como se refere seguidamente.

Os critérios major podem ser:

- Macroscópicos: áreas hemorrágicas na superfície cardíaca;
- Microscópicos: fragmentação do miocárdio com miócitos alternando entre hipercontração e hiperdistensão, rutura das fibras miocárdicas e necrose da banda de contração [8].

Os critérios minor incluem os seguintes critérios microscópicos: degeneração focal das fibras musculares lisas, expressão do núcleo do miócito, segmentação dos discos intercalares, alterações nos nervos cardíacos epicárdicos com fendas endoneurais centrais das fibras nervosas e descolamento perineural, edema das fibras nervosas e do espaço subperineural [8].

Além disso, estudos mostram que, após uma queimadura, os indivíduos apresentam um estado de hipercoagulabilidade. Este estado de hipercoagulabilidade não parece estar relacionado com o tipo de queimadura ou com a área total da superfície corporal afetada. Está também associado a um aumento da lise plaquetária e à redução da função plaquetária [9].

### 2.3. Sistema Nervoso

O choque elétrico pode afetar tanto o Sistema Nervoso Central (SNC) como o periférico. A perda de consciência, por exemplo, é muito frequente [3]. As neuropatias são complicações comuns resultantes de acidentes elétricos [5]. De acordo com uma revisão sistemática de 2021, foram relatadas várias neuropatias periféricas, incluindo

mononeuropatias, polirradiculopatias ou polineuropatias periféricas e lesões de nervos cranianos [3]. As mononeuropatias são as mais frequentes, ocorrendo principalmente em acidentes com correntes elétricas originadas por tensão mais reduzida, podendo ocorrer devido a lesão direta ou compressão secundária a edema [3]. Alguns investigadores apoiam a hipótese de que as queimaduras elétricas, na mesma medida que as queimaduras térmicas, podem causar mononeuropatia do nervo mediano devido ao aumento da temperatura dentro do túnel cárpico. Este nervo é particularmente vulnerável à ação da corrente elétrica devido à sua fraca resistência e vascularização circundante. Consequentemente, os sintomas típicos da neuropatia periférica compressiva surgem, em média, 2 meses após a alta hospitalar. O início da fibrose intraneural conduz a uma atrofia fascicular irreversível, mesmo após uma possível libertação cirúrgica [10]. Podem também ocorrer múltiplas mononeuropatias bilaterais, mais frequentemente no contexto de queimaduras de terceiro ou quarto grau. A polirradiculopatia está associada à existência de múltiplos pontos de entrada. O envolvimento dos nervos cranianos pode aumentar o risco de desenvolvimento de zumbidos e vertigens ao longo da vida [10].

As lesões do SNC são altamente variáveis. A mielopatia tem, geralmente, um início imediato e é mais comum nas lesões elétricas devido a tensões mais elevadas [3]. Podem também ocorrer lesões cerebrais traumáticas, apresentando vários sintomas, incluindo cefaleias, náuseas, alterações comportamentais e/ou de memória, paralisia, crises epiléticas, afasia e coma. Os gânglios da base parecem ser mais sensíveis a este tipo de lesão [3].

As lesões isquémicas do SNC são menos frequentes do que as lesões hemorrágicas, e o principal

mecanismo é o vaso espasmo. Foram também relatados casos de síndromes cerebelares transitórias ou permanentes [3].

Outras consequências no SNC incluem hidrocefalia, edema cerebral, trombose venosa cerebral e perturbações do movimento. A epilepsia pode ser uma consequência tardia do trauma elétrico, assim como a mioclonia [3]. As evidências atuais parecem também sugerir uma maior prevalência de esclerose lateral amiotrófica nas profissões relacionadas com a eletricidade, sendo que as meta-análises consideram a eletrocussão como um importante fator de risco [3].

Existem também alguns achados clínicos inespecíficos após um acidente elétrico, como reações pupilares anormais, como pupilas fixas e dilatadas ou anisocoria devido à síndrome de Horner, uma consequência da disfunção autonómica reversível (3,6). Os danos no sistema nervoso autónomo podem também resultar em síndromes complexos de dor regional, complicações cardiovasculares autonómicas e paralisia de Charcot [3].

#### **2.4. Sistema Respiratório**

Após um acidente elétrico, a paragem respiratória pode ocorrer imediatamente devido à inibição do centro respiratório ou à paralisia prolongada/contração tetânica do diafragma ou de outros músculos respiratórios. Os danos diretos no parênquima pulmonar são raros, mas podem ocorrer queimaduras térmicas no trato respiratório devido à inalação de gases tóxicos ou detritos quentes [6].

#### **2.5. Sistema Gastrointestinal**

As lesões viscerais resultantes de queimaduras elétricas são raras, mas potencialmente graves [11]. O intestino é o órgão mais frequentemente afetado, sendo ocasionalmente relatadas lesões no esófago, estômago, fígado, vesícula biliar, pâncreas, rins e pulmões. A disfunção hepática é comum em doentes com queimaduras térmicas graves, enquanto as lacerações hepáticas são raramente descritas [11]. Num relato de caso, observou-se uma laceração hepática após um acidente elétrico: um operário

da construção civil, de 47 anos, tocou acidentalmente num fio de corrente alternada de tensão elevada (14 kV). Isto resultou em queimaduras no abdómen à direita, mão e coxas, sem trauma associado. As queimaduras foram “tratadas” pelo próprio doente. Por agravamento das dores, dirigiu-se ao serviço de urgência, tendo sido observadas: queimadura de terceiro grau na mão direita, queimaduras de segundo grau no abdómen à direita e queimadura de pequenas dimensões na coxa direita. O abdómen estava mole, mas desconfortável à palpação profunda. A ecografia abdominal revelou presença de líquido na região perihepática. Os exames laboratoriais revelaram leucocitose de  $17.660/\text{mm}^3$ , AST/ALT de 545/415 U/L e CK de 4.842 U/L. A tomografia computadorizada revelou uma laceração hepática, hemorragia intraperitoneal ligeira e enfarte segmentar do rim direito. Foi iniciado tratamento conservador e o doente internado na unidade de queimados, de onde teve alta ao 9º dia de internamento [11].

## 2.6. Outros

As lesões elétricas também podem causar efeitos adversos a longo prazo, como as cataratas [2]. No entanto, um estudo de coorte prospetivo emparelhado com 14.112 participantes não revelou associação entre acidentes elétricos e aumento do risco de catarata, sugerindo que não há necessidade de rastreio de catarata perante estes acidentes [12]. Secundariamente a este tipo de acidentes, o sistema nefrourológico pode também ser afetado, resultando, por exemplo, em disfunção urinária (bexiga hipoativa/hiperativa), disfunção erétil e lesão renal aguda [3]. No entanto, a insuficiência renal é pouco frequente [2].

A mioglobínúria está também associada ao risco de lesão de órgãos sólidos ou vísceras ocas (por exemplo, perfuração intestinal) e cálculos biliares [2]. As queimaduras elétricas na mucosa oral são frequentemente de terceiro grau [13]. Os indivíduos que sofreram acidentes elétricos podem apresentar alterações neuropsiquiátricas, como perturbações do humor, do comportamento, da memória,

da fala e do sono [14, 15]. Irritabilidade, frustração, raiva e comportamentos agressivos também foram relatados após lesões elétricas em indivíduos que não apresentavam perturbações de humor ou de personalidade antes do acidente [15]. Estas alterações podem ocorrer de forma aguda ou até 5 anos após a lesão e podem surgir com correntes de baixa ou elevada tensão [12]. Até 78% das pessoas que sofreram lesões elétricas desenvolvem um diagnóstico psiquiátrico de acordo com o Manual Diagnóstico e Estatístico de Transtornos Mentais [15]. Também foram identificadas semelhanças entre as sequelas neuro psicológicas não focais das lesões elétricas e as do traumatismo cranioencefálico. Isto reforça a ideia de que mecanismos diferentes da lesão térmica provocada pela corrente elétrica estão envolvidos na origem dos sintomas [15].

A depressão e a perturbação de stress pós-traumático são descritas com maior frequência em vítimas de acidentes elétricos que experienciaram o fenómeno de “não largar”. Estados de alteração da consciência, como amnésia, perda de consciência e casos em que as vítimas foram projetadas para longe da fonte elétrica, estão correlacionados com diagnósticos clínicos de depressão e stress pós-traumático. Consequentemente, os indivíduos que sofreram lesões elétricas apresentam défices cognitivos, incluindo a nível da memória verbal, funções executivas e atenção. Isto sugere que as lesões elétricas têm características únicas que levam a um sofrimento psiquiátrico crónico e progressivo [15]. No entanto, cerca de 50% dos sintomas neuropsiquiátricos resolvem-se espontaneamente [14].

## 3. Efeitos fisiopatológicos em populações especiais

### 3.1. Mulheres Grávidas

Existem poucos relatos de choques elétricos em grávidas, mas algumas das manifestações clínicas maternas referidas na literatura incluem queimaduras (de diferentes graus), arritmias e perfuração timpânica. Uma revisão sistemática de

2020 verificou a presença de algumas consequências fetais de acidentes elétricos, como oligohidrânio, restrição de crescimento intrauterino e morte fetal [16]. No entanto, um estudo de coorte com 31 mulheres que sofreram lesões elétricas acidentais concluiu que estas lesões não constituem um risco definitivo de morte fetal [17].

### 3.2. População Pediátrica

Os acidentes elétricos em crianças são, na maioria dos casos, evitáveis. Assim, é essencial educar os pais e cuidadores sobre as medidas de segurança e a prevenção destes acidentes. Nas crianças, as queimaduras elétricas são tipicamente mais profundas, uma vez que esta população apresenta uma baixa percentagem de gordura corporal e uma relação superfície/volume diferente da dos adultos. O stress psicológico prolongado e outros distúrbios psiquiátricos após acidentes elétricos são frequentemente observados nesta faixa etária [4].

Um estudo prospetivo realizado no Paquistão avaliou 60 crianças que se apresentaram no departamento de cirurgia pediátrica de um hospital entre janeiro de 2021 e janeiro de 2022. Destas 60 crianças, 70% sofreram queimaduras resultantes de acidentes com alta tensão. A taxa de mortalidade foi de 13%. No seguimento às 6 semanas, 35 crianças foram diagnosticadas com perturbação dismórfica corporal [4].

### 3.3. Avaliação Médica

Na avaliação médica inicial, o tipo de corrente (contínua ou alternada), a magnitude da tensão elétrica e as circunstâncias do incidente são parâmetros importantes a considerar. A abordagem médica deve incluir uma anamnese com informação sobre o acidente e um exame objetivo que procure pontos de entrada e saída [6].

Como apresentado anteriormente, as manobras de reanimação devem ser realizadas independentemente da resposta pupilar, dado que esta pode ser alterada por disfunção do sistema nervoso autónomo [2]. O diagnóstico e os procedimentos a adotar podem ser os indicados na figura 4 [6].

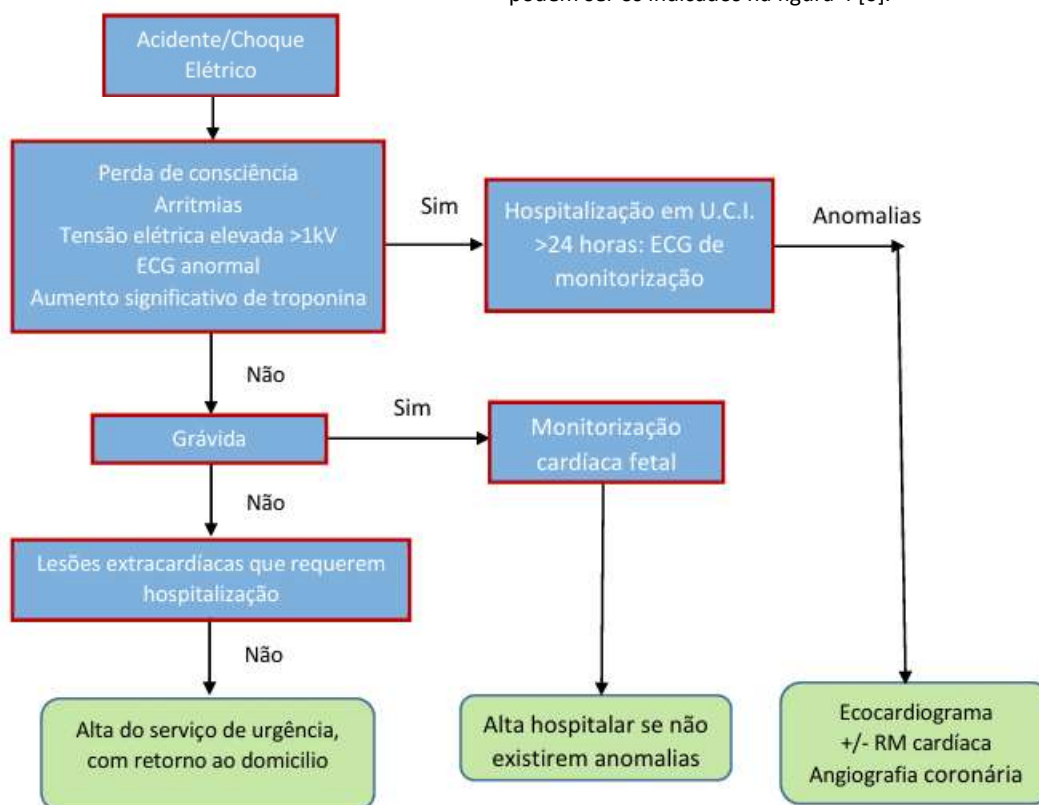


Figura 4. Gestão do risco elétrico na sala de emergência hospitalar [6]

A mioglobínúria pode ocorrer devido a lesão muscular direta, sendo necessária uma terapia com fluidos mais intensiva. As fasciotomias podem até ser necessárias. Em caso de lesão por corrente com origem numa tensão elétrica elevada, é essencial despistar lesão da coluna vertebral, sendo necessária a estabilização da coluna, colocando a pessoa lesada em plano duro [2].

Nos acidentes elétricos, quando acontece o contacto direto entre o metal e a mucosa oral, é particularmente importante avaliar as indicações para a profilaxia antitetânica [13].

Em caso de acidente com tensão elétrica muito elevada, ou suspeita de lesão cardíaca no local do acidente, deve ser realizada uma monitorização contínua do ritmo cardíaco durante, pelo menos, 24 horas. No entanto, perante ritmo cardíaco normal à admissão hospitalar, a monitorização cardíaca de 24 horas não é necessária devido à baixa probabilidade de arritmia. Os critérios para a vigilância hospitalar incluem lesão por tensão elétrica muito elevada, alterações no ECG, perda de consciência e suspeita de síndrome compartimental [2].

#### 4. Conclusão

Os acidentes elétricos provocam diversos efeitos e consequências fisiopatológicas no organismo humano. O espectro varia de assintomático a lesões graves devido a queimaduras e paragem cardiorrespiratória. A gravidade de uma lesão elétrica depende da energia aplicada e do percurso da corrente pelo corpo, o que nem sempre é previsível [11].

As queimaduras são um problema de saúde global e, quando causadas pela eletricidade, representam um desafio particular, uma vez que a avaliação da sua gravidade com base na área da superfície corporal afetada não é fiável, já que podem estar presentes lesões profundas e consequências sistémicas [11].

O melhor “tratamento” para as lesões elétricas é a prevenção. Os esforços para prevenir acidentes de trabalho em profissões de alto risco e acidentes domésticos envolvendo crianças são essenciais. Muitas recomendações implicam a implementação de procedimentos de segurança no local de trabalho. Exemplos incluem inspeções periódicas às instalações elétricas, desenergização das linhas de energia antes do início dos trabalhos, manutenção da distância de segurança necessária das fontes de energia e formação em reconhecimento de riscos. Em caso de acidente, a magnitude da corrente elétrica que atravessa o corpo deve ser minimizada através de medidas para aumentar a resistência, como o uso de vestuário de proteção retardador de chamas, escadas não condutoras ou mantas isolantes e mecanismos automáticos de corte de energia (disjuntores, fusíveis e dispositivos de segurança sensíveis à corrente residual de defeito). Assim, as medidas de resposta padronizadas e a gestão otimizada de incidentes são importantes, assim como a formação e a disponibilidade de equipamento de reanimação através de simulações, formação em reanimação cardiopulmonar, dispositivos de alerta de proximidade de equipamentos e peças ativas com potenciais elétricos elevados e a ampla disponibilidade de desfibriladores em locais públicos [6].

No que diz respeito a acidentes domésticos, as instalações elétricas devem estar em conformidade com as normas de segurança em vigor. Educar e supervisionar as crianças é essencial. O uso de protetores de tomadas, a remoção de fios expostos e evitar o uso de aparelhos elétricos com a pele molhada são medidas preventivas cruciais. A proteção oferecida por muitas instalações elétricas modernas (como os interruptores e disjuntores sensíveis à corrente residual diferencial) limita a duração da exposição e a intensidade da corrente transmitida, resultando, na maioria dos casos, em acidentes sem consequências graves. É importante não descurar o papel das campanhas de sensibilização pública na promoção de uma melhor compreensão dos riscos envolvidos, bem como da abordagem correta a adotar nestes casos [6].

O atendimento médico é essencial para a avaliação precoce e a orientação sobre os efeitos associados ao choque elétrico. Com esta revisão narrativa, procura-se analisar as principais lesões a considerar após estes acidentes, sendo o exame e o seguimento adequados ferramentas essenciais. Como vários órgãos e sistemas do corpo humano são afetados, é necessária uma abordagem multidisciplinar.

## 5. Referências bibliográficas

- [1] Hörburger, D., Schmidt, E. & Henz, S. Stromunfälle. Praxis <https://econtent.hogrefe.com/doi/10.1024/1661-8157/a004046> (2023).
- [2] Friedstat, J., Brown, D. A. & Levi, B. Chemical, Electrical, and Radiation Injuries. Clin. Plast. Surg. 44, 657–669 (2017).
- [3] Neurological and neurourological complications of electrical injuries. Yiannopoulou Neurologia & Neurochirurgia Polska. [https://journals.viamedica.pl/neurologia\\_neurochirurgia\\_polska/article/view/JNNS.a2020.0076/52142](https://journals.viamedica.pl/neurologia_neurochirurgia_polska/article/view/JNNS.a2020.0076/52142).
- [4] Shahid, F. et al. Psychosocial Impact of Electrical Burn in Children: A Follow-Up Study Conducted at a Tertiary Care Hospital. Cureus 14, e32816 (2022).
- [5] Stockly, O. R. et al. The impact of electrical injuries on long-term outcomes: A Burn Model System National Database study. Burns J. Int. Soc. Burn Inj. 46, 352–359 (2020).
- [6] Waldmann, V. et al. Electrical cardiac injuries: current concepts and management. Eur. Heart J. 39, 1459–1465 (2018).
- [7] Lee, D. H., Desai, M. J. & Gauger, E. M. Electrical Injuries of the Hand and Upper Extremity. J. Am. Acad. Orthop. Surg. 27, e1–e8 (2019).
- [8] Favia, M., Mele, F., Introna, F. & De Donno, A. Morphological cardiac changes in electrocution deaths: A literature review. Med. Sci. Law 61, 130–135 (2021).
- [9] Upon admission coagulation and platelet function in patients with thermal and electrical injuries - PubMed. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27692780/>.
- [10] Albert, T., Perrot, P., Lecoq, F.-A. & Lancien, U. Post-burn carpal tunnel syndrome: A systematic review. Hand Surg. Rehabil. 44, 102134 (2025).
- [11] Ye, Z.J. and Huang, Y.C. (2026) 'Liver laceration from electrical burn, a case report and literature review', The American Journal of Emergency Medicine, 99, pp. 436–438. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ajem.2025.10.060>.
- [12] Kaergaard A, Nielsen KJ, Carstensen O, Biering K. Electrical injury and the long-term risk of cataract: A prospective matched cohort study. Acta Ophthalmol. 2023 Feb;101(1):e88-e94. doi: 10.1111/aos.15220. Epub 2022 Jul 27. PMID: 35894089; PMCID: PMC10086943.
- [13] Kang, S., Kufra, K., Sollecito, T. P. & Panchal, N. A treatment algorithm for the management of intraoral burns: A narrative review. Burns J. Int. Soc. Burn Inj. 44, 1065–1076 (2018).
- [14] Khor, D. et al. Electrical injuries and outcomes: A retrospective review. Burns J. Int. Soc. Burn Inj. 49, 1739–1744 (2023).
- [15] Wesner, M. L., Hickie, J., Long-term sequelae of electrical injury. Can Fam Physician. Sep;59(9):935-939 (2013).
- [16] Caballero-Carvajal, J. A., Manrique-Hernández, E. F., Becerra-Ar, C. & Alvarado-Socarras, J. L. Secondary maternal-fetal consequences to electrical injury: A literature review. Taiwan. J. Obstet. Gynecol. 59, 1–7 (2020).
- [17] Einarson, A., Bailey, B., Inocencion, G., Ormond, K. & Koren, G. Accidental electric shock in pregnancy: a prospective cohort study. Am. J. Obstet. Gynecol. 176, 678–681 (1997).



*“É com grande satisfação que se inicia com esta revista, a que sugestivamente se chama “Neutro à Terra”, a publicação de um conjunto de documentos de carácter técnico-científico relacionados com as Instalações Eléctricas.”*

*Profº Beleza Carvalho*



#### MAIS EFICIENTE



#### MENOS EFICIENTE

**Eficiência Energética**  
Pág. 2



**Domótica**  
Pág. 4



**Segurança**  
Pág. 7



**Instalações Eléctricas**  
Pág. 14



**Telecomunicações**  
Pág. 18

## WI-FI 6E E WI-FI 7: IMPACTO NO PROJETO DE REDES INTERNAS EM EDIFÍCIOS

### 1. Introdução

O presente artigo aborda a temática do *Wi-Fi* (utilizada por produtos certificados que pertencem à classe de dispositivos de rede local sem fios (WLAN) baseados no padrão IEEE 802.11), cujo nome deriva de uma abreviação de *wireless field*, ou “área sem fio”, mais concretamente, o *Wi-Fi* 6E e *Wi-Fi* 7 e o seu impacto no projeto de redes internas em edifícios.

Com efeito, a conectividade sem fios tornou-se uma infraestrutura crítica em edifícios residenciais, comerciais e industriais. Com o crescimento exponencial do número de dispositivos ligados, impulsionado pela IoT (*Internet of Things*), videoconferência, *streaming* 4K/8K (transmissão) e realidade aumentada, coloca uma pressão crescente sobre as redes *Wi-Fi* atualmente existentes.

As normas *Wi-Fi* 6E (IEEE 802.11ax estendido) e *Wi-Fi* 7 (IEEE 802.11be) representam, de facto, uma rutura significativa face às gerações anteriores, com implicações diretas na forma como se projeta, dimensiona e instala a infraestrutura de telecomunicações em edifícios.

O projetista de Infraestruturas de Telecomunicações em Edifícios (ITED) não pode ignorar estas evoluções, pois elas condicionam as decisões acerca da cablagem, dos sistemas de alimentação, posicionamento de equipamentos e segurança.

Assim, este artigo visa analisar as principais características técnicas destas duas normas, o seu impacto no projeto de redes internas e os desafios colocados ao projetista de infraestruturas de telecomunicações, com particular atenção ao contexto regulatório português e europeu.

### 2. Evolução das Normas Wi-Fi: do 802.11ax ao 802.11be

A história do *Wi-Fi* é uma sucessão de normas IEEE que, a cada geração, ampliam o débito (capacidade de transmissão de dados ou largura de banda ou velocidade que uma rede consegue suportar), reduzem a latência (atraso num sistema) e melhoram a eficiência espectral (taxa de transmissão de dados que pode ser transmitida por uma largura de banda específica num sistema de comunicação).

A Tabela 1 sintetiza as principais características das últimas quatro gerações.

Tabela 1 — Comparação das gerações Wi-Fi 5 a Wi-Fi 7

| Característica      | Wi-Fi 5   | Wi-Fi 6     | Wi-Fi 6E         | Wi-Fi 7         |
|---------------------|-----------|-------------|------------------|-----------------|
| Norma IEEE          | 802.11ac  | 802.11ax    | 802.11ax + 6 GHz | 802.11be        |
| Bandas              | 5 GHz     | 2,4 / 5 GHz | 2,4 / 5 / 6 GHz  | 2,4 / 5 / 6 GHz |
| Canal máx.          | 160 MHz   | 160 MHz     | 160 MHz (EU)     | 320 MHz         |
| Modulação           | 256-QAM   | 1024-QAM    | 1024-QAM         | 4096-QAM        |
| Débito máx.         | ~3,5 Gbps | ~9,6 Gbps   | ~9,6 Gbps        | ~46,1 Gbps      |
| Latência            | Média     | Baixa       | Baixa            | Ultra-baixa     |
| MLO (Multi-link)    | Não       | Não         | Não              | Sim             |
| Preamble Puncturing | Não       | Não         | Não              | Sim             |
| Segurança mínima    | WPA2      | WPA2/3      | WPA3             | WPA3            |

O salto mais significativo entre gerações foi introduzido pelo *Wi-Fi 6E*, com o acesso à banda de 6 GHz (a primeira nova faixa de espectro atribuída ao *Wi-Fi* desde a norma 802.11a), e pelo *Wi-Fi 7*, que duplicou a largura dos canais e introduziu a operação multiligação simultânea (MLO – *Multi-link*).

### 3. Principais Características Técnicas

#### 3.1 Wi-Fi 6E — A Banda de 6 GHz

O *Wi-Fi 6E* é, no fundo, uma extensão da norma *Wi-Fi 6* (802.11ax) à banda de 6 GHz, abrangendo frequências entre os 5 925 e os 7 125 MHz. Este espectro contíguo de 1 200 MHz permite, em teoria, a criação de catorze canais adicionais de 80 MHz, sete de 160 MHz e três de 320 MHz.

Poder-se-á identificar que as principais vantagens do *Wi-Fi 6E* face ao *Wi-Fi 6* são:

- Espectro virgem, sem congestionamento das bandas 2,4 e 5 GHz já saturadas por milhares de redes coexistentes;
- Com 59 novos canais de 20 MHz disponíveis na banda de 6 GHz, os problemas de congestionamento são imediatamente aliviados, e os *access points* (APs) podem operar sem interferência de dispositivos legados;
- Larguras de canal de 80 e 160 MHz tornam-se práticas e generalizáveis, desbloqueando velocidades *multi-gigabit*;
- Latências abaixo de 1 ms em redes bem dimensionadas, viabilizando aplicações de realidade aumentada, VR (*virtual reality*) sem fios e telepresença (conjunto de tecnologias imersivas, como videoconferência avançada, robótica e realidade virtual, que dão ao utilizador a sensação de “estar fisicamente presente” num local remoto).

A *Wi-Fi Alliance* exige que os dispositivos *Wi-Fi 6E* certificados incluam WPA3 como protocolo de segurança obrigatório para redes privadas, e *Wi-Fi Enhanced Open* para redes abertas, eliminando de vez o WPA2 como único mecanismo de proteção nestas redes.

#### 3.2 Wi-Fi 7: Produtividade extremamente elevada (802.11be)

O *Wi-Fi 7* baseia-se no *Wi-Fi 6E* e introduz inovações fundamentais, com destaque para quatro funcionalidades-chave:

1. **4096-QAM (4K-QAM):** Cada símbolo transporta 12 bits em vez de 10, resultando em taxas de transmissão teóricas 20% superiores às do *Wi-Fi 6* com 1024-QAM. Esta funcionalidade é opcional na certificação *Wi-Fi CERTIFIED 7*, mas está presente na generalidade dos *chipsets* de gama alta.
2. **Canais de 320 MHz:** O *Wi-Fi 7* duplica a largura máxima dos canais face ao *Wi-Fi 6E* (160 MHz), suportando canais contíguos e não contíguos de 320 MHz na banda de 6 GHz. Um canal de 320 MHz tem o dobro da capacidade de um canal de 160 MHz;
3. **Multi-Link Operation (MLO):** Funcionalidade que permite ao dispositivo enviar e receber dados simultaneamente em diferentes bandas e canais de frequência. O MLO traduz-se numa redução de latência até 80% e num aumento de débito até 300% face ao *Wi-Fi 6E* em ambientes congestionados. Em aplicações críticas como dispositivos médicos, automação industrial ou videoconferência, o MLO garante ainda continuidade de ligação em caso de interferência numa das bandas;
4. **Preamble Puncturing:** Permite que um dispositivo ignore seletivamente uma porção problemática de um canal, bloqueando apenas o segmento de 20 MHz afetado por interferência, sem impactar o restante da transmissão. Esta funcionalidade melhora significativamente a fiabilidade dos canais mais largos em ambientes com interferências localizadas.

Para a mesma configuração de rádio, o *Wi-Fi 7* foi projetado para atingir velocidades até 2,4 vezes superiores às do *Wi-Fi 6*. Um smartphone típico com *Wi-Fi 7* pode alcançar até 5 Gbps de débito efetivo, preparando a infraestrutura doméstica e empresarial para ligações de 10 Gbps à operadora.

#### 4. Contexto Regulatório em Portugal e na Europa

A disponibilização do espectro de 6 GHz é uma condição prévia para tirar partido do *Wi-Fi* 6E e do *Wi-Fi* 7. O contexto regulatório é, por isso, determinante para o projetista em Portugal.

Em Portugal, a ANACOM (Autoridade Nacional de Comunicações) seguiu as orientações dos restantes reguladores europeus, atribuindo apenas o espectro de 5 925 a 6 425 MHz, um total de 500 MHz, em vez dos 1 200 MHz disponíveis nos EUA, Canadá e outros países. Esta limitação reduz significativamente o número de canais disponíveis:

- Apenas 6 canais de 80 MHz (em vez de 14);
- Apenas 3 canais de 160 MHz (em vez de 7);
- Apenas 1 canal de 320 MHz (em vez de 3).

Esta restrição deve-se à necessidade de preservar o espectro entre 6 725 e 7 025 MHz para o Serviço Fixo de Satélite (FSS). Organizações europeias do setor pressionam pela abertura da banda superior de 6 GHz, argumentando que a Europa está a ficar para trás na adoção das novas gerações *Wi-Fi*, com impacto na competitividade digital do continente.

Em Portugal, o operador de comunicações eletrónicas NOS foi pioneira na implementação comercial do *Wi-Fi* 6E, com uma solução baseada em extensores *triband* em parceria com a Plume, utilizando a banda de 6 GHz exclusivamente para o *backhaul mesh* (infraestrutura de comunicação invisível, via cabo ou rádio, que conecta os vários módulos, ou “nós”, de uma rede *Wi-Fi Mesh* entre si e ao router principal) entre os nós da rede, libertando as bandas de 2,4 e 5 GHz para os dispositivos clientes.

#### 5. Impacto no Projeto de Redes Internas em Edifícios

##### 5.1 Propagação e Posicionamento dos *Access Points* (Pontos de Acesso)

Uma das preocupações mais comuns no projeto de redes *Wi-Fi* 6E é a atenuação superior associada à banda de 6 GHz.

Os estudos de modelação de propagação mostram, contudo, que o impacto é moderado e bastante gerível:

- A diferença de RSSI (indicador de intensidade do sinal recebido) entre um AP (*Acess Point*) a operar nos 5 GHz e outro a 6 GHz, a 10 metros de distância, é de apenas 1,05 dB, praticamente negligenciável para efeitos de projeto;
- Ambas as bandas produzem células de cobertura comparáveis (tipicamente 1250 pés quadrados / ~116 m<sup>2</sup>) quando operadas com potências equivalentes;
- Para instalações em edifícios novos ou requalificados, as boas práticas de projeto WLAN empresarial apontam para áreas de cobertura entre 140 e 190 m<sup>2</sup> por AP.

O comportamento do sinal de rádio em interiores é sempre condicionado pelos materiais de construção. Paredes de betão armado e tijolo absorvem o sinal significativamente, enquanto o pladur provoca atenuação muito menor.

A diferença entre materiais de construção tem, na prática, muito maior impacto do que a diferença de 1 dB entre 5 e 6 GHz. Por isso, a realização de levantamentos de campo (*site surveys*) antes da elaboração do projeto definitivo é indispensável, especialmente em edifícios com compartimentação densa ou estruturas metálicas.

##### 5.2 Infraestrutura de Cablagem e Alimentação PoE

A adoção do *Wi-Fi* 6E e *Wi-Fi* 7 em edifícios tem implicações diretas na infraestrutura de cablagem estruturada e nos sistemas de alimentação dos APs. Os novos APs *triband* (2,4 + 5 + 6 GHz) apresentam consumos de potência superiores aos seus antecessores, exigindo atenção especial aos orçamentos de PoE (*Power over Ethernet*).

Assim, as principais aspetos a verificar no projeto são:

- Compatibilidade com PoE+ (IEEE 802.3at, 30 W) ou PoE++ (IEEE 802.3bt, 60–90 W), os APs *Wi-Fi* 6E/7 de gama alta podem consumir entre 25 e 60 W;
- Capacidade dos *switches* de acesso para alimentar todos os APs simultaneamente, sem exceder o orçamento total de PoE do equipamento;

- Cablagem de Cat.6A ou superior para suportar as velocidades *multi-gigabit* (2,5G ou 10G) necessárias ao *backhaul* dos APs. A Cat.5e e Cat.6 limitam-se a 1 Gbps, o que pode tornar-se num obstáculo;
- Dimensionamento dos quadros de telecomunicações para acomodar *switches* com maior densidade de portas PoE++ e, eventualmente, *uplinks* (ligação ascendente, é o processo de envio de dados de um dispositivo local para uma rede maior, servidor, estação base ou satélite) de 10G ou 25G.

### 5.3 Dispositivos Clientes e Compatibilidade Retroativa

O Wi-Fi 6E e o Wi-Fi 7 são normas retro compatíveis, isto é, um AP Wi-Fi 7 aceita ligações de dispositivos Wi-Fi 4, 5, 6 e 6E, cada um operando à velocidade máxima suportada pelo seu *chipset*.

Contudo, para aceder à banda de 6 GHz, o dispositivo cliente tem obrigatoriamente de suportar Wi-Fi 6E ou Wi-Fi 7, não existe atualização de *firmware* que permita a um dispositivo legado operar em 6 GHz.

Na prática, o projetista deve considerar o seguinte:

- Os dispositivos legados continuam a operar normalmente nas bandas de 2,4 e 5 GHz, podendo indiretamente beneficiar do descarregamento de tráfego para a banda de 6 GHz pelos novos clientes;
- A partir de 2025, a maioria dos smartphones de gama alta e portáteis com processadores Intel Core Ultra ou Snapdragon X Elite incluem Wi-Fi 7 de série;
- O ciclo de renovação de dispositivos cliente nas empresas, tipicamente de 4 a 5 anos, dita o ritmo real de adoção da banda de 6 GHz.

### 5.4 Política de Espectro e Segmentação de Rede

Com três bandas disponíveis, o projetista deve definir uma política clara de alocação de espectro e segmentação de rede.

Assim, a abordagem recomendada é:

- 2,4 GHz: cobertura de longa distância, dispositivos IoT de baixo débito (sensores, fechaduras, termostatos), e clientes legados que não suportam 5 ou 6 GHz;
- 5 GHz: clientes de propósito geral (portáteis, *tablets*, *smartphones* de gama média);
- 6 GHz: clientes de alto desempenho (*smartphones* e portáteis topo de gama), *backhaul mesh* entre APs, e aplicações críticas com requisitos de baixa latência (AR/VR, videoconferência 4K, automação industrial).

Em ambientes com estruturas de betão armado, paredes metalizadas ou espaços muito compartimentados, os desafios de propagação são acrescidos.

Pode ser necessário criar SSIDs (*Service Set Identifier*, “Identificador de Conjunto de Serviços”, na prática, é o nome público da rede Wi-Fi) dedicados para dispositivos legados sem suporte a 6 GHz, de forma a evitar problemas de compatibilidade com o WPA3 obrigatório na banda de 6 GHz.

## 6. Casos de Aplicação em Edifícios

A Tabela 2 resume as recomendações de projeto para os principais tipos de edifícios, considerando as características do Wi-Fi 6E e Wi-Fi 7.

Em edifícios residenciais multifamiliares (prédios de apartamentos), o projetista ITED deve prever, desde a fase de projeto, a infraestrutura passiva necessária para suportar APs Wi-Fi 6E/7 em cada fogo, designadamente as tomadas de telecomunicações (TT) com cablagem Par de Cobre (PC) Cat.6A, e alimentação PoE+ disponível nos armários de telecomunicações de piso.

Esta abordagem poderá proteger o investimento para os próximos 10 a 15 anos.

Tabela 2 — Recomendações de projeto por tipologia de edifício

| Tipo de Edifício          | Recomendação          | Densidade de APs              | Justificação                                              |
|---------------------------|-----------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Habitação unifamiliar     | Wi-Fi 7 mesh triband  | 1–3 nós mesh                  | Backhaul em 6 GHz; cobertura total da habitação           |
| Escritório open space     | Wi-Fi 6E / Wi-Fi 7    | 1 AP / 140–190 m <sup>2</sup> | Alta densidade de clientes; banda 6 GHz sem interferência |
| Hotel                     | Wi-Fi 6E por piso     | 1 AP por 2–3 quartos          | Isolamento RF entre quartos; SSID por piso                |
| Armazém / Industrial      | Wi-Fi 6 (2,4 + 5 GHz) | Conforme levantamento         | Maior penetração em ambientes metálicos                   |
| Hospital / Clínica        | Wi-Fi 7 com MLO       | Alta densidade                | Ultra-baixa latência; continuidade de ligação crítica     |
| Auditório / Sala reuniões | Wi-Fi 7, APs no teto  | 1 AP / 50–80 lugares          | Muito alta densidade pontual; MLO reduz latência          |

## 7. Desafios para o Projetista ITED

A adoção do Wi-Fi 6E e Wi-Fi 7 coloca ao projetista de ITED um conjunto de desafios que importa mencionar e antecipar:

- Regulamentação europeia restritiva: A atribuição de apenas 500 MHz em Portugal (em vez dos 1 200 MHz disponíveis nos EUA) limita o número de canais de 80, 160 e 320 MHz, reduzindo o potencial máximo das novas normas. O projetista deve, pois, dimensionar a rede tendo em conta estas restrições reais, e não as especificações teóricas globais das normas;
- Renovação do parque de clientes: A migração para dispositivos com suporte a 6 GHz é gradual. O projeto deve garantir a coexistência harmoniosa de clientes Wi-Fi 4/5/6 com os novos Wi-Fi 6E/7, sem degradação de serviço para os primeiros;
- Maior densidade de APs: O dimensionamento mais fino que as boas práticas atuais recomendam (1 AP por 140–190 m<sup>2</sup>) pode implicar mais pontos de tomada TT e revisão das infraestruturas ITED existentes em edifícios em requalificação;
- Alimentação PoE: O aumento do consumo dos APs *triband* exige avaliação cuidada da potência disponível nos armários de telecomunicações e, em muitos casos, substituição dos *switches* de acesso por modelos com suporte a PoE++ (802.3bt).

- Cablagem de *backhaul*: A cablagem Par de Cobre Cat.5e ou Cat.6 existente em muitos edifícios pode tornar-se um obstáculo para os débitos multi-gigabit dos novos APs. O projeto de requalificação deve incluir a substituição por cabo de Par de Cobre de Cat.6A ou fibra ótica monomodo até aos armários de telecomunicações;
- Segurança e WPA3: A obrigatoriedade do WPA3 (Wi-Fi Protected Access 3 é o protocolo de segurança mais avançado para redes sem fio) na banda de 6 GHz implica que controladores de acesso à rede, sistemas de gestão de identidade e equipamentos de segurança perimetral sejam compatíveis com esta norma de autenticação;
- *Site surveys* obrigatórios: A variabilidade das condições de propagação em interiores, especialmente em edifícios com estruturas metálicas, betão armado ou compartimentação densa, torna os levantamentos de campo indispensáveis antes da elaboração do projeto definitivo.

## 8. Conclusão

O Wi-Fi 6E e o Wi-Fi 7 representam um salto qualitativo na conectividade sem fios em edifícios. A introdução da banda de 6 GHz, os canais de 320 MHz, o MLO e o *preamble puncturing* traduzem-se em redes mais rápidas, com menor

latência e maior capacidade para suportar o crescente ecossistema de dispositivos conectados.

Para o projetista de telecomunicações em edifícios, estas normas implicam uma revisão das práticas de dimensionamento de APs, escolha de cablagem estruturada adequada, alimentação PoE e política de espectro.

A decisão entre Wi-Fi 6E e Wi-Fi 7 deve ser baseada nos casos de uso concretos, no orçamento disponível e no ciclo de renovação dos dispositivos cliente, e não apenas nas especificações das normas.

Em Portugal, o contexto regulatório europeu limita, por enquanto, o pleno aproveitamento da banda de 6 GHz, com apenas 500 MHz disponíveis. No entanto, a evolução legislativa em curso, impulsionada pela pressão da indústria para a abertura da banda superior de 6 GHz, aponta para uma melhoria progressiva desta situação a curto/médio prazo.

Decorrente, ainda, da atual revisão do Manual ITED 4, este é o momento certo para o projetista ITED integrar estas tecnologias nos projetos de nova geração, garantindo que a infraestrutura passiva, cablagem Par de Cobre Cat.6A, tomadas de telecomunicações, e dispositivos PoE, suporta não apenas o presente, mas os próximos 10 a 15 anos de evolução tecnológica sem fios.

## Referências

- [1] IEEE, "IEEE Standard for Information Technology – Telecommunications and Information Exchange Between Systems – Local and Metropolitan Area Networks – Specific Requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications – Amendment 8: Enhancements for High Efficiency WLAN". IEEE Std 802.11ax-2021.
- [2] IEEE, "IEEE 802.11be – Extremely High Throughput (EHT)," IEEE Draft Standard, 2024.
- [3] Wi-Fi Alliance, "Wi-Fi CERTIFIED 6E™ Brings Wi-Fi Performance to the 6 GHz Band," Wi-Fi Alliance White Paper, 2021.
- [4] Wi-Fi Alliance, "Wi-Fi CERTIFIED 7™ – Enabling Next-Generation User Experiences," Wi-Fi Alliance White Paper, 2024.
- [5] Cisco Systems, "Wi-Fi 7 and the Growing Future of Wireless Design Guide," Cisco White Paper, 2024.
- [6] Wi-Fi Alliance, "Wi-Fi 6E: The Details You Need to Know – Enterprise Deployment Considerations," 2022.
- [7] Extreme Networks, "How Far Will Wi-Fi 6E Travel in 6 GHz?," Technical Blog, 2022.
- [8] ANACOM, "Decisão sobre a utilização da banda 5925–6425 MHz para redes locais sem fios (RLAN)," Autoridade Nacional de Comunicações, 2022.
- [9] ANACOM, "Consulta Pública – Plano de Gestão de Espectro de Radiofrequências," 2023.
- [10] ITUR 3 / ITED 4 – Manuais de Infraestruturas de Telecomunicações em Edifícios e em Urbanizações, ANACOM, Portugal.

# CÉLULAS SOLARES DE PEROVSKITE

## Resumo

As células solares de perovskite (Perovskite Solar Cells – PSCs) têm-se afirmado como uma das tecnologias fotovoltaicas mais promissoras da atualidade, destacando-se pelo rápido progresso alcançado em termos de eficiência de conversão energética e pelo potencial de redução dos custos de fabrico. Este artigo analisa o estado da arte das PSCs, abordando a sua estrutura cristalina, propriedades optoelectrónicas, principais arquiteturas de dispositivos e técnicas de fabrico. A metodologia adotada baseia-se numa revisão crítica da literatura científica especializada. A análise realizada evidencia que os materiais de perovskite apresentam características particularmente favoráveis à conversão fotovoltaica, nomeadamente elevado coeficiente de absorção ótica, reduzida energia de ligação dos excíton e longos comprimentos de difusão dos portadores de carga. Estas propriedades têm permitido alcançar eficiências de conversão superiores a 25% em condições laboratoriais.

Contudo, desafios relacionados com a estabilidade ambiental, a migração iónica e a presença de chumbo na composição de muitas perovskites continuam a constituir obstáculos à sua implementação comercial em larga escala. Conclui-se que, apesar das limitações atualmente existentes, as células solares de perovskite apresentam um elevado potencial para futuras aplicações em sistemas de produção distribuída de energia elétrica e para a evolução sustentável do setor fotovoltaico.

**Palavras-chave:** Perovskite; Energia solar; Células fotovoltaicas; Produção distribuída

## 1. Introdução

As células solares de perovskite (PSCs) tornaram-se, na última década, um dos mais promissores avanços no campo fotovoltaico.

A crescente necessidade de mitigação das alterações climáticas tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias energéticas sustentáveis, entre as quais a energia solar fotovoltaica assume um papel central nos sistemas de produção distribuída. As tecnologias convencionais, baseadas maioritariamente em silício cristalino, apresentam elevada maturidade, mas implicam custos energéticos elevados nos processos de fabrico. As células solares de perovskite (PSCs) surgem como uma alternativa inovadora, destacando-se pela rapidez de evolução das suas eficiências e pela simplicidade dos métodos de produção [3]. Desde a sua introdução em 2009, estas células registaram um crescimento notável, atingindo eficiências superiores a 25% em pouco mais de uma década [1]. Este progresso resulta das propriedades intrínsecas dos materiais de perovskite e da evolução das arquiteturas de dispositivos.

O objetivo deste artigo é analisar os fundamentos científicos das PSCs, discutindo as suas características estruturais e funcionais, bem como os desafios que condicionam a sua aplicação em sistemas elétricos de energia baseados em produção distribuída.

## 2. Propriedades

### 2.1 Propriedades da estrutura cristalina

As perovskites constituem uma classe de materiais cristalinos cuja estrutura básica pode ser descrita pela fórmula geral  $ABX_3$ , originalmente associada ao mineral perovskite ( $CaTiO_3$ ).

No contexto fotovoltaico, esta designação refere-se maioritariamente a perovskites halogenadas metálicas, onde A é um catião monovalente (orgânico ou inorgânico), B é um catião metálico bivalente e X é um anião halogeneto [2], [3].

A estrutura cristalina caracteriza-se por octaedros  $BX_6$  ligados pelos vértices, formando uma rede tridimensional contínua, enquanto o catião A ocupa os espaços intersticiais entre os octaedros. Esta disposição estrutural confere às perovskites elevada flexibilidade composicional, permitindo variações significativas nas propriedades físicas e eletrónicas através da substituição controlada dos seus constituintes [1].

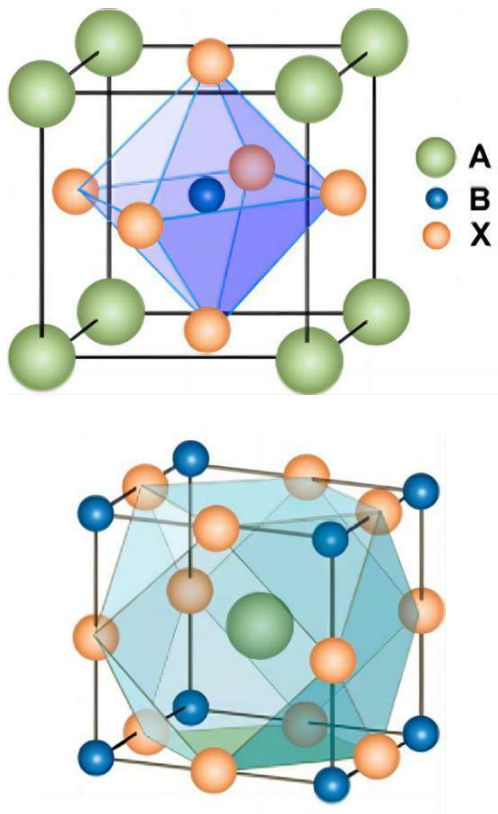


Figura 1 – Estrutura cristalina de fórmula geral  $ABX_3$ . [1]

A estabilidade geométrica da estrutura  $ABX_3$  é frequentemente avaliada através do fator de tolerância de Goldschmidt ( $t$ ), definido pela relação entre os raios iónicos dos constituintes. Valores de  $t$  próximos da unidade favorecem a formação de estruturas cúbicas estáveis, enquanto desvios conduzem a distorções tetragonais ou ortorrômbicas [3]. Estas variações estruturais influenciam diretamente propriedades como o bandgap, a mobilidade de portadores e a estabilidade térmica do material.

A possibilidade de utilizar diferentes catiões no sítio A, como metilamónio ( $MA^+$ ), formamidínio ( $FA^+$ ) ou cério ( $Cs^+$ ), tem sido amplamente explorada com o objetivo de melhorar a estabilidade estrutural e reduzir a degradação sob condições ambientais adversas. Do mesmo modo, a substituição parcial dos aniões halogenetos permite ajustar o bandgap do material, tornando-o adequado para aplicações específicas, incluindo células tandem.



Figura 2 – Cristal natural do mineral perovskite. [2]

## 2.2 Propriedades optoelectrónicas

As perovskites distinguem-se por apresentarem um elevado coeficiente de absorção ótica, superior a  $10^4 \text{ cm}^{-1}$ , permitindo a utilização de camadas ativas com espessuras reduzidas [3]. Esta característica contribui para a redução do consumo de material e dos custos de fabrico.

Outro aspeto relevante é a baixa energia de ligação, tipicamente inferior a 20 meV, o que favorece a geração de portadores livres (condutores) à temperatura ambiente [2].

Além disso, estes materiais apresentam longos comprimentos de difusão de eletrões e lacunas, frequentemente superiores a  $1 \mu\text{m}$ , facilitando a recolha eficiente de carga mesmo em filmes policristalinos [1].

### 3. Utilização como células solares

#### 3.1 Arquiteturas de células solares de Perovskite

As PSCs são geralmente implementadas segundo duas arquiteturas principais: n-i-p (regular) e p-i-n (invertida). A arquitetura n-i-p utiliza uma camada transportadora de elétrons, geralmente  $\text{TiO}_2$ , seguida da perovskite e de uma camada transportadora de lacunas, sendo responsável pelos primeiros dispositivos de elevada eficiência [3].

A arquitetura p-i-n tem vindo a ganhar relevância devido à sua menor histerese e maior compatibilidade com processos de fabrico a baixa temperatura, o que a torna particularmente atrativa para aplicações em substratos flexíveis e dispositivos integrados [2].

#### 3.2 Técnicas de fabrico

Os métodos de fabrico mais comuns baseiam-se em processos de deposição por solução, como o método de um passo (one-step) e o método de dois passos (two-step) [2]. Técnicas mais avançadas, incluindo deposição por vapor e processos assistidos por vácuo, têm sido exploradas para melhorar a uniformidade das películas e facilitar o escalonamento industrial [1].

### 4. Conclusão

As células solares de perovskite têm vindo a afirmar-se como uma das mais promissoras tecnologias emergentes no domínio da conversão fotovoltaica, evidenciando uma evolução particularmente significativa em termos de eficiência e simplicidade dos processos de fabrico. A análise realizada permitiu verificar que as propriedades estruturais e optoelectrónicas destes materiais, nomeadamente o elevado coeficiente de absorção ótica, a reduzida energia de ligação dos portadores de carga e os longos comprimentos de difusão, contribuem de forma determinante para o seu elevado desempenho fotovoltaico.

A flexibilidade composicional da estrutura cristalina das perovskites constitui igualmente uma vantagem relevante, possibilitando a otimização das propriedades eletrónicas e a adaptação dos materiais a diferentes configurações de dispositivos, incluindo aplicações em células tandem e sistemas fotovoltaicos de elevada eficiência. As arquiteturas atualmente utilizadas, bem como os métodos de fabrico baseados em deposição por solução e por vapor, demonstram o potencial desta tecnologia para processos produtivos de menor custo e reduzido consumo energético. Apesar dos progressos alcançados, subsistem desafios significativos que condicionam a sua implementação comercial em larga escala. Entre os principais obstáculos destacam-se a degradação dos materiais perante fatores ambientais, os fenómenos de migração iónica que afetam a estabilidade operacional e as preocupações ambientais associadas à utilização de chumbo em muitas das composições atualmente estudadas.

Em síntese, as células solares de perovskite apresentam características que as posicionam como uma forte candidata à próxima geração de tecnologias fotovoltaicas. O sucesso da sua adoção industrial dependerá, contudo, do desenvolvimento de materiais mais estáveis, sustentáveis e fiáveis, capazes de garantir um desempenho duradouro em condições reais de operação. Neste contexto, a investigação científica e tecnológica continuará a desempenhar um papel fundamental na consolidação desta solução para aplicações futuras em sistemas de produção distribuída de energia elétrica.

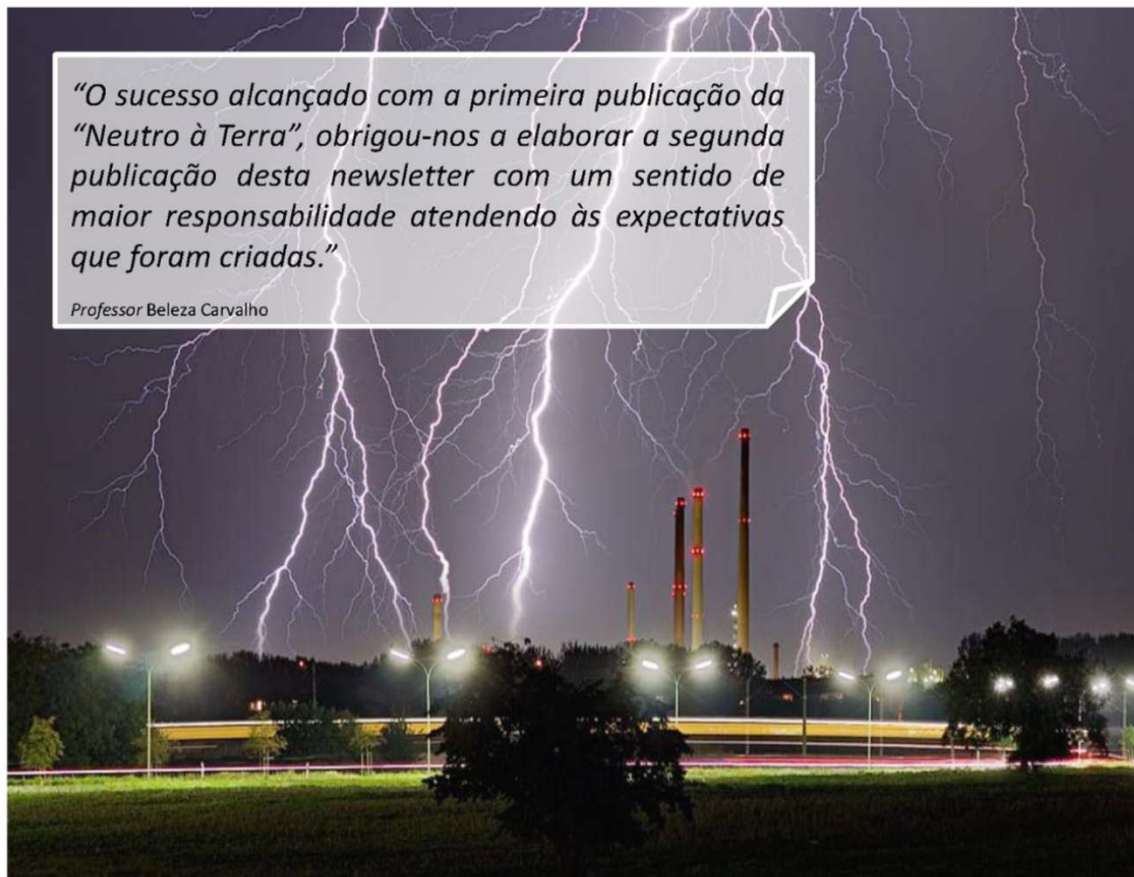
#### Referências Bibliográficas

- [1] H. Yin, "Advanced perovskite materials: Structure, properties, and applications in solar cells," *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 2024.
- [2] S. Bello, A. Urwick, F. Bastianini, A. J. Nedoma e A. Dunbar, "An introduction to perovskites for solar cells and their characterisation," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 89–106, 2022.
- [3] N.-G. Park, "Perovskite solar cells: An emerging photovoltaic technology," *Materials Today*, vol. 18, no. 2, pp. 65–72, 2015.



*“O sucesso alcançado com a primeira publicação da “Neutro à Terra”, obrigou-nos a elaborar a segunda publicação desta newsletter com um sentido de maior responsabilidade atendendo às expectativas que foram criadas.”*

Professor Beleza Carvalho



Eficiência  
Energética  
Pág. 4



Sistemas  
Segurança  
Pág. 8



Telecomunicações  
Pág. 18



Domótica  
Pág. 27



Máquinas  
Eléctricas  
Pág. 31



Instalações  
Eléctricas  
Pág. 38

# O PAPEL DA ENERGIA NUCLEAR NA DESCARBONIZAÇÃO E NA TRANSIÇÃO ECONÓMICA GLOBAL: OPORTUNIDADES E DESAFIOS

## Resumo

Perante a crescente urgência de descarbonizar a economia global e garantir a segurança do abastecimento energético, a energia nuclear voltou a assumir um papel de destaque no debate sobre o futuro dos sistemas energéticos.

Este artigo analisa o contributo das tecnologias nucleares para a transição energética, explorando o potencial da fissão nuclear enquanto fonte de produção elétrica de baixas emissões e da fusão nuclear como uma das soluções mais promissoras para o fornecimento sustentável de energia a longo prazo. São discutidas as principais vantagens e limitações destas tecnologias, incluindo a elevada densidade energética, a estabilidade da produção, os desafios associados à gestão de resíduos, os custos de investimento e a aceitação social. Paralelamente, são abordados desenvolvimentos tecnológicos recentes, como os Reactores Modulares de Pequena Escala (SMR) e os avanços obtidos nos programas internacionais de investigação em fusão nuclear.

A análise efetuada evidencia que a energia nuclear poderá desempenhar um papel estratégico na redução das emissões de gases com efeito de estufa, contribuindo para uma matriz energética mais diversificada, resiliente e sustentável.

Conclui-se que o futuro do setor dependerá não apenas da evolução tecnológica, mas também da capacidade de assegurar enquadramentos regulatórios estáveis, confiança pública e investimentos compatíveis com os objetivos globais de neutralidade carbónica.

**Palavras-chave:** Energia Nuclear, Neutralidade Carbónica, Fissão, Fusão, ITER

## 1. Introdução

A atual crise climática e a necessidade de uma descarbonização global para conter a mesma exigem uma transformação acelerada dos sistemas energéticos.

Alinhada com o Acordo de Paris, a transição para uma economia de baixo carbono tornou-se um objetivo fundamental com implicações ambientais, económicas e geopolíticas. Neste contexto, a busca por energias que conciliem baixas emissões e elevada densidade energética tem reposicionado o debate sobre o papel da energia nuclear [1][2].

A energia nuclear de fissão destaca-se como uma fonte de produção elétrica com baixas emissões de carbono e uma capacidade de geração estável, o que oferece um contraponto fundamental à intermitência das fontes renováveis. Contudo, o setor enfrenta desafios ligados aos elevados custos de capital, à gestão dos resíduos radioativos e à aceitação por parte da população, em particular dos ativistas sociais. Apesar destas barreiras, a energia nuclear está a ser considerada estratégica em diversas economias avançadas, principalmente naquelas que não tem fontes renováveis em abundância.

Adicionalmente, a investigação da fusão nuclear abre uma via transformadora do setor energético, com projetos internacionais de vanguarda (em particular o projeto ITER) a indicarem a viabilidade comercial nas próximas décadas.

A fusão oferece a promessa de energia quase ilimitada e segura, com uma quantidade reduzida de resíduos radioativos de longa duração

## 2. Energia Nuclear Convencional (Fissão Nuclear)

A energia nuclear de fissão constitui uma das mais consolidadas tecnologias de geração elétrica de baixo carbono e tem um papel importante na estratégia de mitigação das alterações climáticas.

Esta tecnologia é baseada na divisão controlada de núcleos atômicos pesados, como o urânio-235 ou o plutônio-239, em fragmentos menores, essa fissão liberta uma quantidade significativa de energia, que é convertida em eletricidade através de turbinas a vapor[3] [4].

A elevada densidade energética do combustível nuclear torna este processo extremamente eficiente, uma pequena quantidade de urânio pode produzir milhões de vezes mais energia do que a queima de combustíveis fósseis em massa equivalente [5].

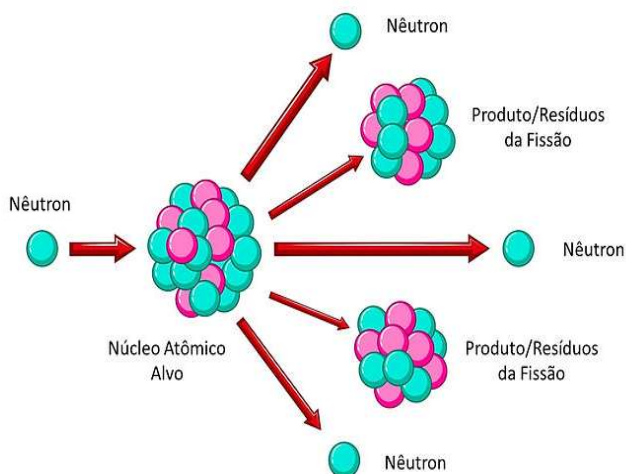


Figura 1 - Representação do processo de Fissão Nuclear [6]

Para além do seu desempenho energético extremamente positivo, o nuclear convencional apresenta emissões de carbono muito baixas e o urânio, pela sua elevada densidade energética e facilidade de armazenamento, confere autonomia energética a países com menor disponibilidade de recursos fósseis ou renováveis, reduzindo a dependência de importações.

No entanto, a fissão nuclear enfrenta barreiras persistentes que condicionam a sua expansão. Entre os principais desafios destacam-se os custos de investimento inicial, que superam por muito os das energias renováveis, e o período prolongado de construção das centrais, que pode ultrapassar uma década. Estes fatores dificultam a viabilidade económica de novos projetos, sobretudo em mercados de energia liberalizados onde o retorno financeiro depende da volatilidade dos preços da eletricidade. Ainda assim, quando em funcionamento, as centrais nucleares apresentam custos de produção estáveis e baixos, o que contribui para amortizar o investimento ao longo da vida útil, frequentemente superior a 60 anos [7] [8].

A gestão dos resíduos radioativos é outro ponto sensível do debate público e político. Apesar de representarem volumes relativamente pequenos, os resíduos nucleares requerem confinamento em sistemas geológicos profundos por períodos que podem atingir centenas de milhares de anos [9]. Além disso, eventos históricos como o de Chernobyl e Fukushima denegriram a imagem do nuclear junto da população, alimentando o medo em torno da segurança nuclear, ainda que as normas e a segurança das centrais tenham evoluído bastante desde então.

Mesmo com toda esta controvérsia, nos últimos anos a energia nuclear, em particular a de fissão, tem ganho uma nova vida, observam-se avanços tecnológicos promissores destinados a revitalizar o setor e a torná-lo mais compatível com as exigências da transição energética.

Os reatores de quarta geração, ainda em fase de desenvolvimento, visam a melhorar a eficiência do combustível, aumentar a segurança, diminuir o custo da energia produzida e reduzir os resíduos, diminuindo o impacto ambiental [10]. Paralelamente, os Reatores Modulares de Pequena Escala (SMR) emergem como uma solução inovadora, oferecendo tempos de construção mais reduzidos e menor investimento inicial [11].



Figura 2 – Conceção de um SMR [12]

### 3. Fusão Nuclear

A fusão nuclear representa uma das vias tecnológicas mais promissoras para transformar o panorama energético global a médio e longo prazo. Ao contrário da fissão, que se baseia na divisão de núcleos pesados, a fusão produz energia através da união de núcleos leves (tipicamente deutério e trítio) libertando quantidades extraordinárias de energia devido à conversão de massa em energia, conforme descrito pela equação de Einstein. Este processo é o mesmo que alimenta o Sol e as estrelas, o que evidencia o seu enorme potencial energético, por unidade de massa, a fusão pode gerar quatro vezes mais energia que a fissão e milhões de vezes mais do que os combustíveis fósseis [13].

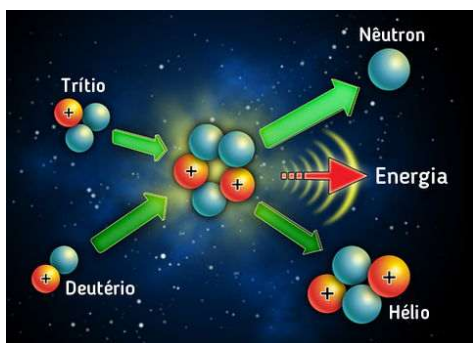


Figura 3 - Representação do processo de Fusão Nuclear [14]

Uma das características mais interessantes da fusão é a combinação da elevada densidade energética, segurança e uma produção reduzida de resíduos de longa duração. O combustível necessário, o deutério, está presente na água do mar, enquanto o trítio pode ser produzido internamente nos reatores através de mantas de lítio.

A inexistência de risco de fusão descontrolada ou de derretimento do núcleo, juntamente à produção significativamente reduzida de resíduos radioativos de longa duração, transforma a fusão como uma fonte limpa e segura. Além disso, a fusão não emite carbono durante a operação, e o seu ciclo de vida apresenta emissões extremamente reduzidas, semelhante às fontes renováveis [15][16].

Apesar deste potencial, a fusão enfrenta vários desafios técnicos e científicos. Para que haja fusão, é necessário atingir temperaturas superiores a 100 milhões de graus Celsius, permitindo que os núcleos ultrapassem a repulsão eletrostática. Gerir algo tão quente requer tecnologias altamente avançadas, como o confinamento magnético em dispositivos tokamak ou o confinamento inercial através de lasers de alta potência. Os fundos internacionais têm convergido maioritariamente no modelo tokamak, sendo o projeto ITER, em construção no sul de França, o mais ambicioso na área. O ITER pretende demonstrar um break-even energético significativo, produzindo dez vezes mais energia do que a injetada no plasma, um marco importante para comprovar a viabilidade comercial da tecnologia [17][18] [19].

Paralelamente ao ITER, os últimos anos têm assistido a um crescimento acelerado de iniciativas privadas e governamentais dedicadas à fusão nuclear. Em 2022, a National Ignition Facility (NIF), nos Estados Unidos, anunciou o primeiro experimento de ignição líquida, onde a energia produzida por fusão superou a energia absorvida pelo combustível, um marco histórico que reforçou a credibilidade científica do setor. Embora ainda distante da produção comercial, este avanço demonstrou que a fusão é fisicamente alcançável, algo que há alguns anos não era consensual entre os investigadores [20].

No plano económico, estima-se que as centrais de fusão, quando comercializadas, possam oferecer eletricidade a custos competitivos, comparáveis aos das centrais nucleares convencionais. A inexistência de riscos de acidente grave, a ausência de resíduos radioativos e a abundância do

combustível poderão contribuir para custos operacionais reduzidos e um perfil de risco significativamente mais baixo. Contudo, os investimentos iniciais permanecem elevados. A viabilidade comercial da fusão é projetada para entre 2035 e 2050, dependendo dos avanços tecnológicos e da maturidade dos protótipos de demonstração, prometendo revolucionar o mercado de energia e impulsionar a descarbonização.

#### **4. Implicações Estratégicas e o Enquadramento da Transição Económica**

##### **4.1. Geopolítica e competitividade económica**

Com o fim anunciado da produção energética por via de fontes não renováveis, o mundo (em particular a Europa) virou-se para as energias renováveis. No entanto vários países depararam-se com um problema, não tinham recursos naturais suficientemente atrativos para uma aposta credível no setor das energias renováveis. Com isso a política internacional voltou-se para algo que ao longo das últimas décadas fora cada vez mais posto como segundo plano, a energia nuclear. Conforme dito nos capítulos anteriores a investigação efetuada neste setor nos últimos anos demonstrou que a energia nuclear tem uma grande potencialidade para explorar.

A energia nuclear de fissão, apesar de ter um baixo custo operacional, o financiamento de grandes centrais de fissão convencional (Gigawatt-scale) exige um elevado custo de capital inicial e prazos de construção que podem exceder uma década, como foi referido anteriormente. A viabilidade económica destes investimentos depende de mecanismos de apoio estatal para diminuir os riscos. Em contraste, a modularidade dos SMRs, como dito anteriormente, promete reduzir o risco de investimento e os prazos de construção, tornando a tecnologia mais competitiva e adaptável a mercados descentralizados. Para além da geração de eletricidade, o investimento nuclear impulsiona cadeias de valor de alta tecnologia e cria empregos qualificados em

engenharia, fabrico e operação, sendo importante para o crescimento industrial e económico.

A fusão nuclear tem implicações profundas para a transição energética e económica. A sua capacidade de fornecer energia limpa e inesgotável pode reconfigurar os sistemas energéticos globais e impulsionar a descarbonização total do planeta. Quando operacionalizada, a fusão pode complementar, e até ultrapassar, outras tecnologias de baixo carbono, oferecendo um modelo de produção elétrica de grande escala com reduzido impacto ambiental.

Além disso, o desenvolvimento desta tecnologia tem impulsionado a economia mundial com inovação em áreas como materiais avançados, supercondutividade, robótica, inteligência artificial e engenharia criogénica, contribuindo para retornos económicos indiretos significativos, vistos como atrativos por parte dos diversos governos mundiais e para uma inovação tecnológica que pode contribuir para novas descobertas em outros setores.

No entanto, o consenso científico atual reconhece que a fusão não constitui uma solução imediata, mas sim uma aposta estratégica de longo prazo. Ainda assim esta deve ser acompanhada com proximidade por parte dos políticos pois os avanços recentes reforçam a perceção de que a fusão pode desempenhar um papel decisivo no futuro energético global, oferecendo uma fonte de energia limpa capaz de sustentar o crescimento económico sem comprometer os limites ambientais do planeta.

##### **4.2. Desafios e aceitação social**

O sucesso da energia nuclear na transição energética é contingente à superação de barreiras que transcendem a tecnologia e o custo, nomeadamente a consistência regulatória, o risco percebido e a aceitação pública.

A resistência pública, muitas vezes transmitida pelo fenómeno NIMBY (Not In My Backyard), é o principal

obstáculo não-técnico à construção de novas centrais e de repositórios de resíduos. O sucesso da expansão nuclear depende da capacidade de mostrar às pessoas a potencialidade do nuclear e mostrar que os riscos de desastres como os que aconteceram no passado são muito reduzidos devido à investigação e à melhoria das infraestruturas. Isto implica uma comunicação transparente, o envolvimento das comunidades afetadas e a garantia de mecanismos de fiscalização robustos. O futuro da energia nuclear dependerá da aceitação social, da consistência das políticas públicas e do investimento em inovação tecnológica.



Figura 4 - Fenómeno NIMBY [21]

Para além da resistência social, também é observada uma certa resistência política principalmente em algumas franjas do espectro político, para que o nuclear possa ser realmente uma tecnologia de futuro é importante que os políticos atuais façam um enquadramento regulatório estável e previsível. A ausência de um consenso político duradouro sobre o papel da energia nuclear cria incerteza e eleva o

risco para os investidores, dificultando a viabilidade económica de novos projetos.

## 5. Análise das fontes energéticas

A avaliação do papel da energia nuclear no contexto da descarbonização exige uma análise comparativa das suas principais características técnicas, económicas e ambientais face a outras fontes de energia amplamente utilizadas. Neste sentido, a Tabela 1 apresenta uma síntese comparativa entre a fissão nuclear, a fusão nuclear e o gás natural.

As diferenças entre as fontes nucleares (fissão e fusão) e o gás natural são significativas, especialmente no que toca à eficiência e ao impacto ambiental. É evidente pela tabela que as energias nucleares, em particular a fusão, possuem uma capacidade de gerar energia muito superior à do gás natural, para além de operarem com uma pegada carbónica nula.

Por outro lado, a fissão nuclear revela desvantagens competitivas face ao gás natural no que toca aos custos de capital inicial para a construção das centrais e aos resíduos libertados que são radioativos, logo potencialmente perigosos. No caso da fusão, a sua principal barreira atual é o facto da tecnologia ainda encontrar-se em fase de desenvolvimento e não estar disponível para comercialização.

Tabela 1 Comparação entre fontes energéticas

| Características                 | Fissão Nuclear                                             | Fusão Nuclear                       | Gás Natural                                                                    |
|---------------------------------|------------------------------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Pegada Carbónica</b>         | 12 g CO <sub>2</sub> eq / kWh<br>[22]                      | Praticamente 0<br>[17]              | 490 g CO <sub>2</sub> eq / kWh<br>[22]                                         |
| <b>Geração de energia</b>       | Milhões de vezes superior à queima de combustíveis fósseis | 4x fissão nuclear<br>[15]           | Milhões de vezes inferior à energia nuclear                                    |
| <b>Custo do Capital Inicial</b> | 5 a 10 mil milhões de dólares<br>[23]                      | Tecnologia ainda em desenvolvimento | 919 \$/kW - Gás-CT<br>927 \$/kW - Gas-CC<br>[24]                               |
| <b>Resíduos Libertados</b>      | Resíduos Radioativos                                       | Quase nulos                         | Emissões CO <sub>2</sub> e NO <sub>x</sub> /CH <sub>4</sub> e resíduos sólidos |

## 6. Conclusões

A análise realizada evidencia que a energia nuclear pode desempenhar um papel relevante na descarbonização dos sistemas energéticos e no reforço da segurança do abastecimento elétrico, particularmente num contexto marcado pelo aumento da procura de energia e pela necessidade de reduzir as emissões de gases com efeito de estufa. A fissão nuclear constitui atualmente uma tecnologia consolidada, capaz de fornecer produção elétrica estável e de baixas emissões de carbono, complementando o contributo das fontes renováveis intermitentes para a estabilidade das redes elétricas.

Os avanços verificados no desenvolvimento de reatores de nova geração e de Reatores Modulares de Pequena Escala (SMR) demonstram o potencial de evolução da tecnologia nuclear, procurando responder a desafios históricos relacionados com a segurança, os custos de investimento e a gestão dos resíduos radioativos. Apesar destes progressos, continuam a existir constrangimentos técnicos, económicos e sociais que condicionam a expansão da energia nuclear em diversos países. Por sua vez, a fusão nuclear representa uma perspetiva tecnológica de elevado potencial para o futuro, oferecendo a possibilidade de produção energética em larga escala com reduzido impacto ambiental. Embora os avanços científicos alcançados nas últimas décadas sejam encorajadores, a sua aplicação comercial permanece dependente da superação de importantes desafios tecnológicos e da demonstração da sua viabilidade económica.

Em síntese, a energia nuclear deverá ser encarada como uma das possíveis componentes de uma estratégia energética diversificada e sustentável, capaz de contribuir para os objetivos de neutralidade carbónica e para a segurança energética global. O seu papel futuro dependerá não apenas da evolução tecnológica, mas também da capacidade de promover enquadramentos regulatórios estáveis, modelos de financiamento adequados e níveis de aceitação social compatíveis com a implementação destas tecnologias em larga escala.

## Referências Bibliográficas

- [1] “Acordo de Paris completa 10 anos com pedido de reforço à cooperação e objetivos,” ONU. Accessed: Dec. 13, 2025. [Online]. Available: <https://news.un.org/pt/story/2025/12/1851805>
- [2] “Energia nuclear é essencial para sair de mundo asfiziado pelo CO<sub>2</sub>,” PPWARE. Accessed: Dec. 01, 2025. [Online]. Available: <https://pplware.sapo.pt/ciencia/energia-nuclear-e-essencial-para-sair-de-mundo-asfiziado-pelo-co2/>
- [3] “Fissão vs. Fusão Nuclear: A Tecnologia por Trás da Geração de Energia e o Futuro da Energia Limpa,” Nascimento Network. Accessed: Dec. 01, 2025. [Online]. Available: <https://www.nascimentonetworks.com.br/post/fiss%C3%A3o-vs-fus%C3%A3o-nuclear-a-tecnologia-por-tr%C3%A1s-da-gera%C3%A7%C3%A3o-de-energia-e-o-futuro-da-energia-limpa>
- [4] Jennifer Rocha Vargas Fogaça, “Fissão Nuclear,” Manual da Química. Accessed: Dec. 01, 2025. [Online]. Available: <https://www.manualdaquimica.com/fisico-quimica/fissao-nuclear.htm>
- [5] “Energia Nuclear: Futuro Sustentável para Portugal?,” Axómetro. Accessed: Dec. 13, 2025. [Online]. Available: <https://axometro.pt/energia-nuclear/>
- [6] “Fotografia Fissão Nuclear.” Accessed: Dec. 09, 2025. [Online]. Available: <https://www.nexxant.com.br/post/fusao-nuclear-o-que-e-como-funciona-e-futuro-da-tecnologia>
- [7] “Energia nuclear: o papel na matriz energética e alternativas renováveis,” EDP. Accessed: Dec. 02, 2025. [Online]. Available: <https://solucoes.edp.com.br/blog/energia-nuclear/>
- [8] “Net zero needs nuclear energy: Tripling nuclear energy needs finance,” NEA. Accessed: Dec. 03, 2025. [Online]. Available: <https://www.oecd-neo.org/upload/docs/application/pdf/2023-12/financing.pdf>

- [9] “Repositórios Geológicos Profundos e Responsabilidade Nuclear,” NEA. Accessed: Dec. 02, 2025. [Online]. Available: [https://www.oecd-nea.org/jcms/pl\\_83247/deep-geological-repositories-and-nuclear-liability](https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_83247/deep-geological-repositories-and-nuclear-liability)
- [10] “A Quarta Geração e o sistema,” ROSATOM NEWSLETTER. Accessed: Dec. 13, 2025. [Online]. Available: <https://rosatomnewsletter.com/pt/2024/05/29/systemic-approach-to-generation-iv/>
- [11] “Pequenos reatores modulares (SMRs): desafios em segurança, gestão de resíduos e aceitação pública,” Ensaio Energético. Accessed: Dec. 13, 2025. [Online]. Available: <https://ensaioenergetico.com.br/pequenos-reatores-modulares-smrs-desafios-em-seguranca-gestao-de-residuos-e-aceitacao-publica/>
- [12] “Foto SMR.” Accessed: Dec. 13, 2025. [Online]. Available: [https://www.defesanet.com.br/e\\_nuclear/pequenos-reatores-modulares-smrs-e-o-renascimento-nuclear/](https://www.defesanet.com.br/e_nuclear/pequenos-reatores-modulares-smrs-e-o-renascimento-nuclear/)
- [13] “O que é fusão?,” ITER. Accessed: Dec. 03, 2025. [Online]. Available: <https://www.iter.org/fusion-energy/what-fusion>
- [14] “Foto Fusão Nuclear,” TodaMatéria. Accessed: Dec. 13, 2025. [Online]. Available: <https://www.todamateria.com.br/fusao-nuclear/>
- [15] “Vantagens da Fusão,” <https://www.iter.org/fusion-energy/advantages-fusion>. Accessed: Dec. 03, 2025. [Online]. Available: <https://www.iter.org/fusion-energy/advantages-fusion>
- [16] Leonam Guimarães, “Logística de Produção do Combustível Nuclear para Reatores de Fusão,” LinkedIn. Accessed: Dec. 03, 2025. [Online]. Available: <https://www.linkedin.com/pulse/log%C3%ADstica-de-produ%C3%A7%C3%A3o-do-combust%C3%ADvel-nuclear-para-fus%C3%A3o-guimar%C3%A3es-3fhfsf/>
- [17] “Fusão Nuclear: uma fonte de energia limpa,” ISQ. Accessed: Dec. 03, 2025. [Online]. Available: <https://www.isq.pt/energia/fusao-nuclear-energia-limpa/>
- [18] “A máquina,” ITER. Accessed: Dec. 03, 2025. [Online]. Available: <https://www.iter.org/machine>
- [19] “O Tao de Q.” Accessed: Dec. 04, 2025. [Online]. Available: <https://www.iter.org/node/20687/tao-q>
- [20] “Fusão nuclear é possível. Laboratório americano produziu energia ilimitada. ‘É um passo de gigante’, diz o físico Bruno Gonçalves,” Visão. Accessed: Dec. 05, 2025. [Online]. Available: <https://visao.pt/exameinformatica/noticias-ei/ciencia-ei/2022-12-13-fusao-nuclear-possivel-energia-ilimitada/>
- [21] “Foto movimento NIMBY.” Accessed: Dec. 13, 2025. [Online]. Available: <https://www.dreamstime.com/illustration/nimby.html>
- [22] “Emissões de dióxido de carbono provenientes da eletricidade,” World Nuclear Association. Accessed: Dec. 09, 2025. [Online]. Available: [https://world-nuclear.org/information-library/energy-and-the-environment/carbon-dioxide-emissions-from-electricity?utm\\_source=chatgpt.com](https://world-nuclear.org/information-library/energy-and-the-environment/carbon-dioxide-emissions-from-electricity?utm_source=chatgpt.com)
- [23] “Custos e benefícios de uma usina nuclear: investimento em construção e manutenção,” Renovables.blog. Accessed: Dec. 09, 2025. [Online]. Available: [https://renovables.blog/pt/blog/costos-y-beneficios-de-una-planta-nuclear-inversion-en-construccion-y-mantenimiento/#costos\\_de\\_construccion\\_de\\_una\\_planta\\_nuclear](https://renovables.blog/pt/blog/costos-y-beneficios-de-una-planta-nuclear-inversion-en-construccion-y-mantenimiento/#costos_de_construccion_de_una_planta_nuclear)
- [24] “Usinas de gás natural,” ATB. Accessed: Dec. 09, 2025. [Online]. Available: <https://atb-archive.nrel.gov/electricity/2019/index.html?t=cg>

# **NEUTRO À TERRA**

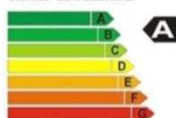
Revista Técnico-Científica | Nº3 | Abril 2009  
<http://www.neutroaterra.blogspot.com>

*"...Os assuntos relacionados com as instalações eléctricas, a domótica, os sistemas de segurança, as telecomunicações e a eficiência energética, particularmente na utilização da força motriz, merecem particular destaque nesta edição..."*

Doutor Beleza Carvalho



MAIS EFICIENTE



MENOS EFICIENTE

Eficiência  
Energética  
Pág. 6



Sistemas  
Segurança  
Pág. 12



Telecomunicações  
Pág. 18



Domótica  
Pág. 23



Máquinas  
Eléctricas  
Pág. 27



Instalações  
Eléctricas  
Pág. 37

## LIGAÇÃO DE CENTRAIS MINI-HÍDRICAS À REDE ELÉTRICA

### Resumo

Num contexto de crescente eletrificação da economia e de reforço da produção de energia a partir de fontes renováveis, as centrais mini-hídricas (CMH) assumem-se como uma solução eficiente para a geração distribuída de eletricidade, combinando reduzido impacto ambiental com elevada fiabilidade operacional. A integração destas centrais na rede elétrica exige, contudo, o cumprimento de requisitos técnicos e regulamentares relacionados com a qualidade da energia, estabilidade da tensão, controlo da frequência e coordenação dos sistemas de proteção. Neste artigo são analisadas as principais tecnologias de geração utilizadas em centrais mini-hídricas, os processos de ligação à rede elétrica e os desafios associados à sua operação, bem como as soluções técnicas adotadas para garantir um funcionamento seguro e eficiente. Como complemento à análise teórica, é apresentado o caso de estudo da Central Mini-Hídrica de Syaure Bhumi, no Nepal, que demonstra o impacto positivo da geração distribuída na melhoria do perfil de tensão e na redução das perdas da rede elétrica. Os resultados evidenciam que as centrais mini-hídricas podem constituir uma alternativa tecnicamente viável e economicamente atrativa para o aproveitamento sustentável dos recursos hídricos, contribuindo para uma rede elétrica mais resiliente, eficiente e descentralizada.

**Palavras-Chaves:** Centrais mini-hídricas, ligação à rede, geradores, geração distribuída.

### 1. Introdução

A crescente procura de energia elétrica e a necessidade urgente de descarbonização, tem conduzido a que as fontes renováveis assumam um papel importante nas políticas de desenvolvimento sustentável. A energia hidroelétrica é uma das principais fontes renováveis, uma vez que contribui com

aproximadamente 94% da produção total de energia renovável e quase 20% das necessidades energéticas globais. Tal deve-se às grandes centrais hidroelétricas construídas ao longo do último século [1].

A construção de grandes barragens enfrenta uma forte oposição devido aos seus impactos ambientais, a falta de grandes reservatórios, bem como aos elevados custos associados. Portanto, em vários países, não é viável construir centrais hidroelétricas devido a estas limitações [2].

As centrais mini-hídricas são centrais hidroelétricas com potência instalada até 10 MW são tipicamente a fio de água e não requerem grandes barragens nem grande caudal, apresentando reduzido impacto ambiental [2]. Além disso oferecem diversas vantagens, pois geralmente têm turbinas de menor inércia e sistemas de controlo mais simples, o que permite ligar e desligar rapidamente, isto significa que podem responder de forma rápida a picos de carga instantâneos, e quando dispõe de albufeira, ajustam o caudal disponível, o que é útil em períodos de ponta, pois aumentam a produção se houver água suficiente [3].

Contudo, injetar energia na rede traz vários desafios e levanta questões como a estabilidade da rede, o controlo da tensão, a presença de harmónicos, a coordenação das proteções e os custos de investimento.

Neste contexto este artigo aborda a classificação dos geradores usados, frequência e requisitos técnicos e regulamentares para ligação da central à rede elétrica portuguesa e os desafios e soluções das CMH, incluindo localização da central, estabilidade da rede em termos de tensão e perdas e sistemas de proteção e controlo [4].

Para ilustrar na prática, foi escolhido um caso de estudo de uma CMH em Syaure Bhumi no Nepal.

Este exemplo permite avaliar como tecnologias simplificadas podem operar de forma estável para diferentes cenários reais e testar a sua compatibilidade com os requisitos técnicos e normativos portugueses, servindo de modelo para pequenos projetos, aplicáveis a geração distribuída.

## 2. Classificação dos geradores em Centrais Mini-hídricas

O gerador é o componente responsável pela conversão da energia mecânica da turbina em energia elétrica. Nas centrais mini-hídricas ligadas à rede, estas máquinas, podem ser classificadas da seguinte forma:

### 2.1 Gerador de indução

O gerador de indução trifásico é a máquina elétrica mais utilizada, devido à simplicidade da sua construção, manutenção e à pequena exigência quanto a sistemas de controlo. Além disso, são capazes de operar em paralelo com a rede elétrica e, mediante sistemas adequados de compensação reativa, em funcionamento isolado [5].

Como estes geradores não têm um enrolamento de campo que permita criar a tensão nos seus terminais, é necessário ligar um banco de condensadores em paralelo para fornecer a corrente de magnetização, tal como é ilustrado na Figura 1.

A combinação entre o gerador de indução e os condensadores provoca o fenómeno de autoexcitação, que gera e estabiliza a tensão produzida pela máquina [6].

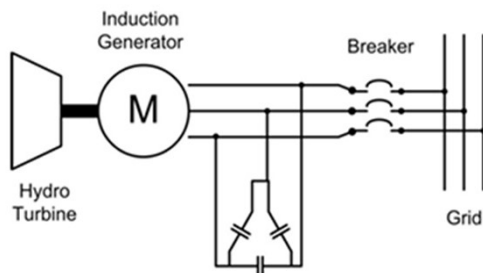


Figura 1. Esquema do gerador de indução[4]

### 2.2 Gerador síncrono

As mini-hídricas que utilizam geradores síncronos são consideradas as mais robustas, devido às tecnologias de controlo mais avançadas associadas a este tipo de máquina. No entanto, a utilização de geradores síncronos aumenta o custo de investimento inicial do sistema [5].

A sua principal vantagem em relação aos geradores de indução reside no facto de o AVR (Automatic Voltage Regulator) permitir o controlo do fator de potência, ou seja, fornece potência reativa à rede elétrica sempre que necessário, o que contribui para a melhor regulação da tensão [7]. O esquema desta configuração é apresentado na Figura 2.

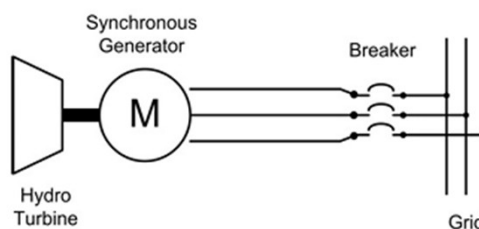


Figura 2. Esquema do gerador síncrono [4]

## 3. Integração das Centrais Mini-Hídricas na Rede Elétrica

### 3.1 Requisitos técnicos e regulamentares para ligação à rede

O processo de ligação à rede envolve várias entidades públicas e varia consoante a potência instalada da Central Mini-Hídrica (CMH). Para instalações com potência superior a 1 MW, é exigida uma Licença de Produção e Exploração, enquanto centrais iguais ou inferiores a 1 MW estão sujeitas a um regime simplificado de Registo Prévio [8]. Pelo ministério do ambiente intervém a APA - Agência Portuguesa do Ambiente, incluindo as ARH - Administrações de Região Hidrográfica, e as CCDR - Comissões de Coordenação e Desenvolvimento Regional fazem uma vistoria para garantir que o projeto e as medidas ambientais foram implementados corretamente.

Posto isto, a DGEG - Direção-Geral de Energia e Geologia e as DRE- Direções Regionais de Economia fazem uma vistoria em que verificam se a central está preparada para funcionar em segurança. Dada a complexidade das obras, a legislação prevê para estas centrais prazos mais alargados para a emissão da licença de exploração (até um limite máximo de 6 anos) comparativamente a outras fontes renováveis. Depois disto, emitem a licença de exploração [8].

Além destas entidades, laboratórios credenciados certificam os sistemas de medição de energia, enquanto a E-REDES verifica as proteções, o paralelo com a rede. Nesta fase, os encargos com a construção da ligação, desde a central até ao ponto de interligação na rede pública, são da responsabilidade do titular da licença. A E-REDES atribui então o código de ponto de entrega e formaliza-se o contrato [9].

A ligação à rede elétrica de distribuição está sujeita a condições técnicas e regulamentares definidas pela DGEG, que determinam o ponto de receção, o ramal, e a compatibilidade com a rede. Para efeitos de cálculo de capacidades na rede, a fonte hídrica distingue-se por considerar uma Potência Garantida Aparente de 30% da potência de ligação.

Os requisitos técnicos incluem a estabilidade da tensão no

ponto de ligação, gestão da energia reativa, segurança do sistema e do consumidor [9], [10]. As configurações de ligação das CMH variam consoante a tensão no ponto de ligação, integrando habitualmente subestações com transformadores de tomadas para regulação em vazio, seja em Alta Tensão (60 kV) ou Média Tensão (15 ou 30 kV) [9]. A figura 3 apresenta o fluxograma de todo o processo.

### 3.2. Desafios e soluções na integração das CMH na rede elétrica

A integração de Centrais Mini-Hídricas apresenta desafios devido à sua dimensão reduzida e à variabilidade do recurso hídrico. Para mitigar a instabilidade que resulta destas características, é necessário adotar uma abordagem que vai desde a seleção do local até à implementação de sistemas de proteção.

#### 3.2.1 Fator localização e Infraestrutura

O processo de integração de uma CMH começa na fase de projeto. A escolha da localização é um fator importante, uma vez que a produção depende diretamente do caudal disponível e da altura de queda. Escolher um local favorável permite não só maximizar a energia gerada, como também reduzir os custos associados às estruturas (canais e condutas) e minimizar os impactos ambientais[5].



Figura 3. Esquema do processo de licenciamento à ligação a rede elétrica[8]

A proximidade aos centros de consumo é igualmente importante. Se a instalação for demasiado afastada exige investimento em novas linhas de distribuição e transformadores, o que aumenta o custo global do projeto. Assim, o principal desafio inicial consiste em encontrar um ponto de equilíbrio entre o caudal do local e a infraestrutura elétrica necessária para a ligação à rede [11].

### 3.2.2 Estabilidade da rede: tensão e perdas

Após a ligação à rede, a variabilidade de produção da CMH coloca desafios à qualidade da energia. A frequência como depende do equilíbrio entre a potência produzida e a consumida. Para evitar oscilações, a solução técnica passa pelo controlo do binário no eixo do gerador síncrono (por via de um sistema governador) ou pela utilização de controladores eletrónicos de carga (ELC), estas soluções ajustam a produção em tempo real [12]. Em simultâneo, é necessário garantir a estabilidade da tensão e o fator de potência. Como a potência reativa não é energia útil e causa perdas, os operadores exigem a instalação de bancos de condensadores. Estes equipamentos como compensam o consumo de potência reativa, asseguram que a tensão se mantém dentro dos valores regulamentados [12], [13].

### 3.2.3 Proteção e Controlo da instalação

Para garantir a segurança da instalação face a falhas ou a desfasamentos, é essencial a instalação ter sistemas de proteção.

A proteção mecânica visa salvaguardar o sistema hidráulico contra velocidades ou caudais excessivos, enquanto a proteção elétrica atua sobre o gerador, quadro elétrico, linhas de distribuição. Atualmente, privilegia-se a utilização de relés numéricos baseados em microprocessadores. Ao contrário dos sistemas tradicionais, estes dispositivos integram múltiplas funções, como proteção contra sobretensão, assim como curto-circuitos e permite isolar rapidamente a parte afetada do sistema em caso de anomalia [14].

## 4. Caso de Estudo

O caso de estudo trata-se da ligação da Central Mini-Hídrica de Syaure Bhumi à rede elétrica nacional do Nepal. Com o objetivo de fornecer energia elétrica a zonas rurais do Nepal.

### 4.1 Caracterização da central mini-hídrica

A Central Mini-Hídrica de Syaure Bhumi possui uma turbina de 33 kW acoplada a um gerador síncrono de 50 kVA, que opera com um fator de potência de 0,8. A central é capaz de produzir 30 kW de potência ativa e utiliza o controlo da tensão via Regulador Automático de Tensão (AVR).

A ligação entre a central e o ponto de ligação à rede é feito por uma linha aérea de 60 metros de comprimento, cabo do tipo Rabbit (com secção de 30 mm<sup>2</sup>) [15].

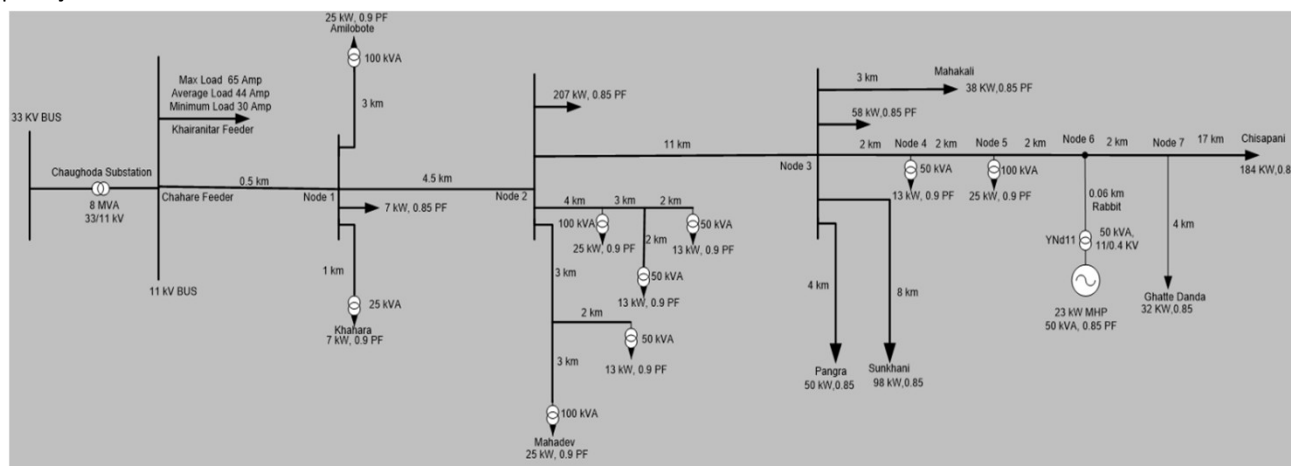


Figura 4. Esquema unifilar da rede elétrica do Nepal [15]

A Central liga-se a rede de distribuição de 11 kV, que conforme apresentado na Figura 4 trata-se de uma rede radial, cuja origem se encontra na Subestação de Chaughoda (33/11kV – 8 MVA) com o comprimento aproximado de 119 Km. Sendo que a central se encontra a 22 Km de distância da Subestação mais próxima [15].

## 4.2 Métodos do cenário do transito de potências

A avaliação da Central Mini-hídrica, apresentada na Figura 5, foi avaliada através da simulação de três cenários de carga: carga máxima (100%), carga média (60%) e carga mínima (45%). Esta análise permite avaliar a fiabilidade da ligação da rede principalmente a nível de tensão e perdas. Para efeito de estudo é assumido um cenário de injeção de potência de 23 kW [15].

### 4.2.1 Cenário de carga máxima 100%

Este é o cenário mais crítico, a rede apresenta uma carga total de 1989 kW. Antes da ligação à rede verificava-se uma tensão baixa no barramento 25 (ponto de ligação), de cerca de 0,938 p.u, que é inferior aos valores estáveis que se situam entre 0,95 e 1.05 p.u. No entanto ao ser injetada uma

potência ativa de 23 kW e reativa de 17,25 KVar pela CMH a tensão subiu para 0,944 p.u. Já no ponto mais afastado da rede, em Chisapani a tensão passou de 0,899 para 0,905 p.u. Relativamente a perdas, as perdas do sistema diminuiram de 92,4 kW para 85,5 kW, o que corresponde a uma redução de 6,9 kW [15].

### 4.2.2 - Cenário de carga média 60%

Para o cenário de carga média a rede opera com mais estabilidade, assim a mesma apresenta uma carga total de 1170 kW. De acordo com os dados do estudo, a tensão no barramento 25 aumentou de 0,9782 p.u. para 0,984 p.u. Já as perdas reduziram de 30,8 kW para 27,4 kW, que resulta em 3,4 kW [15].

### 4.2.3 - Cenário de carga mínima 45%

O último cenário apresenta uma carga total de 875 kW. Os dados do estudo mostram que a tensão no barramento 25 torna-se ainda mais estável aumentando de 0,9782 p.u. para 1,0036 p.u. Já as perdas passaram de 16,6 kW para 14,3 kW, o que representa uma redução de 2,3 kW [15]. O resumo dos resultados é apresentado na Tabela 1.

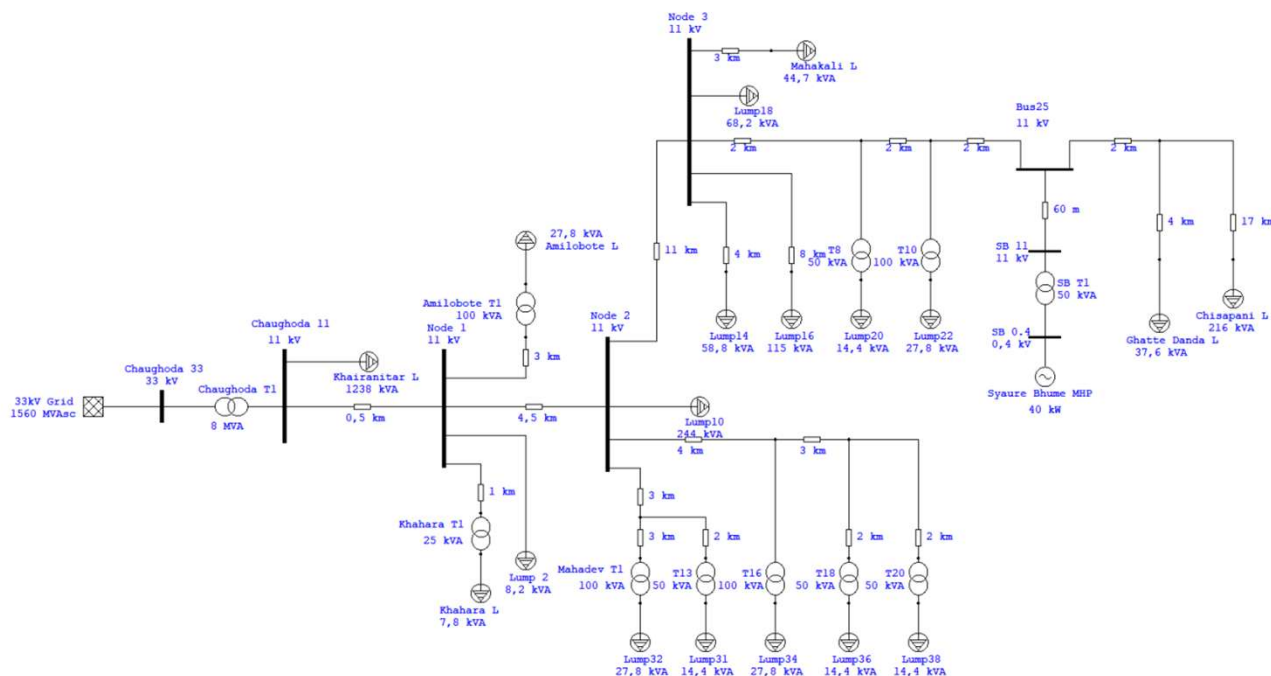


Figura 5. Esquema elétrico da rede no software [15]

Tabela 1 Resumo dos resultados de cada cenário

| Cenário de Carga     | Carga Total (kW) | Tensão no Barramento 25 (p.u.) |        | Perdas Totais (kW) |        | Redução de perdas (kW) |
|----------------------|------------------|--------------------------------|--------|--------------------|--------|------------------------|
|                      |                  | Antes                          | Depois | Antes              | Depois |                        |
| <b>Máximo (100%)</b> | 1989             | 0,938                          | 0,944  | 92,4               | 85,5   | 6,9                    |
| <b>Média (60%)</b>   | 1170             | 0,978                          | 0,984  | 30,8               | 27,4   | 3,4                    |
| <b>Mínima (45%)</b>  | 875              | 0,978                          | 1,003  | 16,6               | 14,3   | 2,3                    |

### 4.3 Proteção da instalação

Foi realizado uma análise de curto-circuito trifásico simétrico com o objetivo de calcular a corrente máxima de curto-circuito, no sistema de 11 kV e 0,4 kV e assim dimensionar a proteção da instalação. Os resultados da análise mostraram que a corrente máxima de curto-circuito ocorre no gerador de 0,4 kV, sendo de 2,2 kA. Já nos barramentos de 11 kV, as correntes máximas são baixas e variam entre 0,382 a 0,518 kA. Considerando isto, foram escolhidos aparelhos de média tensão com capacidade de interrupção de 12,5 kA [15].

## 5. Conclusões

A análise do caso de estudo permite concluir que: No cenário mais crítico, em carga máxima, a central atua de forma eficaz na mitigação das quedas de tensão e na redução de perdas, resultantes da maior circulação de corrente nas linhas. Este comportamento reforça a importância da geração distribuída nos períodos em que a rede se encontra mais fatigada. Nos períodos de carga de baixa procura, a central garante a estabilidade da rede, e torna as tensões próximas dos seus valores nominais. Deste modo, permite concluir que a central não se limita a maximizar a produção de energia, mas que se adapta ao comportamento da rede, nomeadamente as variações de procura, pelo que contribui para a melhoria do perfil de tensão e para a redução das perdas da rede. Os resultados demonstram que soluções tecnicamente simples, suportadas por sistemas adequados de controlo e proteção, podem garantir níveis satisfatórios de desempenho e estabilidade

A utilização de geradores de indução, apoiados por controladores eletrónicos de carga (ELC), é suficiente para garantir a estabilidade da rede. Isto é importante para situações onde os custos de investimento possam ser uma limitação. Os resultados permitem ainda concluir que a localização da rede e a sua capacidade de injetar potência ativa próxima dos locais de consumo contribui para o impacto positivo.

Em suma, o caso estudo comprova que a ligação de centrais mini-hídricas a rede, através de um sistema simples, produz resultados promissores que podem ser compatíveis com padrões de estabilidade e fiabilidade exigidas pelas normas europeias. Este resultado potencializa que soluções de baixo custo, possam servir de modelo em projetos de pequena escala, tornando-os investimentos atrativos para pequenos investidores e contribuindo para a otimização da rede.

### Referências Bibliográficas

- [1] M. De Matos, C. Correia, E. Electromecânica, D. João, P. Da, and S. Catalão, "Conversão de Energia em Centrais Mini-Hídricas: Estudo das Tecnologias e Determinação do Potencial Hidroelétrico Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em," 2009.
- [2] N. Agostinho and P. Leão, "MINI-HÍDRICAS," 2014.
- [3] K. Batinić, D. Golubović, S. Simić, and G. Orašanin, "Design of Pico Hydropower Plants for Rural Electrification," in *Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 42, Springer, 2019, pp. 397–404. doi: 10.1007/978-3-319-90893-9\_47.

- [4] 2018 International Symposium on Recent Advances in Electrical Engineering. IEEE, 2018.
- [5] D. De Sele1, "Centrais Mini--Hídricas (CMH)."
- [6] V. B. Murali Krishna and V. Sandeep, "Experimental Investigations on Loading Capacity and Reactive Power Compensation of Star Configured Three Phase Self Excited Induction Generator for Distribution Power Generation," *Distributed Generation and Alternative Energy Journal*, vol. 37, no. 3, pp. 725–748, 2022, doi: 10.13052/dgaej2156-3306.37316.
- [7] I. A. Ezenugu and C. S. Nwokonko, "Automatic Voltage Regulator Control System for Synchronous Generator," *Saudi Journal of Engineering and Technology*, vol. 9, no. 06, pp. 265–273, Jun. 2024, doi: 10.36348/sjet.2024.v09i06.004.
- [8] ANTÓNIO EIRA LEITÃO, "INTERLIGAÇÃO DAS PEQUENAS CENTRAIS HIDROELÉTRICAS COM A REDE ELÉCTRICA NACIONAL ANTÓNIO EIRA LEITÃO Eng.o Civil Hidroerg, projectos energéticos Lisboa-Portugal," Lisboa, 2013.
- [9] "E-REDES."
- [10] "Decreto-Lei n.o 15/2022 - Estabelece a organização e o funcionamento do Sistema Elétrico Nacional.," *Diário da República*, 1.a série, n.o 10.
- [11] A. Paschetto, C. Caselle, and S. M. R. Bonetto, "A GIS-based methodology for hydropower potential assessment: balancing energy production and ecosystem sustainability," *Environmental Challenges*, vol. 20, Sep. 2025, doi: 10.1016/j.envc.2025.101236.
- [12] R. R. Singh, B. A. Kumar, D. Shruthi, R. Panda, and C. T. Raj, "Review and experimental illustrations of electronic load controller used in standalone Micro-Hydro generating plants," Oct. 2018, Elsevier B.V. doi: 10.1016/j.jestch.2018.07.006.
- [13] "CHAPTER-6 HYDRO-TURBINE GOVERNING SYSTEM (Reviewed by Dr. R. Thapar)."
- [14] E. Harpreet and K. Channi, "A Monthly Double-Blind Peer Reviewed Refereed Open Access International e-Journal-Included in the International Serial Directories REVIEW OF MICROPROCESSOR BASED PROTECTIVE RELAYS A Monthly Double-Blind Peer Reviewed Refereed Open Access International e-Journal-Included in the International Serial Directories," vol. 3, no. 2, 2015, [Online]. Available: <http://www.ijmra.us>
- [15] "Study on Project to Grid and Project to Project Interconnection REPORT."

Nº4 · 2º semestre de 2009 · ano 2 · ISSN: 1647-5496



# NEUTRO À TERRA

Revista Técnico-Científica | Nº4 | Outubro 2009  
<http://www.neutroaterra.blogspot.com>

2  
ANO  
2011



Instalações  
Eléctricas  
Pág. 5



Máquinas  
Eléctricas  
Pág. 13



Telecomunicações  
Pág. 23



Segurança  
Pág. 27



Energias  
Renováveis  
Pág. 33



Domótica  
Pág. 41



Eficiência  
Energética  
Pág. 47

# SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM BATERIAS LIGADAS À REDE ELÉTRICA COM POSSIBILIDADE DE PRESTAÇÃO DE SERVIÇOS AUXILIARES

## RESUMO

As preocupações climáticas e o roteiro para a neutralidade carbónica estão a ter um impacto profundo no setor energético global, impulsionando a integração de fontes de energia renováveis, nomeadamente a solar fotovoltaica e a eólica. A natureza intermitente e não despachável destes recursos renováveis coloca desafios à gestão da rede elétrica, em particular no que diz respeito ao equilíbrio entre produção e consumo.

O armazenamento de energia em baterias estacionárias surge como uma solução promissora e em franca expansão, que permite deslocar a energia gerada em períodos de menor consumo para períodos de maior necessidade energética. Quando implementados a larga escala, estes sistemas de armazenamento, também designados por *Battery Energy Storage Systems* (BESS), podem desempenhar serviços de suporte à rede (regulação de frequência e controlo de tensão), dotando-a de maior flexibilidade na sua operação. A integração dos BESS na rede, bem como a sua capacidade de prestação destes serviços, está dependente da utilização de conversores eletrónicos de potência adequados.

Neste artigo, é introduzido o inversor de interface à rede, ou *Voltage Source Converter* (VSC), na designação anglo-saxónica, um conversor de potência bidirecional que permite assegurar a interface entre o BESS e a rede. Mediante um método de controlo adequado, nomeadamente o controlo desacoplado de corrente baseado no referencial síncrono  $dq$ , é possível regular de modo bidirecional e independente os fluxos de potência ativa e reativa entre o conversor e a rede. Partindo de um protótipo desenvolvido laboratorialmente, é demonstrada a capacidade de operação do VSC em múltiplos quadrantes de potência, bem como a sua rápida velocidade de resposta a alterações nos *setpoints* de potência ativa e reativa.

## 1. Introdução

### 1.1 Princípio de Funcionamento

Um VSC trifásico de interface à rede é constituído por três braços, cada um com dois semicondutores totalmente controláveis (Figura 1). No lado AC do conversor, cada uma das fases inclui uma indutância, o que permite assegurar o seu funcionamento como retificador e filtrar os harmónicos das correntes que circulam entre a rede e o VSC.

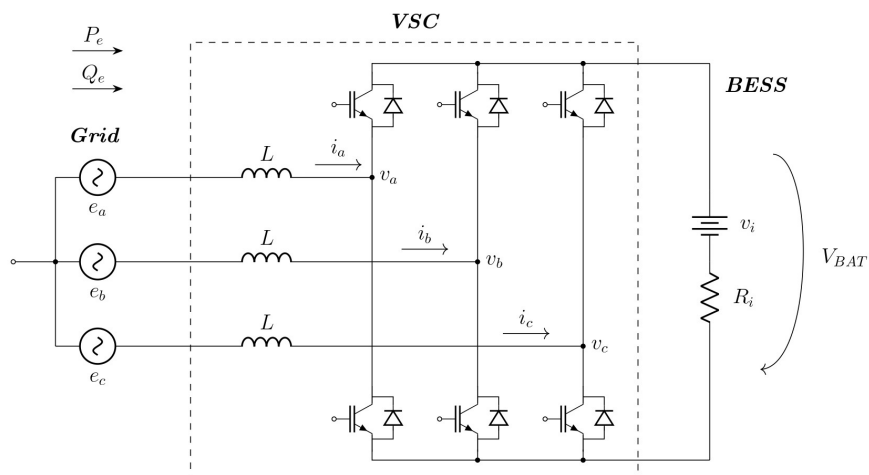


Figura 1 – Voltage Source Converter Trifásico

Partindo da comutação a altas frequências (tipicamente na ordem das dezenas de kHz) dos semicondutores de cada braço, é possível manipular/controlar as tensões produzidas no conversor. O trânsito da potência ativa e potência reativa é definido pela interação entre as tensões da rede ( $e_a$ ,  $e_b$  e  $e_c$ ) e as componentes fundamentais das tensões produzidas no conversor ( $v_a$ ,  $v_b$  e  $v_c$ ). Estas componentes fundamentais são em tudo semelhantes às tensões da rede, existindo apenas ligeiros desvios de amplitude e fase face às mesmas (tipicamente inferiores a 2-3% em amplitude e a 3° em fase).

Ao passo que a potência ativa é transferida entre a rede e o BESS, a potência reativa circula exclusivamente entre a rede e o lado AC do VSC. A amplitude e o sentido das potências ativa e reativa são parâmetros ajustáveis mediante referências de controlo independentes. A Figura 2 apresenta o modelo equivalente do sistema, detalhando a relação entre as tensões da rede e as componentes fundamentais das tensões geradas no lado AC do VSC.

Admitindo, portanto, dois sistemas trifásicos equilibrados interligados por meio de uma indutância, as potências ativa e reativa (vistas da perspetiva da rede) são descritas por [1]:

$$\begin{cases} P_e = \frac{-E \cdot V \cdot \sin \delta}{X_L} \\ Q_e = \frac{E^2 - E \cdot V \cdot \cos \delta}{X_L} \end{cases}$$

em que:

$P_e$  – potência ativa vista da perspetiva da rede;

$Q_e$  – potência reativa vista da perspetiva da rede;

$E$  – valor de pico das tensões simples da rede;

$V$  – valor de pico das tensões simples produzidas no VSC;

$X_L$  – reatância indutiva;

$\delta$  – desfasamento entre as tensões da rede e as tensões produzidas no VSC ( $\delta = \theta_{VSC} - \theta_e$ ).

Do conjunto de equações anterior, é perceptível que os fluxos de potência ativa e reativa são essencialmente definidos, respetivamente, pelo desfasamento entre as tensões da rede e as tensões produzidas no conversor e pela amplitude relativa de ambas. Nesta perspetiva, tomando como referência a fase e o módulo das tensões da rede, será possível manipular o fluxo de potências adiantando/atrasando as tensões produzidas no VSC e aumentando/diminuindo ligeiramente a sua amplitude.

Importante notar que a alteração da amplitude  $V$  ou do desfasamento  $\delta$  produz alterações tanto na potência ativa, como na potência reativa. Verifica-se, portanto, uma interdependência entre ambas as potências. A mudança de referencial, sustentada pelas transformadas matemáticas de Clarke e Park, permite facilitar a análise e o controlo do sistema, tendo em vista a simplificação do controlo com o desacoplamento das potências ativa e reativa.

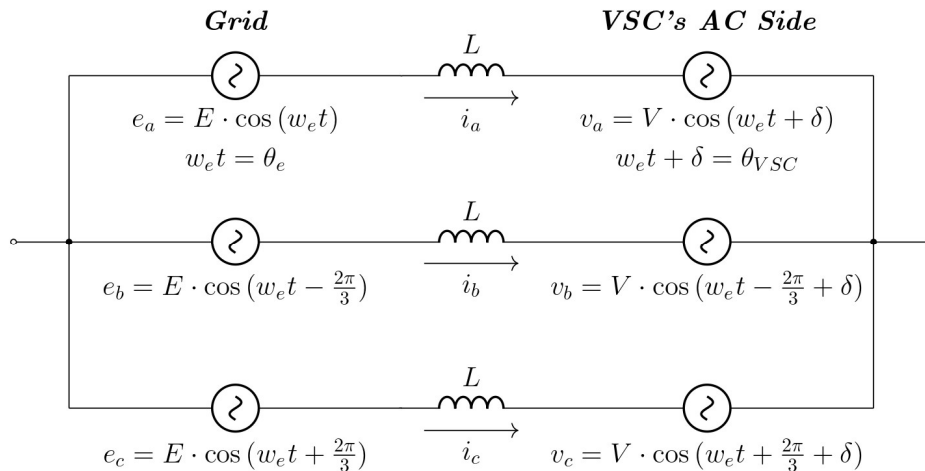


Figura 2 - Interação entre as Tensões da Rede e as Tensões Produzidas no VSC

## 1.2 Sincronismo com a rede

A transformada de Clarke, também designada por transformada  $\alpha\beta$ , converte um referencial trifásico fixo (abc) num referencial igualmente fixo, contudo, ortogonal e de apenas duas fases ( $\alpha\beta$ ). Esta redução dimensional é efetuada projetando os três vetores de tensão abc segundo os eixos  $\alpha$  e  $\beta$  (Figura 3). Aplicando a transformada de Clarke às tensões da rede, é obtido o vetor espacial  $\vec{E}$ . Este é um vetor que agrega informação quanto às três tensões da rede e que gira, em sentido anti-horário, à velocidade angular da rede ( $\omega_e = 2\pi f_e$ ).

A transformada de Park, ou transformada  $dq$ , converte o referencial  $\alpha\beta$  num novo referencial ortogonal ( $dq$ ), que gira em sincronismo com o vetor  $\vec{E}$  (Figura 3). Sob a condição do eixo direto (d) ser, a todo o momento, coincidente com o vetor  $\vec{E}$ , diz-se que o conversor está sincronizado com a rede. Desta forma, é possível tomar as tensões da rede como referência para o sistema de controlo, bem como operar com grandezas essencialmente DC, dada a adoção de um referencial síncrono. O controlo do fluxo de potências passa por produzir no conversor um vetor espacial  $\vec{V}$  com fase e amplitude ligeiramente distintas de  $\vec{E}$ , de acordo com o conjunto de equações anteriormente apresentado (Figura 4).

De notar que a condição de sincronismo exige o conhecimento do ângulo de fase da rede ( $\theta_e$ ). A estimação deste ângulo, bem como da frequência da rede, é tipicamente efetuada por meio de uma *Phase-Locked Loop* (PLL).

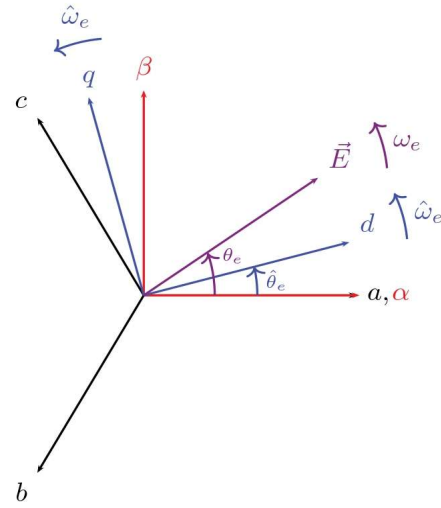


Figura 3 - Referenciais abc,  $\alpha\beta$  e dq

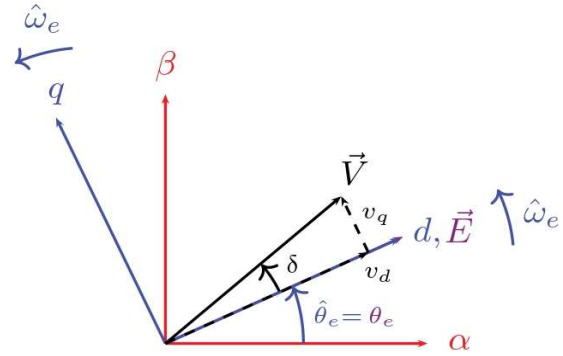


Figura 4 - Vetores Espaciais  $\vec{E}$  e  $\vec{V}$

Este é um mecanismo de controlo em malha fechada que, partindo da mudança de referencial  $abc-dq$  das tensões da rede, visa determinar o ângulo que anula a componente em quadratura (q) do vetor  $\vec{E}$  (Figura 5). Sempre que tal se verificar, o conversor está sincronizado com a rede (eixo d coincidente com o vetor  $\vec{E}$ ).

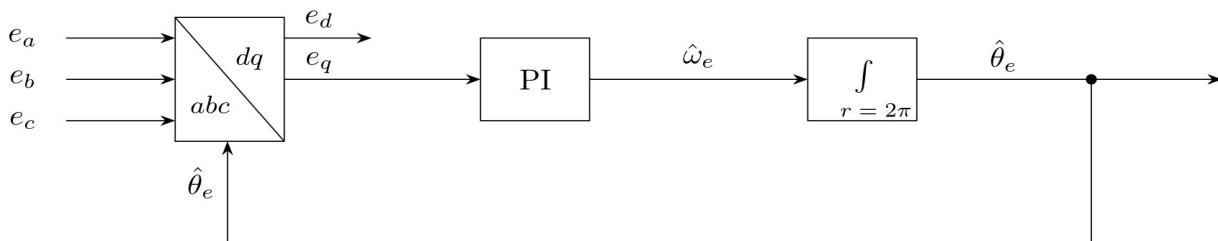


Figura 5 - Modelo Genérico de uma PLL

A Figura 6 clarifica a atuação da PLL. Partindo da medição das tensões da rede, são inicialmente calculadas as componentes  $\alpha\beta$  do seu vetor espacial  $\vec{E}$ . Posteriormente, com base no ângulo de fase estimado da rede, é definido o referencial síncrono  $dq$ . Como é possível notar, a adoção deste referencial permite operar com grandezas essencialmente DC, como é o caso das componentes  $e_d$  e  $e_q$ .

Assegurado o sincronismo entre o conversor e a rede ( $e_q = 0$  e  $e_d = E$ ), as potências ativa e reativa sob o referencial  $dq$  são definidas por [1], [2]:

$$\begin{cases} P_e = \frac{3}{2} \cdot E i_d \\ Q_e = -\frac{3}{2} \cdot E i_q \end{cases}$$

em que:

$P_e$  – potência ativa vista da perspectiva da rede;

$Q_e$  – potência reativa vista da perspectiva da rede;

$\frac{3}{2}$  – fator decorrente da mudança de um referencial trifásico (abc) para um referencial bifásico ( $dq$ );

$E$  – valor de pico das tensões simples da rede;

$i_d, i_q$  – componentes  $dq$  das correntes de fase.

Partindo do conjunto de equações anterior, é perceptível que os fluxos de potência ativa e reativa são independentes e proporcionais a  $i_d$  e  $i_q$ , respectivamente. Sendo possível, através do sistema de controlo e das tensões produzidas no conversor, controlar  $i_d$  e  $i_q$  individualmente, será também possível ajustar isoladamente as potências ativa e reativa absorvidas/fornecidas pela rede.

A Figura 7 caracteriza a relação entre as correntes nas três fases do conversor e as respetivas componentes  $dq$ .

Neste exemplo concreto, a componente  $i_d$  acompanha a envolvente (pico) das correntes trifásicas. A componente  $i_q$  é, por sua vez, nula, o que reflete a ausência de fluxo de potência reativa.

De notar que o valor de pico das correntes trifásicas (módulo do vetor espacial das correntes) é dado por  $i_{abc(pico)} =$

$\sqrt{(i_d)^2 + (i_q)^2}$ , coincidindo neste caso particular com o valor absoluto de  $i_d$ .

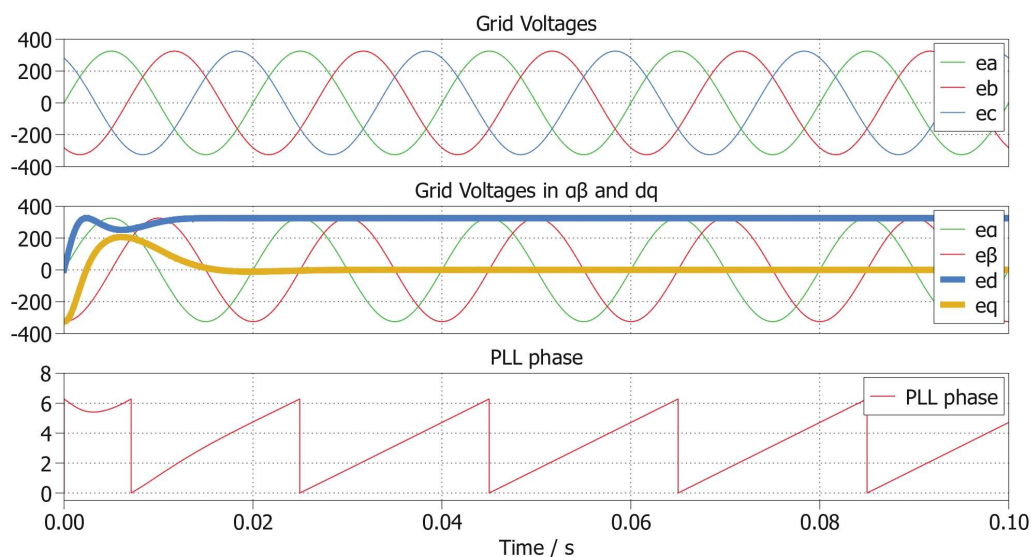


Figura 6 - Sincronismo com a Rede

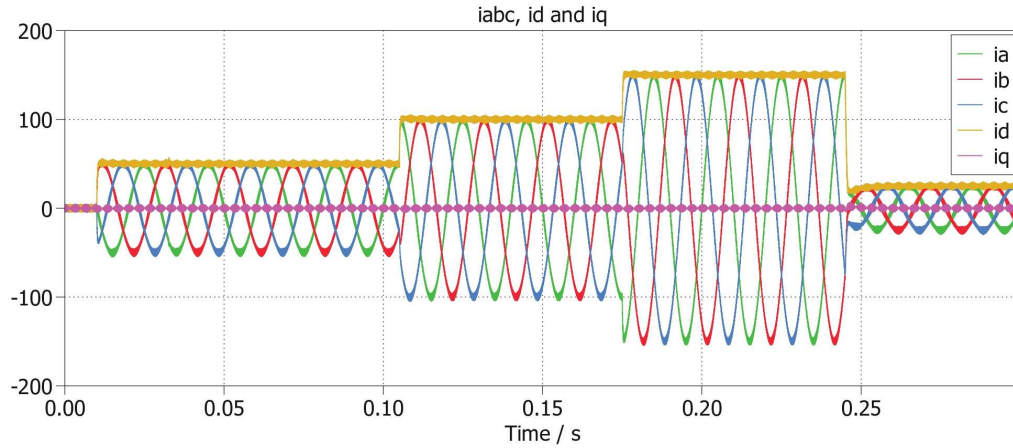


Figura 7 - Correntes em abc e dq

Na Figura 8, é apresentado o esquema geral de potência e controle do VSC. Inicialmente, partindo do fluxo de potências desejado, são definidas correntes de referência  $i_d^*$  e  $i_q^*$ . O processo de controle passa por fazer com que as correntes reais  $i_d$  e  $i_q$  igualem as respectivas correntes de referência  $i_d^*$  e  $i_q^*$ . Para que tal se verifique, deverão ser geradas, no conversor, tensões  $v_d$  e  $v_q$  apropriadas, de modo a que novas correntes  $i_d$  e  $i_q$  (idealmente  $i_d^*$  e  $i_q^*$ ) sejam impostas no circuito.

Embora o VSC seja um sistema intrinsecamente acoplado, no qual as correntes  $i_d$  e  $i_q$  se influenciam mutuamente, o método de controle desacoplado permite, através da definição das tensões  $v_{dq}$  a produzir no VSC, anular a influência que a alteração de uma das componentes exerce sobre a outra. Este método é baseado na compensação *feedforward* dos termos de acoplamento introduzidos pelo referencial síncrono *dq*, permitindo um controle independente de  $i_d$  e  $i_q$  [3]. Deste modo, alterações no fluxo de potência ativa não interferem no fluxo de potência reativa, e vice-versa.

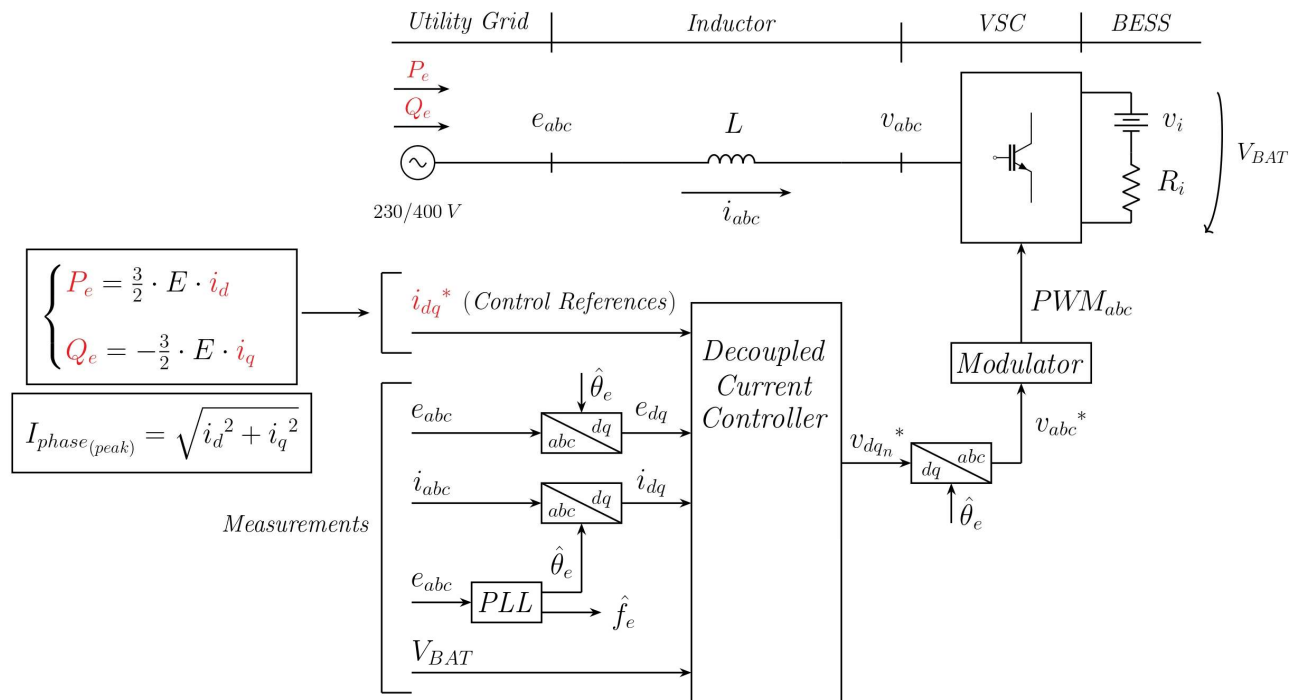


Figura 8 – Esquema Geral de Potência e Controle do VSC

A Figura 9 apresenta o resultado da simulação do VSC, mediante diferentes correntes de referência  $i_d^*$  e  $i_q^*$ . Por questões de simplicidade de visualização, apenas são exibidas as formas de onda da tensão e da corrente de uma das fases da rede.

Como é possível constatar, a tensão medida aos terminais da bateria acompanha o formato da corrente  $i_d$ , responsável pela definição do fluxo de potência ativa. Sempre que  $i_d$  é positiva, a rede fornece potência ativa à bateria (tensão e corrente da rede em fase), pelo que esta carrega e a tensão medida aos seus terminais aumenta. Por outro lado, quando  $i_d$  é negativa, é a bateria quem fornece potência ativa à rede (tensão e corrente da rede em oposição de fase), descarregando.

No que diz respeito à corrente  $i_q$ , esta é responsável por definir o fluxo de potência reativa que é transferida entre a

rede e o lado AC do VSC. Sempre que  $i_q$  é positiva, o VSC fornece potência reativa à rede, atuando, portanto, como carga capacitiva (corrente da rede em avanço face à tensão).

Por outro lado, quando  $i_q$  é negativa, é a rede quem fornece potência reativa ao VSC, pelo que este atua como uma carga indutiva (corrente da rede em atraso face à tensão).

É importante realçar não só a rápida velocidade de resposta do VSC (tipicamente inferior a  $\frac{1}{4}$  do ciclo da rede) perante diferentes correntes de referência, mas também a efetividade do controlo desacoplado de potências. Como é possível notar na Figura 9, o efeito da alteração do fluxo de potência reativa na tensão medida aos terminais da bateria é praticamente inexistente, o que permite ao VSC injetar ou absorver potência reativa da rede sem comprometer o processo de carga/descarga da bateria.

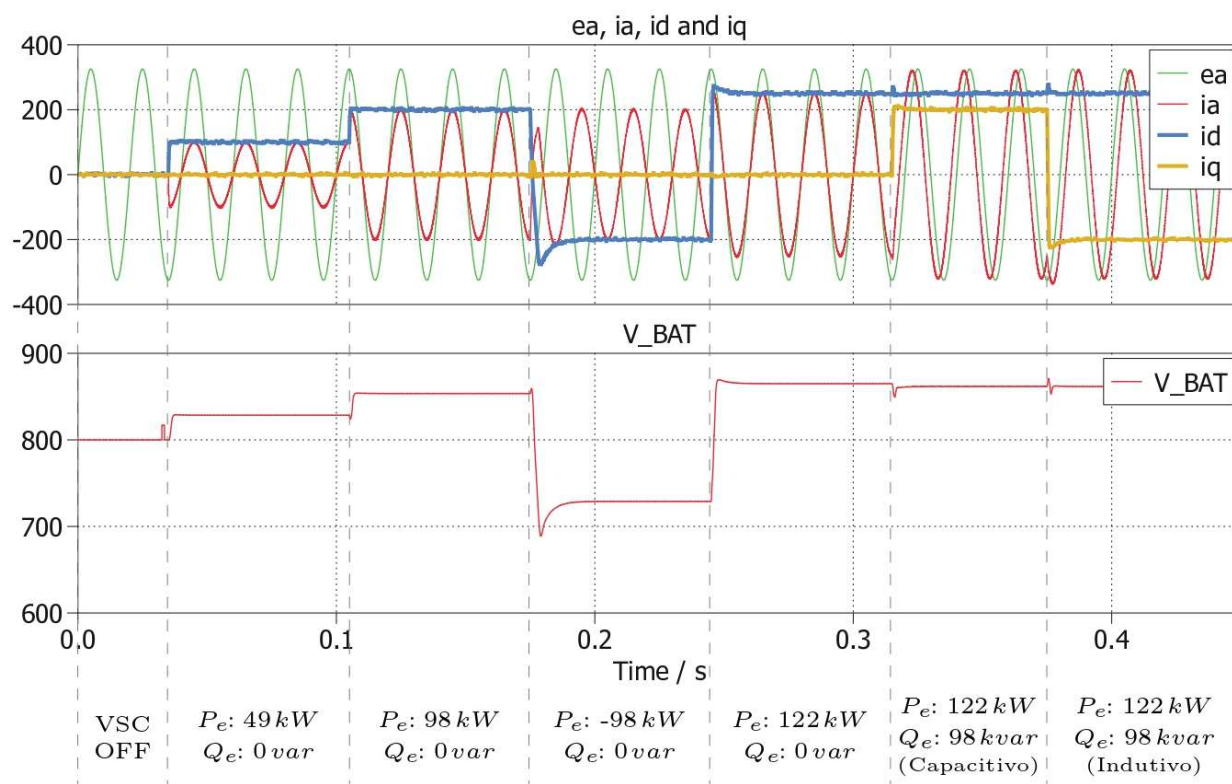


Figura 9 - Simulação do VSC

Ao passo que o fluxo de potência ativa desempenha um papel central na regulação da frequência da rede (determinada pelo balanço entre produção e consumo), o nível de tensão é um parâmetro que depende essencialmente da disponibilidade local de potência reativa [4], [5]. Uma vez que os VSCs permitem controlar simultaneamente o fluxo de potência ativa e o FP imposto à rede, a utilização alargada deste tipo de conversores surge como uma solução viável para a prestação de serviços de sistema, como a regulação da frequência e o controlo de tensão [6], [7].

## 2. Protótipo Laboratorial

O desempenho do VSC é também avaliado em contexto prático, através do protótipo laboratorial de baixa tensão exibido na Figura 10 [1]. O BESS é formado por três baterias de chumbo de 12 V conectadas em série, o que perfaz uma tensão nominal aos seus terminais de 36 V. Atendendo às características do conversor trifásico utilizado e do nível de tensão do barramento DC, as tensões da rede foram reduzidas, com recurso a um autotransformador trifásico e a um conjunto de três transformadores monofásicos abaixadores, para um valor de pico de 10 V.

## 3. Resultados e Discussão

Mediante a atribuição de diferentes valores às correntes de referência  $i_d^*$  e  $i_q^*$ , são apresentados alguns exemplos de operação do VSC sob regimes de potência distintos. Para tal, é analisada a forma de onda da tensão e da corrente de uma das fases da rede. Por forma a eliminar ruído de alta frequência, ou *Eletromagnetic Interference* (EMI), e melhorar a clareza da forma de onda apresentada, é utilizado um filtro passa-baixo na visualização da tensão da rede no osciloscópio.

Inicialmente, na Figura 11, é destacado o funcionamento do VSC sob o controlo exclusivo da potência ativa. Dependendo da frequência da rede, o VSC poderá atuar como: retificador, consumindo potência ativa da rede e carregando as baterias (adequado a momentos em que a frequência da rede é superior à nominal); ou inversor, fornecendo potência ativa à rede e descarregando as baterias (adequado a momentos em que a frequência da rede é inferior à nominal).

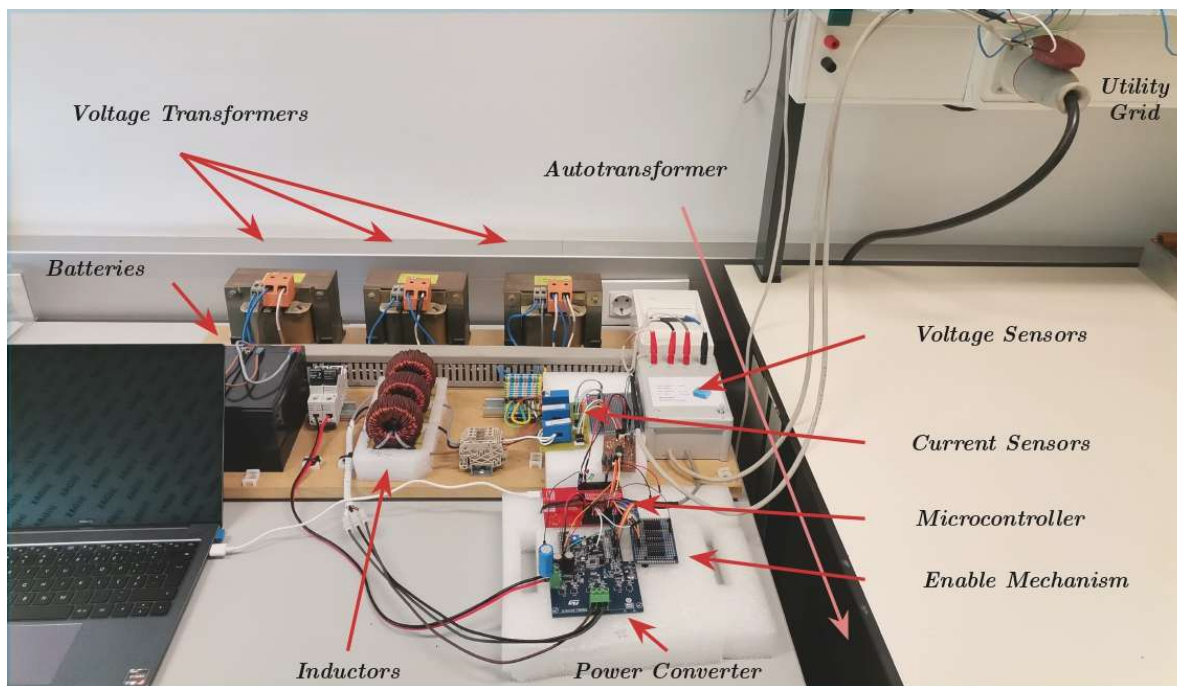
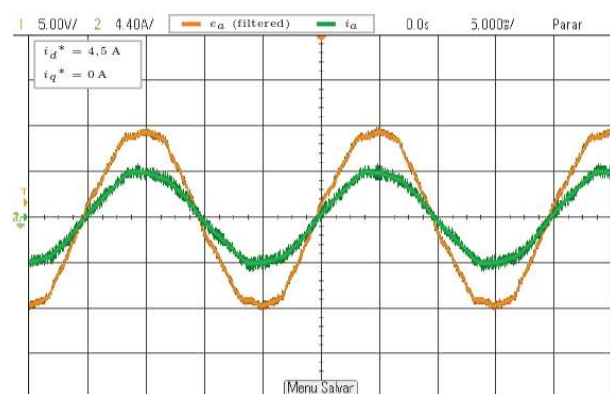
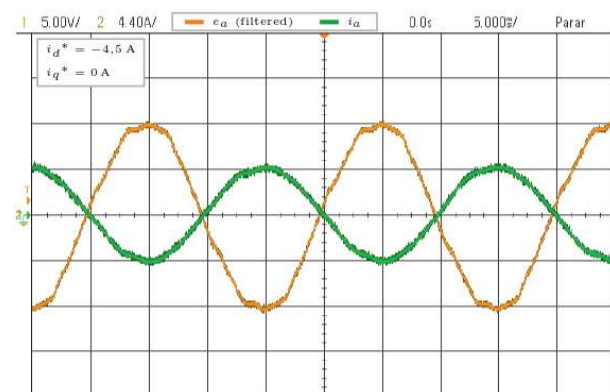


Figura 10 - Protótipo Laboratorial

Independentemente do controlo da potência ativa, o FP imposto pelo VSC à rede pode ser regulado. Na Figura 12, é apresentada a atuação do VSC como retificador, sob dois FP distintos, indutivo e capacitivo. Um FP indutivo é caracterizado pela absorção de potência reativa por parte do conversor, o que permite reduzir o nível de tensão da rede caso este exceda o nominal. Por outro lado, um FP capacitivo, caracterizado pela injeção de potência reativa na rede pelo conversor, contribui para o aumento do nível de tensão da rede sempre que este for inferior ao nominal. Embora neste exemplo o VSC atue como retificador, o mesmo é também válido aquando da operação como inversor. O conversor pode ainda realizar o controlo exclusivo da potência reativa.

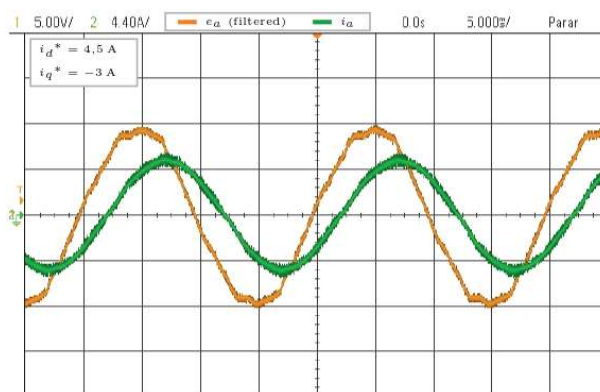


(a)

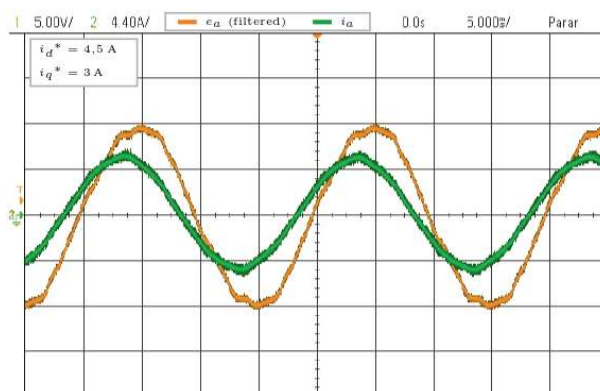


(b)

Figura 11 - Operação do VSC como (a) Retificador e (b) Inversor



(a)



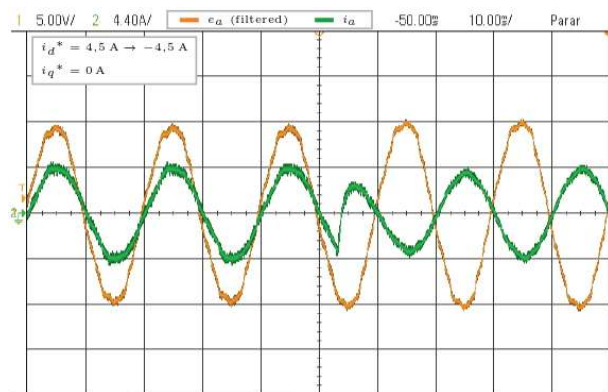
(b)

Figura 12 - Operação do VSC como Retificador com FP (a) Indutivo e (b) Capacitivo

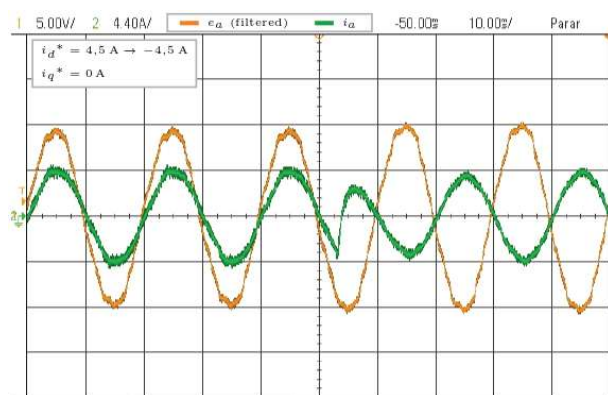
De realçar a qualidade da forma de onda da corrente, que se aproxima de uma senoide perfeita.

Para além da flexibilidade de operação nos vários quadrantes de potência, a rapidez de resposta do VSC é também um fator que viabiliza a sua participação em serviços de suporte à rede elétrica.

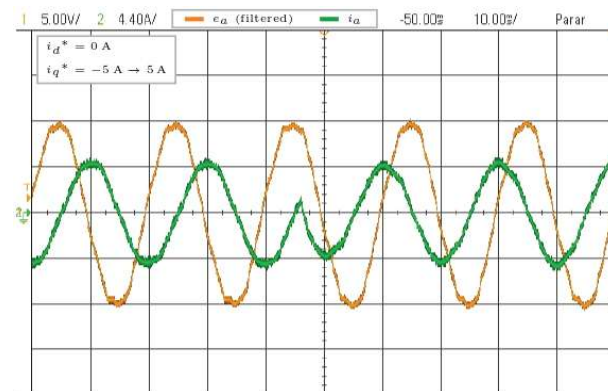
Na Figura 13, são apresentadas diferentes respostas ao degrau do conversor, quer em termos de potência ativa, quer potência reativa. Como é possível notar, o tempo de resposta do conversor é tipicamente inferior a 5 ms ( $\frac{1}{4}$  do ciclo da rede).



(a)



(b)



(c)

Figura 13 – Transitórios (a) Carga/Descarga das Baterias, (b) FP Capacitivo/Indutivo e (c) Absorção/Injeção Exclusiva de Potência Reativa

Apesar da boa dinâmica de resposta do VSC perante ações de controlo relativas à alteração dos *setpoints* de potência ativa e potência reativa ( $i_d^*$  e  $i_q^*$ , respetivamente), a sua

capacidade de prestação de serviços auxiliares está também dependente da deteção e medição de eventuais desvios na frequência e tensão da rede, o que introduz um atraso adicional de processamento. Este atraso de medição requer a avaliação de, pelo menos, alguns ciclos da rede, normalmente 100-200 ms no caso concreto da medição de frequência [8].

A estratégia de mitigação destes desvios depende da arquitetura de controlo adotada, que pode ser baseada numa abordagem descentralizada, centralizada ou mista [9]. No caso da ação descentralizada, os VSCs conectados à rede operam de forma autónoma, ajustando os *setpoints* de potência ativa e reativa com base em medições locais da frequência e tensão da rede, respetivamente. Esta resposta local, muitas vezes baseada em algoritmos de *P/Q droop control*, permite uma ação rápida na presença de anomalias na rede. No entanto, a falta de comunicação entre os conversores pode causar conflitos, limitando a coordenação e a estabilidade geral do sistema. Por outro lado, a abordagem centralizada segue uma arquitetura hierárquica. As ações de controlo a serem tomadas são definidas pelo operador do sistema, que transmite os *setpoints* de potência ativa e reativa aos VSCs. Embora a operação centralizada garanta uma resposta globalmente otimizada entre os vários VSCs, atrasos de comunicação entre o operador do sistema e os conversores são inevitavelmente introduzidos. Neste contexto, a seleção de redes de comunicação de baixa latência, como fibra ótica, combinada com a implementação de estratégias de compensação de atrasos, permite mitigar os efeitos adversos dos atrasos de comunicação. O atraso permitido de ponta a ponta (incluindo medição, comunicação e resposta) depende da arquitetura do sistema de energia e pode normalmente atingir até 300-500 ms sem comprometer significativamente a estabilidade do sistema [10]. Normalmente, é empregue uma combinação de ambas as abordagens, o que permite obter um equilíbrio entre a (rápida) resposta local dos VSCs e a coordenação geral do sistema elétrico, assegurando a sua estabilidade e qualidade de operação [9].

#### 4. Conclusão

A transição energética impõe desafios acrescidos à gestão da rede elétrica. Os sistemas de armazenamento de energia a baterias, quando associados a conversores de potência adequados, como os VSCs, emergem como uma solução promissora no contexto da prestação de serviços de suporte à rede. Dada a possibilidade de controlo independente do fluxo de potência ativa e de potência reativa, estes sistemas, para além da sua função primária de armazenamento de energia em períodos de excesso de produção, podem atuar quer no âmbito da regulação da frequência, quer no controlo do nível de tensão, conferindo à rede maior estabilidade e resiliência.

Os resultados experimentais confirmam a capacidade de operação do VSC sob distintos quadrantes de potência, boa qualidade da forma de onda das correntes da rede e, ainda, uma boa dinâmica de resposta do conversor a alterações nas referências de potência. Ao passo que o controlo descentralizado permite responder prontamente a desvios de frequência e tensão da rede, o controlo centralizado assegura a coordenação entre múltiplos VSCs. Por forma a garantir a qualidade de operação do sistema elétrico, os efeitos decorrentes dos atrasos de medição e comunicação deverão ser devidamente acautelados.

#### Referências

- [1] A. F. D. D. Amorim, «Desenvolvimento de um Voltage Source Converter de Interface à Rede para Sistemas de Armazenamento de Energia a Baterias», jul. 2025. [Online]. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10400.22/30349>
- [2] R. M. M. de Brito, «Power Generation System for Series Hybrid Electric Vehicles», jul. 2015. [Online]. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/99184>
- [3] A. Lunardi, L. F. N. Lourenço, E. Munkhchuluun, L. Meegahapola, e A. J. S. Filho, «Grid-Connected Power Converters: An Overview of Control Strategies for Renewable Energy», *Energies*, vol. 15, n.o 11, jun. 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/en15114151>.
- [4] J. A. B. Carvalho, «Controlo dos sistemas elétricos de energia», *Neutro À Terra*, pp. 5-17 Páginas, nov. 2021, doi: <https://doi.org/10.34630/neutroaterra.vi24.4408>.
- [5] P. S. Kundur, *Power system stability and control*, Nachdr. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [6] O. Tasneem, H. Tasneem, e X. Xian, «Lithium-ion Battery Technologies for Grid-scale Renewable Energy Storage», *Res.*, vol. 2, n.o 2, p. 100297, jun. 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.nexres.2025.100297>.
- [7] M. M. Babiker, K. H. Al Hosani, M. S. El Moursi, e A. S. Al Sumaiti, «Integration of Multi-Function BESS Based on Coordination Strategy to Simultaneously Support Multiple Ancillary Services», em 2024 6th International Conference on Smart Power & Internet Energy Systems (SPIES), dez. 2024, pp. 445–450. doi: <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1109/SPIES63782.2024.10983722>.
- [8] «Frequency Measurement Requirements and Usage», ENTSO-e, jan. 2018. [Online]. Disponível em: [https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/SOC%20documents/Regional\\_Groups\\_Continental\\_Europe/2018/TF\\_Freq\\_Meas\\_v7.pdf](https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/SOC%20documents/Regional_Groups_Continental_Europe/2018/TF_Freq_Meas_v7.pdf)
- [9] O. F. Rodriguez-Martinez, F. Andrade, C. A. Vega-Penagos, e A. C. Luna, «A Review of Distributed Secondary Control Architectures in Islanded-Inverter-Based Microgrids», *Energies*, vol. 16, n.o 2, jan. 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/en16020878>.
- [10] S. Ghimire, V. “Mani” Venkatasubramanian, e G. Torresan, «Impact of communication delay and sampling on small-signal stability of IBR-rich power systems», *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 174, p. 111502, jan. 2026, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2025.111502>.

## LISTA DE AUTORES:

**André Filipe Dias de Amorim**

1201433@isep.ipp.pt

Aluno do curso de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia, Instituto Superior de Engenharia do Porto

**Carolina de Almeida Cosa**

Médica interna de 2º ano de Medicina Geral e Familiar na USF Infante D Henrique, Viseu

**Catarina Magalhães Silva**

Médica interna de 4º ano de Medicina Geral e Familiar na USF Infante D Henrique, Viseu

**João Filipe Tomé Pires**

1220821@isep.ipp.pt

Aluno do curso de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia, Instituto Superior de Engenharia do Porto

**José António Beleza Carvalho**

jbc@isep.ipp.pt

Professor Coordenador, Instituto Superior de Engenharia do Porto

**Maria José Almeida**

Médica Assistente Graduada em Medicina Geral e Familiar na USF Infante D Henrique, Viseu

**Nuno André Falcão Coutinho Vicente**

1180673@isep.ipp.pt

Aluno do curso de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia, Instituto Superior de Engenharia do Porto

**Pedro Alves da Conceição**

1241530@isep.ipp.pt

Aluno do curso de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia, Instituto Superior de Engenharia do Porto

**Rui Miguel Monteiro De Brito**

rmb@isep.ipp.pt

Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

**Sérgio Filipe Carvalho Ramos**

scr@isep.ipp.pt

Professor Coordenador, Instituto Superior de Engenharia do Porto

**Teresa Alexandra Ferreira Mourão Pinto Nogueira**

tan@isep.ipp.pt

Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

