

# NEUTRO À TERRA

Revista Técnico-Científica

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

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

*José Beleza Carvalho, Professor Doutor*



**Máquinas e Veículos Elétricos**



**Produção, Transporte e Distribuição Energia**



**Instalações Elétricas**



**Telecomunicações**



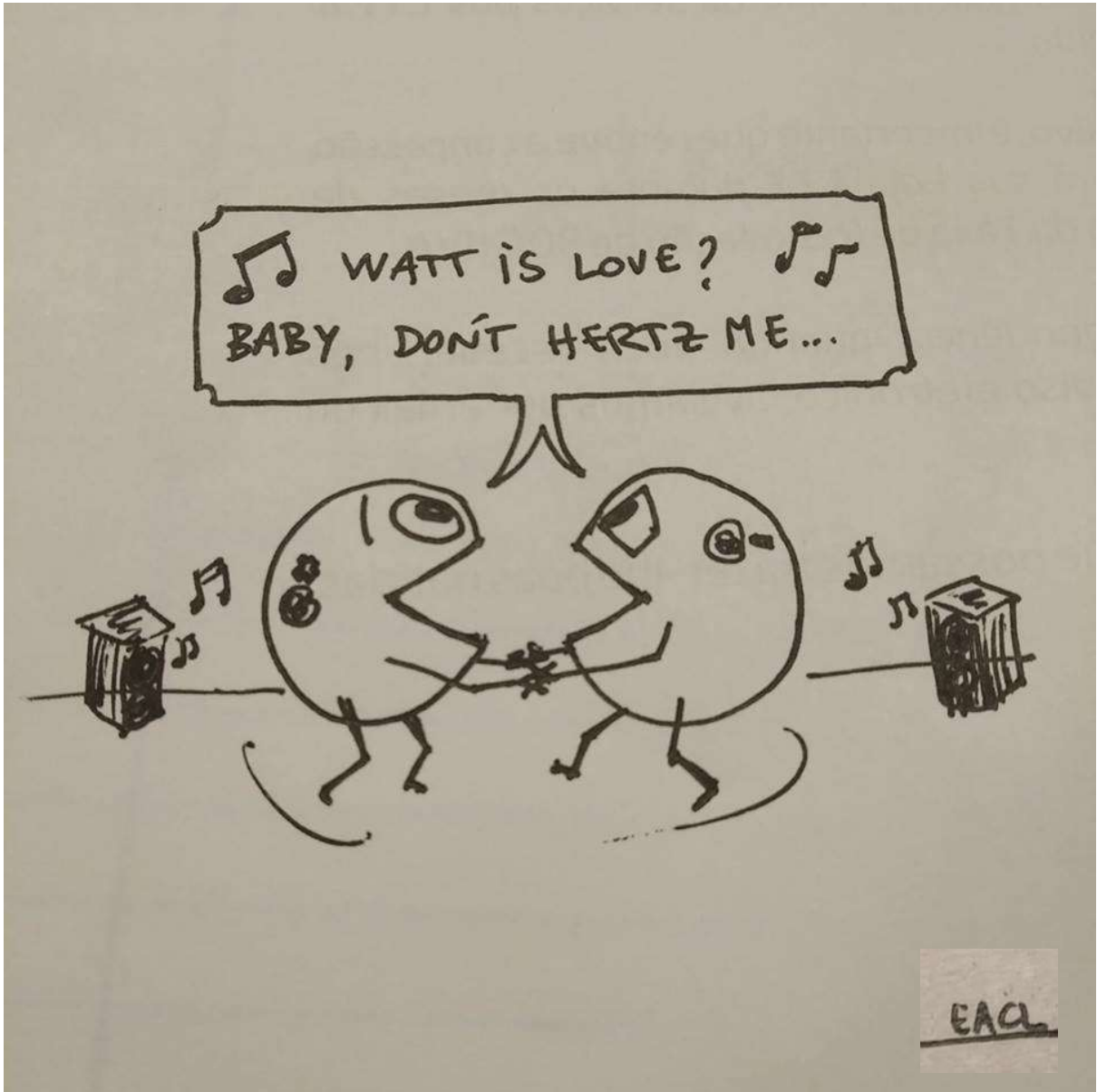
**Segurança**



**Gestão de Energia e Eficiência Energética**



**Automação, Gestão Técnica e Domótica**



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

## FICHA TÉCNICA

DIRETOR:	José António Beleza Carvalho, Doutor
SUBDIRETORES:	António Augusto Araújo Gomes, Eng. Roque Filipe Mesquita Brandão, Doutor Sérgio Filipe Carvalho Ramos, Doutor
PROPRIEDADE:	Área de Máquinas e Instalações Eléctricas Departamento de Engenharia Electrotécnica Instituto Superior de Engenharia do Porto
CONTATOS:	<a href="mailto:jbc@isep.ipp.pt">jbc@isep.ipp.pt</a> ; <a href="mailto:aag@isep.ipp.pt">aag@isep.ipp.pt</a>
PUBLICAÇÃO SEMESTRAL:	ISSN: 1647-5496

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

**Sinopse:**

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

**INSTALAÇÕES ELÉTRICAS DE BAIXA TENSÃO**  
 Dimensionamento e Proteção de Canalizações Elétricas

**SOBRE O LIVRO**

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

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

**SOBRE OS AUTORES**

**António Augusto Araújo Gomes**

Bacharel em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas de Energia pelo Instituto Superior de Engenharia do Porto, licenciado em Engenharia Elétrica (Licenciatura em Engenharia Elétrica e Computadores) pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Professor adjunto no Departamento de Engenharia Eletrotécnica do Instituto Superior de Engenharia do Porto desde 1999. Coordenador de Ótica na CEI/ALPUB – Engenharia de Segurança, entre 1997 e 1999. Sócio da empresa Realto & Tavares – Gabinete de Engenharia, Lda (2002 a 2010). Presidência de serviços de formação e/ou assessoria e/ou consultoria no âmbito das instalações elétricas, telecomunicações, segurança, gestão de energia, eficiência energética, a diversas entidades nomeadamente: NORVIA – Consultores de Engenharia, S.A., Schmalz – Engenharia e Serviços, Lda, ENERPO – Consultores de Engenharia, Lda, ECG – Instituto de Soluções e Qualidade, Quilónia – Fabrica de Quadros Elétricos, S.A., IEP – Instituto Eletrotécnico Português, CEMITERIO – Centro de Energia e Tecnologia, ANACOM – Autoridade Nacional das Comunicações, IOT – Instituto para o Desenvolvimento Tecnológico, EBY – Agência de Energia, Emoc, Aurore e Vouge.

**Henrique Jorge de Jesus Ribeiro da Silva**

Licenciado em Engenharia Eletrotécnica, área de Proteção, Transporte e Distribuição de energia, pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e Mestre (grau honoris causa) em Engenharia Industrial pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Minho. Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Eletrotécnica do Instituto Superior de Engenharia do Porto.

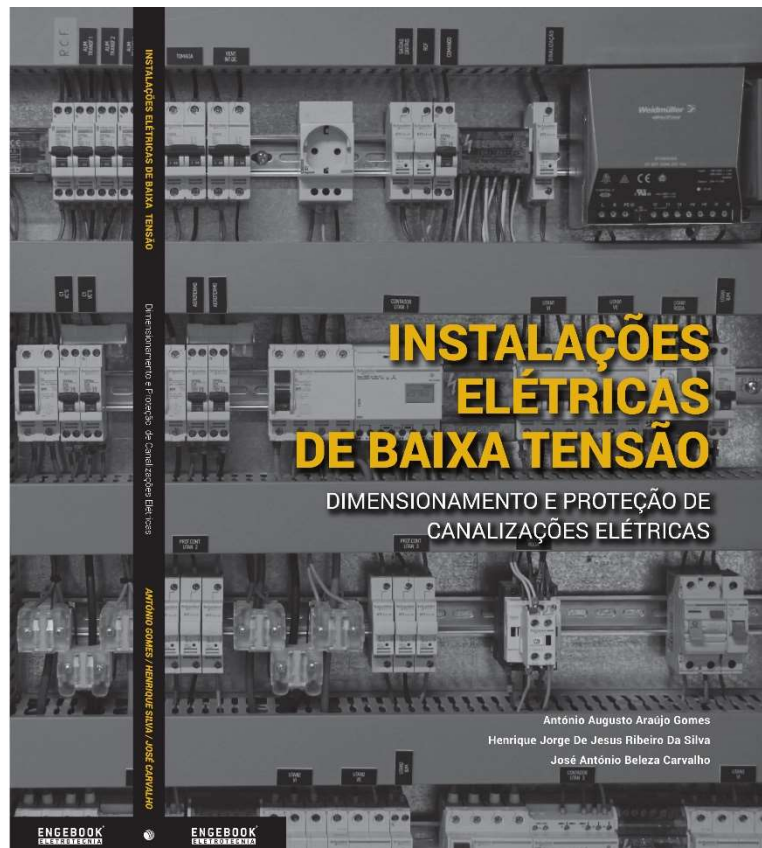
**José António Beleza Carvalho**

Bacharel em Engenharia Eletrotécnica pelo Instituto Superior de Engenharia do Porto, Mestre e Doutor em Engenharia Eletrotécnica na especialidade de sistemas de energia pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Professor Coordenador no Departamento de Engenharia Eletrotécnica do Instituto Superior de Engenharia do Porto, coordenador das funções do Diretor do Departamento. Integra a direção da Escola Tecnológica de Vals de Camarã como responsável técnico. Instituto Politécnico do Porto. É autor de vários artigos publicados em conferências nacionais e internacionais, diretor de revista científica e integrou vários júris de provas públicas de doutoramento e para a carreira do ensino superior.

**ENGENHARIA**

Faculdade de Engenharia  
 Sistemas de Instalações Elétricas

Com o apoio de **Lifa & Om**, **Schneider Electric**, **Weidmüller**



Estimados leitores

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

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

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

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

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

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

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

Estando certo que nesta edição da revista “Neutro à Terra” apresenta-se novamente interessantes artigos técnicos para todos os profissionais do setor eletrotécnico, satisfazendo assim as expectativas dos nossos leitores, apresento os meus cordiais cumprimentos e votos de um Excelente Ano de 2019.

Porto, dezembro de 2018  
José António Beleza Carvalho



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

**Sinopse:**

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



ENGEBOOK **ELETROTECHNIA**

António Gomes  
Sérgio Ramos  
André Sá



Blog:

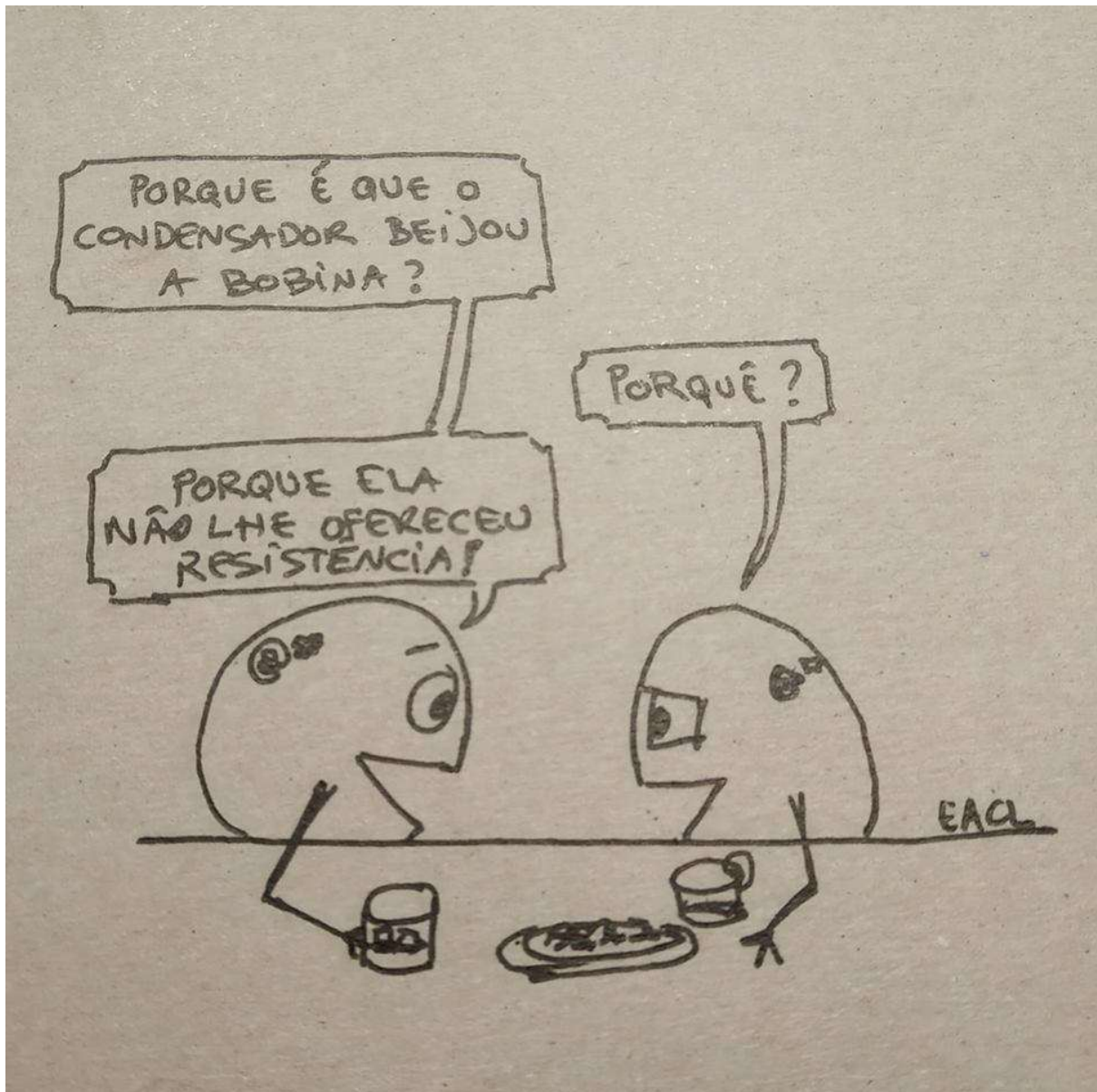
[www.neutroaterra.blogspot.com](http://www.neutroaterra.blogspot.com)

### Histórico de visualizações

**32 298**

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







## SIMULADOR DE CARREGAMENTO PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS

### Resumo

*Este artigo tem como objetivo analisar o comportamento dos utilizadores de veículos elétricos, e perceber qual o impacto que a variação dos preços da energia elétrica tem sobre os mesmos. Pretende-se entender se optar por tarifas dinâmicas possa ser compensatória em comparação com uma tarifa fixa constante.*

*Para atingir este objetivo foi desenvolvido uma ferramenta que simula viagens de veículos elétricos e o carregamento destes, considerando alguns comportamentos dos seus utilizadores. Os resultados demonstram que optar por uma tarifa dinâmica pode revelar-se compensatório para os utilizadores.*

*Palavras-Chave: Veículos Elétricos, Mobilidade Elétrica, Comportamentos de Carregamento, Simulador, Preços de Energia.*

### 1. INTRODUÇÃO

A necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa é cada vez maior. O Acordo de Paris, anunciado em dezembro de 2015, visa limitar o aumento da temperatura média global a menos de 2° Celsius acima dos níveis pré-industriais [1].

O setor dos transportes representa 23% das emissões de gases com efeito de estufa, sendo apenas superado pelas emissões de combustíveis fósseis (por exemplo, produção de energia) [2]. Isso revela que a eletrificação do transporte desempenha um papel significativo em tornar o planeta um lugar mais verde, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis.

A utilização de veículos elétricos (VEs) não só apresenta potencial na alteração da mobilidade individual, bem como

na redução de emissões de poluentes que é considerada uma das principais causas da poluição do ar e responsável por graves problemas de saúde na população. No entanto, como as cargas carregadas crescentes serão, idealmente cobertas pela produção renovável para alcançar a descarbonização do setor de transporte, a introdução de preços dinâmicos da eletricidade poderia aumentar o risco de sobrecargas de subestações [3]. Na Europa, o crescimento do uso de VEs resultará numa procura extra de energia, com o seu consumo a aumentar de aproximadamente 0,03% em 2014 para 9,5% em 2050 [4].

Num modo geral, a população está habituada a lidar com as energias fósseis e com a facilidade que conseguem em encontrar uma estação de serviço que permite abastecer os seus veículos, rapidamente e sem constituir qualquer incómodo. Isto é, não existem preocupações no que respeita ao tempo de espera nem preocupações inerentes ao combustível necessário para chegar ao destino previsto. Perante um VE, é importante considerar estes fatores. Além disso, existem outros desafios como o aumento da procura de energia de pico se os eventos de carregamento ocorrerem no mesmo instante que os horários de pico [5].

A rede reage consoante o nível de cargas que nela ficam ligadas, e com um afluente crescido deste meio de transporte no futuro, torna-se necessário estudar como os impactos da energia extra podem ser mitigados. Entender o comportamento dos utilizadores dos veículos elétricos perante as mudanças na rede será uma peça fundamental.

Estudos recentes, sugerem que os preços dinâmicos da eletricidade podem propagar a procura e ajudar as operadoras a evitar investimentos dispendiosos em infraestruturas [6]. Contudo, a falta de variabilidade nos preços da eletricidade não permite que os estudos sejam, completamente realistas.

Nesse contexto, torna-se importante abordar a principal questão de investigação:

Poderão os utilizadores de Veículos Elétricos alterar os seus padrões de carregamento, como consequência da variação dos preços da eletricidade?

## 2. ESTADO DE ARTE

### 2.1. Mobilidade Elétrica

Em 2017 o número de VEs a circular nas estradas foi de cerca de 3.1 milhões, um aumento de 57% em relação a 2016 (conforme Figura 1). Este aumento foi semelhante ao registado entre 2015 e 2016, de 60% [7]. É possível ainda verificar que os veículos puramente elétricos (BEV), tiveram um crescimento maior que os veículos híbridos (PHEV), representando dois terços do total. A China é o país com a maior fatia, representando 40% do total.

Com a popularidade dos VEs a aumentar, surge a necessidade de melhorar as infraestruturas de carregamento e oferecer modelos mais acessíveis. Apesar dos governos oferecerem incentivos para a adoção de VEs e continuarem a investir nas infraestruturas, os motivos que levam as populações a optar por este meio de transporte são cada vez mais evidentes: é a solução mais limpa que irá ajudar a sustentar um planeta habitável.

Isto reflete-se na satisfação dos utilizadores de VEs, em que 51% afirmam que o maior incentivo para a compra de um, é o facto de contribuírem para um futuro mais sustentável [8].

No geral, os resultados mostram que esta adoção não depende apenas de incentivos, mas também de existirem menos obstáculos para uma condução mais confortável.

Neste sentido, torna-se fundamental que o carregamento seja acessível. É importante existirem estações de carregamento nos centros comerciais, parques de estacionamento, no trabalho e em casa. Outro aspeto a considerar é o tipo de carregamento, uma vez que o tempo é, talvez, a variável que o consumidor mais valoriza.

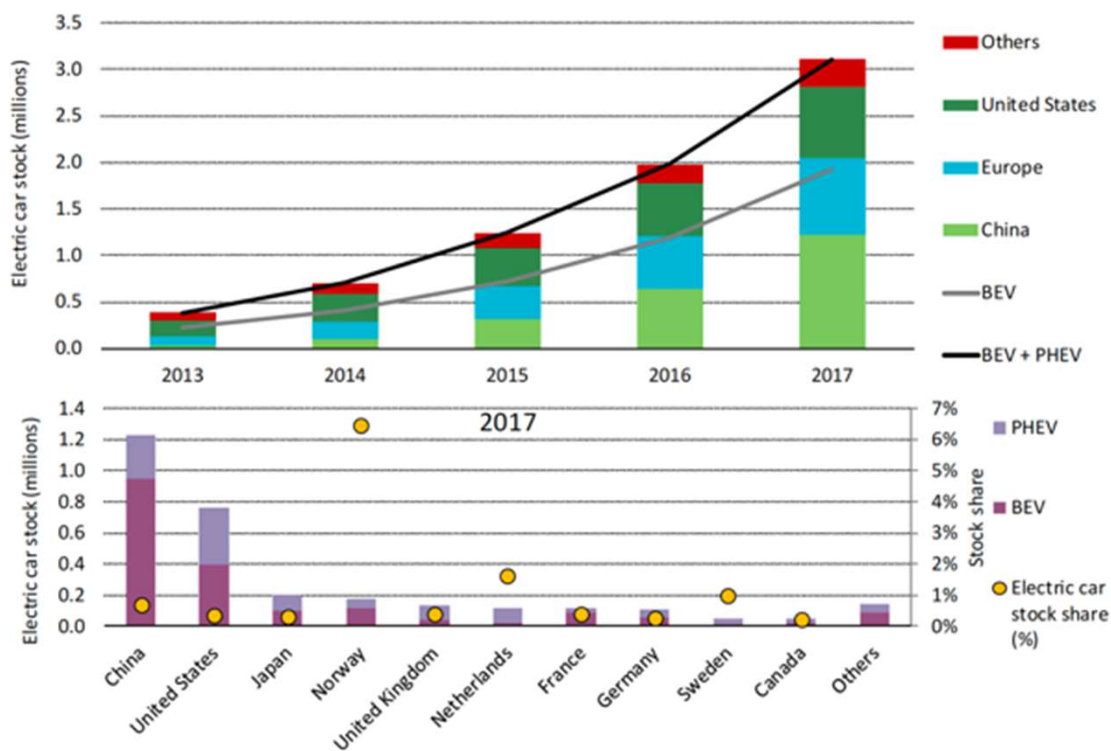


Figura 1 - Número de VEs em várias regiões

A potência de carregamento elevada dos carregadores rápidos (Corrente Contínua maior que 40 kW), dificulta a sua implementação nas residências habitacionais, devido a questões técnicas, que apesar de serem concebíveis, ainda estão pouco desenvolvidas. Nesta perspetiva, a implementação de estações de carregamento (EC) rápido irá facilitar o utilizador, reduzindo os tempos de espera.

## 2.2. SmartCities

Espera-se que até 2050 exista um aumento de 68 % da população a residir nas áreas urbanas [9], o que representa cerca de 2500 milhões de pessoas. Estas alterações justificam uma melhor eficiência na utilização dos recursos disponíveis nas áreas urbanas.

Uma das componentes numa *SmartCity* é a *SmartGrid*, e a sua existência na cidade vai permitir uma dinâmica dos preços da eletricidade mais em tempo real, que significa uma utilização mais eficiente dos recursos da cidade.

## 2.3. Comportamentos de Carregamento

Entre 2011 e 2013 foram recolhidos dados sobre padrões de condução e carregamento de VEs, num estudo realizado na Europa[10]. Foram registados mais de 230,000 carregamentos. A média do estado da bateria (SoC) quando foram iniciados os carregamentos era de 60%, o que mostra que os utilizadores não deixam a bateria descarregar, ligando-se à rede sempre que têm oportunidade e não quando a bateria está baixa. Aliás, a percentagem média de utilizadores que iniciaram uma viagem ou um carregamento com um nível de SoC inferior a 20% é menor que 5%. Relativamente ao momento dos carregamentos, verifica-se que a maioria são realizados entre as 18:00h e 22:00h, o que corresponde às horas de ponta de energia.

Franke and Krems[11] analisaram o comportamento de carregamento dos utilizadores num estudo realizado na Alemanha. Eles concluíram que os níveis de autonomia afetam as decisões de carregamento.

Também desenvolveram um modelo conceitual baseado em princípios de autorregulação e teoria de controlo onde é possível entender, um pouco melhor, o uso eficiente de recursos energéticos.

Este modelo, baseia-se na premissa de que sempre que os utilizadores interagirem com fontes de energia limitadas, estes, monitorizam e gerem, continuamente, a relação entre as suas necessidades de mobilidade e os seus recursos de mobilidade. Por exemplo, as necessidades de mobilidade dizem respeito à distância que separa um local de um destino e os recursos de mobilidade dizem respeito à autonomia restante.

Os utilizadores, geralmente, sentem a denominada *range anxiety* ou “stress de autonomia” que pode ser descrita como a discrepância experienciada entre os buffers de recurso de alcance disponíveis e preferenciais. Quanto maior a ansiedade, maior é a probabilidade de os utilizadores recorrerem a estratégias que possam lidar com esta situação, nomeadamente, conduzir de forma económica ou carregar o carro mais vezes.

Marmaras et al.[12] também consideraram dois perfis de comportamento para simulações: *unaware* e *aware*.

O *Unaware* tenta encontrar a melhor solução possível com acesso limitado às informações e com o mínimo de interação com o ambiente e outros utilizadores de VEs. Aqui, o nível de *range anxiety* é forte e este utilizador procura sempre carregar o veículo, mesmo quando não é necessário.

O *Aware* tem mais acesso a informação e interage com o seu ambiente e outros VEs de forma a encontrar a melhor solução possível. Este, tem um nível de *range anxiety* baixo, carregando o seu veículo só quando necessário.

Segundo os resultados desta investigação, o utilizador *Unaware* começa a carregar assim que chega a casa, entre as 17:30h e as 18:00h, enquanto que, o utilizador *Aware* espera pelas horas fora de ponta, entre as 22:00h e as 06:00h.

## 2.4. Ferramentas de Simulação

É possível verificar o resumo com as características das ferramentas revistas na Tabela 1. O modelo proposto destaca-se em alguns aspectos que se podem observar.

## 3. SIMULADOR

Neste ponto são descritos os parâmetros e algoritmo do simulador. O programa permite simular viagens de veículos elétricos de uma forma simples. O simulador foi desenvolvido de raiz, utilizando o Rstudio [21], um software que desenvolve ferramentas gratuitas para R, uma linguagem de programação estatística *open-source*.

### 3.1. Parâmetros

Na Tabela 2 estão descritos os parâmetros globais do simulador.

Estes parâmetros significam que são aplicados a todos os perfis gerados, ou seja, que para qualquer momento da simulação são os mesmos. Estes são valores predefinidos, mas que podem ser alterados conforme as preferências.

Parâmetro	Descrição	Valor de exemplo
ncars	Número de veículos elétricos	1000
cdist	Distância compensatória entre dois pontos	20%
sf	Fator de escala do mapa	5
hcpower	Potência do carregamento em casa	3.7 kW
chargingeff	Eficiência do modo de carregamento	85%

### 3.2. Algoritmo do Simulador

O simulador é constituído por duas partes principais: a geração de dados e a simulação das viagens dos carros.

São gerados dados relativamente aos perfis de cada utilizador, como as características do veículo (bateria, consumo, etc.), as viagens a realizar (localizações e tempos de saída) e, os parâmetros comportamentais.

Tabela 1– Resumo das ferramentas estudadas

Modelo/Simulador	Decisões de carregamento utilizando comportamentos de carregamento estudados	Preços Dinâmicos	Simulação/Análise de Viagens	Modelo/Análise de Estações de Carregamento	Impacto na rede elétrica
Modelo Proposto	Sim	Sim	Sim	Considera	Não
[13]	Não	Não	Sim	Não	Não
MATSim[14]	Não	Não	Não	Não	Não
SUMO [15]	Não	Não	Sim	Não	Não
[16]	Não	Não	Sim	Sim	Não
[17]	Não	Não	Não	Não	Sim
[18]	Não	Não	Não	Sim	Sim
EVeSSi[19]	Não	Não	Sim	Não	Sim
V2G-sim [20]	Não	Não	Não	Não	Sim

### 3.3. Geração de Dados

A geração da população é um processo iterativo em que cada uma das variáveis é gerada aleatoriamente a partir de uma amostra de valores com probabilidades individuais.

Inicialmente, é atribuída uma localização inicial a cada perfil, consoante as posições disponíveis no mapa da cidade. Esta localização será uma residência ou um ponto de saída/entrada na cidade, considerando utilizadores não habitantes da cidade. De seguida são gerados valores para o SoC inicial, o nível de carga preferido e o perfil de viagens. É também gerado o valor da capacidade da bateria que irá determinar o resto das características do veículo. Do mesmo modo é atribuído um valor para o peso da distância na decisão da escolha da estação de carregamento, que consoante esse valor, são depois atribuídos os restantes pesos. Os últimos conjuntos de dados a serem gerados são as viagens e tempos em que serão realizadas, assim como a sua importância. O algoritmo segue a seguinte estrutura:

```

FOR (each of the cars) DO
  Add an x coordinate to variable
  x
  IF (x equal to some of the
  correspondent existent x available on
  the map) THEN
    Add y coordinate to y
    variable
  END IF
  Generate initial SoC, available
  range preference, battery capacity
  and trip importance
  Random generate w1
  IF (w1 equals to a specific
  value) THEN
    w2 = 1-w1-w3
    w3 = 1-w1-w2
  END IF
  IF (cars battery = value) THEN
    Attribute all data to
    this car model in the cars data frame
  END IF
  IF (i=0 to 5) THEN
    Number of trips = 2, 3, 4
    or 10-15
    Generate trips importance
    Generate locations for
    the number of trips
    Generate work day times,
    night times and/or leisure times
  END IF
END FOR

```

### 3.4. Simulação de Viagens

A simulação das viagens corre em períodos de 15 minutos, totalizando 96 (j=96) para um dia completo.

Toda a sua estrutura e modo de funcionamento está descrita através de um fluxograma, na Figura 2.

Cada veículo tem uma localização inicial e uma série de viagens a realizar durante o dia. Para cada viagem está associado um tempo de saída, o período j em que o utilizador irá realizar essa viagem. Quando isso acontece, é calculada a distância euclidiana – através de uma função incluída no software - entre a localização atual e a localização do próximo destino, com uma margem acrescida de 20%, uma vez que a distância calculada é em linha reta, multiplicado pelo fator de escala – sf. Sabendo a distância, determina-se o tempo de viagem consoante a velocidade média do veículo em questão.

Por exemplo, se a distância calculada for de 9000 m, e a velocidade média for de 35 km/h, o tempo de viagem será de 15 minutos e 26 segundos, o que é superior a um intervalo de tempo, e desta forma a viagem demorará 2 períodos. No entanto se a velocidade média for de 40 km/h, o tempo de viagem será de 13 minutos e 30 segundos, o que equivale a 1 período de tempo.

O tempo de viagem determina-se através da seguinte equação:

$$T = \frac{d}{V_m \times (1000/3600)} / 60$$

onde:

d- Distância entre destinos

V<sub>m</sub>- velocidade média do veículo



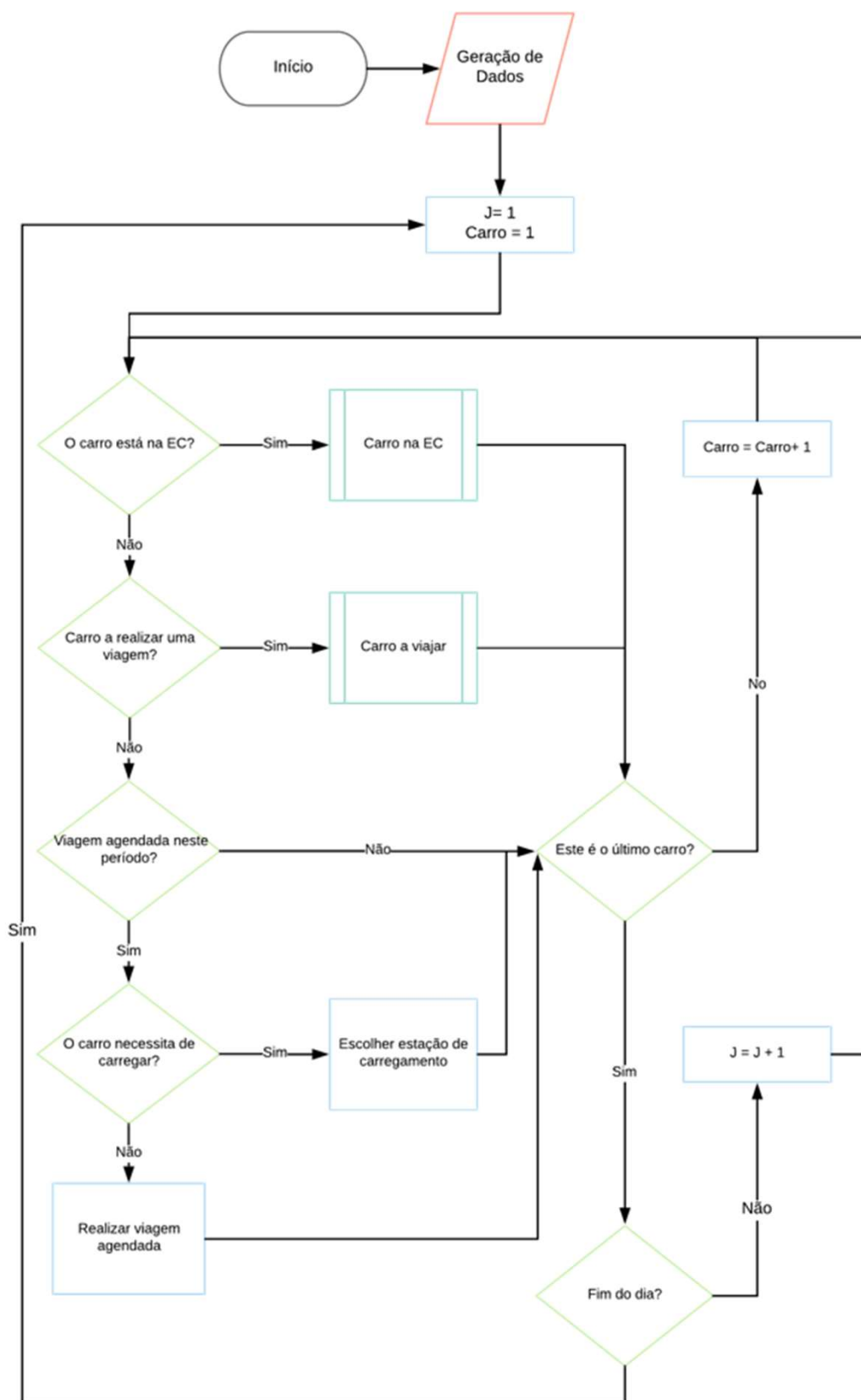


Figura 2 - Fluxograma do algoritmo da simulação das viagens

### 3.5. Estações de Carregamento

Para simular o carregamento, foram considerados quatro estações de carregamento e utilizadores que possuam um carregador privativo em casa. Das estações, duas são de carregamento normal com potência de 7,2 kW e, outras duas de carregamento rápido (*fast charge*) com uma potência de 50 kW. Os carregadores domésticos têm uma potência de 3,7 kW.

A localização das estações não foi escolhida utilizando uma metodologia. A sua distribuição foi realizada de modo a abranger todos os pontos da cidade, com alguma aleatoriedade. Neste sentido, o objetivo passa sempre por perceber quais e como os variados fatores podem influenciar a escolha do local de carregamento e, de que forma os preços da energia influenciam os utilizadores dos VEs.

### 3.6. Decisões de Carregamento

Quando o utilizador decide ir carregar, tem de escolher um local (estação de carregamento ou casa). Para esta simulação foram consideradas 3 variáveis: distância, preço da energia e tempo de carregamento (*slow ou fast*). Depois de determinadas as pontuações de cada uma das variáveis, somam-se, e considerando as preferências de cada utilizador por uma ou outra destas variáveis, obtém-se a pontuação final (Equação 2). A estação de carregamento com maior pontuação é o escolhido para o utilizador ir carregar o seu veículo.

$$Pontuação\ Final = Ds \times w_1 + Ps \times w_2 + Cts \times w_3$$

Onde:

Ds- Pontuação da distância, de 0 a 100

Ps- Pontuação do preço, de 0 a 100

Cts- Pontuação do tempo de carregamento, de 0 a 100

W- Peso para cada uma das variáveis

O processo de seleção do local preferido para carregar segue a estrutura descrita na Figura 3.

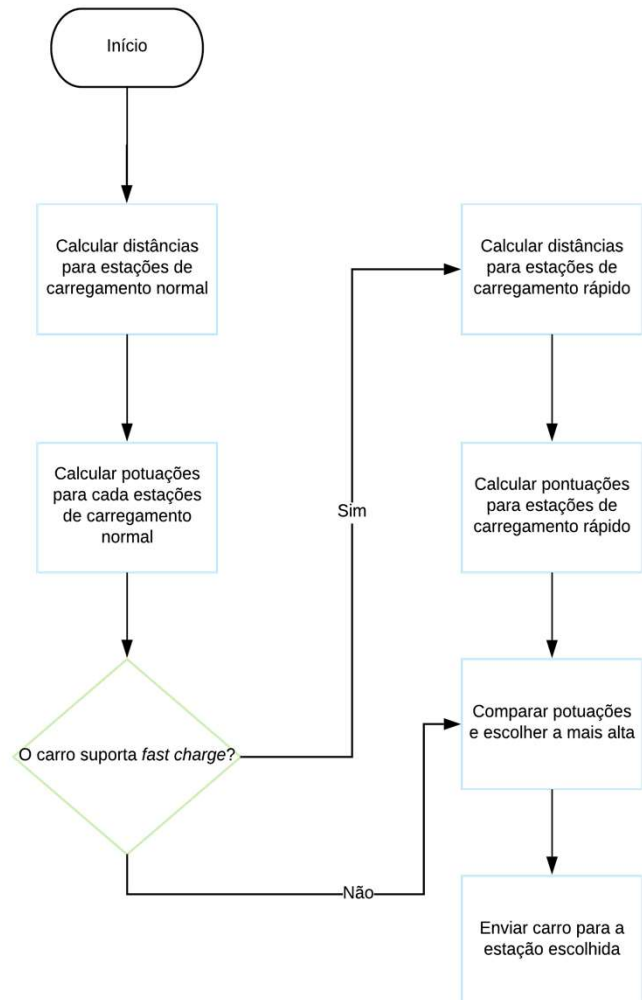


Figura 3 - Fluxograma da escolha da estação de carregamento

Inicialmente são calculadas as distâncias às estações de carregamento do tipo normal. Estes valores, em conjunto com o preço da energia (€/kWh) e o tempo de carregamento para o tempo que tem o utilizador dispõe, permitem obter uma pontuação final entre 0 e 100 para cada estação. Se o veículo permitir carregamento rápido, este processo é repetido para as estações de carregamento deste tipo. Finalmente, comparam-se as pontuações para as estações disponíveis e aquela que for a maior será o local escolhido.

Para determinar o tempo que cada utilizador pode atrasar uma viagem para carregar o seu veículo, ou até mesmo se a pode ou não descartar, foi criada uma variável que define a sua importância. Assim, foram designados 3 níveis diferentes de valor:

1. Baixa importância – esta viagem é descartada e o carro fica a carregar até à viagem seguinte;
2. Média importância – o utilizador atrasa a viagem, e todas as outras posteriores, até a um limite de tempo que varia consoante o tipo de utilizador;
3. Alta importância – o utilizador tem de realizar esta viagem, não podendo carregar, a não ser que o nível de carga de bateria atinja um nível crítico.

Para assegurar que cada utilizador tem sempre carga suficiente para realizar as viagens foi considerado um estado crítico do nível da bateria. Seguindo os resultados previamente revistos em [10], este valor é de 20%. Sempre que um utilizador atinja um nível inferior a este, independente da viagem que tenha que fazer deve ir carregar o seu veículo. Neste caso existem duas opções: ou encontra um local perto do seu local de trabalho (1º destino) e deixa lá o carro até à hora da próxima viagem, ou, caso contrário, procura o posto de carregamento mais perto de casa e deixa lá o carro durante a noite até à próxima viagem programada. Assume-se que o utilizar deixa o carro neste local e, hipoteticamente, faz o resto das suas viagens utilizando outro meio de transporte.

### 3.7. Preço da Energia

Uma das variáveis que o utilizador considera para decidir o local onde irá carregar o seu veículo é o preço da energia elétrica. Este preço difere entre o tipo de estação (*slow* ou *fast*) e as tarifas domésticas. Além disto, existem ainda duas situações onde os preços também são distintos: simulação com preços fixos ou simulação com preços variáveis (preços dinâmicos).

Nos preços fixos, o utilizador paga sempre o mesmo independentemente da altura em que vai carregar o veículo.

O preço da energia no carregamento rápido é superior ao normal, e a tarifa paga em casa foi definida para ser igual em todas as situações.

No caso dos preços dinâmicos, estes variam em intervalos de 15 minutos. Isto é conseguido utilizando um programa de operação e reconfiguração da rede de distribuição, que atualiza os LMPs consoante a procura de energia. Depois do simulador receber os LMPs, é calculado o preço de energia. Em primeiro lugar calcula-se um preço adicional (Equação 3), que varia de acordo com a potência contratada, seja ela para o carregamento normal ou para o carregamento rápido:

$$PA = \frac{0,397 \times \text{Potência de Carregamento}}{720} / TxU$$

onde:

0,397- Custo do operador da estação de carregamento

Potência de Carregamento- 7,2 kW para *slow charge* e 50 kW para *fast charge*

TxU- Taxa de utilização da estação de carregamento

720- Número de horas média anual de ocupação

De seguida, calcula-se o preço final da energia para o consumidor (Equação 4). Este valor é a soma do LMP recebido, com a tarifa a aplicar para o período horário em questão e o preço adicional calculado anteriormente. A isto acrescenta-se uma taxa de 5%, a pagar ao proprietário da estação de carregamento, e o valor do IVA:

$$\text{Preço Final} = (LMP + \text{Tarifa} + PA) * 1,05 * IVA$$

onde:

LMP- *Locational Marginal Prices* recebidos a cada período pelo programa auxiliar

Tarifa- Tarifa da energia elétrica por período horário

## 4. ESTUDO DE CASOS

Para realizar os casos de estudo foi utilizado um modelo físico da *SmartCity*, GECAD-BISITE [22] como local.

A cidade é composta por 6 edifícios de escritórios, um hospital, um quartel de bombeiros, um centro comercial e 15 edifícios habitacionais, como se pode verificar nas Figura 4.

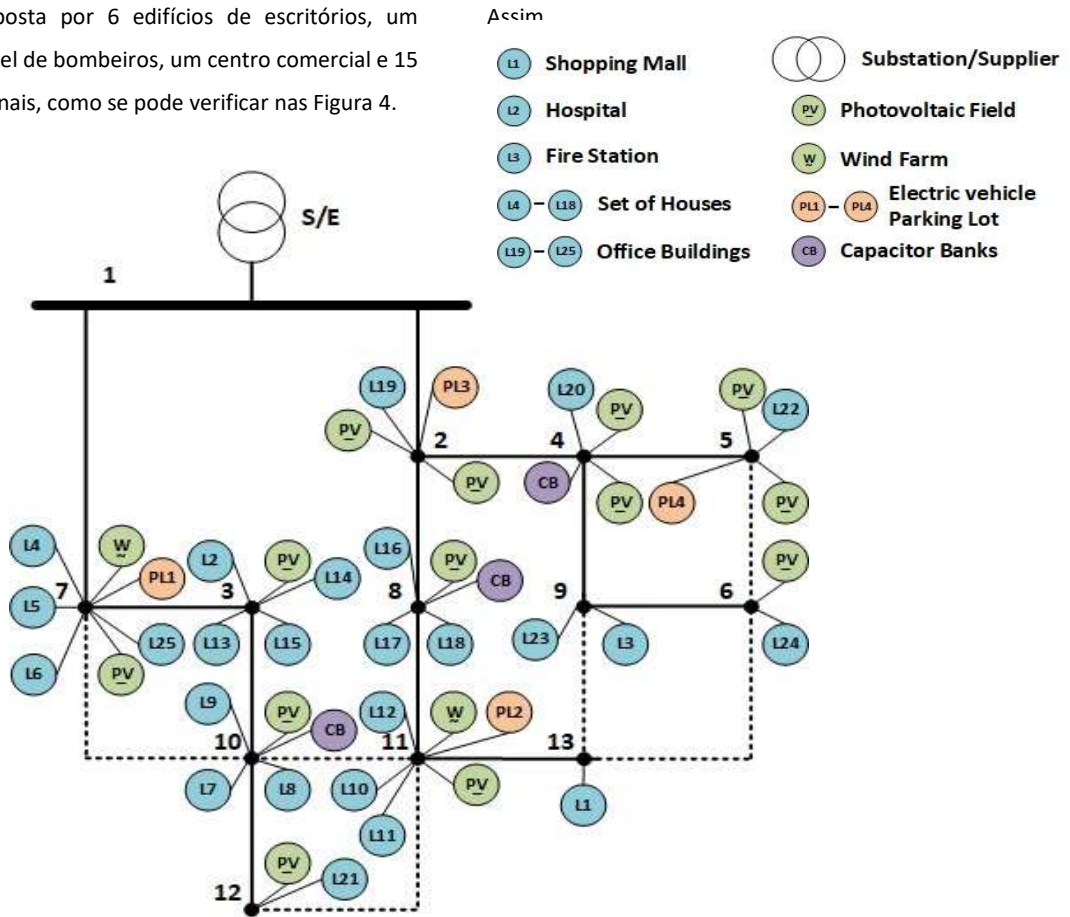


Figura 4 - Topologia da rede da cidade

A rede que alimenta toda a cidade é constituída por 13 barramentos, 4 dos quais alimentam as estações de carregamento existentes. As estações de carregamento normal (1 e 2), encontram-se junto ao edifício L19 e junto das residências, respetivamente. As estações de carregamento rápido estão situadas no edifício L24 e no L1 (centro comercial), respetivamente (Figura 5). A escala visível nesta figura é apenas utilizada como referência, uma vez que o fator de escala (sf) permite aumentar o tamanho da cidade, situação que se verifica nos casos de estudo deste capítulo, onde se utilizou um  $sf=5$ .

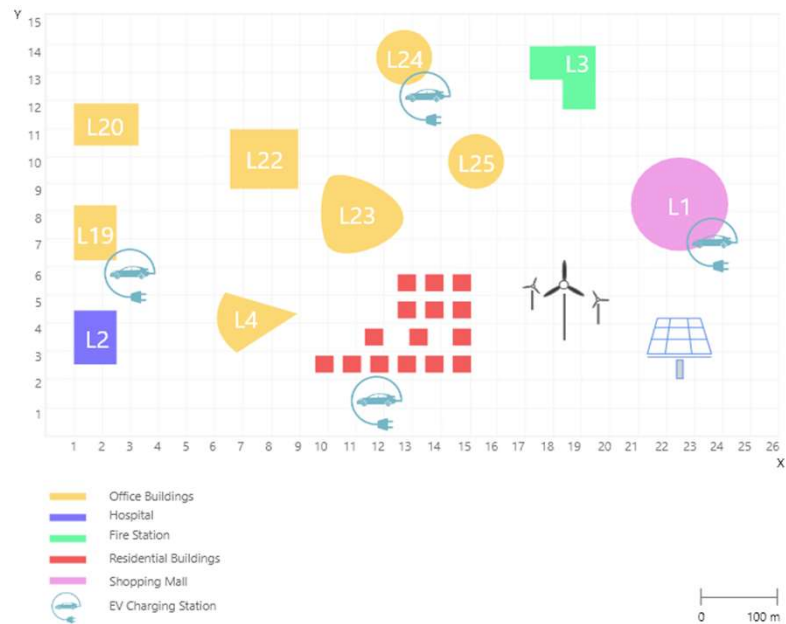


Figura 5 - Topologia da cidade

<sup>2</sup> No diagrama está implícito que  $|E_S| = |-E_R|$

Foram realizadas simulações utilizando preços de energia fixos e variáveis. Para cada uma foram variadas as preferências do utilizador pelo preço, distância e tempo de carregamento.

Para que a comparação entre as simulações seja mais credível, as populações utilizadas são sempre as mesmas, alterando apenas os aspetos que diferenciem os casos de estudo. Valores como número e modelos dos veículos (Tabela 5), carga inicial da bateria, conjunto de viagens a realizar, tempos a que estas serão efetuadas e localização inicial são exatamente os mesmos em todas as simulações realizadas nos casos de estudo deste capítulo. Os casos de estudo que obtiveram maior preponderância têm uma população de 5000 VEs. No entanto, também foram realizadas simulações adicionais com populações de 2500 e 7000 VEs para melhor compreender a relevância do número de veículos.

#### 4.1. Preços Fixos

Neste estudo de caso foram utilizados preços fixos para qualquer período do dia. As estações de carregamento normal praticam o mesmo preço entre elas, e o mesmo acontece para as estações de carregamento rápido as quais que têm um preço superior. O preço da energia doméstica é constante para todas as simulações. Para cada um dos casos de estudo utilizando preços fixos foram realizadas simulações com três cenários de preços, como se pode verificar na Tabela 6.

Tabela 3 - Preços fixos da energia

Local	Preço (€/kWh)		
	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Estação de Carregamento 1	0,15	0,2	0,25
Estação de Carregamento 2	0,15	0,2	0,25
Estação de Carregamento 3	0,25	0,3	0,35
Estação de Carregamento 4	0,25	0,3	0,35
Casas	0,2094	0,2094	0,2094

#### 4.2. LMPs

As simulações utilizando preços variáveis foram conseguidas com recurso a um programa específico. Na metodologia proposta, os LMPs são definidos através de multiplicadores *Lagrangeanos* das restrições correspondentes (equilíbrio de potência) do problema de otimização que tem como objetivo minimizar os gastos com o operador do sistema. O problema de operação e reconfiguração da rede de distribuição num contexto de *smartgrids* com alta penetração de recursos de PD em relação aos aspetos de comportamento dos utilizadores de VEs e preço de carregamento de VE dinâmico considerando LMPs é classificado como problema com variáveis discretas e contínuas (MINLP) devido às características de não-linearidade. Para resolver problemas complexos como este, a decomposição de *Benders* é uma técnica adequada.

#### 4.3. Preços Fixos Vs. Preços Variáveis

O objetivo deste trabalho passa por perceber se os preços dinâmicos podem ser mais compensatórios para os utilizadores de VEs, em comparação com uma tarifa fixa. Nesta secção os resultados das simulações entre preços fixos e dinâmicos são comparados de forma a perceber quais as diferenças e se será benéfico optar por tarifas variáveis ou fixas.

Relativamente às simulações em que a população tem maioritariamente preferência pelo preço, foram registadas diferenças.

Numa análise de sensibilidade, observando a Figura 6, pode-se concluir que os utilizadores conseguem pagar menos em média pelo preço da energia – 0,19 €/kWh – comparativamente a todas as simulações com preços fixos.

Além disso, o custo médio da energia é o mais baixo de todos os casos simulados – 10,43 €.



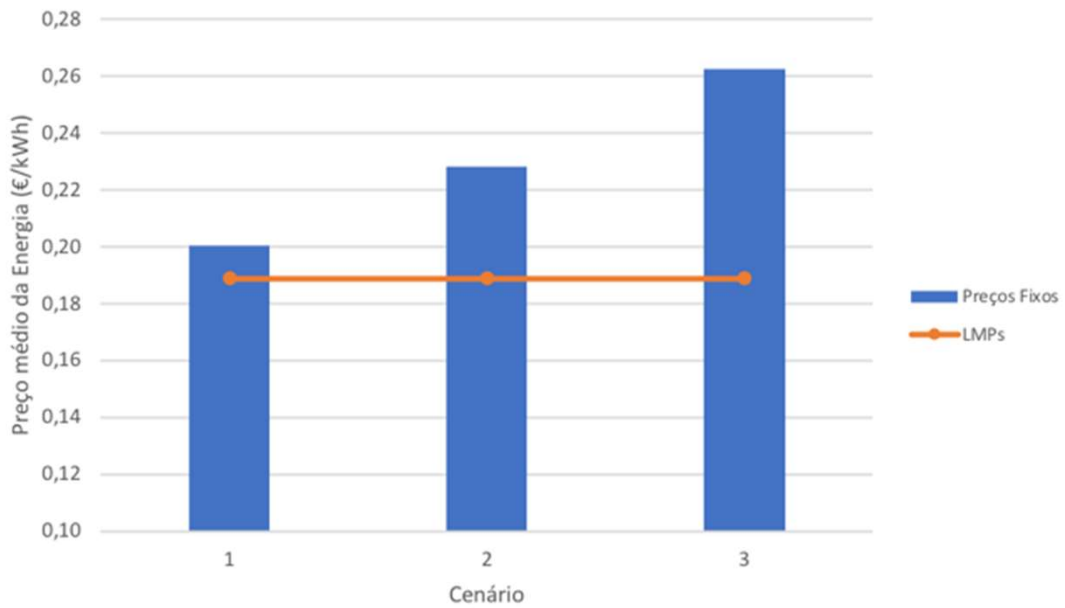


Figura 6 - Análise de sensibilidade para a preferência pelo preço

Quando os utilizadores optam por dar prioridade à proximidade da estação de carregamento, começa a ser compensatório optar por tarifas dinâmicas a partir de um

preço médio de 0,22 €/kWh (Figura 7). Nas simulações realizadas, apenas o primeiro cenário de preços obteve melhores resultados com preços fixos.

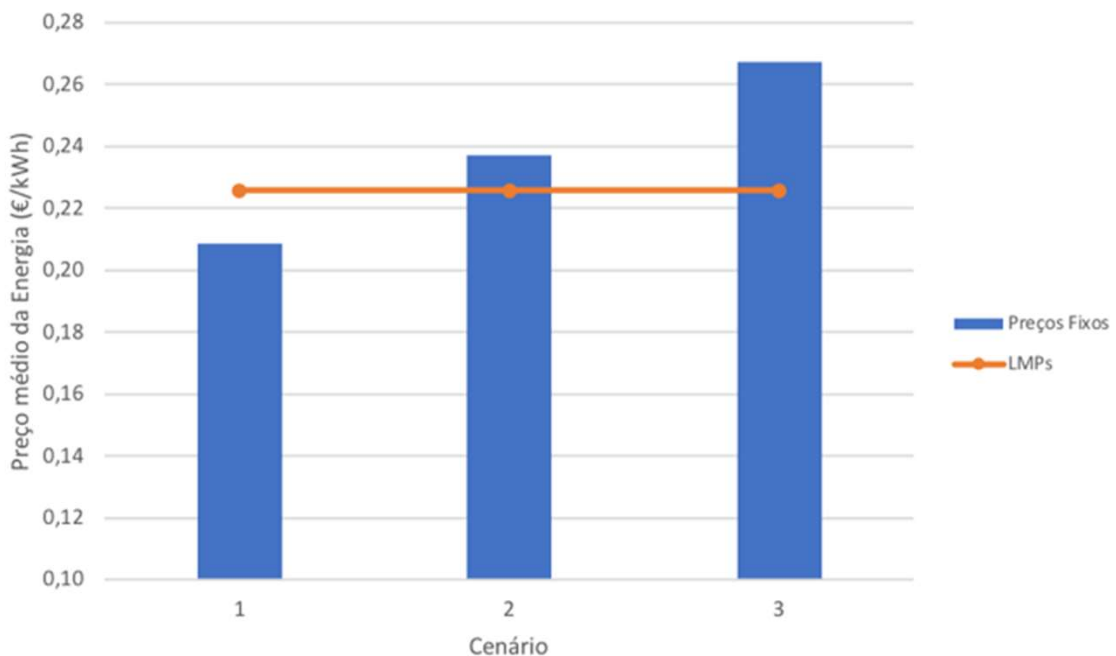


Figura 7 - Análise de sensibilidade para a preferência pela distância

Relativamente à análise de sensibilidade para a preferência pelo tempo de carregamento, não faz sentido realizá-la, uma vez que foram verificados preços irrealistas com os quais não seria de todo vantajoso optar pelas tarifas dinâmicas, como se pode observar na Tabela 4.

Tabela 4 - Preços da energia elevados nos períodos de pico

Período (h)	Preço (€/kWh)			
	EC 1	EC 2	EC 3	EC 4
18:30	0,0914	0,0677	0,1926	0,1937
18:45	0,1927	0,29	0,3721	0,375
19:00	0,3688	3,6962	0,4632	4,0335
19:15	12915,04	12915,01	12915,14	12915,14
19:30	0,3468	0,6179	4,0183	4,0526
19:45	0,2817	0,3983	0,3999	0,4041

## 5. CONCLUSÕES

Nas simulações realizadas com tarifas fixas, as diferenças mais visíveis entre os diferentes níveis de preços foram os encargos com a energia carregada, como seria esperado.

Quando a preferência dos utilizadores recai sobre o preço da energia, as estações de carregamento com os preços mais baixos, são as que tem uma maior aderência. Em contraste, quando a preferência recai sobre o tempo de carregamento, os utilizadores optam mais vezes pelas estações de carregamento rápido e, como consequência, existe uma maior procura da energia devido à elevada potência destas estações.

Os casos de estudo que envolveram os LMPs, permitindo obter preços de energia dinâmicos, mostraram resultados diferentes. Foi possível observar uma maior influência nas decisões de carregamento, comparativamente às tarifas fixas.

As estações de carregamento normais, principalmente a EC 1 foram escolhidas com uma grande diferença das estações de carregamento rápido. O facto de estas últimas estarem um pouco mais afastadas dos destinos frequente dos utilizadores, também influenciou as decisões.

O caso de estudo em que o tempo de carregamento é prioritário mostrou ser o mais problemático, isto devido à elevada energia requisitada à rede.

Ao aderirem a estações de carregamento rápido, com potência elevada, os preços de energia retornados pelo modelo de operação de rede, foram demasiado elevados para serem considerados realistas. Houve um período em que o preço da energia atingiu os 1000 €/kWh, algo irrealista.

A rede ficou congestionada em demasia para o que são os seus limites. Isto pode demonstrar que a rede em questão não está preparada para enormes quantidades de energia a circular nas linhas e, ao mesmo tempo, realçar que a introdução de VEs nas estradas tem de ser estudado profundamente, uma vez que o seu impacto nas redes é considerável.

De modo geral, a introdução de preços dinâmicos no mercado energético demonstra ser promissor no sentido de oferecer aos utilizadores de VEs mais opções no momento de decidir qual o local mais apropriado para carregar o VE.

Comparativamente com uma tarifa fixa, este estudo demonstra que os utilizadores conseguem reduzir a sua fatura ao existirem tarifas dinâmicas. No entanto também se verifica que os tempos de carregamento baixos, que é algo que os utilizadores poderão favorecer, especialmente considerando que é algo que estão habituados quando utilizam combustíveis fósseis, poderão causar problemas na rede de distribuição.

## Referências

- [1] UNFCCC. Conference of the Parties (COP), "Paris Climate Change Conference-November 2015, COP 21," 2015.
- [2] European Commission, "Greenhouse gas emission statistics - emission inventories - Statistics Explained." [Online]. Available: [http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Greenhouse\\_gas\\_emission\\_statistics\\_-\\_emission\\_inventories](http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Greenhouse_gas_emission_statistics_-_emission_inventories). [Accessed: 08-Mar-2018].
- [3] F. Salah, J. P. Ilg, C. M. Flath, H. Basse, and C. van Dinther, "Impact of electric vehicles on distribution substations: A Swiss case study," *Appl. Energy*, vol. 137, pp. 88–96, 2015.
- [4] European Environment Agency, "Electric vehicles and the energy sector - impacts on Europe's future emissions," *Eea.Europa.Eu*, pp. 1–5, 2016.
- [5] N. Daina, A. Sivakumar, and J. W. Polak, "Electric vehicle charging choices: Modelling and implications for smart charging services," *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 81, pp. 36–56, 2017.
- [6] C. Latinopoulos, A. Sivakumar, and J. W. Polak, "Response of electric vehicle drivers to dynamic pricing of parking and charging services: Risky choice in early reservations," *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 80, pp. 175–189, 2017.
- [7] "Global EV Outlook 2018," 2018.
- [8] EV-BOX, "Manifesto of Electric Mobility," 2017.
- [9] I. Pes, "2018 Re-imagining the Electric Grid."
- [10] C. Corchero, S. Gonzalez-Villafranca, and M. Sanmartin, "European electric vehicle fleet: Driving and charging data analysis," 2014 IEEE Int. Electr. Veh. Conf. IEVC 2014, no. Figure 1, 2015.
- [11] T. Franke and J. F. Krems, "Understanding charging behaviour of electric vehicle users," *Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav.*, vol. 21, pp. 75–89, 2013.
- [12] C. Marmaras, E. Xydias, and L. Cipcigan, "Simulation of electric vehicle driver behaviour in road transport and electric power networks," *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 80, pp. 239–256, 2017.
- [13] J. Sewall, D. Wilkie, P. Merrell, and M. C. Lin, "Continuum traffic simulation," *Comput. Graph. Forum*, vol. 29, no. 2, pp. 439–448, 2010.
- [14] K. W. Axhausen, *The Multi-Agent Transport Simulation MATSim*. 2016.
- [15] D. Krajzewicz, J. Erdmann, M. Behrisch, and L. Bieker, "Recent Development and Applications of {SUMO - Simulation of Urban MObility}," *Int. J. Adv. Syst. Meas.*, vol. 5, no. 3, pp. 128–138, 2012.
- [16] M. Strehler, S. Merting, and C. Schwan, "Energy-efficient shortest routes for electric and hybrid vehicles," *Transp. Res. Part B Methodol.*, vol. 103, pp. 111–135, 2017.
- [17] P. Demand, P. Production, E. Cost, and S. Platform, "SIMULATION PLATFORM FOR COORDINATED CHARGING OF ELECTRIC," pp. 8–11, 2015.
- [18] S. Bae and A. Kwasinski, "Spatial and Temporal Model of Electric Vehicle Charging Demand," vol. 3, no. 1, pp. 394–403, 2012.
- [19] J. Soares, B. Canizes, C. Lobo, Z. Vale, and H. Morais, "Electric vehicle scenario simulator tool for smart grid operators," *Energies*, vol. 5, no. 6, pp. 1881–1899, 2012.
- [20] "V2G-Sim." [Online]. Available: <http://v2gsim.lbl.gov/>. [Accessed: 01-Sep-2018].
- [21] RStudio, "Home - RStudio," 2015. [Online]. Available: <https://www.rstudio.com/>. [Accessed: 01-Sep-2018].
- [22] B. Canizes, T. Pinto, J. Soares, Z. Vale, P. Chamoso, and D. Santos, "Smart City: A GECAD-BISITE Energy Management Case Study," vol. 641794, no. 641794, 2018, pp. 92–100.

**Título:** Instalações Elétricas de Média Tensão – Postos de Transformação e Seccionamento  
**Autor:** António Augusto Araújo Gomes, José António Beleza Carvalho  
**Editora:** Publindústria  
**Data de Edição:** 2017  
**ISBN:** 9789897232541  
**Nº Páginas:** 195  
**Encadernação:** Capa mole

**Sinopse:**

Esta obra pretende ser, acima de tudo, uma ferramenta didática de apoio aos alunos de cursos de engenharia eletrotécnica, bem como a técnicos responsáveis pelo projeto, execução e exploração de instalações elétricas. Pretende ser ainda uma ferramenta prática de estudo e de trabalho, capaz de transmitir conhecimentos técnicos, normativos e regulamentares sobre o projeto, execução e exploração de postos de transformação e seccionamento aos diversos agentes eletrotécnicos, tornando-os capazes de, para cada instalação na qual sejam intervenientes, maximizar a segurança, a fiabilidade e a funcionalidade, assim como reduzir os custos de execução e exploração das instalações.

António Augusto Araújo Gomes  
 José António Beleza Carvalho

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

**Sobre o livro**

Esta obra pretende ser, acima de tudo, uma ferramenta didática de apoio aos alunos de cursos de engenharia eletrotécnica, bem como a técnicos responsáveis pelo projeto, execução e exploração de instalações elétricas. Pretende ser ainda uma ferramenta prática de estudo e de trabalho, capaz de transmitir conhecimentos técnicos, normativos e regulamentares sobre o projeto, execução e exploração de postos de transformação e seccionamento aos diversos agentes eletrotécnicos, tornando-os capazes de, para cada instalação na qual sejam intervenientes, maximizar a segurança, a fiabilidade e a funcionalidade, assim como reduzir os custos de execução e exploração das instalações.

**Sobre os autores**

**António Augusto Araújo Gomes**

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

**José António Beleza Carvalho**

Bacharel em Engenharia Eletrotécnica pelo Instituto Superior de Engenharia do Porto, Mestre e Doutor em Engenharia Eletrotécnica na especialidade de sistemas de energia pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Professor Coordenador no Departamento de Engenharia Eletrotécnica do Instituto Superior de Engenharia do Porto, desempenhando as funções de Diretor do Departamento. Integra a direção da Escola Tecnológica de Vale de Cambes como representante do Instituto Politécnico do Porto. É autor de vários artigos publicados em conferências nacionais e internacionais, diretor da revista Neutro à Terra e integrou vários juries de provas públicas de doutoramento e para a carreira do ensino superior.



## MOTORES ELÉTRICOS PARA APLICAÇÕES ESPECIAIS

### 1. INTRODUÇÃO

O esforço global para a redução de emissões poluentes a que hoje assistimos, tem despoletado o estudo de alternativas e soluções para a conversão eléctrica de aplicações que, outrora, eram exclusivamente associadas a máquinas térmicas e hidráulicas. O objetivo é não só reduzir as emissões associadas ao princípio de funcionamento destas máquinas, mas também fazer uso das potencialidades da variação de frequência nos motores eléctricos - com vista à redução dos elementos da cadeia de transmissão (caixas de velocidades e outros equipamentos auxiliares).

A procura de novas soluções, aliada às solicitações extremas a que muitas vezes estas máquinas estão sujeitas – tanto a nível do ambiente de instalação como a nível do tipo de funcionamento pretendido – provocou um impulso na necessidade e urgência de um desenvolvimento especializado de motores eléctricos, em áreas que até então não tinham sido estudadas ou tinham sido pouco desenvolvidas.

### 2. UM PRODUTO ESPECIALIZADO E AJUSTADO À APLICAÇÃO

O motor eléctrico industrial mais comum, de indução trifásico, apesar de consistir numa máquina com um princípio de funcionamento simples, quando sujeito a aplicações de elevada exigência necessita ser cuidadosamente analisado de forma a garantir o seu correcto funcionamento na aplicação e o tempo de vida expectável. Um tipo particular de motor eléctrico é o motor antideflagrante. Este é usado em zonas onde estão presentes atmosferas explosivas e o invólucro garante a contenção de uma potencial explosão (fruto da ignição da atmosfera envolvente) no interior do motor. (ver Figura 1)

Para além da possível presença de uma atmosfera explosiva, podem ser identificadas, de forma não extensiva, outras situações extremas, como por exemplo, a exposição a temperaturas baixas ou elevadas, a instalação em aplicações com elevadas vibrações ou impactos, e ainda a necessidade de máquinas com potências cada vez mais elevadas, mantendo velocidades de 3000rpm, por exemplo.

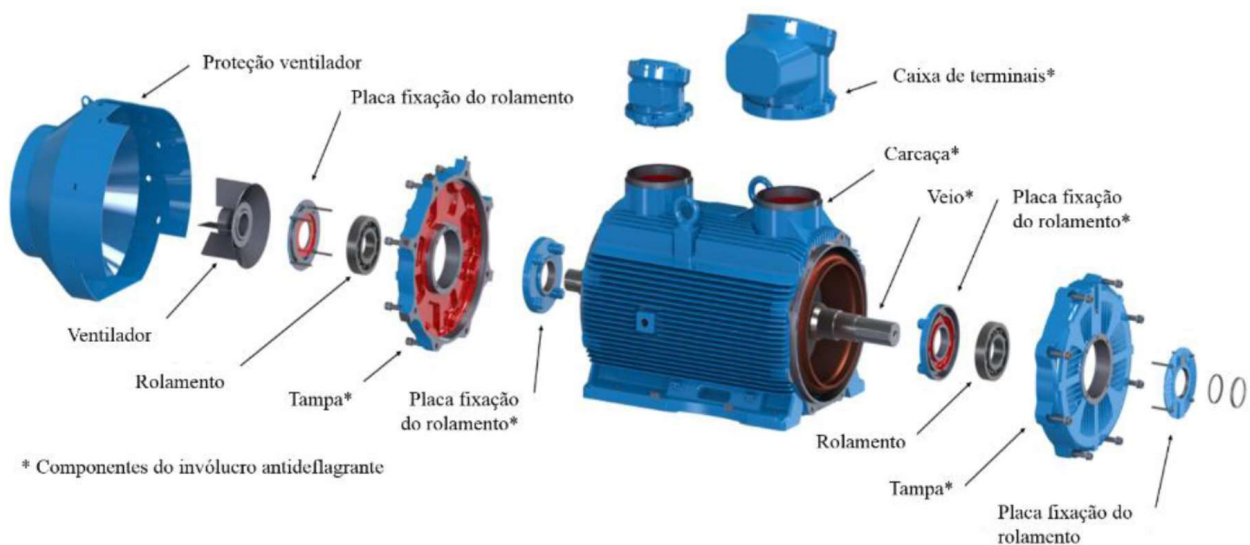


Figura 1 – Vista explodida de um motor de indução trifásico antideflagrante



### 3. Temperaturas extremas

A nível térmico as aplicações mais exigentes para os motores elétricos são, por um lado, as temperaturas extremas negativas - com impacto direto nas propriedades dos materiais - e por outro, as temperaturas muito elevadas - que têm impacto na vida do isolamento, lubrificação, etc.

Motores elétricos instalados em ambientes com temperaturas muito baixas são desenvolvidos de forma a evitar a fragilização dos materiais plásticos e metálicos, através da análise e seleção de materiais apropriados para o efeito. No caso de motores antideflagrantes, a garantia de resistência é ainda mais relevante, pois o invólucro do motor tem de suportar uma explosão de gás no seu interior.

Na Figura 2 pode ser observado um teste de explosão, para temperaturas negativas, realizado numa caixa de terminais.



Figura 2 - Teste realizado em caixa de terminais em temperatura negativa

No caso de temperaturas elevadas o maior impacto concentra-se no isolamento do motor, que pode ficar fragilizado quando o aquecimento natural do mesmo é somado à elevada temperatura ambiente.

Esta fragilização do isolamento tende a causar uma redução do tempo de vida do motor. Em situações limite, como é o caso de aplicações em desertos com elevada exposição solar, por exemplo, o impacto desta exposição pode ser mitigado com recurso a proteções contra a incidência direta da radiação solar. (ver Figura 3)

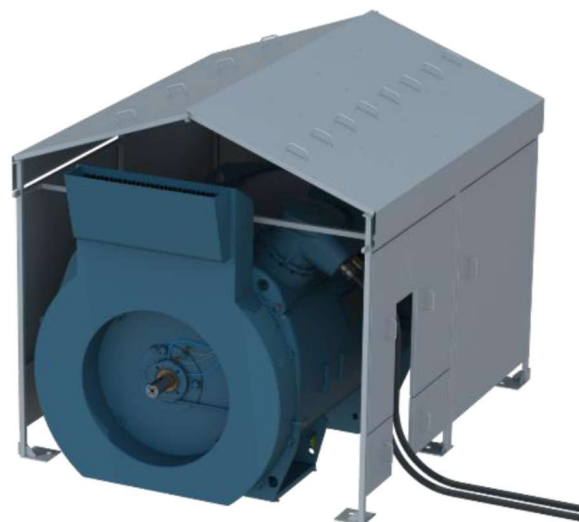


Figura 3 – Projeto de motor com proteção contra incidência direta do sol para aplicação no deserto

Também a lubrificação dos mancais é consideravelmente afetada pelas altas temperaturas. A perda das propriedades dos lubrificantes, e o conseqüente aumento do atrito entre os componentes dos rolamentos, pode levar a uma redução considerável da vida dos mesmos, caso a solução desenvolvida não tenha tido em conta estas condições extremas.

### 4. Impactos e vibrações

É cada vez mais frequente o fornecimento de motores para a substituição de outros, em instalações mais antigas, onde o novo motor tem de ser adaptado ao tipo de acionamento da instalação. Estas instalações ou aplicações, em muitos casos, sujeitam os motores elétricos a vibrações e impactos para além das suas condições normais de funcionamento.

O recurso a análises modais e dinâmicas nos diversos componentes do motor (ver Figura 4) e o seu ajuste às especificidades da aplicação - através da melhoria/reforço dos componentes críticos, permite garantir um aumento na fiabilidade do motor e consequentemente da aplicação, como um todo.

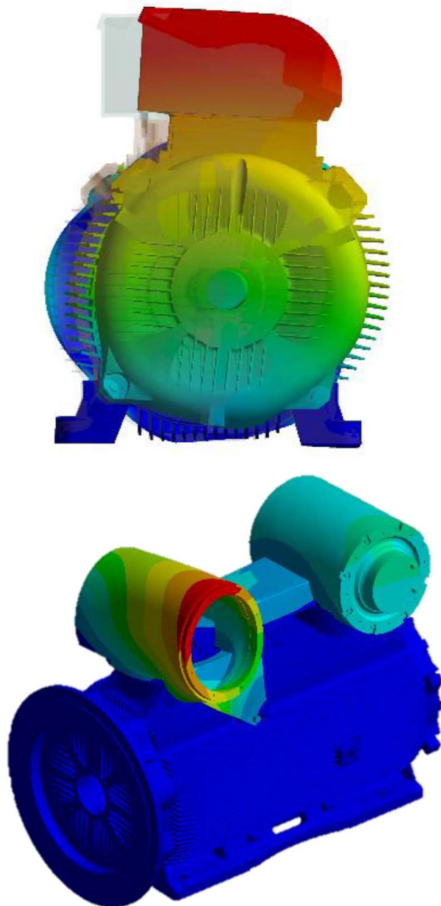
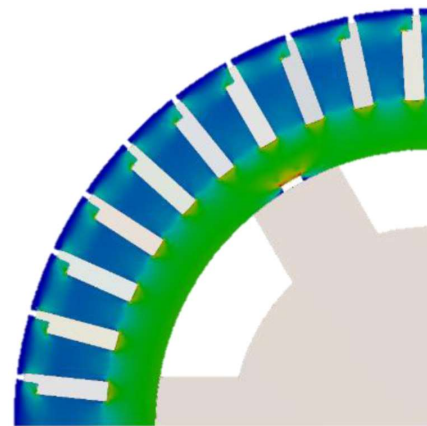


Figura 4 – Simulações realizadas para validar a integridade do motor elétrico em aplicações com elevadas vibrações

## 5. INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE NOS MOTORES DE ELEVADA POTÊNCIA

A ascensão dos variadores de frequência, e a consequente possibilidade de operar motores elétricos tanto a velocidades mais baixas como em sobre velocidade, permitiu uma redução das cadeias de acionamento, reduzindo em certas aplicações a necessidade de utilização de redutores e multiplicadores.

A possibilidade de utilizar os motores elétricos a velocidades superiores foi acompanhada pela necessidade de motores mais potentes para estas aplicações. Tal necessidade implica o estudo e desenvolvimento de novos métodos de engenharia (ver Figura 5) e produtos de forma a atender as aplicações mais exigentes.



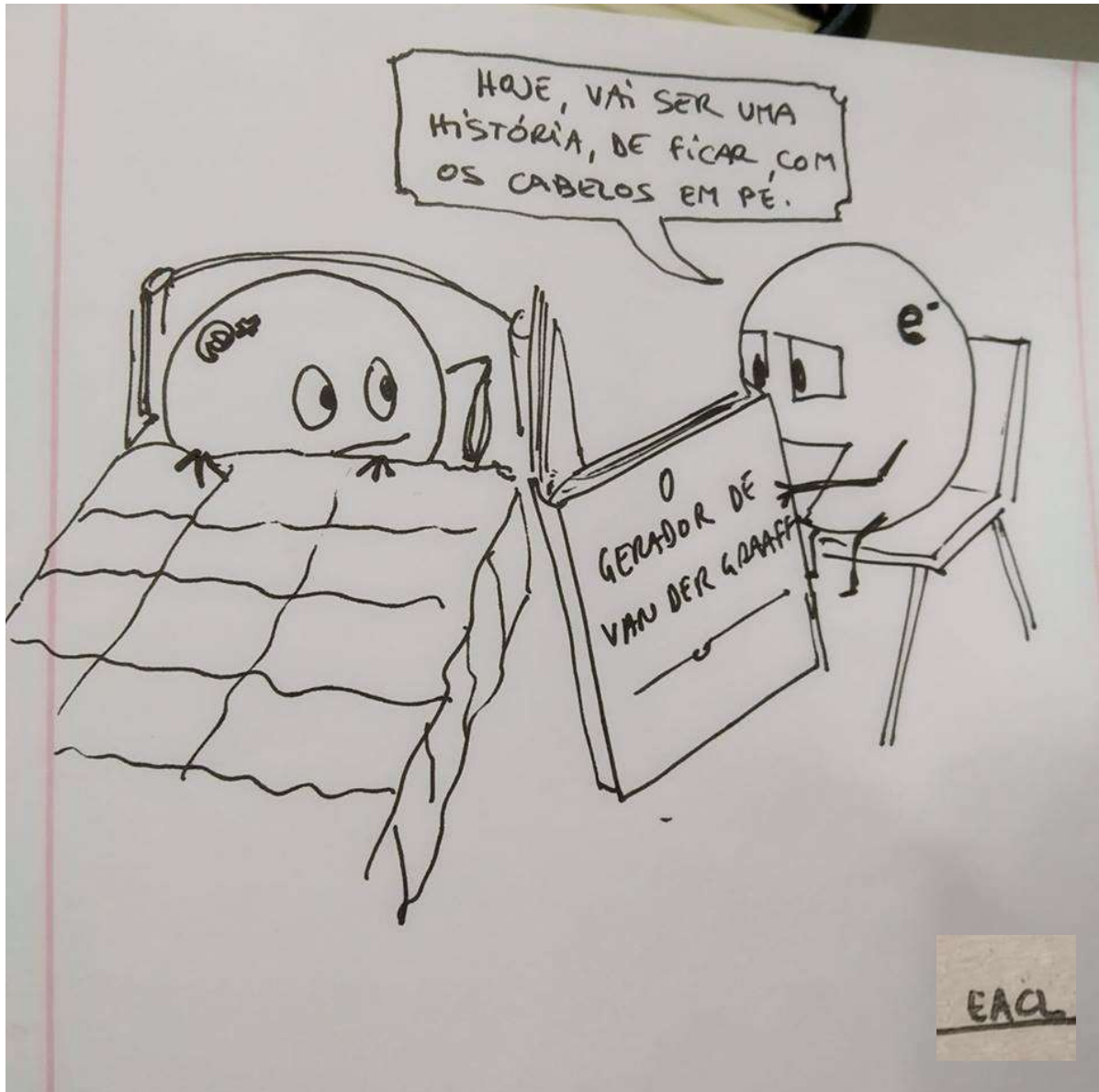
5 – Validação da integridade do bloco magnético em rotor de elevada velocidade tangencial

A análise dos diversos constituintes do rotor - desde o bloco magnético até à gaiola do rotor - é vital para garantir que, nas condições de funcionamento impostas pela aplicação, o motor mantém todas as suas características e fiabilidade.

## 6. CONCLUSÕES

Os mercados cada vez mais exigentes e desafiantes induzem nos fabricantes uma necessidade constante de vencer as suas próprias barreiras tecnológicas de forma a atender, com segurança e competitividade, às aplicações mais exigentes.

Os motores elétricos acompanham esta necessidade, revelando que, apesar de serem uma tecnologia em plena maturidade, há décadas, ainda são desafiados a vencer os limites anteriormente impostos e revelar novas potencialidades tecnológicas. Num mundo em constante mutação e sedento de novos produtos, aumento de eficiência e fiabilidade, o conhecimento tecnológico adquirido e o desenvolvimento de produtos especializados tem um papel crucial no crescimento e competitividade das empresas.



## CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DO MOTOR DE RELUTÂNCIA COMUTADO

### Resumo

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

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

### 1. Introdução

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

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

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

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

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

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

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

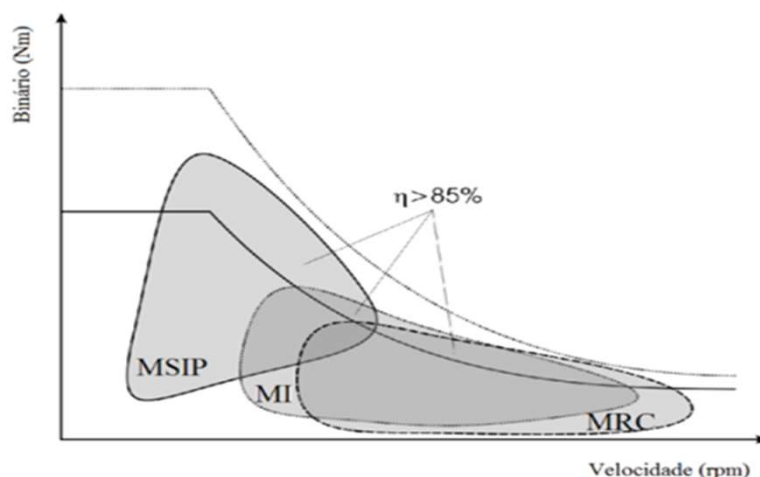


Figura 1– MSIP, MI e MRC: Zonas de Funcionamento com Elevados Rendimentos

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

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

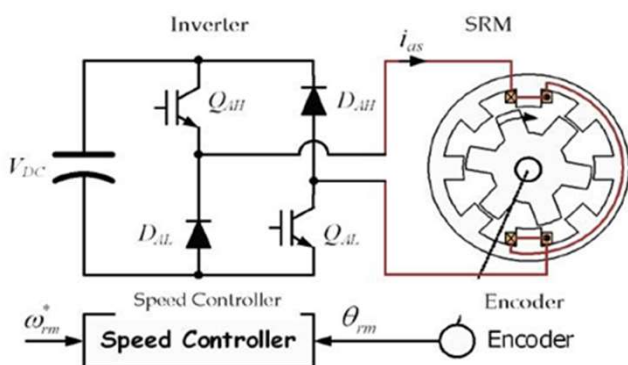


Figura 2– Drive de MRC (estrutura do inversor para uma fase)

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

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

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

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

## 2. MOTORES DE RELUTÂNCIA

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

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

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

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



## 2.1. Aspectos Construtivos do MRC e do MSR

Na Figura 3 estão representadas duas configurações distintas do MRC.



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



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

Figura 3– Motores de Relutância Comutados

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

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

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

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

Tabela 1 – Configurações de MRC

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

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

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

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

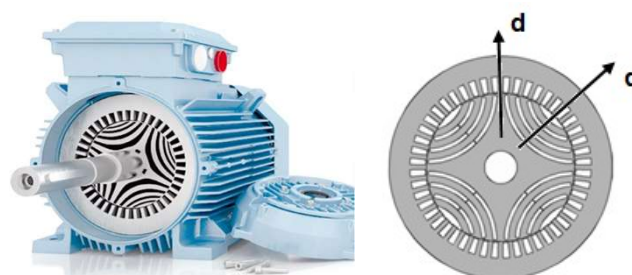


Figura 4– Motor Síncrono de Relutância trifásico (4 polos)

O estator é semelhante ao das máquinas AC polifásicas convencionais: ranhurado na periferia interior, com enrolamentos de fase distribuídos, de modo sinusoidal, pelas ranhuras. Normalmente, no rotor são colocadas barreiras de fluxo axiais (visíveis na Figura 4), que lhe conferem características anisotrópicas, isto é, propriedades magnéticas distintas segundo as direções radiais  $d$  e  $q$ . Ao contrário do MRC, o nº de polos no estator e rotor são iguais. Podem ser alimentados com tensões sinusoidais, simétricas e equilibradas. No entanto, é frequente serem alimentados através de um conversor de potência, de modo a regular a velocidade e otimizar a sua exploração.

### 3. PRINCÍPIO E CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMENTO DO MRC

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

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

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

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

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

#### 3.1. Análise Qualitativa

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

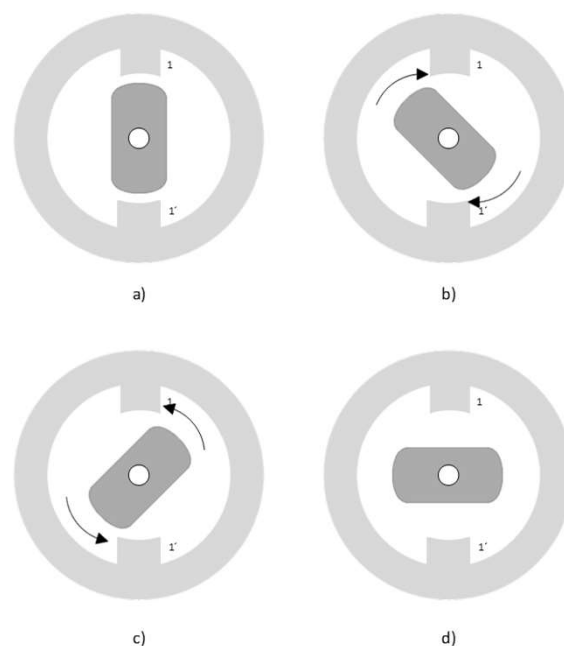


Figura 5– MRC elementar

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

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

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

Estes cenários evidenciam algumas características essenciais do funcionamento do MRC:

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

### 3.2. Características Geométricas: Impacto no Funcionamento do MRC

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

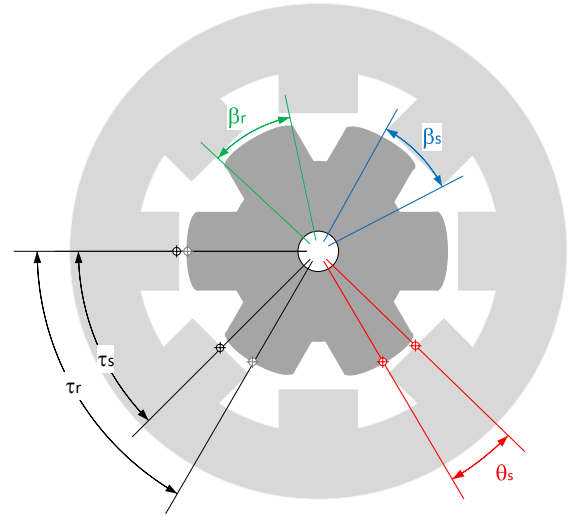


Figura 6– Características de  $L_s$ , corrente (motor & gerador) e zonas de binário (referidas a uma fase), em função de  $\theta$

Para além de evidenciar os arcos polares do estator ( $\beta_s$ ) e do rotor ( $\beta_r$ ), os restantes ângulos são definidos do seguinte modo:

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

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

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

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

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

De notar que o número total de impulsos numa rotação corresponde ao denominador de  $\varepsilon$ .

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

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

Assim, tem-se:

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

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

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

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

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

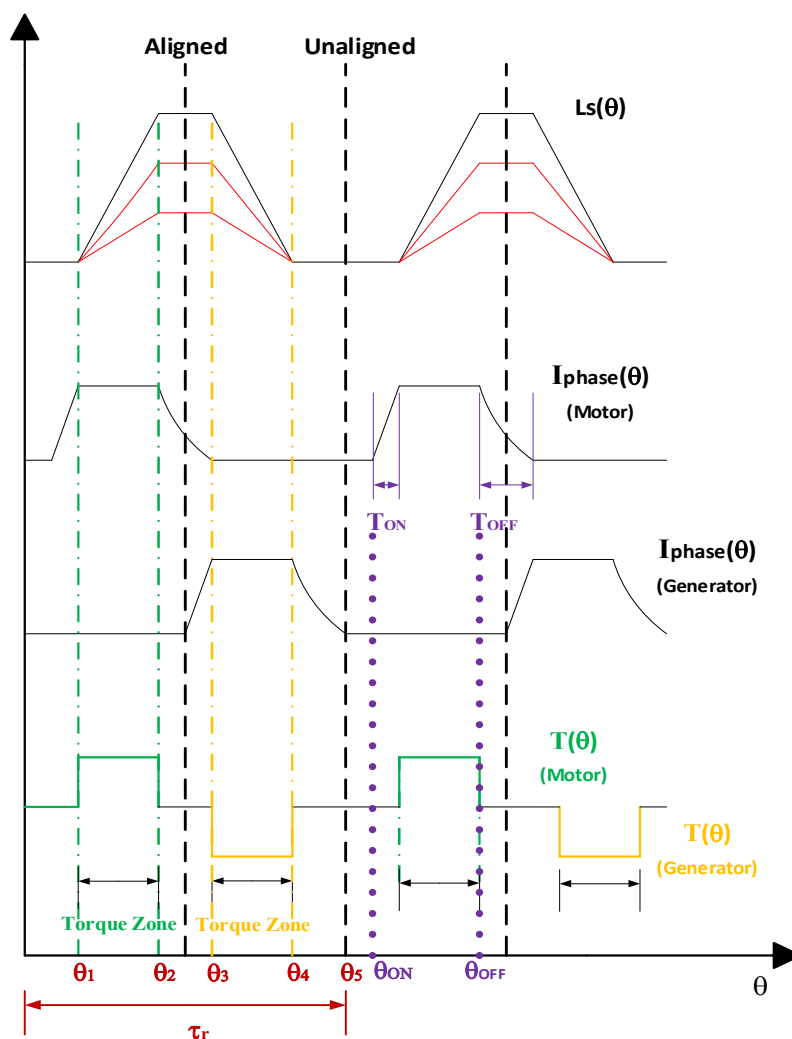


Figura 7– Características de  $L_s$ , corrente (motor & gerador) e zonas de binário (referidas a uma fase), em função de  $\theta$

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

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

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

#### 4. MODELIZAÇÃO E CONVERSÃO DE ENERGIA NO MRC

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

#### 4.1. Modelização

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

##### Equação de Tensão

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

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

$R_s$ : a resistência de uma fase do estator;

$i$ : a corrente instantânea na fase;

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

##### Equação Magnética

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

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

##### Equação Eletromecânica (binário instantâneo)

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

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

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

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

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



#### ▪ Equação Mecânica (Motor)

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

$T_{carga}$ : binário da carga;

$J$ : momento de inércia equivalente do sistema mecânico;

$\omega$ : velocidade angular do rotor;

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

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

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

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

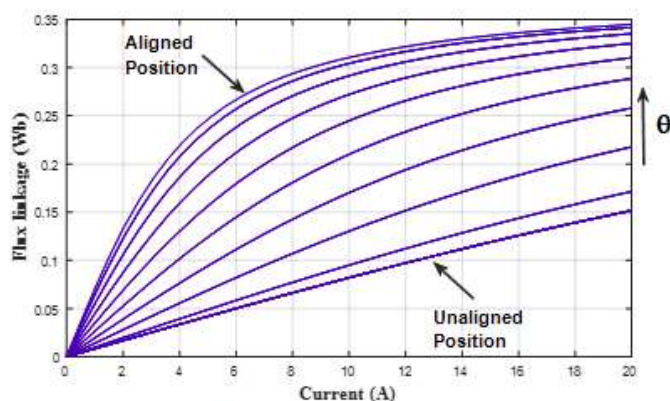


Figura 8 – Características magnéticas do MRC, em função da posição do rotor ( $\theta$ )

#### 4.2. Conversão de Energia: Aproximação Linear

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

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

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

e

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

Na ausência de saturação magnética, as características de magnetização correspondem a retas. Na Figura 9 estão representadas duas características magnéticas, correspondentes à posição inicial  $\theta_0$  e a um deslocamento infinitesimal ( $d\theta$ ), a partir daquela posição, para  $i=i_1$ .

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

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

Pelo que (16) pode ser formulado como:

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

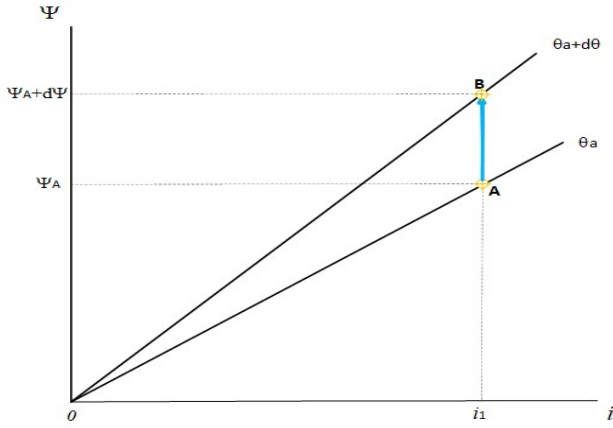


Figura 9 – Características magnéticas para  $\theta_a$  e  $\theta_a+d\theta$

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

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

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

Pelo que a variação da energia absorvida pela fase, entre  $\theta_a$  e  $\theta_b$ , é decomposta em:

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

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

Com efeito, sendo:

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

Vem que:

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

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

Esta expressão evidencia algumas das observações feitas na secção 3.1:

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

## 5. CONCLUSÕES

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

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

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

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

#### REFERÊNCIAS

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

## POWER TRANSFORMERS DIAGNOSIS: STATUS EVALUATION

### ABSTRACT

*The reliability of the electrical grid depends on the availability and performance of crucial components such as power transformers. A failure in these expensive devices threatens supply energy warranty and system overhaul reliability. As transformers approach their end of life, the failure rate tends to increase and, therefore, both equipment diagnostics and working condition assessment are important to detect oncoming faults.*

*In this work, we develop a state assessment methodology, able to evaluate power transformers health condition. The study is about the transformer operation analysis and the associated status index calculation. This index value classifies the transformer general operation, according to the information of five partial indexes, reflecting the work conditions of most critical equipment: insulating oil and paper, winding and bushings. This contribution also presents an extensive transformer state analysis, backed up by in-service equipment.*

**Keywords:** *power transformer diagnostics; oil dissolved gas analysis; assessment methodology; status index; partial indexes*

### 1. INTRODUCTION

Power transformers are one of the fundamental building blocks of the electric system, the central hub in the field of energy distribution and transmission. Therefore, their work state condition is a key factor for reliable operation, once any localized fault can bring serious consequences such as a total failure, or even extended damage on goods or property.

Currently, 70% of large power transformers and transmission lines are twenty-five years or older and 60% of circuit breakers are thirty years or older [1]. A catastrophic failure on transmission system threatens the network operation, and current aging transformers may increase the likelihood of this happening.

The preventive replacement after a certain number of operating years is not considered an eco-nomically viable alternative, since the associated costs of replacing these machines can be enormous. Also, the aging depends on the conditions in which the transformer has been operated. Therefore, work condition monitoring, time-based equipment diagnostic and in-service state evaluation have established themselves as the better options.

The long-term reliability of a transformer depends on its initial high-quality operation. An efficient transformer lifecycle management safeguards a good quality of service throughout the transformer's entire life [2]. Thus, monitoring the daily work conditions is crucial for the lifecycle management, to ensure the components higher-performance under safety conditions, as well as, to minimize operational costs. The ongoing monitoring with a continuously evaluation of stress points situations is important for the detection of coming faults at an early stage [3]. Not less important is an effective information system based on test reports and guided by maintenance records and incoming inspections.

In this work was developed an accurate state operation assessment methodology and its applicability in many power transformers on the Portuguese national grid. It was used diagnostic techniques in the most critical equipment, such as oil dissolved gas analysis, paper furanic compounds,

proporcionais [6], de acordo com a equação (1): bushings and winding degradation status. With these parameters information and their associated state indexes calculation, we can evaluate the global equipment status index.

The broadness of those diagnostic techniques and assessment methodology allow us to view into transformer internal conditions and is a support decision tool to hierarchize maintenance strategies.

## 2. TRANSFORMER EQUIPMENT DIAGNOSIS

### 2.1. Major components

Although power transformers come in a wide variety of sizes and configurations, they include two main active parts: the core and windings.

The core is made of high-permeability, grain-oriented, silicon electrical steel, layered in pieces. Electrical steel is a critical component because of its great impact on the transformer performance once, if it provides low core loss and high permeability, we have efficient and economical power transformers [4]. The windings, made of copper conductors wound around the core, provide electrical input and output.

Power transformers are produced in two basic configurations of core and windings, frequently called as the core-type and the shell-type, both presented in Figure 1, for a single phase. In the core-type cylindrical windings cover the core legs, whereas the common shell-type transformer, the primary and secondary are both on one leg and are surrounded by the core [5].

The core and windings are contained in a mechanical frame, the transformer tank, used for housing the active part of the transformer, immersed in insulating oil. Tanks are constructions made of welded thin steel sheets and support other parts as bushings, which connect power transformers to transmission lines, tap changers, power cable connectors, gas-operated relays, thermometers, relief devices, dehydrating breathers, oil conservator and other control indicators. In Figure 2 we can see a standard core-type power transformer and some of its major components [6].

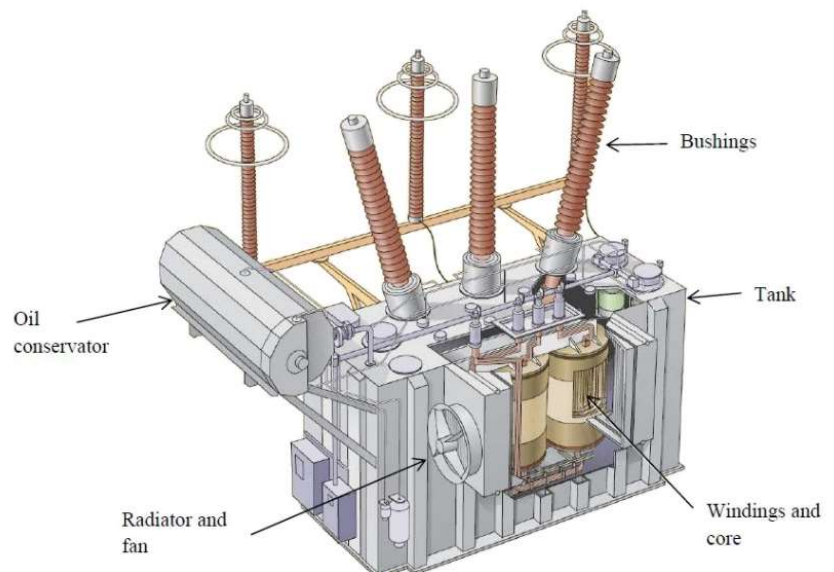


Figure 2 – Transformer major components [6]

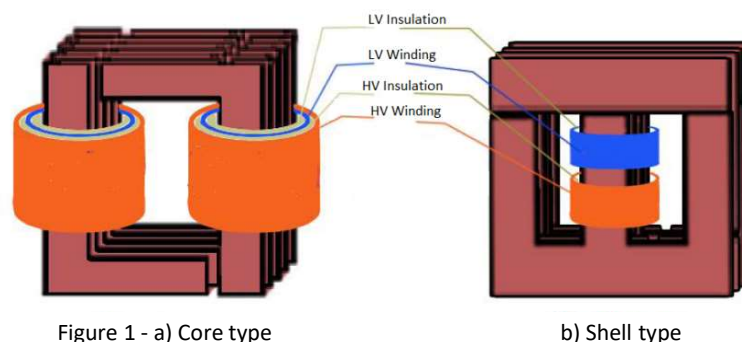


Figure 1 - a) Core type

b) Shell type

Along the transformer operation life, chemical contaminants can occur leading to progressive equipment aging, usually caused by the oxidation processes inside the transformer.

Physical contamination of the oil can also occur, like moisture, particles and fibers or by the occurrence of electric arcs, discharges and overheating [7].

The insulation oil degradation, the irreversible deterioration of the paper and active part are some of the most worrisome phenomena, since they cause the decrease of dielectric capacity, mechanical strength and thermal performance of the equipment.

If the transformer lengthen is wanted, lifespan and safeguard its proper functioning it's essential to carry out diagnostic tools to ensure the accuracy of voltage ratios, verify power ratings, and determine electrical impedances [8], these are the primary security measures to avoid failures.

## 2.2. Insulating oil

The insulating oil is an important part for a transformer state evaluation because its quality gives important information about internal health and physical condition, without the need to apply for intrusive analysis methods.

During its operating life, transformer oil can deteriorate due to heat or to external and internal contamination. The heat results from inherent transformer operation. External contamination is due to the ingress of water and particles, and internal contamination resulted by products of oil, paper and other material aging [9].

In normal conditions, the dielectric oil existing in a transformer tank will not decompose at a fast rate. However, thermal and electrical faults can accelerate the decomposition of the dielectric fluid, as well as the solid insulation [8].

The relevant information about oil contamination and its consequent internal transformer faults can be analyzed by a diagnostic tool for oil-filled apparatus, the dissolved gas analysis (DGA) test. The existing DGA standard is based on some procedures well controlled under laboratory conditions [10]. For transformers with higher operating temperatures or those designed for extended service life, there may exist further limits for the oil oxidation stability test, according to standard analysis methods [11].

With a frequent taken oil samples, it is possible to control fault gas development, by evaluating ratios of different gases and long-term gas generating rates [12]. The fault gas profiles analysis gives information about the evaluation of kind and severity of the foreseen fault and thus guaranteeing an optimal energy transmission [13].

Gases escaping through the conservator tank may lead to misleading concentration levels and underrated gas generation rates especially for free breathing transformers [14]. In addition, one other way is possible: gases from the ambient air, mainly nitrogen and oxygen, are slowly dissolving in the conservator tank oil and are afterwards mixed with the main tank oil [15].

Other factors may affect the insulation oil feature like the aging, high oil conductivity and an in-crease in the water content, all can be symptoms of the degradation process in the insulation. These symptoms also result in an increase of losses, which can be quantified by measuring the power factor or dissipation factor, both related to the dielectric losses in an insulating fluid when used in an alternating electric field.

When an insulating fluid is subjected to an AC current, there are dielectric losses, which cause two effects. The resulting current is deflected slightly out of phase with the AC field that has been applied, and the energy of the losses is dissipated as heat. The power factor of insulating oil equals the cosine of the phase angle between an AC voltage applied to oil and the resulting current [16].



The power factor test is widely used as a preventive maintenance test for insulating oil. A high-power factor indicates deterioration and/or contamination from byproducts such as water, carbon, or other conducting particles, including metal soaps caused by acids attacking transformer metals, and products of oxidation [17]. A new, clean and dry transformer oil has a very low value of power factor. The contamination by moisture or by other contaminants will increase the oil power factor, as well as the aging and oxidation of the oil.

### 2.3. Cellulosic insulating paper

For correct function, each transformer winding needs to be insulated turn from turn with different solid insulating materials used for this purpose. In power transformers, cellulosic insulating paper, also known as Kraft paper, is by far the most widely used material, although nowadays other synthetic materials can be used as alternative. Kraft paper is a mat of cellulose fibers extracted from wood and other vegetable sources [18]. In Figure 3 we can see the isolated active part of a core-type transformer.

Cellulosic insulating papers must have good electrical properties to withstand electrical stresses as well as good

mechanical properties to avoid it became broken whilst in service. However, different mechanical properties may have quite different behaviors during ageing.

Like oil degradation, cellulose degradation is a complex process which can be accelerated by the combined effect of heat, water, acids and oxygen, all of them available to the cellulose environment of the transformer [19], [20].

The DGA approaches can evaluate the ageing process and the deteriorating of cellulose material in the transformer oil, as well as the degree of polymerization measurements. Determining the degree of polymerization (DP) value of cellulose is a standard method of quantifying cellulose paper degradation, DP value indicates the average polymer length of the cellulose molecules [21].

In cellulosic insulating paper, aging caused by thermal stress generates furanic compounds (FUR) as a degradation product. These compounds are a family of chemical substances that differ in stability and production rates. Once these compounds are dissolved in oil, they can be detected and studied by standard analytical methods, how is the case of the Furan analysis test.



Figure 3 - Transformer active part isolated with Kraft paper

## 2.4. Bushings and windings inspection

As seen, the condition of the oil and cellulosic paper insulation is essential for secure and reliable operation of the transformer. In addition to them, another important cause for transformer outages is the replacement of bushings due to a deterioration or failure of the insulation, they are one of the major components causing forced outages of power transformers.

Measuring capacitance and power factor/dissipation factor are performed to investigate the condition of the insulation in bushings or between windings. Changes in capacitance indicate mechanical displacements of windings or partial breakdown in bushings. By measuring the capacitance and losses, problems in the insulation can be detected in an early state, i.e., before a failure occurs.

Aging and degradation of the insulation, coupled with the ingress of water, increase the amount of energy that is converted to heat in the insulation. The rate of these losses is measured by the dissipation factor, called  $\tan(\delta)$ .

The dissipation factor is calculated via the tangent of the angle  $\delta$  between the measured current and the ideal current which would occur if no losses would exist. The power factor is the cosine of the angle  $\phi$ , between the output voltage and the measured current [22]. As seen in Figure 4, the dielectric losses cause a phase shift.

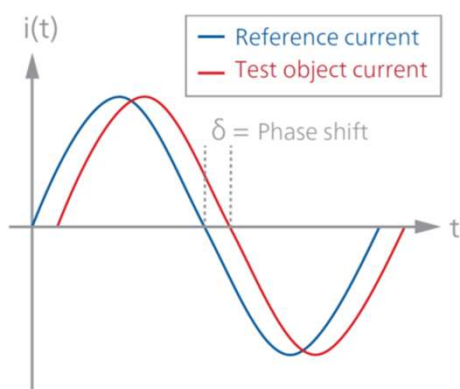


Figure 4 - a) Phase shift

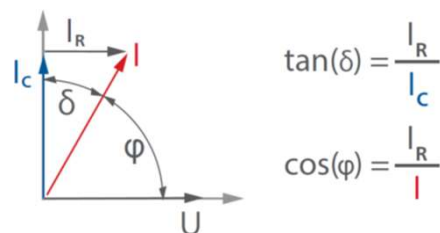
Winding resistance measurements are performed for assessing possible damage in windings or contact problems, such as from the bushings to the windings and the windings to the tap changer. They are also used to check the on-load tap changer (OLTC) as they can indicate when to clean or replace OLTC contacts, or when to replace or refurbish the OLTC itself [22]. With this diagnostic tool, failures can be detected without opening the tap changer compartment.

Static winding resistance measurements are the most common and easiest way to check for issues regarding the winding and OLTC. It investigates the resistance of each subsequent tap position and compares it with the reference measurement data of the manufacturer.

The requirements and tests for different categories of windings carried out on each transformer should follow IEC60076 standard [23].

Those dielectric tests performed on the transformer bushings and windings evaluate the state of insulation through the resistance insulation level and dissipation factor, identifying possible leakage currents in the insulation structure and can quantify its level of degradation.

The combination of these parameters with the oil analysis and the insulation paper provide a very good diagnostic methodology for the global assessment of the power transformer. Therefore, optimizing the combination of various diagnostic techniques is an important issue for the calculation of the transformer status index.



b) Dissipation factor / Power factor

### 3. STATE ASSESSMENT METHODOLOGY

In this work we develop a transformer state assessment methodology, based on the calculation of a numerical indicator, the status index -  $i_{ET}$ , which gives us a global evaluation of the equipment and its current degree of degradation. This indicator is calculated from five partial indexes, three of them based on the analysis tests carried out on the insulating oil and the other two, based on the analysis of the dielectric tests on windings and bushings.

#### 3.1. DGA index, $i_{DGA}$ – Oil Dissolved Gas Analysis

As seen previously, the dissolved gas analysis can provide a reliable assessment about internal transformer faults. Thermal and electrical failures generate typical fault gases which are dissolved in the oil. The DGA index considers the relative concentration and daily rate of change of the fault gases, accordingly to their standards values.

#### 3.2. FUR index, $i_{FUR}$ – Oil Furanic Compounds

Furaldehyde in oil is generated by the degradation of cellulosic materials used in the solid insulation systems of transformers. These compounds are oil soluble and leads to migration into the insulating fluid so, high concentrations or unusual increases concentrations in oil, may indicate cellulose degradation from aging or another fault situation.

Direct measurement of these properties is not practical for in-service transformers, however, the amount of furanic compounds (2-FAL) is directly related to the degree of polymerization (DP) of the paper inside the transformer. The FUR index analyzes the level characterization of the insulation paper degradation, directly related to the equipment life expectancy.

#### 3.3. AOL index, $i_{AOL}$ – Oil Physico-Chemical Properties

The insulating oil deteriorates gradually with use, losing slowly its dielectric and thermal properties, by a series of physical and chemical reactions.

The causes are the absorption of the moisture from air and outer particles that get into the oil and cause oxidation, decomposition and polymerization of insulation materials, producing non-soluble particles collected in the coil and windings. These sediments do not affect directly the dielectric breakdown, but deposits formed on the winding, hinder its normal refrigeration and accelerate the oil oxidation. The AOL index analyses the concentration of various oil parameters, indicative of natural oil degradation, such as water and sediment content, color, acidity level and disruptive voltage.

#### 3.4. ATV index, $i_{ATV}$ – Bushings Degradation

The aim of this index is to establish a classification of the degradation level of the transformer capacitive bushings, by directly measuring its dielectric dissipation factor values,  $\text{tg}(\delta)$ , from both primary and secondary bushings, for a test voltage of 10 kV.

#### 3.5. AER index, $i_{AER}$ – Winding Degradation

Similarly, with this index we establish a classification of degradation level of transformer windings, based on the values from dielectric dissipation factor,  $\text{tg}(\delta)$ , applied with a test voltage of 10 kV and the values from insulation resistance at a test voltage of 5 kV during 10 minutes.

#### 3.6. Transformer Status Index – $i_{ET}$

The transformer status index  $i_{ET}$  is obtained by weighing the values of the five indexes,  $i_{DGA}$ ,  $i_{FUR}$ ,  $i_{AOL}$ ,  $i_{ATV}$  and  $i_{AER}$ , getting the global indicator of the transformer state. The indexes value weights vary according to the result of each one, affording marked relevance to the priority cases, in a way they are not masked by the calculation of mean values.

The equation (1) gives us the global state index:

$$i_{ET} = i_{DGA} \cdot K_{DGA} + i_{FUR} \cdot K_{FUR} + i_{AOL} \cdot K_{AOL} + i_{ATV} \cdot K_{ATV} + i_{AER} \cdot K_{AER} \quad (1)$$

Each of the  $K_x$  weighting values is obtained according to equation (2):

$$K_x = \frac{P_x}{P_{DGA} + P_{FUR} + P_{AOL} + P_{ATV} + P_{AER}} \quad (2)$$

where  $x$  represents any of the 5 previous parameters. For instance, for the calculation of  $K_{DGA}$ , equation (2) is replaced by (3):

$$K_{DGA} = \frac{P_{DGA}}{P_{DGA} + P_{FUR} + P_{AOL} + P_{ATV} + P_{AER}} \quad (3)$$

The weights  $P_x$  take on values according to their specific index, as seen in equation (4):

$$P_x = 1 + n \cdot i_x \cdot \frac{1}{\sum_{j=1}^T j} \quad (4)$$

being  $T$  the maximum value of the index. In this study we consider  $T=7$ , which are seven discrete ranks of classification, ranging from 1 to 7, being 1 the best and 7 the worst. The variable  $n$  is used as a decision variable for fine tuning the calculation, allowing to linearly hold off all the weights values, giving more relevance to higher weights in the final equation of  $i_{ET}$ .

#### 4. RESULTS AND ANALYSIS

The assessment methodology was applied to 241 in-service power transformers from the Portuguese national grid. In Figure 5, the results are sorted down by the transformer state index. The number of transformers is higher in state index level 2 and 3 (yellow zone), than those in level 1 (green zone). This is expected since they are the first levels at which evident degradation symptoms begin to appear, so this serve as an indication of a warning.

We got more information from this sample, about 77% of the analyzed equipment is in a positive state, the remaining 23% in a non-favorable state, with 2 transformers in a very critical level, red zone in Figure 5.

The worst classified equipment is a three-phase 150/63 kV power transformer with more than 35 years, actually indicated for possible deactivation, due to an advanced degradation of the insulation paper.

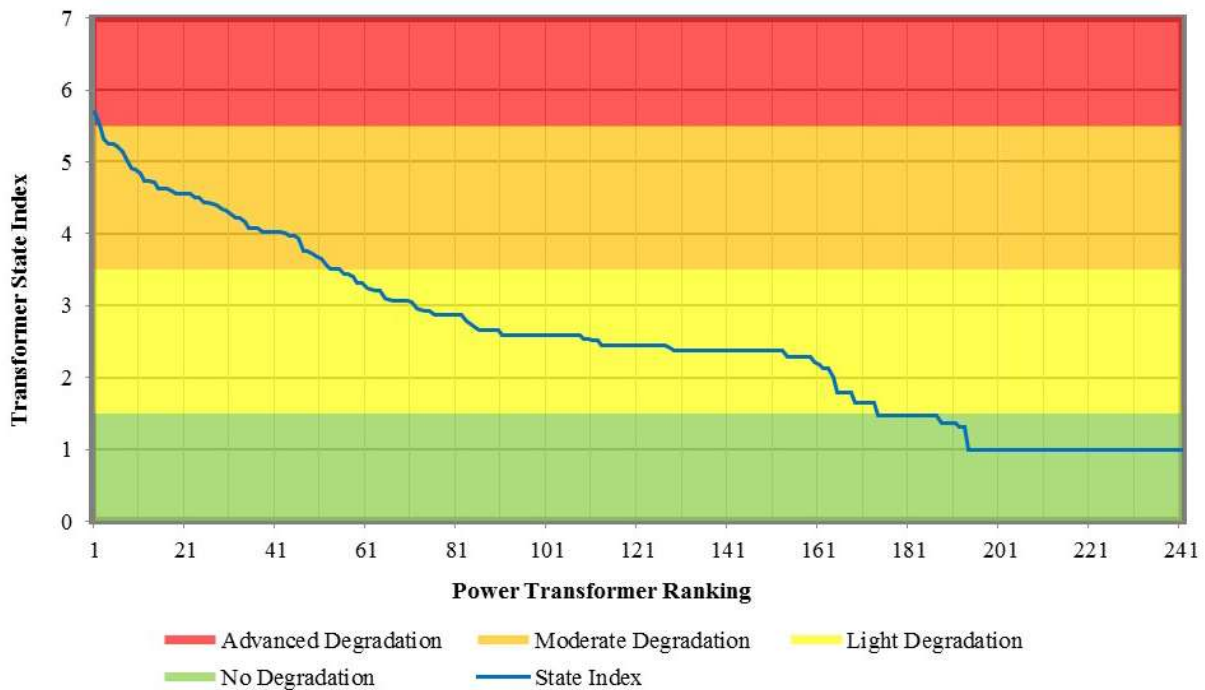


Figure 5 - Power Transformer ranking by state index

The second most critical equipment is a 400/63 kV three-phase transformer, operating for more than 25 years, already indicated for reconditioning, due to an advanced level degradation in oil and in the active part.

Another advantage of this methodology is the state evaluation from the dynamic representation of the partial state indexes and their standard limits, as seen in Figure 6.

The five partial indexes are represented by the central black line, as well as their numerical classification. The lines parallel to the center of the pentagon indicates the partial indicators and the background colors indicate the limits of degradation degrees. The final indicator is on the vertical axis of the polygon and its position depends on their value.

## 5. CONCLUSION

In this work it was made a diagnostics of transformer equipment, as well as the state indexes analysis. The study proposes a methodology to evaluate the global state of the

power transformers in the electrical grid, based on five partial indexes values, three of them from tests carried out on the insulating oil and other two, from dielectric tests on windings and bushings.

The state assessment methodology provides important information about the transformer components condition in-service and constitute an important decision support to establish the hierarchy of maintenance activities. Thus, it is possible to identify the degradation degree of some specific equipment, allowing preventive measures to be taken accordingly.

The methodology was applied in real case equipment, with an exhaustive analysis of 241 transformers on service in Portuguese national electric grid. With this study it becomes possible, not only a statistical analysis of historical data, but also it can anticipate trends and establish cause-effect relationships upon the different parameters and their operation work conditions.

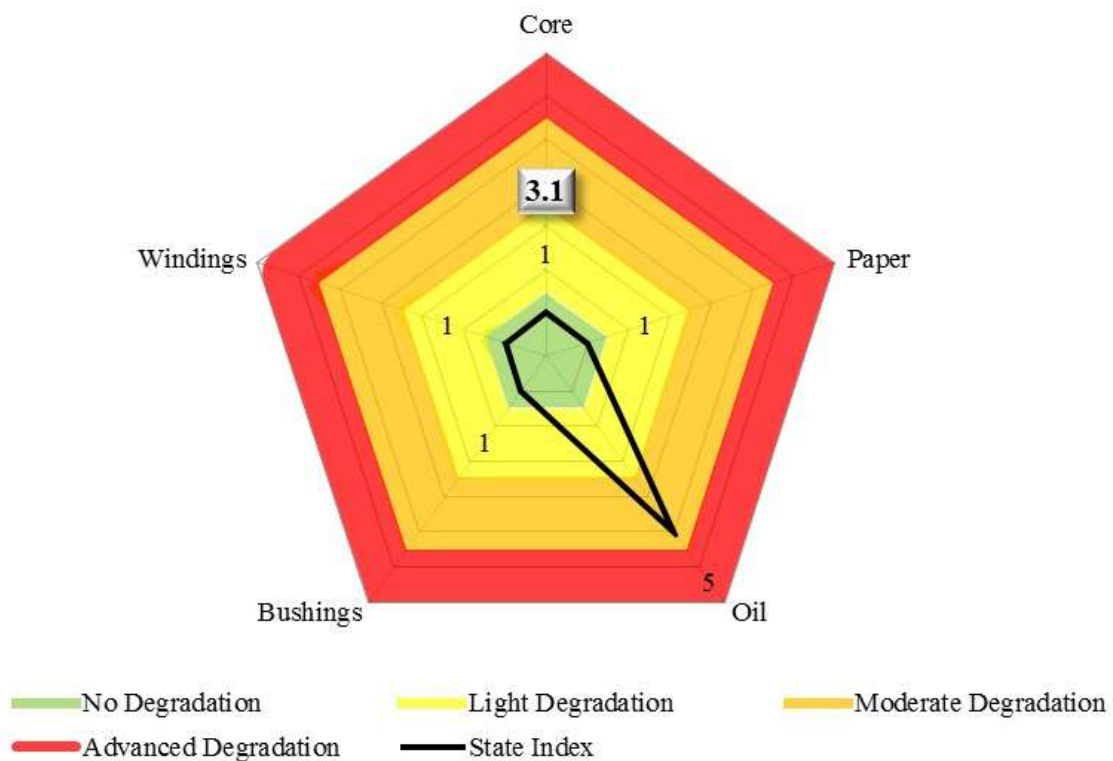


Figure 6 - Power Transformer state index assessment tool

## REFERENCES

- [1] U.S. Department of Energy, "An Assessment of Energy and Research Opportunities," in *Enabling Modernization of the Electric Power System: Quadrennial Technology Review*, 2015.
- [2] Mario Willms, *Power Engineering Guide*. Alemanha: Siemens Aktiengesellschaft, 2014.
- [3] Stefan Tenbohlen, Sebastian Coenen, Mohammad Djamali, and Andreas Müller, "Diagnostic Measurements for Power Transformers," *Energies*, p. 25, 2016.
- [4] Patricia Hoffman and William Bryan, "Large Power Transformers and the U.S. Electric Grid," U.S. Department of Energy, 2012.
- [5] *Industrial Technology Review*, "Right Choice of Dry Type or Liquid-Filled Transformer," *Electrical*, vol. nº 280, 2017.
- [6] Jean Sanchez and Mladen Banovic, "Basics of Power Transformers," *Transformers Magazine*, vol. 1, no. 1, pp. 22-25, 2015.
- [7] ABB, "Operation and Maintenance for Power Transformers," *User's Manual 1ZCL000002EG-EN*, 2007.
- [8] Radu Godina, Eduardo Rodrigues, João Matias, and João Catalão, "Effect of Loads and Other Key Factors on Oil-Transformer Ageing: Sustainability Benefits and Challenges," *Energies*, vol. 8, no. open access, pp. 12147-12186, 2015.
- [9] CIGRE, "Ageing cellulose in mineral oil insulated transformer," *Brochure 323 TF D1.01.109*, 2007.
- [10] Sung Wook Kim, Sung-jik Kim, Hwang-dong Seo, and Michel Duval, "New Methods of DGA Diagnosis using IEC TC 10 and Related Databases Part 1: Application of Gas-ratio Combinations," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 20(2), pp. 685-690, April 2013.
- [11] IEC60296, "Fluids for electrotechnical applications - Unused mineral insulating oils for transformers and switchgear," 2012.
- [12] IEEE, "Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil Immersed Transformers," New York, NY, USA, IEEE Std. C57.104 2008.
- [13] Jae Ryong Jung, H D Seo, S J Kim, and Sung Wook Kim, "Advanced Dissolved Gas Analysis (DGA) Diagnostic Methods with Estimation of Fault Location for Power Transformer Based on Field Database," in *CIGRE 2016*, vol. A2-106, France, 2016.
- [14] R. Anderson, U.R. Roderick, V. Jaakkola, and N. Östman, "The Transfer of Fault Gases in Transformers and Its Effect upon the Interpretation of Gas Analysis Data," Paris, France, Cigré Report 12-02 1976.
- [15] E. Bräsel, O. Bräsel, and U. Sasum, "Gashaushalt bei Transformatoren der offenen Bauart—Neue Erkenntnisse," in *EW-Medien und Kongresse*, Frankfurt, Germany, 2010, pp. 56-59.
- [16] Paul Gill, *Electrical Power Equipment Maintenance and Testing*. USA: CRC Press, 2014.
- [17] Hydroelectric Research and Technical Services Group, "Transformer Diagnostics," USA, 2003.
- [18] C. Fernández, F. Ortiz, C. Olmo, J. Carcedo, and A. Ortiz, "Assessment of the temperature distribution into a transformer through tensile," *RE&PQJ - Renewable Energy and Power Quality Journal*, vol. 1, no. 14, pp. 720-724, May 2016.
- [19] CIGRE DI 143, "Insulating Oil Regeneration and Dehalogenation," *Working Group D1.01 (TF 12) ISBN: 978-2-85873-100-8*, 2010.
- [20] A. De Pablo et al., "Furanic compounds analysis as a tool for diagnostic and maintenance of oil-paper insulation systems," in *CIGRE Symposium on Diagnostic and Maintenance techniques*, Berlin, 1993, pp. Paper 110-09.
- [21] Huo-Ching Sun, Yann-Chang Huang, and Chao-Ming Huang, "A Review of Dissolved Gas Analysis in Power Transformers," *Energy Procedia*, pp. 1220-1225, 2012.
- [22] OMICRON, "Testing and diagnostics of power transformer," *OMICRON L2673, OMICRON L2673*, December 2016.
- [23] IEC60076, "Power transformers – Part 3: Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air," 2000.



**Título:** Instalações Elétricas de Baixa Tensão – Canalizações elétricas  
**Autor:** António Augusto Araújo Gomes  
**Editora:** Publindústria  
**Data de Edição:** 2015  
**ISBN:** 9789897230752  
**Nº Páginas:** 151  
**Encadernação:** Capa mole

**Sinopse:**

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

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



## INSTALAÇÕES DE LIGAÇÃO À TERRA

### 1. ASPETOS GERAIS

Uma instalação de ligação à terra consiste num conjunto de um ou de vários elétrodos de terra interligados e dos condutores de proteção e de terra correspondentes.

Os objetivos principais de uma eficaz e segura ligação à terra são:

- Assegurar que as pessoas nas proximidades de instalações ligadas à terra não estejam expostas ao perigo de eletrocussão ;
- Providenciar meios para conduzir correntes elétricas para a terra sob condições normais ou em situações de defeito sem exceder os limites operativos dos equipamentos ou afetar a continuidade de serviço.

No propósito de atingir os objetivos anteriormente enunciados, os principais requisitos de uma instalação de ligação à terra são:

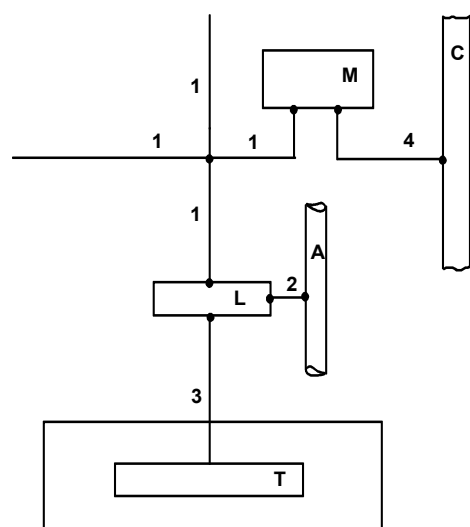
- Cumprimento das normas e regulamentos;
- Baixa impedância;
- Fiável e robusto do ponto de vista mecânico;
- Resistente à corrosão;
- Tempo de vida expectável igual ou superior ao da instalação.

### 2. CONSTITUIÇÃO DE UMA INSTALAÇÃO DE LIGAÇÃO À TERRA

A figura 1 mostra um desenho esquemático de uma instalação de ligação à terra.

#### 2.1. Massa (M)

Uma massa consiste numa parte condutora de um equipamento elétrico suscetível de ser tocada, em regra, isolada das partes ativas mas podendo ficar em tensão em caso de defeito.



Onde:

A - Canalização metálica principal de água

C - Elemento condutor

L - Terminal principal de terra

M - Massa

T - Elétrodo de terra

1 - Conductor de proteção

2 - Conductor da ligação equipotencial principal

3 - Conductor de terra

4 - Conductor de equipotencialidade suplementar

Figura 1. Desenho esquemático de uma instalação de ligação à terra

O termo massa abrange, essencialmente, as partes metálicas dos equipamentos elétricos que estejam separadas das partes ativas apenas por um isolamento principal, mas que podem ficar, acidentalmente, em ligação elétrica com partes ativas em consequência de uma falha do isolamento principal ou das medidas de fixação e de proteção.

Assim:

- a) são consideradas massas as partes metálicas acessíveis dos equipamentos elétricos (exceto as dos da classe II ), as armaduras metálicas dos cabos e as condutas metálicas, com condutores isolados;
- b) não são consideradas massas todas as partes metálicas dos equipamentos elétricos da classe II.

## 2.2. Condutor de Proteção (PE)

Um condutor de proteção é um condutor prescrito em certas medidas de proteção contra os choques elétricos e destinado a ligar eletricamente algumas das partes seguintes:

- ponto de alimentação ligado à terra ou a um ponto neutro artificial;
- massas (M);
- elementos condutores;
- terminal principal de terra (L);
- elétrodo de terra (T).

Podem ser usados como condutores de proteção:

- a) condutores pertencentes a cabos multicondutores;
- b) condutores isolados ou nus que tenham o mesmo invólucro (conduta, calha, etc.) que os condutores ativos;
- c) condutores separados, nus ou isolados;
- d) revestimentos metálicos (armaduras, écrans, bainhas, etc.) de alguns cabos.
- e) condutas metálicas ou outros invólucros metálicos para os condutores;
- f) certos elementos condutores.

Para garantir que os condutores de proteção são capazes de escoar a corrente máxima de defeito previsível sem aquecimento que possa pôr em risco a sua conservação e continuidade, a secção sua deve ser igual ao valor normalizado igual ou imediatamente superior ao valor resultante da aplicação da expressão (válida apenas para  $t \leq 5s$ ).

$$S = \frac{I\sqrt{t}}{k} \quad (1)$$

Onde:

- S Secção do condutor de proteção, em milímetros quadrados
- I Valor eficaz da corrente de defeito que pode percorrer o dispositivo de proteção em consequência de um defeito de impedância desprezável, em amperes
- t Tempo de funcionamento do dispositivo de corte, em segundos
- k Fator cujo valor depende da natureza do metal do condutor de proteção, do isolamento e de outros componentes do condutor, bem como das temperaturas inicial e final.

A tabela 1 mostra os valores de k para condutores de proteção isolados e não incorporados em cabos e para condutores de proteção nus em contacto com a bainha exterior dos cabos.

Tabela 1. Valores de k para condutores de proteção isolados e não incorporados em cabos e para condutores de proteção nus em contacto com a bainha exterior dos cabos.

Natureza do isolamento dos condutores de proteção ou da bainha exterior dos cabos	PVC	XLPE ou EPR	Borracha butílica
Temperatura final (°C)	160	250	220
Material do condutor	Valores de K		
Cobre	143	176	166
Alumínio	95	116	110
Aço	52	64	60

Nota: A temperatura inicial do condutor foi considerada igual a 30 °C

A tabela 2 mostra os valores de k para condutores de proteção constituintes de um cabo multicondutor.

Tabela 2. Valores de k para condutores de proteção constituintes de um cabo multicondutor

Natureza do isolamento dos condutores de proteção ou da bainha exterior dos cabos	PVC	XLPE ou EPR	Borracha butílica
Temperatura inicial (°C)	70	90	85
Temperatura final (°C)	160	250	220
Material do condutor	Valores de K		
Cobre	115	143	134
Alumínio	76	94	89

A secção não deve ser inferior aos valores indicados na Tabela 3.

Tabela 3. Secção mínima dos condutores de proteção

Secção dos condutores de fase da instalação $S_F$ (mm <sup>2</sup> )	Secção mínima dos condutores de proteção $S_{PE}$ (mm <sup>2</sup> )
$S_F \leq 16$	$S_{PE} = S_F$
$16 < S_F \leq 35$	$S_{PE} = 16$
$S_F > 35$	$S_{PE} = S_F/2$
Quando, pela aplicação das condições indicadas, os valores obtidos não corresponderem a valores normalizados, devem ser usados os valores normalizados mais próximos, por excesso.	

Os condutores de proteção que não façam parte da canalização de alimentação devem ter uma secção não inferior a:

- 2,5 mm<sup>2</sup>, se de cobre, no caso de condutores com proteção mecânica;
- 4 mm<sup>2</sup>, se de cobre, no caso contrário.

Quando o condutor de proteção for comum a mais do que um circuito, a sua secção deve ser dimensionada para a maior das secções dos condutores de fase.

### 2.2.1. Condutor Principal de Proteção

Condutor de proteção ao qual são ligados os condutores de proteção das massas, os condutores de terra e, eventualmente, os condutores das ligações equipotenciais.

### 2.2.2. Ligação equipotencial

Ligação elétrica destinada a colocar ao mesmo potencial, ou a potenciais aproximadamente iguais, massas e elementos condutores.

Podem distinguir-se:

- a ligação equipotencial principal;
- as ligações equipotenciais suplementares;
- as ligações equipotenciais locais não ligadas à terra.

### 2.2.3. Ligação Equipotencial Principal

Permite evitar que, em consequência de um defeito com origem no exterior do edifício, possa surgir uma diferença de potencial entre os elementos condutores do edifício.

Em cada edifício devem ser ligados à ligação equipotencial principal os elementos condutores seguintes:

- o condutor principal de proteção;
- o condutor principal de terra ou o terminal principal de terra;
- as canalizações metálicas de alimentação do edifício e situadas no interior (por exemplo, de água e gás);
- os elementos metálicos da construção e as canalizações metálicas de aquecimento central e de ar condicionado (sempre que possível).
- A secção das ligações equipotenciais principais não deve ser inferior a metade da secção do condutor de proteção de maior secção existente na instalação, com o mínimo de 6 mm<sup>2</sup>, podendo, contudo, esse valor ser limitado a 25 mm<sup>2</sup>, se de cobre, ou a uma secção equivalente, se de outro metal.

### 2.2.4. Ligação Equipotencial Suplementar

A ligação equipotencial suplementar deve interligar todas as partes condutoras simultaneamente acessíveis, quer se trate das massas dos equipamentos fixos quer dos elementos condutores .

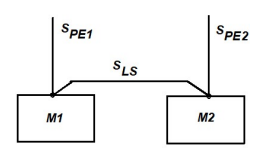
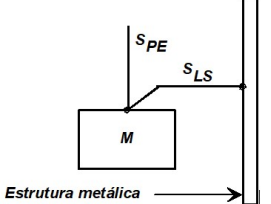
Devem ser ligados:

- As canalizações metálicas de água quente, água fria, ventilação e esgoto;
- O corpo dos aparelhos sanitários metálicos;
- Aros metálicos das portas e das janelas por se encontrarem em contato com elementos metálicos da construção.
- Não é necessário ligar:
  - Toalheiros não elétricos;
  - Massas de aparelhos elétricos da classe II;
  - Grelhas metálicas de ventilação natural;
  - Radiadores de aquecimento central ligados por canalizações isolantes.

A Figura 2 mostra o esquema simplificado de ligações numa casa de banho.

A secção mínima das ligações equipotenciais suplementares (ou locais) entre duas massas ou entre uma massa e uma estrutura metálica são as indicadas na Tabela 4.

Tabela 4. Secção mínima das ligações equipotenciais suplementares (ou locais) entre duas massas ou entre uma massa e uma estrutura metálica

Duas massas	Uma massa e uma estrutura metálica
<p>Se:</p> $S_{PE1} \leq S_{PE2} \Rightarrow S_{LS} \geq S_{PE1}$	$S_{LS} \geq \frac{S_{PE}}{2}$ <p>Com o mínimo de 2,5 mm<sup>2</sup> para condutores mecanicamente protegidos ou 4 mm<sup>2</sup>, caso contrário.</p>
	
<p><math>S_{PE}</math> Secção do condutor de proteção  <math>S_{LS}</math> secção do condutor da ligação equipotencial suplementar  M, M1 e M2 Massas.</p>	

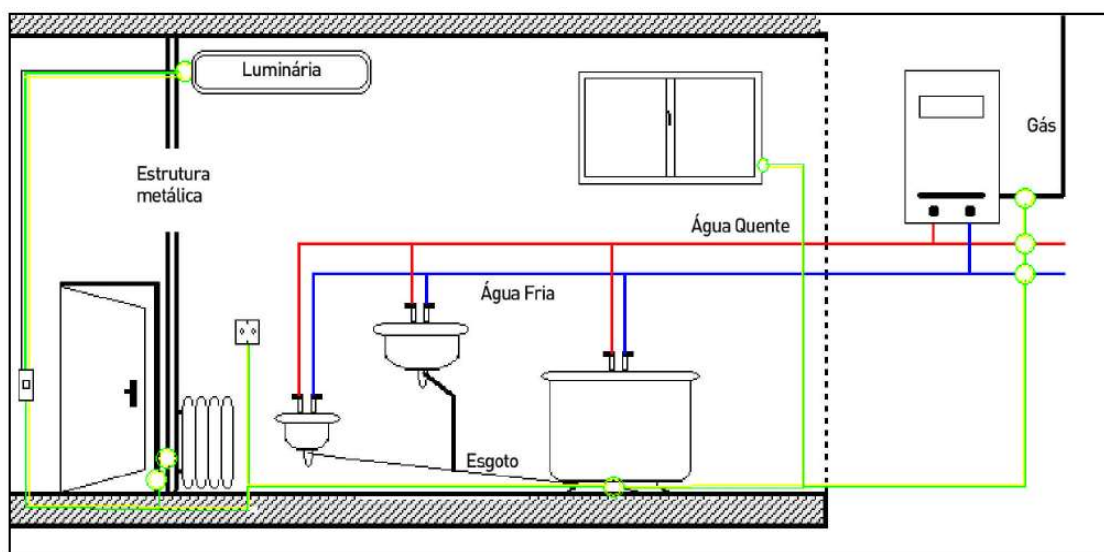


Figura 2. Esquema simplificado de ligações numa casa de banho (CERTIEL Mais, Ficha técnica 20, Junho 2007)

### 2.3. Terminal Principal de Terra (Barra Principal de Terra)

Terminal ou barra previstos para ligação aos dispositivos de ligação à terra dos condutores de proteção, incluindo os condutores de equipotencialidade e, eventualmente, os condutores que garantem uma ligação à terra funcional.

Todas as instalações elétricas devem ter um terminal principal de terra, ao qual devem ser ligados:

- os condutores de terra;
- os condutores de proteção;
- os condutores das ligações equipotenciais principais;
- os condutores de ligação à terra funcional, se necessário.

### 2.4. Condutor de Terra

O condutor de terra é um condutor de proteção que permite ligar o terminal principal de terra ao elétrodo de terra.

Nos condutores de terra, deve ser previsto um dispositivo instalado em local acessível e que permita a medição do valor da resistência do elétrodo de terra das massas, podendo esse dispositivo estar associado ao terminal principal de terra.

Os condutores de terra devem satisfazer ao indicado na secção 543.1 das RTIEBT (secção mínima) e, no caso de serem enterrados, a sua secção deve ter os valores mínimos indicados na tabela 5.

### 2.5. Elétrodo de Terra (T)

Um elétrodo de terra consiste num corpo condutor ou conjunto de corpos condutores em contacto íntimo com o solo, garantindo uma ligação elétrica com este.

Só deve haver um elétrodo de terra num edifício (terra única) para todas as instalações, independentemente da arquitetura (mesmo quando as frações não comunicam com zonas comuns nem existe instalação coletiva).

Os elétrodos de terra podem ser especialmente concebidos para o efeito, sendo designados de “Elétrodos de terra”, ou serem formados pelas estruturas metálicas enterradas, sendo designados de “Elétrodos de terra de facto”.

Podem ser usados como elétrodos de terra os elementos metálicos seguintes :

- tubos, varetas ou perfilados;
- fitas, varões ou cabos nus;
- chapas;
- anéis (de fitas ou de cabos nus) colocados nas fundações dos edifícios;
- armaduras do betão imerso no solo;
- canalizações (metálicas) de água (desde que satisfaçam ao indicado na secção 542.2.5 das RTIEBT);
- outras estruturas enterradas apropriadas (veja-se 542.2.6 RTIEBT).

Tabela 5. Seção mínima dos condutores de terra em função das suas características

Condutor de terra	Protegido mecanicamente	Não protegido mecanicamente
Protegido contra a corrosão	1)	16 mm <sup>2</sup> , se de cobre nu ou aço galvanizado
Não protegido contra a corrosão		25 mm <sup>2</sup> , se de cobre 50 mm <sup>2</sup> , se de aço galvanizado
1) Aplicam-se as regras definidas para os condutores de proteção		



### 2.5.1. Eléktrodos de terra especialmente concebidos para o efeito

#### a) Características

Os Eléktrodo de Terra (T) são realizados por meio de elementos enterrados no solo, podendo estes serem em aço galvanizado a quente, em aço revestido a cobre perfeitamente aderente, em cobre nu ou em cobre revestido a chumbo.

A Tabela 6 indica os diversos tipos de eléctrodos de terra e as respetivas características mínimas.

No estabelecimento dos eléctrodos de terra devem ser observadas as regras seguintes:

i. Eléktrodos de Terra (T) constituídos por condutores enterrados horizontalmente

Os eléctrodos de terra constituídos por condutores enterrados horizontalmente são constituídos por:

- condutores unifilares ou multifilares em cobre ou recobertos por uma bainha de chumbo e de secção  $\geq 25 \text{ mm}^2$ ;
- condutores de alumínio recobertos com uma bainha de chumbo e de secção  $\geq 35 \text{ mm}^2$ ;
- fitas de cobre de secção  $\geq 25 \text{ mm}^2$  e uma espessura  $\geq 2 \text{ mm}$ ;
- fitas de aço macio galvanizado com uma secção  $\geq 100 \text{ mm}^2$  e uma espessura  $\geq 3 \text{ mm}$ ;
- cabos de aço galvanizado de secção  $\geq 100 \text{ mm}^2$

Tabela 6. Tipos de eléctrodos de terra e as respetivas características mínimas

Tipos de eléctrodos		Material constituinte	Superfície de contato com a	Espessura (mm)	Diâmetro exterior (mm)	Comprimento (m)	Dimensão transversal (mm)	Secção (mm <sup>2</sup> )	Diâmetro dos fios constituintes (mm)
Eléktrodos Horizontais	Cabos nus	Cobre	1	-	-	-	-	25	1,8
		Aço galvanizado <sup>1</sup>	1	-	-	-	-	100	1,8
	Fitas	Cobre	1	2	-	-	-	25	-
		Aço galvanizado <sup>1</sup>	1	3	-	-	-	100	-
	Varões	Aço galvanizado <sup>1</sup>	1	-	10	-	-	-	-
Eléktrodos Verticais	Chapas	Cobre	1	2	-	-	-	-	-
		Aço galvanizado <sup>1</sup>	1	3	-	-	-	-	-
	Varetas	Cobre	-	-	15	2	-	-	-
		Aço revestido a cobre	-	0,7 <sup>2</sup>	15	2	-	-	-
		Aço galvanizado <sup>1</sup>	-	-	15	2	-	-	-
	Tubos	Cobre	-	2	20	2	-	-	-
		Aço galvanizado <sup>1</sup>	-	2,5	25	2	-	-	-
	Perfilados	Aço galvanizado <sup>1</sup>	-	3	-	2	60	-	-

(1) A proteção deve ser garantida por meio de galvanização por imersão a quente com uma espessura mínima de revestimento de 120 $\mu\text{m}$ .

(2) Espessura de revestimento. Admite-se que este valor seja reduzido desde que os eléctrodos sejam executados com tecnologia adequada e sujeitos a aprovação prévia da DGEG.

Na prática, os condutores enterrados horizontalmente são dispostos de duas formas:

- anéis localizados no fundo das valas das fundações dos edifícios, normalmente abrangendo todo o seu perímetro (nesse caso, o valor de L a considerar é o desse perímetro);
- valas horizontais, em que os condutores são enterrados a uma profundidade de cerca de 1 m em valas abertas expressamente para o efeito, as quais não devem ser cheias com calhaus, cinzas ou materiais análogos mas sim com terra suscetível de reter a humidade.

### ii. Chapas finas enterradas verticalmente no solo

Na prática, utilizam-se chapas retangulares de 0,5 m x 1 m enterradas por forma a que o bordo superior fique a uma profundidade de cerca de 0,8 m.

A espessura dessas chapas não deve ser inferior a 2 mm, se de cobre, ou a 3 mm, se de aço galvanizado.

### iii. Eléktodos verticais (exceto chapas)

Com exceção dos eléctrodos em chapa, os eléctrodos verticais podem ser :

- varetas de cobre ou de aço com um diâmetro mínimo de 15 mm;  
(no caso de varetas em aço, estas devem ser cobertas com uma camada protetora aderente de cobre (de espessura adequada) ou serem galvanizadas)
- tubos de aço galvanizado com um diâmetro exterior não inferior a 25 mm;
- perfis de aço macio galvanizado com 60 mm de lado;

### b) Instalação

Os eléctrodos de terra devem, sempre que possível, ser enterrados nas partes mais húmidas dos terrenos disponíveis, de preferência em terra vegetal, afastados de depósitos ou de locais de infiltração de produtos que os

possam corroer (fumeiros, estrumeiras, nitreiras, produtos químicos, coque, etc.) e fora das zonas de passagem frequente de pessoas.

O tipo e a profundidade de enterramento devem ser tais que a secagem do terreno e o gelo não provoquem o aumento do valor da resistência de terra para além do valor prescrito. As chapas, as varetas, os tubos e os perfilados devem, em regra, ficar enterrados verticalmente no solo, a uma profundidade tal que entre a superfície do solo e a parte superior do eléctrodo haja uma distância  $\geq 0,80$  m.

A ligação entre o condutor de terra e o eléctrodo de terra deve ser cuidadosamente executada e deve ser eletricamente adequada.

Os eléctrodos de terra devem ser dotados de ligadores robustos, destinados a receber o condutor de terra e ligados ao eléctrodo por um processo que garanta a continuidade e a permanência da ligação.

Esses ligadores devem ser soldados aos eléctrodos de terra por meio de soldadura forte ou de autogéneo ou fixados por rebitagem ou por meio de aperto mecânico de construções robusta e com dispositivo de segurança contra o desaperto accidental. Pode dispensar-se a existência desses ligadores quando a ligação puder ser feita diretamente do condutor de terra ao eléctrodo de terra por meio de soldadura forte ou de autogéneo.

A ligação entre o condutor de terra e o eléctrodo de terra deve ser feita por forma a que:

- a) seja garantido que a natureza ou o revestimento destes não dê origem a corrosão eletrolítica quando estiverem em contacto metais diferentes (por exemplo, recomenda-se não ligar cobre a alumínio, cobre a zinco ou cobre a ferro);
- b) Sempre que se receie a possibilidade de corrosão eletrolítica, a zona de ligação esteja isolada da humidade por meio de uma forte camada protetora, construída por material impermeável e durável (massa isolante, tinta plástica, etc.);

c) quando a ligação não estiver enterrada, deve ficar em local não diretamente acessível a pessoas comuns.

Quando a junção é conseguida através da adição de um metal ou liga cujo ponto de fusão é inferior a 500°C, a soldadura é feita com “solda fraca” ou “branda”.

Quando a junção é conseguida através da adição de um metal ou liga não ferrosa cujo ponto de fusão é superior a 500°C, mas inferior aos pontos de fusão dos metais a ligar, diz-se que a soldadura é feita com “solda forte”. Neste caso, o metal de adição adere às superfícies do metal base por atração capilar.

Estas soldaduras, forte e fraca, sobretudo a primeira, é também chamada brazagem (do inglês ‘brazing’).

Se a união de peças é feita por fusão e o metal de adição for de composição igual à das peças a unir, designa-se esta soldadura por soldadura autogénea.

Os eléctrodos de terra não devem, em caso algum, ser constituídos por uma peça metálica simplesmente mergulhada na água nem devem ser estabelecidos em poças de água ou em rios<sup>1</sup>.

Em regra, a melhor solução para os eléctrodos de terra, consiste na utilização de anéis colocados na base das fundações dos edifícios, estabelecidos durante a construção destes, que têm como principais vantagens :

- a) não necessitarem de trabalhos suplementares de aterro;
- b) serem estabelecidos a uma profundidade que, em regra, permite salvaguardar as situações resultantes das variações climáticas sazonais;
- c) garantir um bom contacto com o solo;

d) utilizar, ao máximo, a área dos edifícios e reduzir, ao mínimo, o valor da resistência de terra que pode ser obtida com essa área;

e) poderem ser usados desde o início da construção como eléctrodo de terra para as instalações do estaleiro.

### 2.5.2. Eléctrodos de terra de facto

Os eléctrodos de terra de facto podem ser:

- i. Tubos e condutas, metálicos, privados

Os tubos e as condutas privados metálicos e enterrados (que não sejam afetos às redes de alimentação dos edifícios, como por exemplo, os de água, os de aquecimento, os de esgotos, etc.) podem ser utilizados como eléctrodos de terra de facto, desde que a sua continuidade eléctrica seja garantida.

Estes eléctrodos devem ser ligados em paralelo com o eléctrodo de terra da instalação.

- ii. Pilares metálicos enterrados

Os pilares metálicos interligados por estruturas metálicas e enterrados a uma certa profundidade no solo podem ser utilizados como eléctrodos de terra.

### Bibliografia

- [1] Portaria N.º 949-A/2006, de 11 de setembro: Aprova e publica as Regras Técnicas de Instalações Eléctricas de Baixa Tensão.

<sup>1</sup> Esta proibição justifica-se não apenas pela medíocre condutibilidade da água mas principalmente pelo risco de secagem e pelo perigo a que poderiam ficar sujeitas as pessoas que entrassem em contacto com a água no momento em que se produzisse um defeito).

## EQUIPAMENTOS DE REDE: EQUIPAMENTOS PASSIVOS E ATIVOS

### Resumo

*O termo redes de computadores está cada vez mais em desuso com a crescente introdução de novas tecnologias e dispositivos, ligadas à internet pública. Todos esses dispositivos não são unicamente compostos por computadores (torres os portáteis) mas cada vez mais por uma grande panóplia de equipamentos, tais como smartphones, sistemas de automação residencial ou industrial entre outros aparelhos eletrônicos.*

*Estes dispositivos são criteriosamente interligados e percorrem um caminho que passa por enlaces de comunicação (cabos, ondas rádio, fibras óticas, etc.) e também por comutadores de pacotes (Switches, Hubs, Routers, etc.). O primeiro é o meio físico responsável pela transmissão em si (equipamentos passivos), enquanto o segundo faz o encaminhamento dos pacotes aos seus destinos (equipamentos ativos).*

*Assim, o presente artigo visa, mesmo que de um modo muito sucinto, efetuar a distinção entre equipamento passivo e ativo, bem como caracterizar alguns dos principais equipamentos e dispositivos que os integram.*

### 1 Introdução

Hoje em dia as redes de computadores e seus diversos equipamentos fazem parte da nossa realidade cotidiana e a sua utilização passa, por vezes, na maior parte das vezes, aos olhos dos utilizadores, completamente despercebida.

A disseminação da utilização da Internet, que não é mais que um sistema global de redes de computadores interligados e que utilizam um conjunto muito próprio de protocolos (*Internet Protocol Suite – TCP/IP*), veio potenciar a utilização dos mais diversos equipamentos.

Com efeito, a designação de Internet é, no fundo, todo um conjunto de redes e computadores interligados entre si a uma escala mundial.

A sua interligação pode ser realizada de diversas formas tais como as redes públicas de telecomunicações baseadas em cabos e condutores (elétricos ou óticos), por via terrestre ou submarina e, ainda, ligações via rádio terrestres ou via satélite.

Com a coexistência de diversas formas e tecnologias de transmissão de “dados” torna-se imperioso haver um elo comum que promova a transferência de “dados” entre todo e qualquer equipamento conectado com a rede de computadores mundial (Internet). Esse elo comum é na realidade o designado IP (Protocolo de Rede, no caso da Internet: *Internet Protocol*).

Assim, uma das missões de um Protocolo de Rede é o de assegurar a transferência de “dados” entre redes que utilizam diferentes tecnologias de transmissão. Este artigo visa a abordagem de alguns desses equipamentos

### 2 Equipamentos passivos e ativos – definição

Na eletrónica e nas telecomunicações (também designada por comunicações eletrónicas) os equipamentos de redes estão divididos em dois principais grupos:

1. Equipamentos Passivos
2. Equipamentos Ativos

Por definição, equipamento passivo entende-se como aquele que só funciona com sinais elétricos e não realiza análise de dados. Estes equipamentos estão sobretudo associados à cablagem, ou seja, aos diversos tipos de cabos existentes que podem ser aplicados a redes.

Cada um desses diferentes cabos possui especificidades definidas por Normas que, entre outras características, estipulam o tamanho máximo permitido, o local de instalação, a velocidade máxima de transmissão, etc.

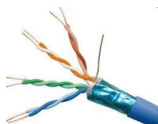
Por outro lado, os equipamentos que analisam e decidem de que forma a informação atravessa o dispositivo e afeta a operação do sistema, são designados por equipamentos ativos.

Este tipo de equipamento é caracterizado por ter o seu próprio processador eletrônico e memória. Em suma, estes equipamentos são aqueles que gerem o tráfego que passa pelos equipamentos passivos.

### 3 Equipamentos Passivos

Os equipamentos passivos são todos aqueles que não interferem com os dados ou sinais que passam por ele e que permitem a interligação do equipamento ativo. Alguns exemplos de equipamentos passivos:

Cabos par de cobre entrançados



Cabos coaxiais



Cabos Fibra ótica



Fichas RJ45 para par de cobre



Conectores para cabo fibra ótica (APC)



Tomadas RJ45



Tomadas fibra ótica



Bastidores



Patch panel's



Este tipo de equipamento estão, sobretudo, associados aos diversos tipos e sistemas de cablagem que podem ser aplicados a redes.

Porém, diversos equipamentos de rede são também designados por equipamento passivos tais como os conversores eletro-óticos (ONT – *Optical Network Terminal*) que convertem impulsos de luz em impulsos elétricos e os repetidores (*Repeaters*), que é utilizado para interligação de redes semelhantes, pois amplificam e regeneram eletricamente os sinais transmitidos no meio físico.

ONT – *Optical Network Terminal*



Repetidores



Os repetidores são muito utilizados para, por exemplo, estender a transmissão de ondas de rádio, como é o caso das redes sem fios (redes wireless). Repetidores regeneram o sinal elétrico, amplificando-o para atingir maiores distâncias.

O repetidor é simplesmente um amplificador de sinais: o que é recebido numa porta é amplificado e retransmitido instantaneamente em todas as outras portas.

#### 4. Equipamentos Ativos

Os equipamentos ativos de rede são todos aqueles que gerem o tráfego de dados que passam pelos equipamentos passivos. São, portanto, todos os equipamentos geradores, recetores de códigos ou conversor de sinais elétricos ou óticos.

Os equipamentos ativos são caracterizados por terem a capacidade de efetuar cálculos e processar os dados recebidos, gerindo-os de modo “inteligente”. De seguida caracterizam-se alguns dos equipamentos ativos usados em redes.

O *Hub* (ou concentrador) é um equipamento que liga vários computadores entre si. Não é indicado para redes de grandes dimensões, devido a esta tecnologia não trabalhar bem com grandes volumes de dados. Isto ocorre dado que o HUB envia as informações a todos os computadores por transmissão.

É um dispositivo simples adequado a instalações onde a distribuição física das estações é tal que a degradação do sinal, quando emitido entre quaisquer estações adjacentes, está dentro do limite aceitável. É um equipamento que permite concentrar o tráfego de rede que provém de vários “hóspedes”. Um *Hub* é um elemento que tem diversas portas, tantas quantas as máquinas que podem ligar entre elas, geralmente: 4, 8, 16 ou 32 portas.

Um *Switch* permite interligar vários equipamentos de rede mas sem prejudicar o de rede tal como acontece com o *Hub*. Os *switchs* podem ter interfaces de rede elétrica ou ótica bem como operar a várias velocidades de transmissão.

Os *Switch* são utilizados para conexão e filtragem de informação entre duas ou mais estações de trabalho em rede de computadores. Além dessa conexão, o *Switch* pode corrigir erros de alguns pacotes de dados, bem como coordenar o tráfego de informações na rede.

A Figura 1 ilustra um exemplo da aplicação de um *Switch* e *Hub* numa rede de computadores.

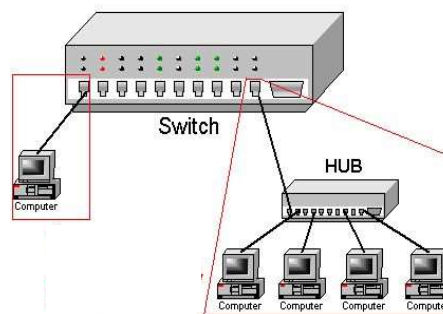


Figura 1 – Exemplo de utilização de um Switch e Hub numa rede de computadores

Em traços gerais um Router (ou encaminhador) é um equipamento ativo de uma rede de dados que permite a comunicação entre dispositivos de redes diferentes (e também de redes com diferentes tecnologias) e totalmente autónomas.

Os *Routers* têm a capacidade (com base nos protocolos de encaminhamento) de fazer chegar os pacotes de dados de uma rede de origem a uma determinada rede de destino.

De facto, os *Routers* estabelecem a ligação entre vários segmentos diferentes numa única rede. São equipamentos que podem tomar decisões “inteligentes” de como fazer chegar os dados ao seu destino, com base nas informações que obtém da sua própria rede.

O *Router* é usado para conectar dois ou mais computadores ou dispositivos entre si e geralmente à Internet, por meio de cabos com fio ou por meio de um sinal sem fio. Isso permite que vários computadores se conectem uns aos outros e à Internet ao mesmo tempo. Se isso fosse feito através de cabos, cada computador teria que ser conectado separadamente ao Router.

A figura 2 ilustra um caso de utilização de um *Router* numa determinada rede.



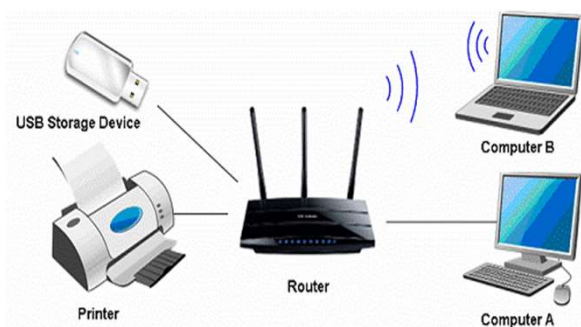


Figura 2 – Exemplo de utilização de um *Router*

Uma Ponte (ou *Bridge*) é um equipamento semelhante a um *Switch* mas possui apenas uma porta de entrada e outra de saída.

Uma *Bridge* apenas com portas de rede com fios praticamente não se utiliza. Neste caso a melhor solução passa por um *Switch* que para além de realizar o mesmo trabalho, ainda pode vir a ser útil para interligar mais equipamentos.

A Figura 3 ilustra um exemplo de utilização de uma *Bridge* na interligação entre duas redes.

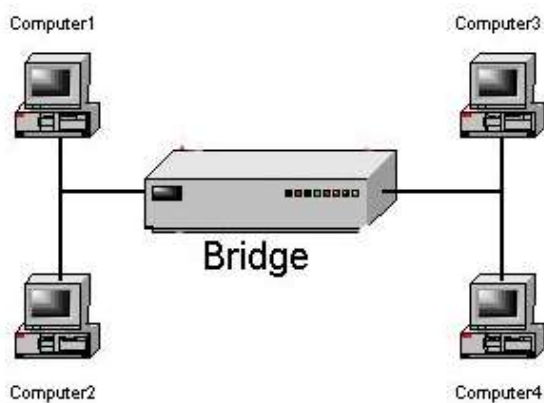


Figura 3 – Exemplo de utilização de uma *Bridge*

As *Bridges* servem para efetuar a interligação entre duas redes, por exemplo a ligação de uma rede de um edifício com a rede de um outro edifício.

A placa de rede (ou *Network Interface Card*) constitui o interface entre o computador e o cabo de rede. É o hardware que permite aos computadores “conversarem” entre si através da rede. Basicamente, a sua função é preparar, enviar e os dados para a rede.

A Figura 4 apresenta um exemplo de uma placa de rede.

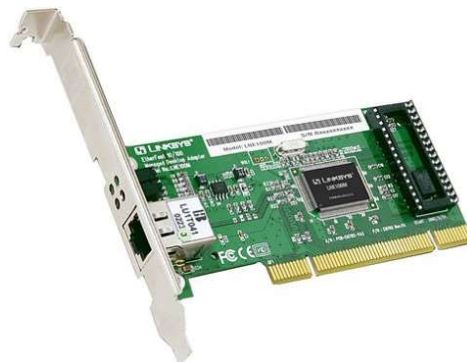


Figura 4 – Exemplo de utilização de uma Placa de Rede (*Network Interface Card*)

Cada arquitetura de rede pode exigir um tipo específico de placa de rede, como as redes em anel do tipo *Token Ring* e as redes Ethernet. Além da arquitetura usada, as placas de rede à venda no mercado diferenciam-se também pela taxa de transmissão, cabos suportados e barramento utilizado.

## 5 Conclusões

Com o presente artigo visou-se identificar, de modo muito sucinto, alguns dos principais equipamentos passivos e ativos que fazem parte integrante de uma rede de computadores.

Outros equipamentos e dispositivos não foram considerados de modo a não estender, de modo exaustivo, o presente artigo.

Trata-se, pois, de uma primeira abordagem a este tópico e alguns dos seus equipamentos.

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

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

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

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

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

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

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

## COLABORARAM NESTA EDIÇÃO:

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

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

**Pedro Miguel Azevedo de Sousa Melo****pma@isep.ipp.pt**

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

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

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

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

Licenciatura e mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, área científica de Sistemas de Energia, pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Doutoramento em Engenharia Electrotécnica e Computadores, pela Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. Docente no Departamento de Engenharia Eletrotécnica, curso de Sistemas Elétricos de Energia do ISEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto. Investigadora no CIETI - Centro de Inovação em Engenharia e Tecnologia Industrial. Áreas de interesse: Projeto de transformadores, mercados de energia, operação do sistema de gás natural, energias renováveis, qualidade de energia, produção de energia e eficiência energética

**WEGeuro Indústria Eléctrica, S.A.**

