



# Instituto Superior de Engenharia

Politécnico de Coimbra

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA E  
BIOLÓGICA

## **Digitalização, Manutenção e Qualidade de Serviço em Redes Elétricas com Elevada Penetração de Energias Renováveis: Um Estudo de Caso**

Trabalho de Projeto para a obtenção do grau de Mestre em  
Engenharia e Gestão Industrial

Autor

**Joice da Conceição Castro Agostinho**

Orientador

**Ana Carla Vicente Vieira**

Co-Orientador

**José Manuel Torres Farinha**

Coimbra, outubro de 2025



INSTITUTO POLITÉCNICO  
DE COIMBRA

INSTITUTO SUPERIOR  
DE ENGENHARIA  
DE COIMBRA



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à minha querida família, em especial aos meus pais, João Agostinho e Francisca Agostinho pelo apoio, incentivo e compreensão ao longo de todo o meu percurso académico.

Expresso igualmente reconhecimento aos meus orientadores, Professora Doutora Ana Carla Vicente Vieira e ao Professor Doutor José Manuel Torres Farinha, pela orientação científica, disponibilidade, paciência, dedicação, rigor e contributos fundamentais para o desenvolvimento e qualidade do presente projeto.

Agradeço ao Instituto Superior de Engenharia de Coimbra (ISEC) pela qualidade dos seus colaboradores, docentes e não docentes, assim como pelos recursos disponibilizados pela instituição, que tornaram possível a realização de etapas cruciais do projeto.

Aos meus amigos mais próximos, que me apoiam desde muito cedo e torcem pelo meu sucesso. Obrigada pelo vosso incentivo e pela vossa amizade.

## RESUMO

A transição energética em curso tem vindo a impor exigências às infraestruturas elétricas, decorrentes da crescente integração de fontes de energia renovável, da digitalização das redes e da maior exposição a fenómenos climáticos extremos. Neste contexto, a manutenção assume um papel estratégico na garantia da fiabilidade, da resiliência e da qualidade de serviço do sistema elétrico. O presente trabalho tem como objetivo analisar o impacto da digitalização das infraestruturas elétricas na qualidade de serviço da rede de distribuição de energia em Portugal, bem como a sua relação com a cibersegurança e a manutenção destes ativos. A metodologia adotada é de natureza quantitativa e descritivo-analítica, sustentada numa revisão sistemática da literatura e numa análise de dados disponibilizados pelo portal *Open Data* da E-Redes. A análise foi desenvolvida nas dimensões temporais, com particular foco na região NUT III e, de forma mais detalhada, na região da Beira Baixa, concelho de Castelo Branco. Os resultados evidenciam que, apesar do aumento da complexidade operacional da rede associado à integração de fontes de energia renovável, os valores globais dos indicadores de continuidade de serviço se mantêm dentro dos limites regulamentares, observando-se uma tendência de estabilização e melhoria. Verifica-se igualmente que o aumento das ordens remotas está associado a uma maior rapidez na reposição do fornecimento de energia. Conclui-se que a digitalização e a manutenção das infraestruturas elétricas constituem um pilar fundamental da transição energética, devendo integrar estratégias de digitalização, automação e cibersegurança, de forma a assegurar a fiabilidade do sistema elétrico, a sustentabilidade ambiental e a qualidade de serviço ao utilizador final.

**Palavras-Chave:** manutenção; energias renováveis; redes elétricas; digitalização; cibersegurança

## **ABSTRACT**

The ongoing energy transition has been imposing demands on electricity infrastructure, resulting from the increasing integration of renewable energy sources, the digitalisation of networks and greater exposure to extreme weather events. In this context, maintenance plays a strategic role in ensuring the reliability, resilience and quality of service of the electricity system. The present work aims to analyze the impact of the digitalization of electrical infrastructures on the quality of service of the energy distribution network in Portugal, and its relationship with cybersecurity and these assets maintenance. The methodology adopted is quantitative and descriptive-analytical, supported by a systematic review of the literature and an analysis of data made available by the E-Redes Open Data Portal. The analysis was developed in the temporal dimensions, with a particular focus on the NUT III region and, in a more detailed way, on the region of Beira Baixa, municipality of Castelo Branco. The results show that, despite the increase in the operational complexity of the grid associated with the integration of renewable sources, the overall values of the quality of service indicators remain within the regulatory limits, observing a trend of stabilization and improvement. It is also verified that the increase in remote orders is associated with a faster restoration of the electrical energy supply. It is concluded that the digitalization and maintenance of electricity infrastructures are a fundamental pillar of the energy transition, and should integrate digitalization, automation and cybersecurity strategies, in order to ensure the reliability of the electricity system, environmental sustainability and quality of service to the end user.

**Keywords:** maintenance; renewable energy; electrical grids; digitalization; cybersecurity.

## ÍNDICE

Agradecimentos .....	i
Resumo .....	ii
Abstract.....	iii
Índice.....	iv
Índice de figuras.....	vi
Índice de tabelas .....	viii
Lista de abreviaturas e acrónimos.....	ix
1. Introdução.....	1
1.1. Contextualização do trabalho.....	1
1.2. Objetivos de trabalho.....	2
1.3. Problema de investigação .....	2
1.4. Estrutura do relatório.....	3
2. Revisão da literatura .....	4
2.1. Metodologia de investigação .....	4
2.2. Conceito e evolução histórica da manutenção.....	10
2.3. Manutenção como função estratégica.....	11
2.4. Tipos de manutenção .....	12
2.5. Normas de manutenção.....	16
2.6. Indicadores de desempenho.....	17
2.7. Tecnologias de suporte à manutenção.....	20
2.8. Infraestruturas elétricas e energias renováveis .....	22
2.9. Cibersegurança em redes elétricas .....	26
2.10. Setor elétrico português .....	28
2.11. Energia renovável em Portugal.....	32
2.11.1. <i>WindFloat Atlantic</i> .....	32
2.11.2. Culatra.....	33
3. Metodologia .....	36
3.1. Fonte de dados.....	36
3.2. Procedimentos de recolha e tratamento dos dados.....	38
3.3. Limitações metodológicas .....	43
4. Resultados e análise.....	44

*Digitalização, Manutenção e Qualidade de Serviço em Redes Elétricas com Elevada Penetração de Energias Renováveis: Um Estudo de Caso*

4.1. Caracterização do estudo .....	44
4.2. Análise de indicadores de continuidade de serviço .....	45
4.3. Contributos e limitações do projeto .....	50
5. Conclusões e perspetivas de trabalho futuro .....	52
Referências bibliográficas .....	55
Anexos .....	60
Anexo 1 – Dados da DGEG para produção anual renovável .....	61
Anexo 2 – Dados extraídos do <i>Portal Open Data</i> para Castelo Branco .....	62
Anexo 3 – Informação complementar – Portugal continental .....	64
Anexo 4 – Artigo apresentado no Congresso Nacional de Manutenção e Gestão de Ativos (Angola) .....	66
Anexo 5 – Artigo apresentado no Physical Asset Management and Data Science Conference (PAMDAS) .....	75

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Interface gráfico da ferramenta <i>Bibliometrix</i> .....	7
Figura 2.2 – Autores de maior relevância.....	7
Figura 2.3 – Produção ao longo do tempo - Autores.....	8
Figura 2.4 – Documentos mais citados a nível global.....	8
Figura 2.5 – Produção [nº de artigos] ao longo dos anos [2015 a 2025] - Países.....	9
Figura 2.6 – Produção científica dos países.....	9
Figura 2.7 – Tipos de manutenção.....	12
Figura 2.8 – Manutenção corretiva.....	13
Figura 2.9 – Manutenção preventiva.....	14
Figura 2.10 – Manutenção preditiva.....	15
Figura 2.11 – Inspeção por ultrassons.....	15
Figura 2.12 – Arquitetura fundamental de uma rede inteligente.....	24
Figura 2.13 – Flexibilidade topológica de sistemas de potência: a) Sistemas centralizados; b) Sistemas descentralizados.....	25
Figura 2.14 – Tríade CIA.....	27
Figura 2.15 – Produção anual renovável.....	28
Figura 2.16 – Evolução da incorporação de energia renovável no consumo final bruto de energia.....	29
Figura 2.17 – Perspetiva histórica: inspeção de ativos elétricos.....	30
Figura 2.18 – Meios de inspeção visual.....	31
Figura 2.19 – Quota de energia proveniente de fontes de energia renovável.....	32
Figura 2.20 – <i>WindFloat</i> .....	33
Figura 2.21 – Comparação do <i>WindFloat</i> .....	33
Figura 2.22 – Projeto Culatra 2030.....	34
Figura 2.23 – Mapa organizacional Culatra 2030.....	34
Figura 3.1 – Portal <i>Open Data</i> : detalhes da interface.....	36
Figura 4.1 – Mapa do distrito de Castelo Branco.....	44
Figura 4.2 – Evolução dos indicadores de continuidade de serviço MT (minutos).....	46

*Digitalização, Manutenção e Qualidade de Serviço em Redes Elétricas com Elevada Penetração de Energias Renováveis: Um Estudo de Caso*

Figura 4.3 – Evolução dos indicadores de continuidade de serviço MT (números) .....	47
Figura 4.4 – Evolução dos indicadores de continuidade de serviço BT (minutos) .....	48
Figura 4.5 – Evolução anual de ordens remotas para Castelo Branco .....	48
Figura 4.6 – Média anual dos indicadores de continuidade de serviço entre 2014 e 2024 (minutos): a) concelho de Castelo Branco; b) Portugal continental.....	49
Figura 4.7 – Média anual dos indicadores de continuidade de serviço entre 2014 e 2024 (número): a) concelho de Castelo Branco; b) Portugal continental.....	50

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Evolução da manutenção .....	10
Tabela 2.2 – Fatores de influência na manutenção .....	18
Tabela 2.3 – Características das redes tradicionais <i>versus</i> modernas .....	23
Tabela 3.1 – Padrões gerais anuais para as redes de distribuição MT/BT .....	38
Tabela 3.2 – Indicadores de continuidade de serviço: Total anual calculado para Portugal continental, por zona de QS .....	39
Tabela 3.3 – Indicadores de continuidade de serviço: Total anual calculado para o concelho de Castelo Branco, por zona de QS.....	41
Tabela 3.4 – Indicadores de continuidade de serviço: Média anual para Portugal continental.....	42
Tabela 4.1 – Principais características da rede do distrito de Castelo Branco .....	45

## **LISTA DE ABREVIATURAS E ACRÓNIMOS**

ANMP	Associação Nacional Municípios Portugueses
AT	Alta Tensão
BAN	<i>Building Area Network</i>
BT	Baixa Tensão
CBM	<i>Condition-Based Maintenance</i> (Manutenção Baseada na Condição)
CIA	<i>Confidentiality, Integrity, Availability</i> (Confidencialidade, Integridade, Disponibilidade)
CIMA	<i>Center for Marine and Environmental Research</i>
CPS	<i>Cyber Physical Systems</i>
CSV	<i>Comma-Separated Values</i>
DGEG	Direção Geral de Energia e Geologia
DL	<i>Deep Learning</i>
DoS	<i>Denial of Service</i>
ED	Energia Distribuída
EDP	Energias de Portugal
END	Energia Não Distribuída
ERSE	Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos
FMEA	<i>Failure Mode and Effects Analysis</i> (Análise de modos e efeitos da falha)
HAN	<i>Home Area Network</i>
IA	Inteligência Artificial
IAN	<i>Industry Area Network</i>
IIoT	<i>Industrial Internet of Things</i>
INE	Instituto Nacional de Estatística
IoT	<i>Internet of Things</i>
ISEC	Instituto Superior de Engenharia de Coimbra
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
KPI	<i>Key Performance Indicators</i>
MAIFI	<i>Momentary Average Interruption Frequency Index</i> (Frequência Média das Interrupções Breve do Sistema)
min	minutos
ML	<i>Machine Learning</i>
MT	Média Tensão
MWh	Megawatt-hora
NAN	<i>Neighborhood Area Network</i>
NP	Norma Portuguesa
num	número
NUT	Nomenclatura de Unidade Territorial
ODS	Objetivo do Desenvolvimento Sustentável
PBM	<i>Performance Based Maintenance</i> (Manutenção Baseada no Desempenho)
PDCA	<i>Plan, Do, Check, Act</i>
PNEC	Plano Nacional de Energia e Clima

PNG	<i>Portable Network Graphic</i>
QS	Qualidade de Serviço
RBI	<i>Risk Based Inspection</i> (Inspeção Baseada no Risco)
RBM	<i>Risk Based Maintenance</i> (Manutenção Baseada no Risco)
RCM	<i>Reliability Centered Maintenance</i> (Manutenção Centrada na Fiabilidade)
REN	Redes Energéticas Nacionais
RNT	Rede Nacional de Transporte
RQS	Regulamento de Qualidade de Serviço
RSL	Revisão Sistemática da Literatura
SAIDI	<i>System Average Interruption Duration Index</i> (Duração Média das Interrupções Longas do Sistema)
SAIFI	<i>System Average Interruption Frequency Index</i> (Frequência Média de Interrupções Longas do Sistema)
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
SEN	Setor Energético Nacional
TIEFI	Tempo de Interrupção Equivalente da Potência Instalada
TPM	<i>Total Productive Maintenance</i> (Manutenção Produtiva Total)
WAN	<i>Wide Area Network</i>
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i>
ZQS	Zona de Qualidade de Serviço

# 1. INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta o enquadramento do tema, o problema em análise e define os objetivos a alcançar. Fornece ainda uma visão geral do documento, de modo a orientar na compreensão da sua organização.

## 1.1. Contextualização do trabalho

A transição energética tem impulsionado mudanças estruturais significativas no setor elétrico, exigindo uma gestão mais eficiente, resiliente e sustentável das infraestruturas elétricas, nomeadamente modelos avançados de gestão da manutenção. Em particular, a crescente penetração de energia elétrica com origem em fontes de energia renovável impõe desafios operacionais, nomeadamente a intermitência, a variabilidade da produção e a necessidade de modernização e segurança das redes. Neste contexto, a manutenção eficaz das infraestruturas elétricas desempenha um papel determinante na garantia da continuidade do fornecimento de energia e na maximização do desempenho dos ativos (Xu et al., 2024).

A interdependência entre as infraestruturas elétricas e as energias renováveis exige uma gestão metódica das infraestruturas e da sua manutenção, uma vez que os seus principais componentes, como transformadores, linhas de transmissão e redes de distribuição devem ser adaptáveis para lidar com as flutuações inerentes às fontes de energia renovável (Kumar et al., 2024; Xu et al., 2024).

Com a globalização dos mercados, as empresas procuram alcançar a excelência dos seus serviços e produtos. A manutenção está diretamente ligada à rentabilidade do processo produtivo, influenciando a qualidade, o volume e o custo da produção. Assim, os objetivos da manutenção devem estar alinhados com os objetivos globais da organização. A literatura clássica, destaca que o segredo reside em estabelecer um equilíbrio entre benefício e custo, de forma a maximizar o contributo positivo da manutenção para a rentabilidade das organizações (Cabral, 2021; Farinha, 2018; Monchy, 1989; Wanxingsheng, 2014; Zeng et al., 2007). A manutenção sustenta três aspetos fundamentais na realidade industrial - económicos, sociais e legais. O aumento da vida útil e da disponibilidade dos equipamentos, resultante de uma boa prática de manutenção, alimenta diretamente os aspetos económicos das empresas, ao maximizar o retorno dos investimentos realizados (Kardec & Nascif, 2001).

No contexto das redes elétricas modernas, caracterizadas pela crescente complexidade operacional e pela elevada penetração de fontes de energia renovável, a manutenção preditiva assume um papel estratégico. Esta abordagem contribui significativamente para a redução dos custos operacionais, para o aumento da

eficiência na gestão de ativos críticos da rede e para a minimização de interrupções, mesmo em cenários de elevada variabilidade (Daniel-Durandt et al., 2024).

O desenvolvimento tecnológico tem transformado a forma como se gere a manutenção das infraestruturas elétricas. A tecnologia disponível permite uma monitorização contínua do estado dos ativos, a deteção precoce de anomalias e a tomada de decisões baseadas em dados, potenciando modelos de manutenção cada vez mais preditivos e prescritivos (Alam et al., 2025; Cavus, 2025). Assim, a manutenção deixa de ser apenas um suporte operacional e passa a constituir-se como um elemento estratégico para a resiliência, a sustentabilidade e a competitividade no setor energético.

## **1.2. Objetivos de trabalho**

O presente trabalho tem como objetivo analisar o impacto da digitalização das infraestruturas elétricas na qualidade de serviço em redes com alta penetração de energias renováveis, com base em indicadores de qualidade de serviço do domínio público. O trabalho teve como pressuposto a utilização de *datasets* do Portal *Open Data* da E-Redes, sobre o funcionamento e a operação da rede de distribuição de energia elétrica em Portugal, permitindo a análise de indicadores de qualidade de serviço relevantes para a manutenção de infraestruturas elétricas. Como objetivos específicos referem-se:

- Analisar a evolução dos indicadores de continuidade de serviço da rede de distribuição;
- Analisar como a digitalização da rede de distribuição afeta o aumento do número de ordens remotas;
- Comparar os indicadores de continuidade de serviço de um distrito com os valores médios nacionais;
- Avaliar a adequação dos indicadores de continuidade de serviço utilizados como instrumentos de monitorização do desempenho da rede;
- Discutir as limitações decorrentes da utilização de dados de acesso público;
- Desenvolver propostas metodológicas para otimização da manutenção de redes elétricas digitalizadas (*smart grids*), com base em dados reais.

## **1.3. Problema de investigação**

A elevada penetração de energias renováveis, embora constitua uma conquista importante no caminho da descarbonização, introduz riscos operacionais. A variabilidade da produção pode comprometer a estabilidade da rede, acelerar o desgaste de equipamentos e aumentar o risco de falhas. Ademais, a digitalização

crecente, embora traga benefícios claros em termos de eficiência e monitorização, expõe as infraestruturas a novos tipos de vulnerabilidades, nomeadamente no domínio da cibersegurança.

As questões centrais de investigação que orientam este trabalho são:

- Que políticas de manutenção se mostram mais adequadas para redes elétricas em cenários com forte integração de fontes de energia renovável?
- Qual é o quadro de indicadores mais adequado para validação das políticas de manutenção de infraestruturas elétricas com a integração das tecnologias associadas à transição energética e integração de fontes de energia renovável?
- De que forma os riscos relacionados com a cibersegurança afetam a manutenção de infraestruturas elétricas num cenário com forte integração de fontes de energia renovável e crescente digitalização?
- Como é que as tecnologias de produção de eletricidade com recurso a fontes de energia renovável condicionam as políticas de manutenção de infraestruturas elétricas, em função das diferenças geográficas?
- Qual é o impacto dos fenómenos climáticos na variação dos indicadores de continuidade de serviço?

#### **1.4. Estrutura do relatório**

O presente relatório encontra-se dividido em cinco capítulos principais e cinco anexos, que serão detalhados em seguida.

No capítulo 1 é apresentada uma introdução ao tema, incluindo a contextualização do estudo, apresentam-se os objetivos, a formulação do problema de investigação e a estrutura do relatório. O Capítulo 2 é dedicado à metodologia de investigação, à revisão da literatura, na qual se realiza uma análise sistemática do estado da arte, abrangendo os conceitos fundamentais de manutenção, à identificação de lacunas de conhecimento, ao reconhecimento de tendências emergentes e a identificar oportunidades de investigação. No Capítulo 3 descreve-se a metodologia adotada, descrevendo as fontes de dados, os procedimentos de recolha e tratamento dos dados, bem como as limitações metodológicas do estudo. O Capítulo 4 apresenta e discute os resultados obtidos a partir da análise dos dados do Portal *Open Data* da E-Redes, com foco na Qualidade de Serviço (QS) e na digitalização das redes. Por fim, o Capítulo 5 reúne as conclusões do trabalho, sintetizando os principais contributos, as limitações identificadas e as recomendações para investigações futuras. O documento termina com a apresentação das referências bibliográficas e dos anexos considerados relevantes para a elaboração deste relatório.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo descreve a abordagem adotada para o desenvolvimento do estudo, explicitando as opções efetuadas ao nível de fontes de dados, dos procedimentos de recolha e tratamento da informação. Assim, exploram-se os principais conceitos, normas aplicáveis, estratégias e tecnologias envolvidas na gestão da manutenção de infraestruturas elétricas, com ênfase no contexto da transição energética e da crescente integração de fontes de energia renovável.

### 2.1. Metodologia de investigação

Para a fundamentação teórica e revisão de literatura foi realizada uma recolha de informação baseada na literatura de vários autores, pensadores e artigos eletrónicos voltados para este tema. A Revisão Sistemática da Literatura (RSL) foi a abordagem científica aplicada para identificar, avaliar e sintetizar de forma rigorosa e transparente o conhecimento existente sobre o tema. Esta abordagem diferencia-se das revisões narrativas por seguir um protocolo formal que assegura a reprodutibilidade e minimiza vieses na seleção e análise dos estudos (Kitchenham et al., 2009, 2010).

A metodologia foi desenhada em conformidade com as diretrizes propostas por Kitchenham et al. (2010), amplamente conhecidas no contexto científico, ainda que originalmente aplicadas à engenharia de *software*.

A análise bibliométrica possibilitou identificar padrões de publicação, redes de coautoria, periódicos de maior impacto e evolução temporal das pesquisas. No entanto, a análise bibliométrica não mapeia apenas o estado da arte, ela aponta para lacunas críticas, tais como a ainda reduzida integração de perspectivas ambientais e sociais nos modelos de manutenção (Santos et al., 2023).

A estratégia metodológica iniciou-se com a definição dos termos de pesquisa, que incluíram: “manutenção”, “energia renovável” e “redes elétricas”. A pesquisa foi realizada em bases de dados científicas, com ênfase na *Scopus*, aplicando a restrição temporal de 2015 a 2025. Numa primeira fase, consideraram-se cerca de 800 documentos tendo-se decidido alterar a relevância dos termos de pesquisa o que resultou num segundo grupo de 132 documentos. Os registos foram exportados em formato compatível com o *software* R Studio, contendo informações como autores, instituição a que pertencem, área de pesquisa, ano de publicação, título, palavras-chave, etc. Na etapa seguinte foram analisados estes documentos e com base na relevância dos mesmos selecionou-se um conjunto de 23 documentos. A Tabela 2.1 sintetiza os documentos de suporte à presente revisão bibliográfica.

Tabela 2.1 – Análise sistemática da literatura

<b>Autor</b>	<b>Ano</b>	<b>Título</b>	<b>Tipo</b>	<b>Resumo</b>
Alam, M. M. et al.	2025	Artificial intelligence integrated grid systems	Artigo	Revisa integração de IA em sistemas de rede elétrica e desafios futuros.
Boyes, H. et al.	2018	The industrial internet of things (IIoT)	Artigo	Apresenta um framework analítico para IIoT e seus riscos.
Cabral, J.	2021	Gestão da Manutenção de Equipamentos	Livro	Aborda práticas de gestão da manutenção em instalações e equipamentos.
Cavus, M.	2025	Advancing Power Systems with Renewable Energy	Artigo	Explora evolução de sistemas elétricos com renováveis e tecnologias inteligentes.
Daniel-Durandt, F. et al.	2024	South Africa's Energy Paradox	Artigo	Sugere integração de renováveis para maior estabilidade do sistema sul-africano.
Faheem, M. et al.	2018	Smart grid communication and information technologies	Artigo	Analisa tecnologias de comunicação aplicadas a smart grids.
Farinha, T.	2018	Asset Maintenance Engineering Methodologies	Livro	Discute metodologias modernas de manutenção de ativos.
Gusmaroli, L.	2023	Feasibility Study – Culatra Case Study	Relatório Técnico	Estudo de viabilidade para implementação de soluções HYDROUSA.
Hickie, D. & Hickie, J.	2021	Industry 4.0 impact on supply chains	Artigo	Analisa impacto da Indústria 4.0 em cadeias de suprimentos europeias.
Ho, Q.-Dung et al.	2014	Wireless Communications Networks for the Smart Grid	Livro	Explora redes de comunicação aplicadas a smart grids.
Honorato, E.	2025	Cibersegurança em Sistemas Críticos	Livro	Trata de proteção de infraestruturas críticas no contexto digital.
Kalkal, P. & Garg, V. K.	2017	Transition to modern grids	Artigo	Analisa evolução de redes tradicionais para microgrids e smart grids.
Kardec, A. & Nascif, J.	2001	Manutenção Função Estratégica	Livro	Apresenta manutenção como elemento estratégico organizacional.
Kitchenham, B. et al.	2009	Systematic literature reviews in <i>software engineering</i>	Artigo	Define metodologia de revisões sistemáticas na engenharia de <i>software</i> .

Tabela 2.1 – Análise sistemática da literatura (continuação)

<b>Autor</b>	<b>Ano</b>	<b>Título</b>	<b>Tipo</b>	<b>Resumo</b>
Kitchenham, B. et al.	2010	Tertiary study on <i>software</i> engineering reviews	Artigo	Avalia revisões sistemáticas existentes na área de <i>software</i> .
Labelec	2021	Inspeção de ativos elétricos com LIDAR	Relatório Técnico	Estudo sobre uso de LIDAR para inspeção de infraestruturas elétricas.
Monchy, F.	1989	A Função Manutenção	Livro	Fundamentos clássicos sobre a função manutenção.
Ourahou, M. et al.	2020	Smart grid control and reliability	Artigo	Revisa desafios de controlo e fiabilidade em smart grids com renováveis.
Pereira, F. J. D. & Sena, F. V.	2016	Manutenção de Instalações Técnicas	Livro	Manual prático sobre manutenção de instalações técnicas.
Slack, N. et al.	2018	Administração da produção	Livro Académico	Obra de referência em gestão de operações.
Strielkowski, W. et al.	2021	Renewable energy in sustainable development	Artigo	Revisão sobre papel das renováveis no setor elétrico sustentável.
Xu, L. et al.	2024	Resilience of renewable power systems	Artigo	Analisa resiliência de sistemas renováveis sob riscos climáticos.
Yaacoub, J. P. et al.	2024	Cybersecurity in Smart Renewable Energy Systems	Artigo	Explora desafios de cibersegurança em redes renováveis inteligentes.

O estudo seguiu uma abordagem bibliométrica para examinar a evolução destes conceitos no período em análise. A análise da bibliografia foi feita com recurso ao pacote *bibliometrix* no ambiente *RStudio*, por execução da função *biblioshiny* que permite abrir a interface gráfica do *Biblioshiny* no navegador (Figura 2.1). Procedeu-se à importação dos dados bibliográficos previamente exportados da base de dados científica *Scopus*, selecionado o formato adequado do ficheiro (.csv<sup>1</sup>). Após a importação, realizou-se uma análise descritiva com o objetivo de caracterizar a produção científica, identificar os autores mais relevantes e avaliar o número de citações. Posteriormente, efetuaram-se análises de redes, nomeadamente de coautoria e de coocorrência de palavras-chave, permitindo visualizar as relações entre autores e temas de investigação. Por fim, os resultados obtidos foram exportados em formato de tabelas e gráficos .png<sup>2</sup> para fundamentar a análise realizada, nomeadamente os principais temas e a sua evolução ao longo do tempo.

<sup>1</sup> *Comma-Separated Values*

<sup>2</sup> *Portable Network Graphic*. Quando exportados, em alguns casos, os gráficos interativos do *Bibliometrix* não incorporam as legendas.

Embora sejam referências fundamentais, observa-se que existe pouca colaboração interdisciplinar entre especialistas de manutenção e investigadores da área das energias renováveis (Figura 2.2).

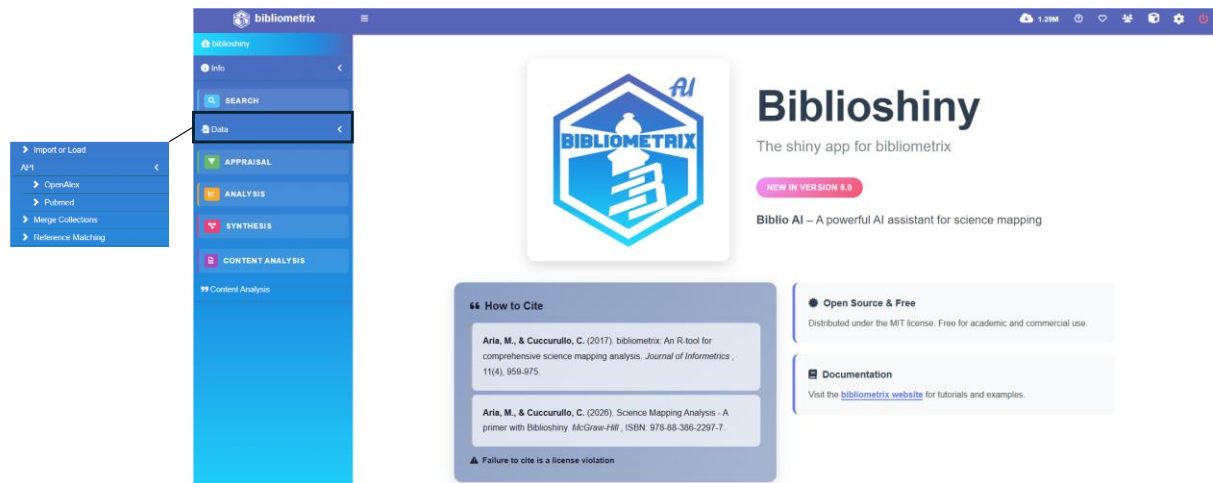


Figura 2.1 – Interface gráfica da ferramenta *Bibliometrix*

Fonte: *Bibliometrix* R

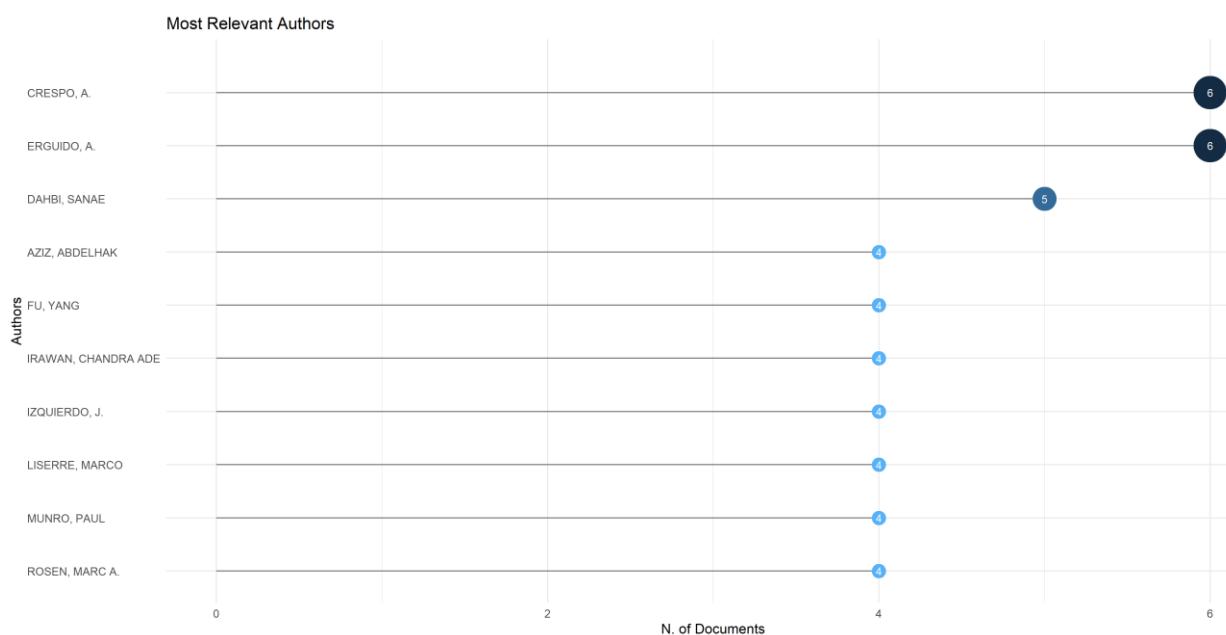


Figura 2.2 – Autores de maior relevância

Fonte: *Bibliometrix* R

A Figura 2.3 mostra a evolução da produção científica dos autores mais influentes ao longo dos anos. Nota-se um crescimento consistente, com um aumento mais expressivo após 2019. Este padrão coincide com a aceleração da transição energética

e a digitalização de infraestruturas, confirmando que o tema tem vindo a ganhar importância.

Os documentos mais citados a nível global (Figura 2.4) evidenciam as referências estruturantes na área, sobretudo em torno da manutenção preditiva, gestão de riscos e fiabilidade. Apesar da sua importância, estes estudos tendem a privilegiar abordagens técnicas e quantitativas, deixando em segundo plano dimensões complementares, como sustentabilidade ambiental e cibersegurança.

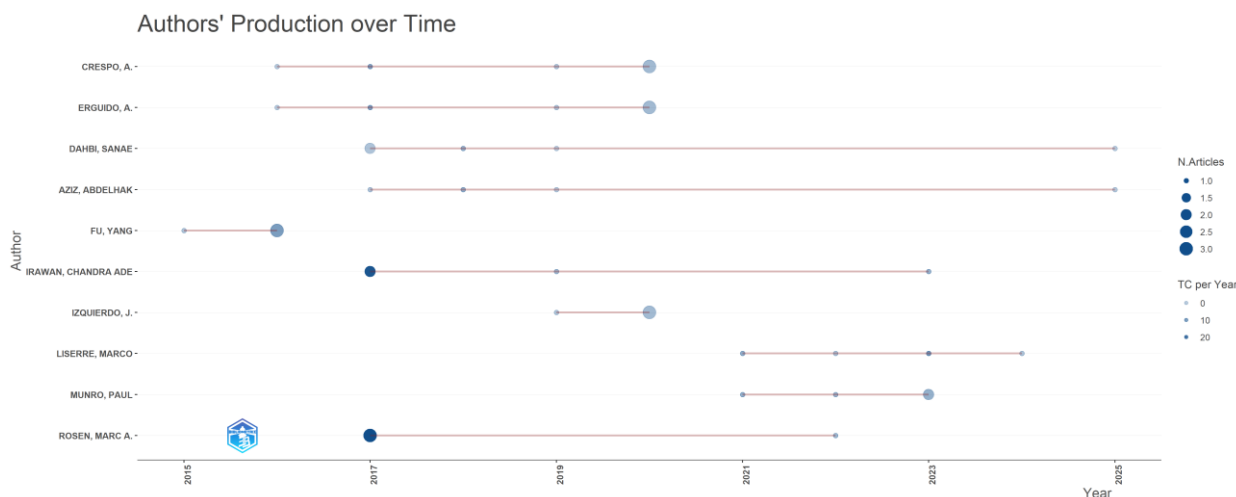


Figura 2.3 – Produção ao longo do tempo - Autores

Fonte: *Bibliometrix* R

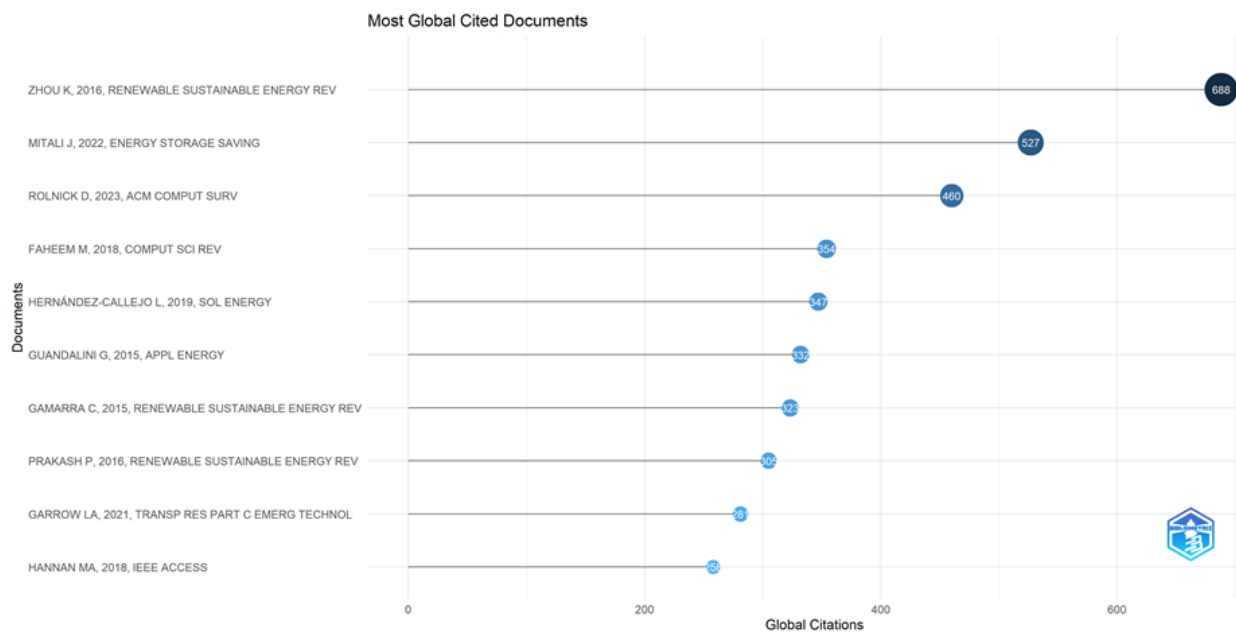


Figura 2.4 – Documentos mais citados a nível global

Fonte: *Bibliometrix* R

A distribuição geográfica ilustrada na Figura 2.5 e na Figura 2.6 revela a predominância de países com maior capacidade de investimento. Contudo, a fraca representatividade de países lusófonos, incluindo Portugal, sugere a necessidade de consolidar a investigação nestas áreas geográficas.

Em síntese, a bibliometria confirma que a investigação sobre a manutenção de infraestruturas elétricas no contexto da transição energética está em expansão, mas ainda apresenta lacunas relevantes:

- Fraca investigação em Portugal;
- Fraca integração entre manutenção, energias renováveis e cibersegurança;
- Pouca articulação entre indicadores técnicos e impactos socioambientais.

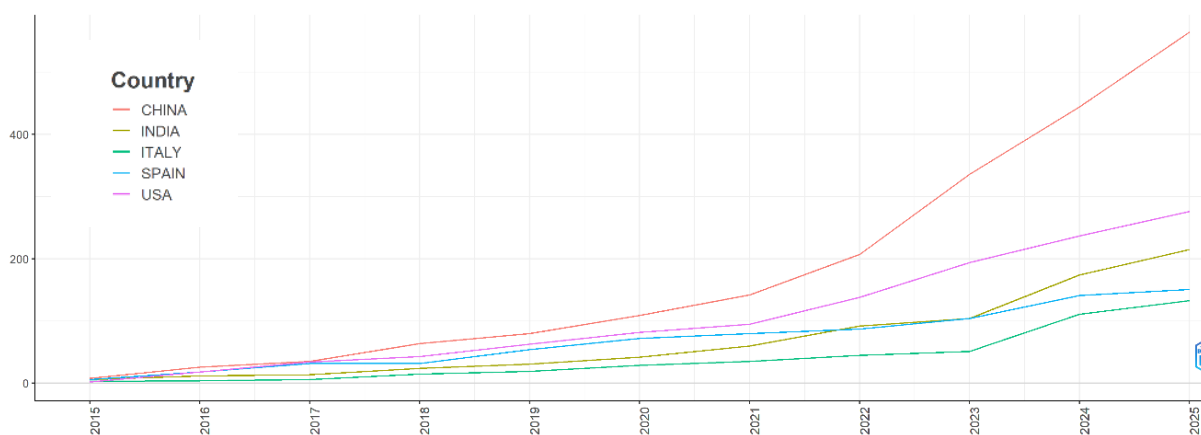


Figura 2.5 – Produção [nº de artigos] ao longo dos anos [2015 a 2025] - Países

Fonte: *Bibliometrix* R

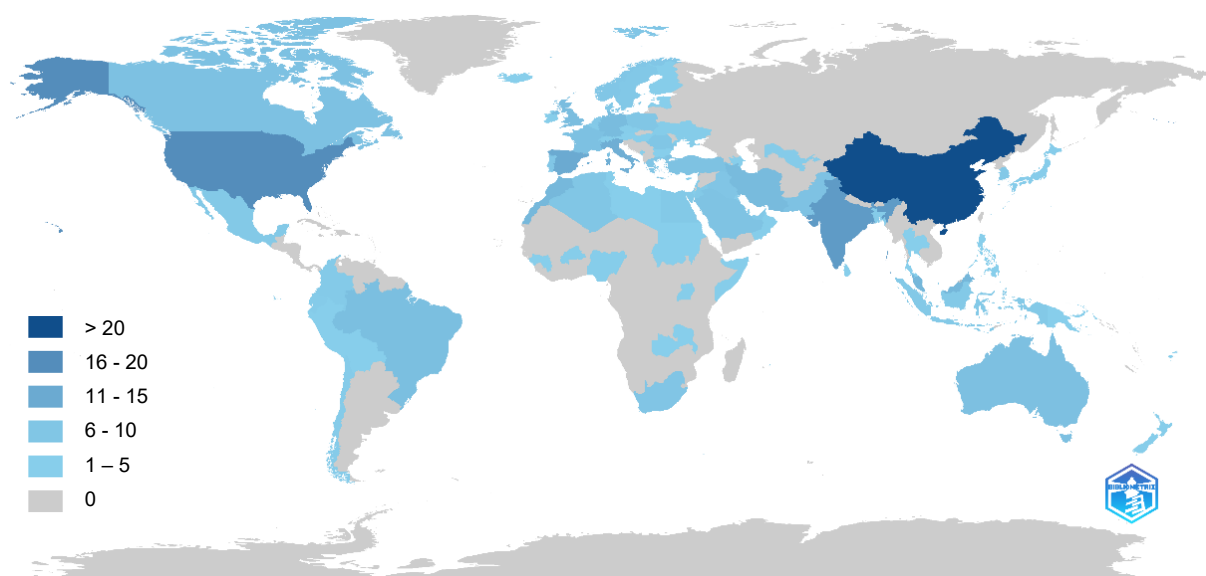


Figura 2.6 – Produção científica dos países

Fonte: *Bibliometrix* R

## 2.2. Conceito e evolução histórica da manutenção

A palavra manutenção deriva do latim *manutencio*, formado por *manus*, “mão”, e “tenere”, agarrar, segurar (Cabral, 2021). Manutenção é manter o que se tem ou, simplesmente, ter na mão.

Há quem acredite que o conceito de manutenção tem origem no vocabulário militar, com objetivo principal de restabelecer as condições originais dos ativos. A Revolução Industrial, porém, ampliou este conceito para incluir estratégias de prevenção e otimização do desempenho dos ativos (Tabela 2.1).

“Manutenção é o termo usado para abordar a forma pela qual as organizações tentam evitar as falhas cuidando das suas instalações físicas” (Slack et al., 2018). Acresce que a manutenção visa atender um processo, com fiabilidade, maior segurança, custos adequados, “valor residual” mais alto e preservação do meio ambiente (Kardec & Nascif, 2001).

Tabela 2.1 – Evolução da manutenção

Geração	Período	Expectativas em Relação à Manutenção	Características das técnicas de manutenção
<b>Primeira Geração</b>	Antes de 1940	Reparação após a falha	Conserto apenas quando a máquina avaria Ausência de planeamento preventivo
<b>Segunda Geração</b>	1940 – 1970	Maior disponibilidade dos equipamentos Aumento da vida útil	Programas de inspeção Sistemas manuais de planeamento e controlo do trabalho Computadores grandes e lentos Monitorização baseada no tempo
<b>Terceira Geração</b>	1980–2000	Maior disponibilidade e fiabilidade Melhor relação custo-benefício Melhor qualidade dos produtos Preservação ambiental	Monitorização de condição Projetos orientados para fiabilidade e manutenibilidade Análise de modos e efeitos da falha (FMEA) Sistemas inteligentes
<b>Quarta Geração</b>	Após 2000	Integração estratégica da manutenção na organização Confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade como métricas-chave Sustentabilidade e segurança como prioridades	Automatização e digitalização da manutenção Monitorização contínua com sensores Manutenção preditiva avançada Análise em tempo real Integração de sistemas e gestão de ativos Cultura de melhoria contínua

Adaptado de: Kardec & Nascif (2001)

Segundo a NP 13306, a manutenção é “a combinação de todas as ações técnicas, administrativas e de gestão, durante o ciclo de vida de um bem, destinadas a mantê-lo ou repô-lo num estado em que possa desempenhar a função requerida” (Cabral, 2021; NP EN 13306, 2021).

Pereira & Sena (2016) entendem que, na definição acima, manter contém a noção de prevenir e repor refere-se à noção de corrigir. A função requerida de um bem é a função (ou conjunto de funções) considerada como necessária para a prestação de um dado serviço.

Em todas as definições de manutenção, sejam elas oficiais ou não, têm subentendido que a função manutenção é a garantia da disponibilidade dos equipamentos, através da avaliação da sua condição.

Assim, a missão da manutenção é garantir a disponibilidade da função dos equipamentos e instalações de modo a atender a um processo de produção ou serviço, com fiabilidade, segurança, e preservação do meio ambiente a custos adequados (Kardec & Nascif, 2001).

### **2.3. Manutenção como função estratégica**

Para que uma organização alcance a excelência dos seus serviços e produtos é indispensável fazer a gestão da manutenção, visando encontrar o equilíbrio entre o benefício e o custo, de forma a maximizar o contributo positivo da manutenção para a rentabilidade dos investimentos efetuados (Farinha, 2018).

As normas, ISO 55001 (Gestão de Ativos) e a NP EN 16646 (Manutenção no âmbito da gestão de ativos físicos), estabelecem que a manutenção deve ser integrada no planeamento estratégico das empresas. Este enquadramento diz respeito à necessidade de garantir que os ativos estejam sempre disponíveis e alinhados com os objetivos organizacionais. Outro ponto relevante é o contributo atual da manutenção para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), em especial sobre o consumo responsável e ação climática.

A manutenção deixou de ser um conjunto de atividades técnicas para reparações ocasionais e passou a constituir-se como uma função estratégica em sistemas industriais e infraestruturas, especialmente quando se trata de ativos críticos, como as redes elétricas.

Deste modo, é fundamental definir a gestão da manutenção, que engloba “*todas as atividades de gestão que determinam os requisitos de manutenção, objetivos, estratégias e responsabilidades, e a implementação destas por diversos meios, tais como planeamento, controlo e a melhoria das atividades de manutenção e aspetos económicos*” (NP EN 13306, 2021).

A gestão da manutenção engloba todas as atividades de gestão que determinam os requisitos de manutenção, objetivos, estratégias e responsabilidades, e a implementação destas por diversos meios (NP EN 13306, 2021).

Uma gestão eficaz da manutenção permite aumentar a fiabilidade e disponibilidade dos equipamentos, reduzir falhas e custos de operação, garantir segurança e continuidade do fornecimento.

Para que a manutenção assuma um papel estratégico deve estar voltada para os resultados da organização. Mais do que ser apenas eficiente é fundamental ser eficaz. Isso significa que não basta reparar com rapidez, mas garantir que a sua função permaneça disponível para a operação, minimizando a probabilidade de paragens não planeadas (Kardec & Nascif, 2001).

## 2.4. Tipos de manutenção

Kardec & Nascif (2001) afirmam que “os diversos tipos de manutenção podem ser considerados como políticas de manutenção, desde que a sua aplicação seja o resultado de uma definição de gestão ou política global da instalação, baseada em dados técnico-económicos”.

Os tipos de manutenção existentes são caracterizados pela maneira como são feitas as intervenções nos equipamentos, sistemas ou instalações. A Figura 2.7 apresenta a classificação dos tipos de manutenção segundo a NP EN 13306. A manutenção pode ocorrer antes ou após a falha.

Na prática, as atividades de manutenção consistem na combinação de três abordagens básicas para cuidar das instalações físicas, que são: melhoria, manutenção corretiva e preventiva (sistemática e condicionada/preditiva).

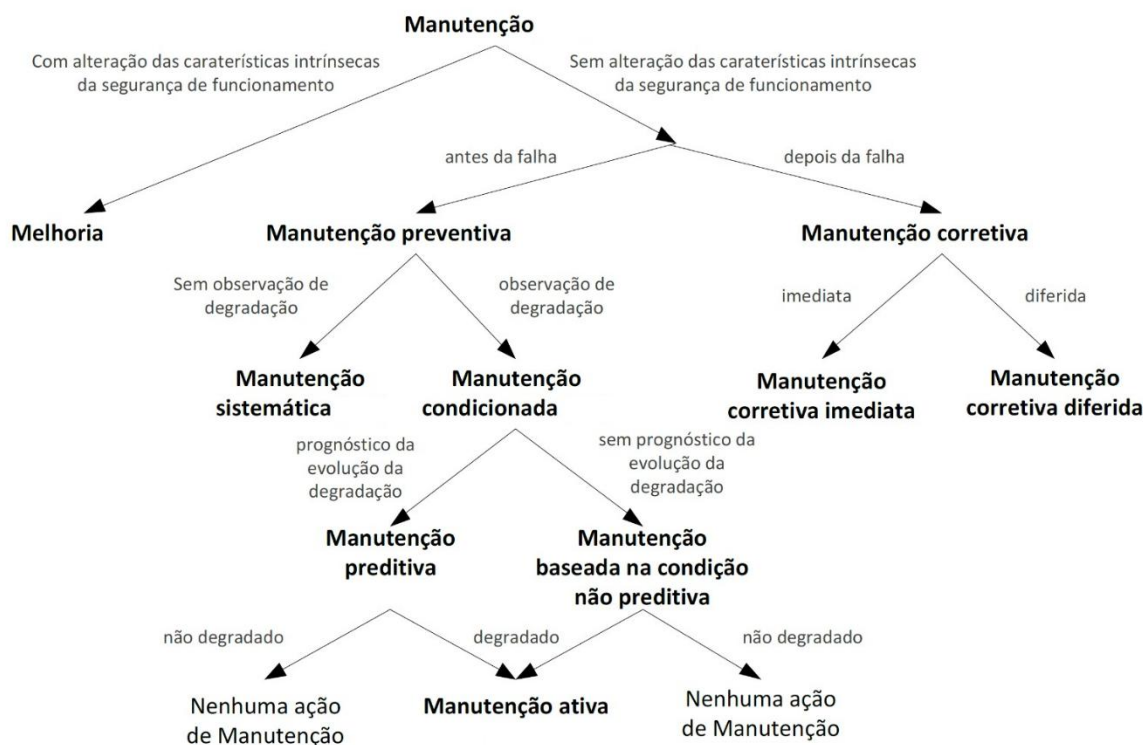


Figura 2.7 – Tipos de manutenção

Fonte: NP EN 13306 (2021)

- **Manutenção corretiva**

Manutenção corretiva, como o nome indica, significa deixar os equipamentos a operar até que avariem. Esta manutenção é realizada após detecção de avaria e destinada a repor um bem num estado em que pode realizar a função requerida (NP EN 13306, 2021; Slack et al., 2018).

A Figura 2.8 representa a manutenção corretiva, onde se observa que o tempo até à falha é aleatório.

Historicamente, a manutenção corretiva foi o tipo de manutenção mais comum na Revolução Industrial, mas nos dias atuais é considerada insuficiente para sistemas críticos, como redes elétricas.

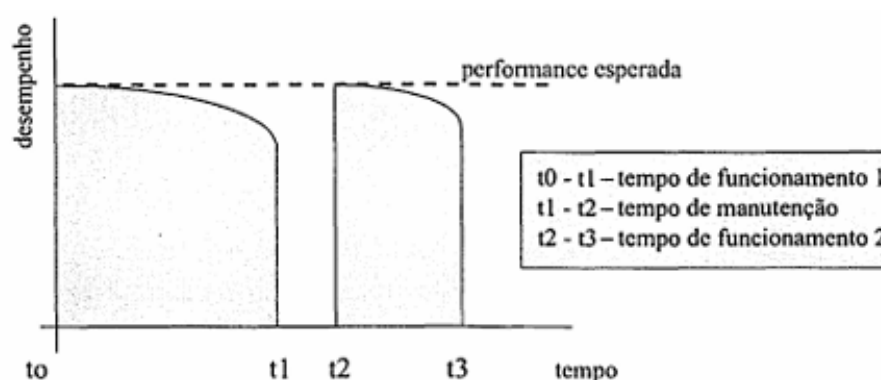


Figura 2.8 – Manutenção corretiva

Fonte: Kardec & Nascif (2001)

- **Manutenção Preventiva**

A manutenção preventiva (Figura 2.9) é efetuada, em intervalos pré-estabelecidos, com a finalidade de avaliar, eliminar e/ou mitigar a degradação e reduzir a probabilidade de falha dos equipamentos (Kardec & Nascif, 2001; NP EN 13306, 2021).

- **Manutenção Preventiva Sistemática**

As inspeções e intervenções são programadas independentemente do estado real do equipamento. A manutenção preventiva é uma abordagem eficaz para redução de falhas inesperadas, mas pode gerar custos desnecessários se os componentes ainda estiverem em boas condições de uso no momento da substituição (Pereira & Sena, 2016).

- **Manutenção Preventiva Condicionada/Preditiva**

A manutenção condicionada é baseada na análise da condição, que inclui a avaliação das condições físicas, análise e possíveis ações de manutenção decorrentes. A

manutenção preditiva é baseada na análise de condição e efetuada de acordo com as previsões extrapoladas de análises repetidas ou características conhecidas e avaliação de parâmetros significativos da degradação (NP EN 13306, 2021). O objetivo deste tipo de manutenção é o de determinar o tempo correto para intervenção com base em modificação de parâmetro de condição ou desempenho, utilizando-se o equipamento até o máximo da sua vida útil (Cabral, 2021; Kardec & Nascif, 2001). A Figura 2.10 ilustra a manutenção condicionada que pode incluir a vertente preditiva.

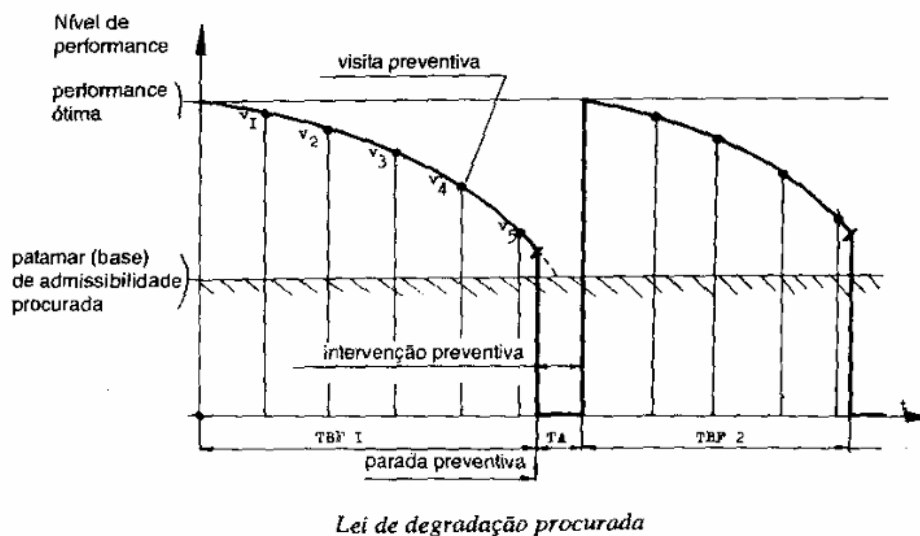


Figura 2.9 – Manutenção preventiva

Fonte: Monchy (1989)

A manutenção preditiva, em particular, destaca-se por permitir uma abordagem baseada em dados e monitorização contínua, suportada em algoritmos ou ferramentas de Inteligência Artificial, com o objetivo de “prever e evitar”, em vez de “reagir e reparar”. A manutenção preditiva pode reduzir os custos ocultos associados ao trabalho de manutenção, reduzindo, por exemplo, os custos com horas extras (Daniel-Durandt et al., 2024).

Um exemplo da aplicação da manutenção preditiva em redes elétricas é o uso de tecnologia de ultrassons. A utilização de tecnologia de ultrassons tem-se vindo a afirmar como uma prática nas inspeções elétricas, uma vez que complementa os métodos tradicionais de inspeção por infravermelhos, contribuindo para um aumento da segurança operacional. Em geral, as inspeções por ultrassons podem ser realizadas antes da abertura de armários ou quadros elétricos energizados, permitindo uma avaliação preliminar segura (Figura 2.11). Entre as anomalias elétricas que podem ser detetadas através desta técnica destacam-se o efeito coroa, a arborescência elétrica, o arco elétrico e as descargas parciais (UE Systems, 2022).

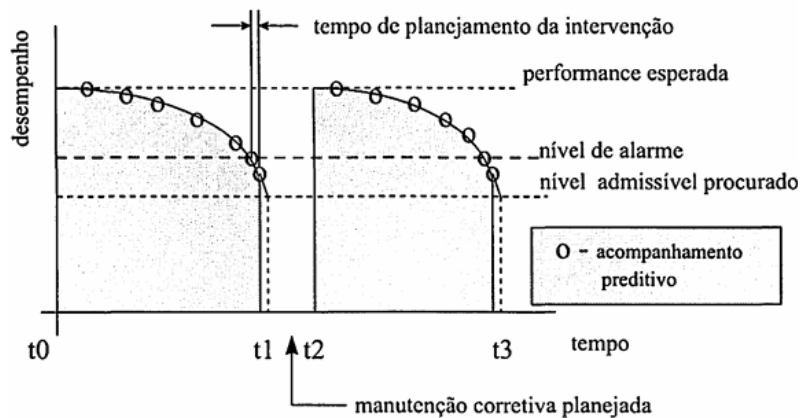


Figura 2.10 – Manutenção preditiva

Fonte: (Kardec & Nascif, 2001)

Os gráficos ilustrados na Figura 2.8, na Figura 2.9 e na Figura 2.10 representam equipamentos que apresentam uma queda de desempenho com o tempo. O aspeto das curvas é apenas didático, não devendo ser considerado que o equipamento apresenta queda de desempenho logo após ter entrado em operação.



Figura 2.11 – Inspeção por ultrassons

Fonte: UE Systems (2022)

Estes diferentes tipos de manutenção são aplicados de forma sistemática em ferramentas e filosofias de manutenção abordadas na literatura. Entre as ferramentas e filosofias mais citadas, como resultado de variadas inovações tecnológicas ao longo dos últimos anos, referem-se Modelos de Gestão da Manutenção Industrial, tais como (Bengtsson & Lundström, 2018; Emanuela et al., n.d.; Farinha, 2018; Ferreira, 2021; Monchy, 1989; Pereira & Sena, 2016; Sezer et al., 2018; Straub, 2007):

- *Reliability Centered Maintenance* (RBM);
- *Total Productive Maintenance* (TPM);

- *Risk Based Maintenance* (RBM);
- *Condition-Based Maintenance* (CBM);
- *Performance Based Maintenance* (PBM);
- *Risk Based Inspection* (RBI).

## **2.5. Normas de manutenção**

As atividades de manutenção devem obedecer a normas técnicas e regulamentares específicas. De modo a uniformizar terminologias, conceitos e formas de atuação, as normas europeias têm substituído outras normas nacionais existentes em diversos países. As mais importantes e abrangentes para a gestão da manutenção são (Cabral, 2021):

- EN 13306 – “Manutenção, Terminologia de manutenção” estabelece a base para a comunicação e compreensão das atividades de manutenção, sendo uma referência essencial para todos os profissionais da área.
- EN 15341 – “Indicadores de desempenho da Manutenção (KPIs<sup>3</sup>)” apresenta indicadores-chave de desempenho com definições padronizadas, permitindo uma aplicação consistente e compreensível em diferentes contextos.
- EN 13269 – “Manutenção, Instruções para a preparação de contratos de manutenção” fornece uma estrutura padrão para a elaboração de contratos de serviços de manutenção, sendo um recurso útil para a sua elaboração.
- EN 13460 – “Manutenção, Documentação para a manutenção” especifica a documentação necessária num sistema de gestão de manutenção, detalhando os requisitos de cada documento.
- EN 16646 – “Manutenção no âmbito da gestão de ativos físicos” introduz no âmbito da gestão de ativos físicos, uma estrutura para as atividades de manutenção, estabelece a relação entre o plano estratégico da organização e o sistema de gestão da manutenção, e descreve as interligações entre o processo de manutenção e todos os outros processos de gestão de ativos físicos.
- EN 50160 – “Características da tensão fornecida pelas redes de distribuição pública de energia elétrica” esta norma especifica os níveis de qualidade de energia recomendado para redes de baixa, média e alta tensão.
- ISO 50001 – “Gestão de Energia”, embora não específica para a manutenção, esta norma é importante por fornecer um quadro de referência para a

---

<sup>3</sup> *Key Performance Indicators*

implementação de um sistema eficaz de gestão de energia seguindo a metodologia *Plan, Do, Check, Act* (PDCA) para melhorar continuamente o desempenho energético das instalações.

- ISO 55001 – “Gestão de Ativos” estabelece requisitos para estabelecimento, implementação, manutenção e melhoria de um sistema de gestão de ativos.
- ISO 41012 – “Gestão de instalações: Guia para as aquisições estratégicas e o desenvolvimento de acordos” tem como objetivo garantir que os espaços, infraestruturas e serviços de suporte de uma organização sejam geridos de forma eficiente, segura e alinhada com os objetivos estratégicos.
- ISO 31000 – “Gestão de Risco” é uma norma que não se restringe a um sector específico, permitindo que as organizações identifiquem, avaliem e tratem riscos de forma sistemática.

## 2.6. Indicadores de desempenho

Indicador é a característica medida (ou conjunto de características) de um fenómeno, de acordo com uma fórmula específica que avalia a sua evolução (NP EN 15341, 2009). A definição de indicador sofreu uma alteração e passou a ser: a medida quantitativa ou qualitativa de uma característica de determinado fenómeno ou desempenho de uma atividade, estabelecida de acordo com critérios definidos, por uma fórmula ou por questionário (NP EN 15341, 2009; Cabral, 2021).

Os indicadores eleitos para medir desempenhos e estabelecer metas designam-se por *Key Performance Indicators* (KPIs), que têm em português o nome de Indicadores-chave de Desempenho.

Indicadores de desempenho são então informações quantitativas, fornecidas em forma de índices ou percentuais sobre diferentes áreas da empresa. O acompanhamento constante destes indicadores auxilia a manutenção a atingir níveis de controlo que respaldem decisões estratégicas.

A norma EN 15341 (2019) dá orientações para definir um conjunto apropriado de indicadores para avaliar e melhorar a eficácia, rendimento e sustentabilidade da manutenção em ativos físicos, sejam eles indústrias, infraestruturas, instalações, edifícios ou sistemas de transporte, enquadrados nos respetivos fatores influenciadores tanto externos como internos (Tabela 2.2). Esta norma define um conjunto de indicadores-chave de desempenho relevantes para a manutenção, mantendo a sua classificação com base nas três categorias:

1. Indicadores Técnicos;
2. Indicadores Económicos;
3. Indicadores Operacionais.

Tabela 2.2 – Fatores de influência na manutenção

Externo	Interno
Localização	Cultura da empresa
Cultura da Sociedade	Severidade do processo
Custo de mão de obra	Gama do produto
Situação do mercado	Dimensão da instalação
Legislação	Taxa de utilização
Setor/Áreas	Idade da Instalação
	Criticidade

Adaptado de: NP EN 15341 (2009)

O desafio dos KPIs é de equilibrar indicadores técnicos e económicos com métricas ambientais e sociais. No setor elétrico são utilizados os seguintes indicadores para medir a qualidade de serviço, bem como avaliar a continuidade do serviço e impor metas regulatórias (ERSE, 2017, 2023a):

- **Frequência Média de Interrupções Longas do Sistema, do inglês *System Average Interruption Frequency Index (SAIFI)***

SAIFI é um indicador de continuidade do serviço que expressa o número médio de interrupções longas (duração superior a 3 minutos) verificadas por ponto de entrega durante determinado período de referência, normalmente anual. Este indicador caracteriza a frequência de ocorrência de falhas de fornecimento, refletindo a fiabilidade do sistema de distribuição. A expressão correspondente é apresentada na Equação (2.1):

$$SAIFI = \frac{\sum_{j=1}^k FI_j}{k} \quad (2.1)$$

Sendo:

$FI_j$  = número de interrupções longas no ponto de entrega  $j$  no período considerado;

$k$  = número total de pontos de entrega

- **Duração Média das Interrupções Longas do Sistema, do inglês *System Average Interruption Duration Index (SAIDI)***

O SAIDI quantifica a duração média total das interrupções longas de fornecimento de energia elétrica por ponto de entrega, num período de observação definido. Este parâmetro traduz a extensão temporal média de falhas de serviço, constituindo um instrumento para a avaliação da continuidade de fornecimento e da eficiência operacional. A sua formulação é apresentada na Equação (2.2)

$$SAIDI = \frac{\sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^x DI_{ij}}{k} \quad (2.2)$$

Sendo:

$DI_{ij}$  = duração da interrupção longa  $i$  no ponto de entrega  $j$

$k$  = número total de pontos de entrega

- **Frequência Média das Interrupções Breve do Sistema, do inglês *Momentary Average Interruption Frequency Index (MAIFI)***

O MAIFI reflete o tempo médio de interrupções breves (com duração entre 1 segundo e 3 minutos) nos pontos de entrega, num determinado período estabelecido. Este indicador caracteriza a qualidade instantânea do fornecimento elétrico, sendo sensível a perturbações transitórias e curtas falhas de continuidade. A sua formulação matemática é apresentada na Equação (2.3):

$$MAIFI = \frac{\sum_{j=1}^k BI_j}{k} \quad (2.3)$$

Sendo:

$BI_j$  = número de interrupções breves no ponto de entrega  $j$  no período considerado

$k$  = número total de pontos de entrega

- **Tempo de Interrupção Equivalente da Potência Instalada (TIEPI)**

O TIEPI corresponde ao tempo ponderado das interrupções longas, considerando a potência instalada nos pontos de entrega afetados. Este indicador fornece uma visão integrada do impacto das interrupções na rede de distribuição, ponderando a gravidade das falhas em função da dimensão e relevância das instalações envolvidas. A expressão correspondente é apresentada na Equação (2.4):

$$TIEPI = \frac{\sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^x DI_{ij} \times PI_j}{\sum_{j=1}^k PI_j} \quad (2.4)$$

Sendo:

$DI_{ij}$  = duração da interrupção longa  $i$  no ponto de entrega  $j$

$PI_j$  = potência instalada no ponto de entrega

- **Energia Não Distribuída (END)**

A END é um indicador que representa o valor estimado da energia não distribuída, nos pontos de entrega, devido a interrupções longas, ou seja, quantifica a energia elétrica que deixou de ser fornecida aos consumidores em resultado das interrupções de serviço. Este indicador expressa, de forma agregada, o impacto energético e económico das falhas de fornecimento. A sua formulação matemática é apresentada na Equação (2.5):

$$END = \frac{TIEPI \times ED}{T} \quad (2.5)$$

Sendo:

TIEPI= Tempo de Interrupção Equivalente da Potência Instalada

ED= Energia distribuída (KWh ou MWh) no período considerado

T= Número de horas

## 2.7. Tecnologias de suporte à manutenção

A manutenção de infraestruturas elétricas tem vindo a evoluir significativamente com a introdução de tecnologias digitais associadas ao paradigma da Indústria 4.0. Entre as mais relevantes encontram-se a Internet das Coisas (*Internet of Things* - IoT), a Inteligência Artificial (IA), os Sistemas Ciberfísicos (*Cyber Physical Systems* - CPS), a Realidade Aumentada, a Robótica e os Gémeos Digitais (Cavus, 2025; Faheem et al., 2018; Hickie & Hickie, 2021).

A tecnologia é o principal catalisador para a digitalização do setor elétrico e, conseqüentemente para a transição energética. As tecnologias aqui citadas têm sido fundamentais para inspeções de linhas críticas, combinadas com modelos analíticos e preditivos que auxiliam na gestão da manutenção e na prevenção de falhas.

- **Internet das Coisas (IoT)**

A *Internet of Things* (IoT) pode ser vista como a fusão de diversas tecnologias, as quais complementam-se para facilitar a integração dos objetos do ambiente físico com o mundo virtual. A IoT aplicada ao setor industrial é conhecida como *Industrial IoT* (IIoT), em português Internet Industrial das Coisas.

A IIoT engloba a rede de objetos físicos que utilizam sensores e *software* para se ligar à rede e partilhar dados, o que converte estes dispositivos em “inteligentes”. Estes dispositivos inteligentes recolhem e partilham uma ampla gama de dados, sobre o estado dos equipamentos em tempo real, o que, por sua vez, facilita a automação de processos, bem como a melhoria das decisões a serem tomadas (Hickie & Hickie, 2021).

A integração entre IoT e CPS representa a base da digitalização moderna e da Indústria 4.0. A IoT fornece o sentido e a conectividade, enquanto os CPS representam a inteligência e ação que transformam os dados recolhidos em decisões e comandos automatizados.

A manutenção preditiva, baseada em dados recolhidos pela IoT, permite intervenções preventivas, reduzindo o tempo de inatividade não planeado e os custos associados. Em sistemas energéticos, os sensores IoT podem identificar aquecimentos anómalos ou vibrações irregulares em diversos pontos da rede elétrica. Estes dados são enviados aos CPS que processam a informação em tempo real e, fazem o ajuste, automaticamente, do fluxo de energia, equilibrando cargas e prevenindo falhas (Boyes et al., 2018).

- **Inteligência Artificial (IA)**

Um sistema de rede inteligente baseado em IA refere-se a um sistema computadorizado que utiliza IA, com aprendizagem profunda (*Deep Learning* - DL) e aprendizagem máquina (*Machine Learning* - ML), para melhorar a fiabilidade, a gestão, a distribuição e o controlo da produção de energia na rede elétrica (Alam et al., 2025).

Estes sistemas inteligentes permitem a análise preditiva para prever falhas e otimizar operações; a capacidade de criar algoritmos e modelos tecnológicos possibilita a automação de processos, a prevenção de padrões e a otimização de operações (Alam et al., 2025; Hickie & Hickie, 2021). A IA aprende com padrões de falha anteriores e consegue sugerir períodos ótimos de manutenção e substituição de componentes.

- **Realidade Aumentada**

A Realidade Aumentada oferece a visualização e interação de informação digital em ambiente físico ou virtual. Para além de possibilitar uma experiência enriquecedora ao cliente, facilita a manutenção ao fornecer instruções claras e visuais para os colaboradores, reduzindo erros nas operações (Hickie & Hickie, 2021). A partir deste mapeamento digital é possível a simulação de cenários de falha, identificando com exatidão os pontos de avaria, bem como os recursos necessários à manutenção. Tal abordagem reduz significativamente o tempo de inatividade dos equipamentos, otimizando o planeamento das ações corretivas e preventivas.

- **Robótica**

A robótica utiliza para inspeções rápidas e seguras de infraestruturas, reduzindo a necessidade de intervenções humanas.

- **Gêmeos digitais**

Os gêmeos digitais podem ser aplicados em diversos níveis e funções dentro do sistema elétrico, designadamente na monitorização em tempo real de ativos e redes, em simulações preditivas para prever falhas e otimizar operações, no planeamento e

projeto de redes elétricas complexas, na gestão de manutenção, reduzindo custos e tempo de inatividade e na integração de energias renováveis com maior precisão e estabilidade, entre outras possibilidades (Verma et al., 2024).

## **2.8. Infraestruturas elétricas e energias renováveis**

A Primeira Revolução Industrial, iniciada no final do século XVII, levou a uma verdadeira rutura no paradigma energético. A introdução da máquina a vapor marcou o início da poluição maciça resultante da queima intensiva de carvão. As consequências tornaram-se cada vez mais visíveis, com impactos ambientais e contributos para as alterações climáticas. Perante este cenário, emergiu a necessidade de repensar e procurar alternativas limpas e sustentáveis (Kardec & Nascif, 2001; Strielkowski et al., 2021).

A transição energética é o processo de mudança do sistema energético, substituindo gradualmente fontes de energia tradicionais, como combustíveis fósseis em grandes centrais, por fontes de energia renovável distribuídas em qualquer ponto da rede e mais sustentáveis, como a energia solar e eólica. As tecnologias para conversão destas fontes de energia renovável em eletricidade variam em complexidade e eficiência (Strielkowski et al., 2021).

A crescente adoção de energias renováveis vincula-se com a redução da dependência de combustíveis fósseis e a maior segurança energética. A diversificação da matriz energética aumenta a segurança do fornecimento elétrico, pois diminui a vulnerabilidade a flutuações de preços e fornecimento de stock limitado de recursos não renováveis. O uso de energias limpas também impulsiona a inovação tecnológica, com o desenvolvimento de novas soluções que podem otimizar a eficiência e a capacidade de armazenamento de energia, viabilizando uma operação mais estável e fiável da rede (Daniel-Durandt et al., 2024).

As infraestruturas elétricas representam um conjunto fundamental de sistemas e componentes que garantem a produção, transporte e distribuição de energia elétrica. Redes elétricas com alta penetração de energias renováveis enfrentam maior vulnerabilidade a condições ambientais adversas, redução da inércia das redes, tempos de recuperação mais longos e maior exposição a eventos climáticos extremos, agravados pelas mudanças climáticas (Xu et al., 2024). A natureza intermitente da energia solar e eólica introduz complexidades na manutenção da estabilidade da rede, controlo de frequência e regulação de tensão (Cavus, 2025).

Historicamente, as redes elétricas foram concebidas para fluxos unidirecionais de energia, onde a corrente flui da central de produção para o consumidor final. Estas redes são caracterizadas por falta de flexibilidade e dificuldade em integrar fontes de energia renovável, uma vez que são consideradas estáticas por serem projetadas para um cenário fixo com pouca adaptação a mudanças. A introdução de energia renovável exige sistemas bidirecionais e inteligentes capazes de acomodar fluxos

variáveis sem comprometer a estabilidade das redes (Cavus, 2025; Kalkal & Garg, 2017).

A arquitetura de uma rede inteligente consiste em três níveis (Ourahou et al., 2020):

- O nível 1 é usado para transportar eletricidade através de uma infraestrutura convencional;
- O nível 2 é formado por uma arquitetura de comunicação baseada em diferentes meios de comunicação e tecnologias usadas para recolher dados de sensores instalados em redes elétricas;
- O nível 3 consiste em aplicações e serviços, como sistemas remotos de resolução de problemas ou programas automáticos de resposta à procura usando informação em tempo real.

A Tabela 2.3 sintetiza as principais características das redes elétricas tradicionais *versus* modernas.

Tabela 2.3 – Características das redes tradicionais *versus* modernas

<b>Redes tradicionais</b>	<b>Redes modernas</b>
Analógica	Digital
Unidirecional	Bidirecional
Produção centralizada	Produção descentralizada
Comunicação em algumas partes da rede	Comunicação em toda a rede
Equilíbrio do sistema elétrico pela regra de oferta <i>versus</i> procura	Equilíbrio do sistema elétrico pela regra da procura <i>versus</i> consumo
Consumidores	Consumidor é ator

Fonte: Ourahou et al. (2020)

As redes inteligentes dependem do uso de uma série de redes que variam em tamanho e localização (Ho et al., 2014; Ourahou et al., 2020):

- Rede de Área Residencial do inglês, *Home Area Network* (HAN) ou rede de área do cliente, que liga aparelhos e dispositivos inteligentes a um medidor inteligente dentro da casa. Elas têm curto alcance e são capazes de se comunicar de forma fiável com baixas taxas de dados. Assim, reduzem os custos de implementação e o consumo de energia.
- Rede de Área Predial do inglês, *Building Area Network* (BAN): semelhante a uma HAN, mas abrange edifícios maiores e pode consistir em várias redes menores.
- Rede de Área Industrial do inglês, *Industry Area Network* (IAN), como as BANs, mas mais complexa e especializada para fábricas e edifícios industriais.

- Rede de Área Ampla do inglês, *Wide Area Network* (WAN), é utilizada pelas NANs para encaminhar os relatórios de eletricidade para o centro de controlo principal. As WANs exigem taxas de dados muito altas e longa distância de cobertura. Redes óticas são comumente usadas como meio de comunicação.
- Rede de Área de Vizinhança do inglês, *Neighborhood Area Network* (NAN), responsável por ligar HAN, BAN e IAN à WAN e agregar dados de medição de milhares de medidores inteligentes. Devido ao seu maior âmbito, as NANs exigem taxas de dados mais altas.

Na Figura 2.12 observa-se que as redes elétricas inteligentes integram múltiplos níveis de comunicação e controlo. Inicialmente, as redes domésticas e locais, compostas por dispositivos, como painéis solares, sistemas de climatização, baterias e veículos elétricos, comunicam com a *firewall* através de *Wireless Fidelity* (Wi-Fi) ou rede local (*Ethernet*), assegurando a comunicação bidirecional. A *firewall* liga-se à nuvem local (NAN), responsável por serviços e funcionalidades de gestão energética, e também à nuvem alargada (WAN). A nuvem WAN agrega serviços de armazenamento de dados, *big data*, segurança, suporte técnico e sistemas de apoio à decisão. As fontes de produção de energia comunicam com a nuvem WAN, permitindo monitorização e controlo em tempo real. Os sistemas de distribuição de energia constituem um componente crítico na infraestrutura elétrica moderna, assegurando a entrega eficiente de eletricidade desde as subestações até aos consumidores finais; as entidades distribuidoras e os utilizadores finais interagem com a rede, acedendo a informação de consumo, faturação e gestão da procura.

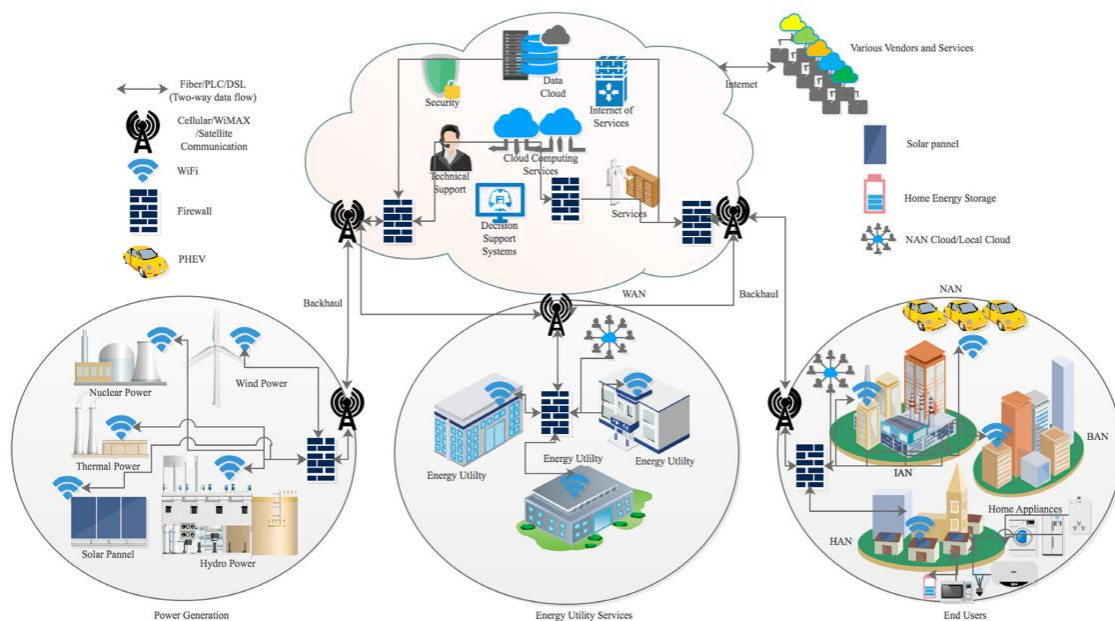


Figura 2.12 – Arquitetura fundamental de uma rede inteligente

Fonte: Faheem et al. (2018)

As fontes de energia renovável no sistema elétrico impõem desafios técnicos, dado o seu carácter intermitente e descentralizado (Figura 2.13). Para garantir a estabilidade são necessários sistemas de armazenamento de energia e redes inteligentes que aumentem a flexibilidade e a capacidade de resposta da rede (Kalkal & Garg, 2017; Xu et al., 2024).

O conceito de *microgrids* surge como resposta aos desafios da integração de fontes de energia renovável, porque as interrupções dentro desta rede são restringidas localmente e não afetam toda a rede, como nos sistemas tradicionalmente utilizados (Kalkal & Garg, 2017; Lindley, 2010). Estas redes podem funcionar de forma autónoma ou ligadas com a rede elétrica principal, oferecendo flexibilidade, segurança energética e melhor aproveitamento da energia renovável.

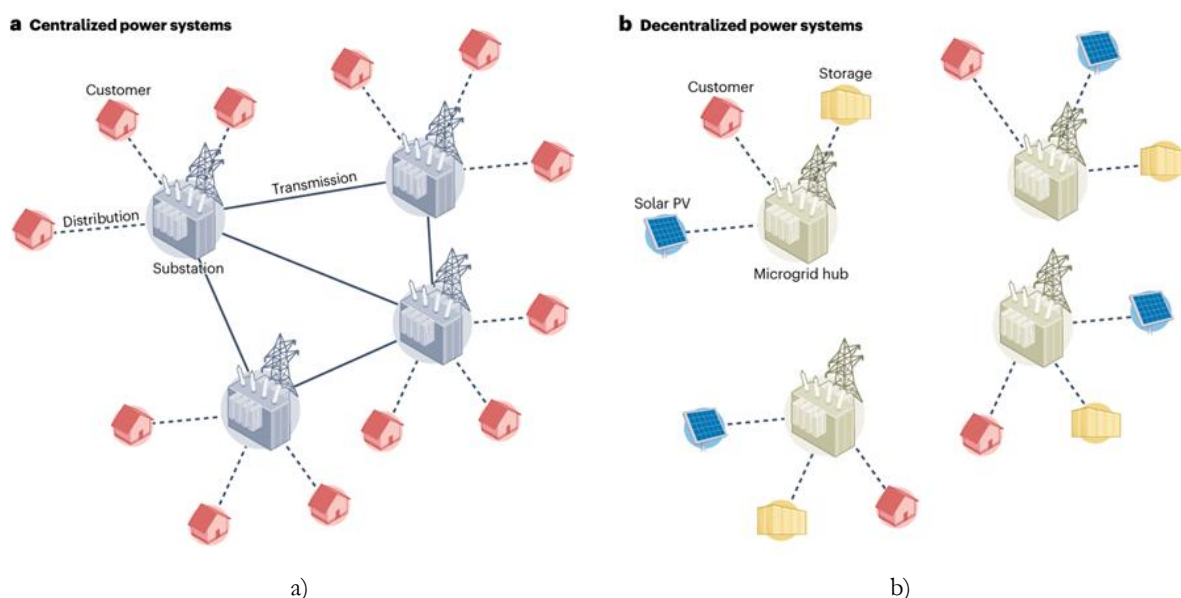


Figura 2.13 – Flexibilidade topológica de sistemas de potência: a) Sistemas centralizados; b) Sistemas descentralizados

Fonte: Xu et al. (2024)

Para fazer face a estes desafios e garantir a estabilidade das redes elétricas, foram desenvolvidas diversas soluções e estratégias tecnológicas:

- **Sistemas de Armazenamento de Energia**

O armazenamento de energia, particularmente os sistemas de armazenamento em bateria, desempenha um papel fundamental na mitigação da variabilidade. Podem armazenar o excesso de energia gerado durante o pico de produção e libertá-la durante os períodos de baixa produção, garantindo um fornecimento de energia estável (Faheem et al., 2018; Kalkal & Garg, 2017). As baterias de iões de lítio são especialmente populares devido à sua elevada

densidade energética, escalabilidade e custos decrescentes, tornando-as uma solução viável para aplicações à escala da rede. Além disso, novas tecnologias de armazenamento, como as baterias de fluxo e armazenamento de hidrogénio, estão a ganhar força pelas suas capacidades de longa duração (Cavus, 2025).

- **Inversores Formadores de Rede**

Estes dispositivos permitem que os sistemas de energia renovável forneçam tensão e frequência estáveis, mesmo sem um gerador síncrono tradicional. Os inversores de rede facilitam a integração da energia renovável, melhorando a estabilidade e a resiliência global da rede. Permitem também que as micro redes operem de forma autónoma e resincronizem-se com a rede central sem comprometer o desempenho do sistema (Xu et al., 2024).

- **Programas de Resposta à Procura**

Ajudam a equilibrar a oferta e a procura, incentivando os consumidores a ajustar a sua utilização de energia com base nos requisitos da rede (Faheem et al., 2018). Por exemplo, os aparelhos inteligentes e os dispositivos IoT podem responder a sinais de preço ou condições da rede em tempo real, reduzindo a procura de pico.

- **Técnicas Avançadas de Previsão**

Ferramentas apresentadas na Secção 2.7 fornecem previsões precisas da produção de energia renovável e dos padrões de procura. Estes dados permitem que os operadores da rede planeiem e aloquem recursos de forma inteligente, minimizando o impacto da variabilidade das energias renováveis.

- **Sistemas de Transmissão Flexíveis de Corrente Alternada e Corrente Contínua**

Estes sistemas aumentam a capacidade das redes para acomodar energia renovável variável, melhorando o controlo do fluxo de energia, reduzindo as perdas e permitindo a transmissão de energia a longa distância a partir de fontes de energia renovável remotas.

## 2.9. Cibersegurança em redes elétricas

Cibersegurança pode ser definida como a prática de proteger sistemas, redes e programas de ataques digitais. Esses ataques geralmente visam aceder, alterar ou destruir informação confidencial, extorquir dinheiro dos utilizadores ou interromper processos normais de serviços essenciais, com impactos económicos e sociais significativos. A cibersegurança consiste na proteção dos ativos, *hardware* e *software*, contra ações provocadas pelo homem (Honorato, 2025; Mohamed, 2024).

A transformação digital tem trazido inúmeros benefícios, mas também expôs as infraestruturas a uma série de ameaças cibernéticas. Estas ameaças, muitas vezes complexas e silenciosas, comprometem a segurança, fiabilidade e resiliência das infraestruturas, exigindo soluções avançadas de monitorização e defesa (Yaacoub et al., 2024; Honorato, 2025).

A crescente interconetividade das redes, alimentada pela proliferação do uso de dispositivos IoT e sistemas de controlo digital, expõe os sistemas a uma diversidade de ataques cibernéticos, como de negação de serviço (*Denial of Service*, DoS), injeção de dados falsos, *ransomware* e até mesmo sabotagens físicas coordenadas (Alam et al., 2025). Estas modalidades de ataque exploram falhas em protocolos de comunicação, autenticação deficiente e a ausência de atualizações de segurança em dispositivos periféricos, representando riscos significativos para a operação contínua da rede.

Devido à sofisticação das ameaças cibernéticas, a proteção a infraestruturas críticas é uma prioridade para organizações e governos a nível mundial, através de:

- Parcerias público-privadas - Incluem a partilha de informação e a coordenação de esforços de resposta a incidentes.
- Legislação e normas reforçadas - Exigem a implementação de medidas de segurança e realizam avaliações frequentes de riscos.

A cibersegurança da informação é essencialmente a união de três pilares fundamentais, comumente conhecidos como a Tríade CIA<sup>4</sup> (Confidencialidade, Integridade e Disponibilidade). Nos sistemas de controlo, em que a operação segura e eficiente de processos industriais é crítica, Honorato (2025) sugere que esse modelo pode não ser totalmente adequado, propondo que a segurança deveria ser incorporada à Tríade CIA (Figura 2.14).

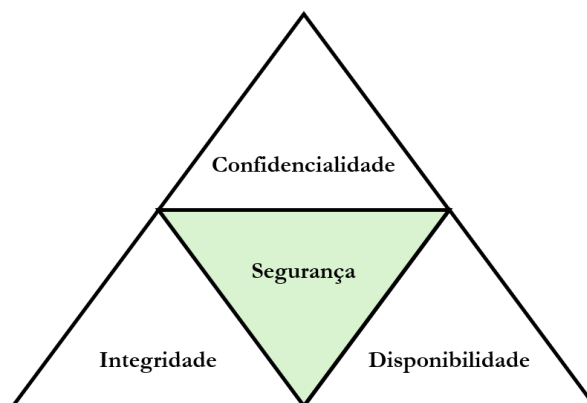


Figura 2.14 – Tríade CIA

Adaptado de: (Eze & Aroh, 2020; Nikander et al., 2020)

---

<sup>4</sup> Confidentiality, Integrity, Availability

Os principais desafios na cibersegurança de redes elétricas incluem a proteção dos sistemas *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA), que são fundamentais para a supervisão e controlo dos processos de produção e distribuição de energia. A interligação entre diferentes elementos das infraestruturas elétricas, como geradores, transformadores e sistemas de medição, aumenta a complexidade da segurança cibernética, necessitando de estratégias robustas de defesa e deteção de intrusões.

Neste cenário, os desenvolvimentos tecnológicos, embora essenciais para a transição energética sustentável, devem ser acompanhados por uma abordagem de cibersegurança igualmente sofisticada e integrada.

O desafio está em conciliar inovação com proteção, garantindo que os ganhos operacionais não comprometam a robustez do sistema elétrico. A cibersegurança, portanto, deixa de ser um complemento técnico e passa a ser um pilar para a transição energética. É imperativo que as políticas de segurança acompanhem a inovação tecnológica (Agostinho et al., 2025b).

## 2.10. Setor elétrico português

O sistema elétrico português caracteriza-se por uma matriz energética diversificada e em constante evolução, com uma forte dependência de recursos hídricos e um crescimento expressivo de energia solar e eólica nos últimos anos, reforçando o compromisso com a transição energética e a neutralidade carbónica (Figura 2.15).

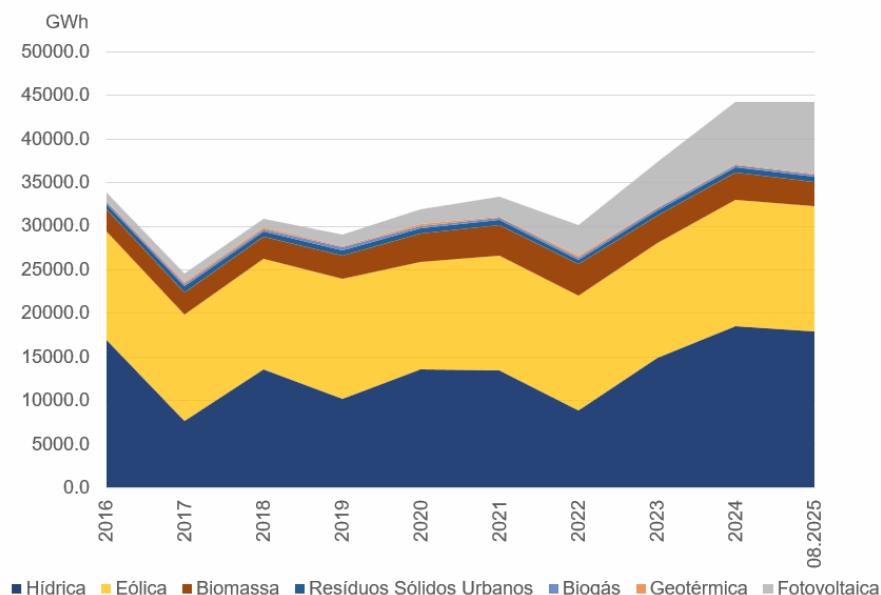


Figura 2.15 – Produção anual renovável

Adaptado de: DGEG (2025); ver Anexo 1

Desde 2014 tem-se registado um aumento contínuo da capacidade instalada de produção de energia renovável, acompanhando as metas definidas no Plano Nacional de Energia e Clima (PNEC); neste documento, revisto em 2024, Portugal tem uma meta ambiciosa de que a contribuição da energia renovável chegue a 51% até 2030, como pode ver-se na Figura 2.16 (INE, 2024). Paralelamente, o país tem investido na modernização das redes elétricas, incorporando o uso de sistemas de armazenamento, automação e redes inteligentes, fundamentais para mitigar os impactos da intermitência das fontes de energia renovável (EDP, 2023).

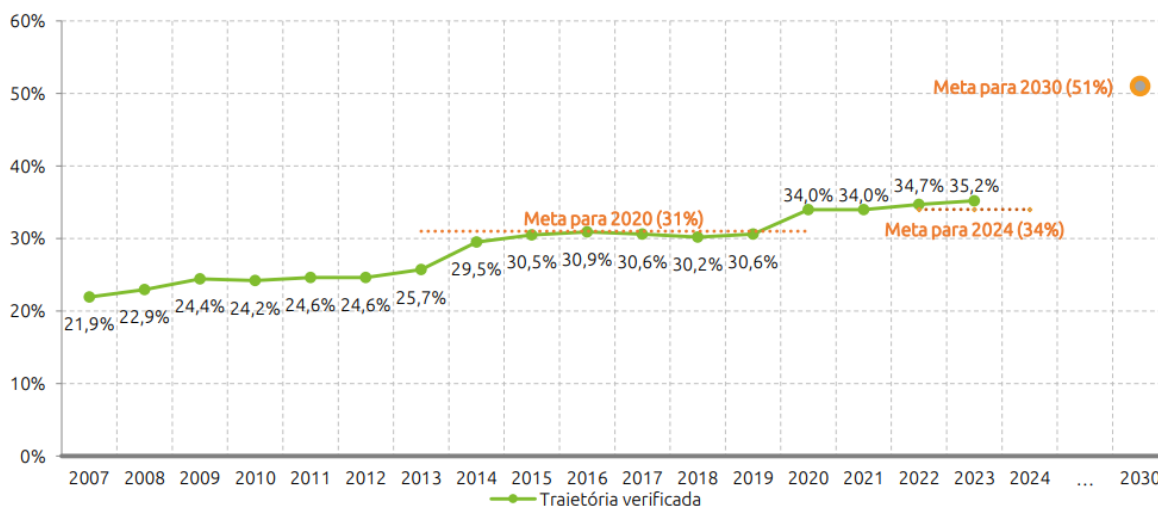


Figura 2.16 – Evolução da incorporação de energia renovável no consumo final bruto de energia  
 Fonte: DGEG (2025)

Da energia primária até ao uso final da energia, há a necessidade de fazer o seu transporte em redes apropriadas. Após a produção, a eletricidade é encaminhada para a Rede Nacional de Transporte (RNT), operada pela Redes Energéticas Nacionais (REN), para a entrega a distribuidores ou diretamente a grandes clientes finais. A nível da distribuição, a E-Redes é a principal entidade responsável pela operação de média e baixa tensão, operando também redes de alta tensão, assegurando a qualidade e continuidade do fornecimento de energia elétrica, em conformidade com a Diretiva 28/2009/CE<sup>5</sup>, o Decreto-Lei n.º 84/2022<sup>6</sup> e a Resolução da Assembleia da República n.º 127/2025<sup>7</sup>.

O Setor Elétrico Nacional (SEN), consciente destes desafios, tem recorrido à utilização de *drones* e sensores IoT para a inspeção remota de linhas e subestações

<sup>5</sup> Estabelece metas para as energias renováveis e promove a sua utilização no consumo final bruto.

<sup>6</sup> Estabelece metas relativas ao consumo de energia proveniente de fontes renováveis, transpondo parcialmente a Diretiva (UE) 2018/2001

<sup>7</sup> Define as metas e políticas de Portugal para a transição energética, mitigação das alterações climáticas e sustentabilidade até 2030.

(como ilustra a evolução histórica da Figura 2.17), para além da implementação de sistemas baseados em IA para a previsão de falhas em equipamentos críticos, reforçando assim a fiabilidade do sistema e a continuidade do serviço (Labelec, 2021; ERSE, 2025; E-Redes, 2025).

A tecnologia é o principal catalisador para a digitalização do setor elétrico e, conseqüentemente, para a transição energética. A E-Redes vem utilizando um *mix* de tecnologias digitais: *Big Data* e Inteligência Artificial, Realidade Aumentada, *Blockchain*, IoT e *drones*, Robótica e Automação (Figura 2.17). Estas tecnologias têm sido fundamentais para inspeções de linhas críticas, combinadas com modelos analíticos e preditivos que auxiliam na gestão da manutenção e na prevenção de falhas.

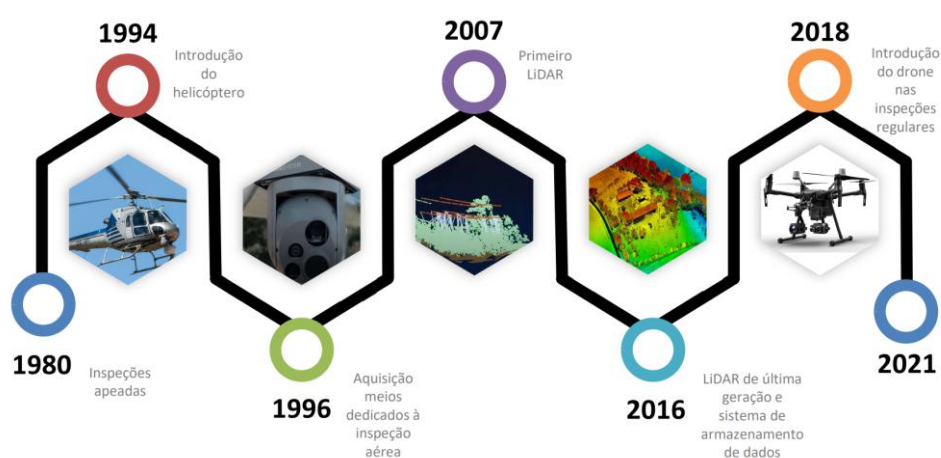


Figura 2.17 – Perspetiva histórica: inspeção de ativos elétricos

Fonte: Labelec (2021)

Para garantir a segurança e o bom funcionamento das linhas elétricas, são feitas inspeções com helicópteros e *drones*. Esses equipamentos captam diferentes tipos de imagens: fotografias comuns, imagens com infravermelhos (que mostram se algum componente está sobreaquecido) e imagens 3D feitas com laser, que ajudam a perceber se há árvores ou outros obstáculos próximos. Com base nesses dados são criados mapas que ajudam as equipas de manutenção na definição de prioridades de intervenção, como poda da vegetação, a substituição de componentes ou reforço de linhas críticas (Figura 2.18).

Importa referir que um dos principais focos de investimento e modernização no SEN tem sido a melhoria dos padrões da qualidade de serviço, reduzindo assimetrias no território nacional. Com a implementação dos modelos de analítica avançada na E-Redes passou a realizar-se um conjunto significativo de ações de manutenção preditiva, assegurando a realimentação de algoritmos sempre que realizadas intervenções sobre os ativos de rede, incluindo a atualização dos dados de cadastro técnico (E-Redes, 2024). Os efeitos deste investimento traduziram-se em bons

resultados de qualidade de serviço comercial, e qualidade de serviço técnico, nomeadamente os relacionados com continuidade de serviço (ERSE, 2025; Parlamento Europeu, 2025).

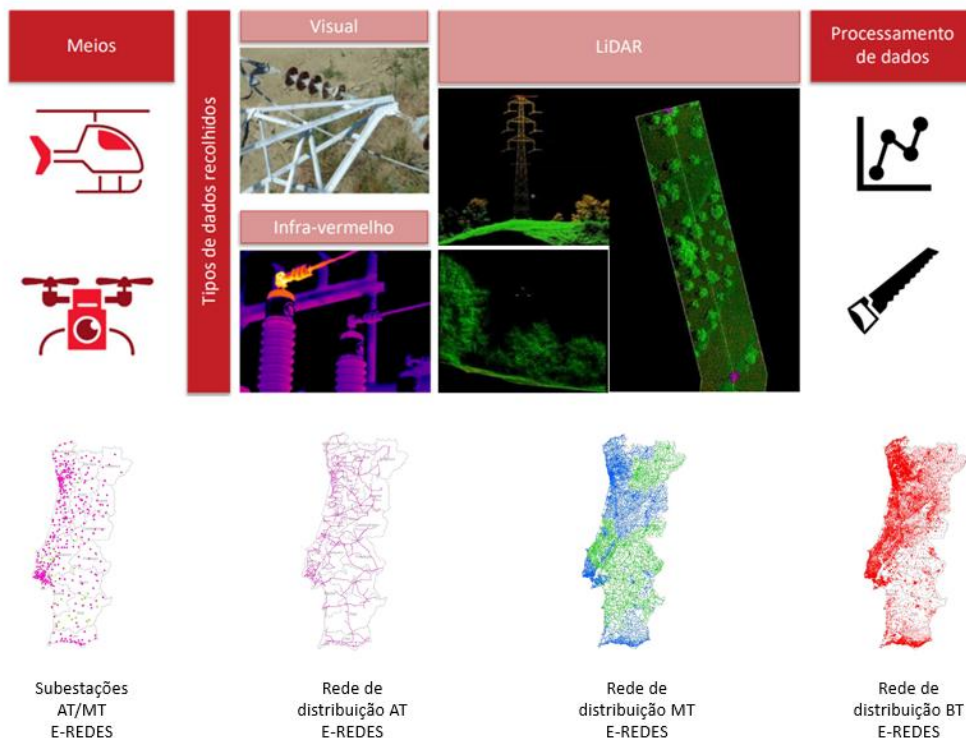


Figura 2.18 – Meios de inspeção visual

Adaptado de:(Fernandes, 2024; Labellec, 2021)

De acordo com dados públicos (Figura 2.19), Portugal é atualmente reconhecido como um dos países europeus líderes na produção de energia elétrica a partir de fontes de energia renovável (EUROSTAT, 2023). Os países europeus que mais têm progredido na transição energética partilham políticas energéticas bem definidas e coordenadas; estabeleceram metas ambiciosas para a redução de gases com efeito estufa e aumento da produção renovável, alinhadas com as diretrizes energéticas definidas pelo Parlamento Europeu (Agostinho et al., 2025b).

Para impulsionar essa transição, implementaram diversos mecanismos de incentivo, como apoio ao autoconsumo, benefícios fiscais e financiamento de projetos sustentáveis (Parlamento Europeu, 2025). Além disso, investem de forma significativa em inovação tecnológica e na melhoria de infraestruturas energéticas. Também apostam na diversificação das fontes de energia renovável, na integração dos sistemas elétricos e na promoção da eficiência energética (Agostinho et al., 2025b).

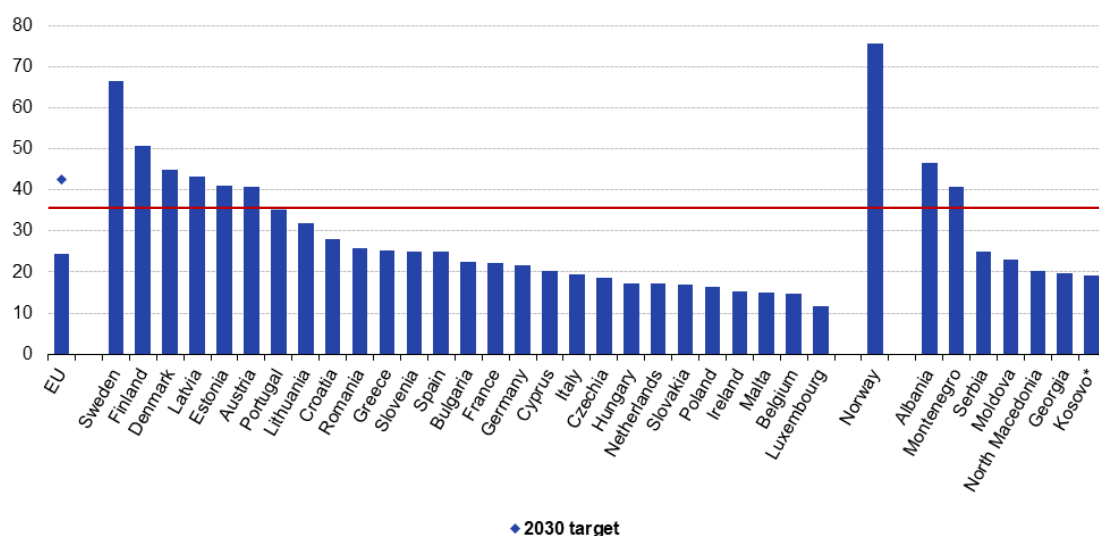


Figura 2.19 – Quota de energia proveniente de fontes de energia renovável

Fonte: EUROSTAT (2023)

## 2.11. Energia renovável em Portugal

Neste tópico apresentam-se dois projetos de referência que refletem a aplicação prática das energias renováveis em Portugal, evidenciando o avanço tecnológico e a capacidade de adaptação das infraestruturas elétricas portuguesas aos desafios da transição energética.

### 2.11.1. *WindFloat Atlantic*

O *WindFloat Atlantic* é um projeto liderado pelo *Windplus*, consórcio constituído pela EDP Renováveis (54,4%), Engie (25%), Repsol (19,4%) e *Principle Power Inc.* (1,2%) (EDP, 2021). Localizado a, aproximadamente, 20 quilómetros ao largo da costa de Viana do Castelo, o parque possui uma capacidade instalada total de 25 MW, distribuída por três turbinas eólicas, suportadas por três plataformas flutuantes semi-submersíveis, baseadas na tecnologia *WindFloat*, desenvolvida pela *Principle Power* (Figura 2.20).

A Figura 2.21 ilustra a escala das turbinas eólicas *offshore*, comparando a sua altura total com referências de reconhecida dimensão, como a Torre dos Clérigos no Porto, e o Santuário de Santa Luzia em Viana do Castelo.

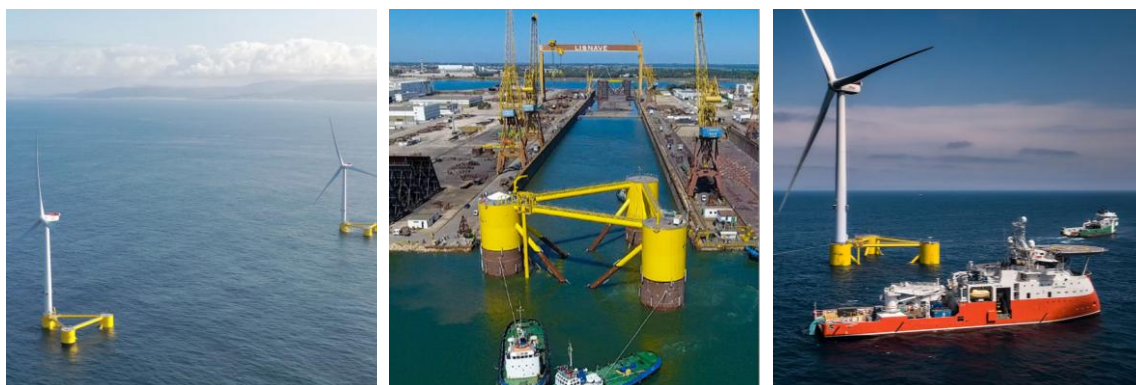


Figura 2.20 – *WindFloat*

Fonte: OW OFFSHORE S.L. (2021)

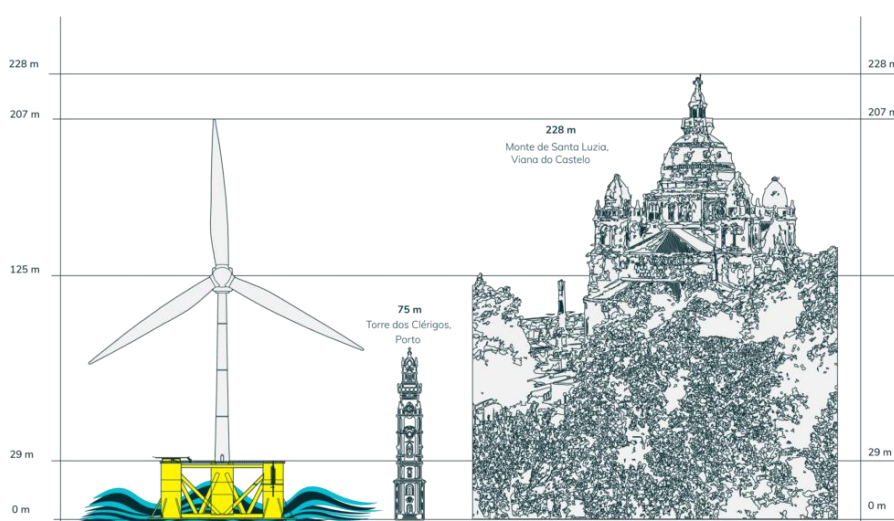


Figura 2.21 – Comparação do *WindFloat*

Fonte: OW OFFSHORE S.L. (2021)

A estabilidade da estrutura é reforçada por um sistema de portões com água na base das três colunas, associada a um sistema de lastro estático e dinâmico. Este sistema de lastro ativo movimentada a água entre as colunas, para compensar as pressões causadas pelo impulso do vento na turbina eólica. Este lastro móvel compensa diferenças significativas na velocidade do vento e na sua direção. A sua função é manter a torre da turbina eólica vertical para otimizar o seu desempenho.

### 2.11.2. Culatra

A Ilha da Culatra, localizada na Ria Formosa, no Algarve, constitui um projeto-piloto de transição energética sustentável e um exemplo pioneiro de comunidade energética renovável em Portugal (Figura 2.22). A iniciativa Culatra 2030 é coordenada pelo

Center for Marine and Environmental Research (CIMA), é apoiada pela *Clean Energy for EU Islands* da comissão europeia e tem como objetivo promover a autossuficiência energética e a redução das emissões de carbono, transformando a ilha num laboratório vivo de inovação energética e social (CIMA, 2020; De Clercq et al., 2019; Gusmaroli, 2023).



Figura 2.22 – Projeto Culatra 2030

Fonte: CIMA (2020)

O projeto, desenvolvido em parceria com a Universidade do Algarve, a Associação de Moradores da Ilha da Culatra e várias entidades públicas (Figura 2.23 ), baseia-se na instalação de sistemas fotovoltaicos descentralizados, armazenamento de energia em baterias e gestão inteligente de consumos. Estas soluções permitem que as habitações, equipamentos públicos e infraestruturas funcionem com elevada eficiência energética, reduzindo significativamente a dependência da rede elétrica continental.

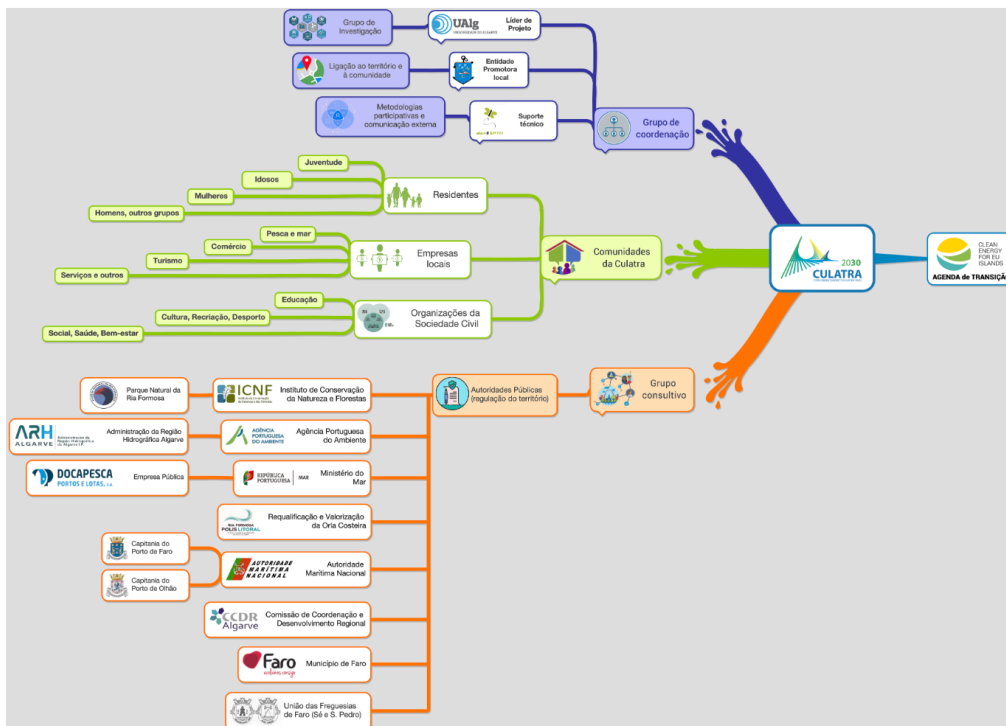


Figura 2.23 – Mapa organizacional Culatra 2030

Fonte: De Clercq et al. (2019)

A Culatra 2030, Comunidade Energética Sustentável, representa uma abordagem integrada que alia transição energética, inclusão social e valorização ambiental. Para além da produção e consumo local de energia limpa, o projeto promove a gestão eficiente da água, a redução de resíduos e a mobilidade elétrica, envolvendo ativamente os habitantes na definição das estratégias de sustentabilidade.

### 3. METODOLOGIA

Este capítulo descreve os materiais e os procedimentos metodológicos adotados para o desenvolvimento do trabalho. Adicionalmente, são apresentados os principais contributos bem como discutidas algumas limitações que podem influenciar a interpretação dos resultados obtidos.

#### 3.1. Fonte de dados

Para a componente prática deste trabalho foi selecionado como estudo de caso a exploração dos dados disponibilizados pelo portal *Open Data* da E-Redes, entidade responsável pela operação das redes de distribuição de energia elétrica em Portugal. A empresa tem desempenhado um papel central na integração de fontes de energia renovável, na digitalização das infraestruturas e na constante atualização das políticas de manutenção implementadas (Agostinho et al., 2025b, 2025a). O portal, do qual se apresenta uma visão geral na Figura 3.1, constitui uma fonte aberta e estruturada de informação sobre o funcionamento e a qualidade de serviço da rede, permitindo a análise de indicadores relevantes para a manutenção de infraestruturas elétricas.

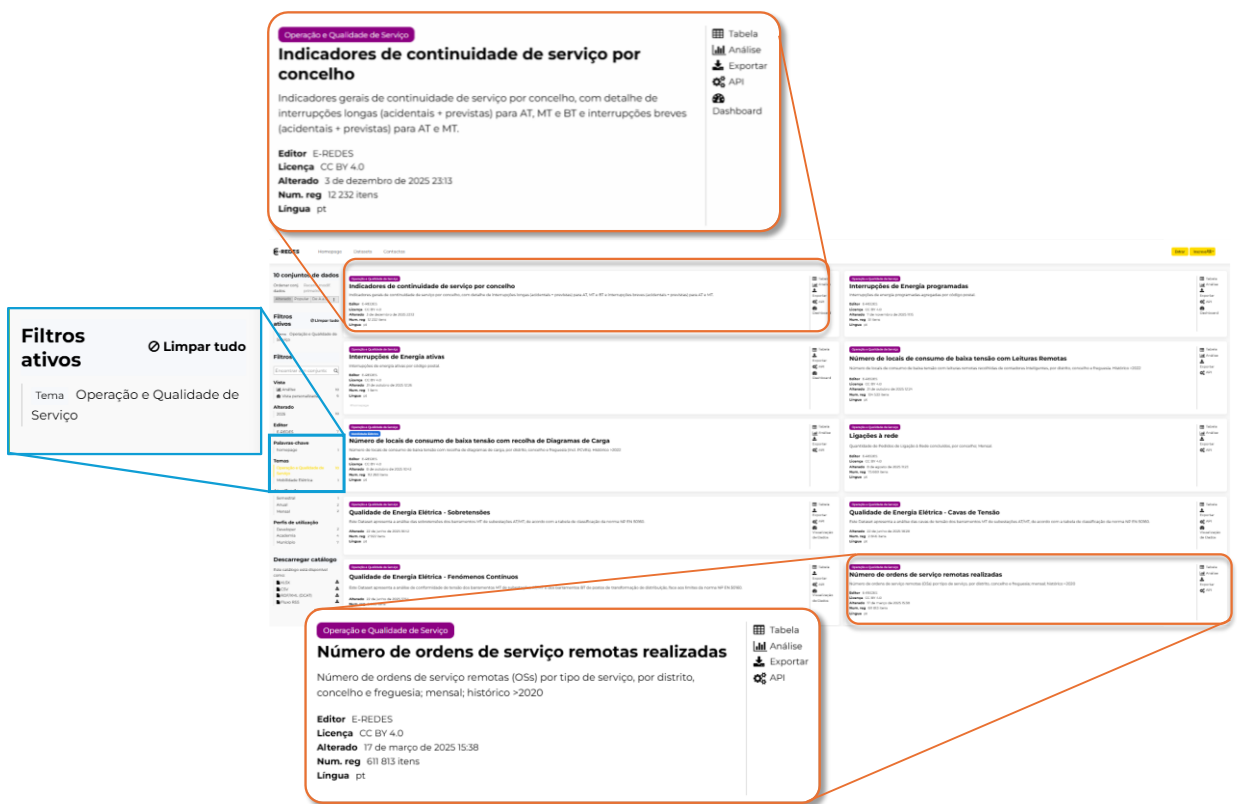


Figura 3.1 – Portal *Open Data*: detalhes da interface

Adaptado de: E-Redes (2020)

Os dados encontram-se organizados em 35 conjuntos de dados divididos em cinco temas: Consumos e Energia, Operação e Qualidade da Rede de Serviço, Rede Elétrica, Energias Renováveis e Mobilidade Elétrica. A informação disponibilizada é apresentada de forma agregada, não sendo fornecidos registos detalhados das intervenções de manutenção ou dos ativos.

O objetivo central da análise proposta neste trabalho é avaliar a resiliência da rede de distribuição a partir de dados reais, procurando estabelecer relações entre interrupções de energia, práticas de manutenção, digitalização das infraestruturas e os desafios decorrentes da crescente integração de energias renováveis. Para tal, foram selecionados *datasets* pertencentes ao tema Operação e Qualidade de Serviço, nomeadamente:

- Número de ordens remotas realizadas. Estes dados apresentam informações sobre operações efetuadas à distância por tipo de serviço e nível geográfico (distrito, concelho e freguesia). Estas operações incluem reduções temporárias, reposição de fornecimento, alteração contratual, interrupções e manutenções. A seleção deste indicador justifica-se pelo facto de o número de ordens refletir o nível de automação e digitalização da rede;
- Indicadores de continuidade de serviço. Estes dados, que medem a frequência e a duração média das falhas sentidas pelos consumidores, são apresentados por período temporal e por região geográfica. Estes indicadores constituem uma medida fundamental da qualidade do serviço prestado e permitem avaliar o desempenho e a fiabilidade da rede do ponto de vista do utilizador.

A análise é desenvolvida em três dimensões principais:

- 1<sup>a</sup> A evolução temporal, onde se observam séries anuais ou mensais de interrupções, com o intuito de identificar tendências, padrões sazonais ou efeitos de eventos climáticos.
- 2<sup>a</sup> Avaliação da eficiência operacional, analisando a relação entre ordens remotas e ordens locais, indicador direto da digitalização da rede, e o impacto desse processo na redução dos tempos médios de restabelecimento de energia.
- 3<sup>a</sup> Estudo da qualidade de serviço através de indicadores normalizados de continuidade, comparando-os com as metas regulatórias definidas pela ERSE e com padrões internacionais de qualidade.

A Tabela 3.1 apresenta os padrões gerais estabelecidos para indicadores de continuidade de serviço para Portugal continental, em função da Zona de Qualidade de Serviço (ZQS), conforme o disposto no Regulamento de Qualidade de Serviço (RQS), Regulamento 826/2023 (ERSE, 2023b).

Tabela 3.1 – Padrões gerais anuais para as redes de distribuição MT/BT

Nível Tensão	Indicador	Zona Qualidade Serviço	Padrão
MT	SAIDI MT (horas)	A	2
		B	3
		C	4
	SAIFI MT (interrupção)	A	2
		B	3
		C	4
BT	SAIDI BT (horas)	A	2
		B	3
		C	5
	SAIFI BT (interrupção)	A	2
		B	3
		C	4

Fonte: (ERSE, 2023b)

As zonas de qualidade de serviço citadas na Tabela 3.1 estão de acordo com a versão mais recente do RQS (Regulamento n.º 826/2023):

- Zona A: capitais de distrito e lugares com mais de 25 000 clientes;
- Zona B: lugares com um número de clientes compreendido entre 2 500 e 25 000;
- Zona C: restantes locais não incluídos na Zona A ou Zona B.

### 3.2. Procedimentos de recolha e tratamento dos dados

Os dados foram descarregados diretamente do portal *Open Data* da E-Redes em formato digital estruturado (csv<sup>8</sup>), para o período compreendido entre 2014 e 2024. O tratamento dos dados foi realizado em duas etapas. Numa fase inicial, recorreu-se a folhas de cálculo *Microsoft Excel* para uma análise preliminar, que incluiu a verificação da integridade dos dados, a eliminação de registos incompletos ou duplicados e a organização dos valores por período temporal para o concelho de Castelo Branco.

<sup>8</sup> *Comma-Separated Values*

Foi ainda considerada e testada a utilização da linguagem de programação *Python* com execução em *Visual Studio Code* para o processamento e análise dos dados. No entanto, devido a dificuldades relacionadas com a estrutura dos ficheiros e a agregação dos dados, esta abordagem não produziu os resultados esperados, tendo-se optado por prosseguir todo o tratamento dos dados no *Excel*.

A partir dos dados extraídos do Portal *Open Data* da E-Redes (o Anexo 2 apresenta um excerto exemplificativo dos dados disponibilizados), para cada indicador de continuidade de serviço, foi calculado o seu respetivo anual por zona QS, isto para todas regiões de Portugal continental, e de forma mais detalhada para o concelho de Castelo Branco<sup>9</sup>, como se ilustra nas tabelas (Tabela 3.2 e Tabela 3.3). Adicionalmente, foi considerada a média anual dos indicadores para Portugal continental (Tabela 3.4), a qual foi utilizada como referência comparativa face aos valores anuais do concelho de Castelo Branco, permitindo contextualizar o seu desempenho relativo no panorama nacional.

Com base nos dados que resultaram do tratamento inicial, foram elaborados gráficos, permitindo identificar tendências ao longo dos anos, variações e eventuais picos associados a períodos de maior instabilidade da rede. Os resultados da análise serão apresentados no próximo capítulo.

Tabela 3.2 – Indicadores de continuidade de serviço: Total anual calculado para Portugal continental, por zona de QS

ANO	ZQS	SAIFI	SIADI	MAIFI	TIEPI	SAIFI	SAIDI	MAIFI	SAIFI	SAIDI
		AT	AT	AT	MT	MT	MT	MT	BT	BT
		num	min	num	min	num	min	num	num	min
2014	zona a	1.00	6.00	4.00	780.07	26.28	895.05	110.21	26.75	1022.02
2014	zona b	4.00	478.03	18.08	7431.68	214.90	8692.73	1438.57	203.76	8130.62
2014	zona c	34.68	3295.69	156.48	26761.62	621.07	30491.26	5240.48	635.38	32047.51
2014	Concelho	36.85	3714.81	162.27	23648.33	591.94	28377.27	110.21	26.75	1022.02
2015	zona a	1.00	137.72	1.00	1081.20	25.43	1469.06	80.34	28.27	1284.69
2015	zona b	2.00	124.83	9.92	7492.44	205.52	8663.32	1159.97	205.76	8413.51
2015	zona c	25.42	2202.75	115.18	22783.66	576.66	26576.15	4125.16	608.95	27866.22
2015	Concelho	25.42	2193.35	118.88	20635.54	550.95	24998.46	80.34	28.27	1284.69
2016	zona a	1.00	103.88	6.00	942.82	32.58	1073.87	91.15	31.75	1112.82
2016	zona b	3.33	192.48	20.00	6964.31	204.76	8148.49	1167.81	207.43	8620.23
2016	zona c	23.37	8898.50	161.37	21584.50	595.56	25233.89	4219.17	610.90	26149.63
2016	Concelho	25.69	8899.67	168.76	20030.48	567.38	24201.05	91.15	31.75	1112.82
2017	zona a	0.00	0.00	0.00	763.33	25.97	883.93	66.35	26.90	954.79

<sup>9</sup> No capítulo seguinte é explicada a razão da escolha deste concelho.

Tabela 3.2 – Indicadores de continuidade de serviço: Total anual calculado para Portugal continental, por zona de QS (cont.)

<b>ANO</b>	<b>ZQS</b>	<b>SAIFI AT num</b>	<b>SIADI AT min</b>	<b>MAIFI AT num</b>	<b>TIEPI MT min</b>	<b>SAIFI MT num</b>	<b>SAIDI MT min</b>	<b>MAIFI MT num</b>	<b>SAIFI BT num</b>	<b>SAIDI BT min</b>
<b>2017</b>	zona b	4.00	51.05	8.50	6529.15	200.49	7658.94	1032.20	214.64	7827.56
<b>2017</b>	zona c	15.38	3622.34	98.95	23554.57	558.58	27205.42	3760.45	575.53	28400.89
<b>2017</b>	Concelho	16.86	3597.50	101.83	21532.03	537.92	25707.77	66.35	26.90	954.79
<b>2018</b>	zona a	0.50	166.73	3.00	853.97	23.26	1012.60	90.42	23.34	1034.31
<b>2018</b>	zona b	7.70	739.44	19.67	7018.70	202.30	8134.71	1241.07	194.79	8182.24
<b>2018</b>	zona c	18.84	3620.26	163.98	28749.11	644.97	33842.01	4688.32	662.25	35708.04
<b>2018</b>	Concelho	24.73	4004.35	175.16	26173.45	613.01	31854.06	90.42	23.34	1034.31
<b>2019</b>	zona a	1.00	351.77	4.50	843.24	23.73	968.36	74.26	24.11	1065.45
<b>2019</b>	zona b	4.17	677.43	12.27	6029.79	191.07	6954.02	961.90	192.51	7643.76
<b>2019</b>	zona c	19.22	1278.94	134.84	22846.22	641.84	26199.42	3750.18	668.37	28629.11
<b>2019</b>	Concelho	21.18	1892.10	137.10	20919.47	613.07	25019.47	74.26	24.11	1065.45
<b>2020</b>	zona a	1.00	148.58	2.00	1159.44	31.94	1228.33	86.51	33.95	1530.28
<b>2020</b>	zona b	4.00	414.12	9.50	6309.89	179.13	6549.42	741.16	194.06	8199.55
<b>2020</b>	zona c	4.81	62.71	32.64	22599.17	614.23	25567.21	3737.43	670.34	29421.06
<b>2020</b>	Concelho	7.14	437.99	35.93	20698.64	587.09	24137.94	86.51	33.95	1530.28
<b>2021</b>	zona a	0.50	3.01	0.50	1748.77	40.29	1843.71	138.90	45.75	2587.89
<b>2021</b>	zona b	3.50	72.24	13.33	7205.99	212.58	7667.49	806.01	237.97	9957.93
<b>2021</b>	zona c	7.08	749.51	31.33	19281.17	568.21	21750.98	3525.08	615.98	26823.82
<b>2021</b>	Concelho	9.31	745.14	34.40	18383.55	549.54	21102.47	138.90	45.75	2587.89
<b>2022</b>	zona a	0.00	0.00	2.00	1869.91	50.61	1942.28	143.12	56.17	3063.90
<b>2022</b>	zona b	1.93	96.44	6.70	6735.71	216.09	7243.00	765.29	243.89	9215.87
<b>2022</b>	zona c	8.63	487.62	26.92	21282.44	610.36	23602.93	3253.84	663.76	27841.53
<b>2022</b>	Concelho	9.43	425.84	26.78	19791.36	584.05	22607.22	143.12	56.17	3063.90
<b>2023</b>	zona a	0.00	0.00	0.00	1268.68	32.88	1383.20	74.03	69.02	8987.44
<b>2023</b>	zona b	1.33	58.43	12.23	6303.49	179.92	6552.51	767.43	222.00	9193.99
<b>2023</b>	zona c	15.26	219.51	37.77	19473.43	564.30	21361.24	3409.03	659.67	28413.31
<b>2023</b>	Concelho	14.88	228.19	43.84	17968.97	546.14	20376.82	74.03	69.02	8987.44
<b>2024</b>	zona a	0.00	0.00	2.00	1478.90	32.48	1529.73	80.63	41.73	2654.88
<b>2024</b>	zona b	1.20	8.34	7.50	7357.88	159.28	7617.98	740.11	167.21	8682.33
<b>2024</b>	zona c	10.72	979.96	31.31	17902.59	477.48	19998.27	3261.49	513.98	22799.52
<b>2024</b>	Concelho	10.92	948.30	32.90	17309.79	458.18	19344.51	80.63	41.73	2654.88

Tabela 3.3 – Indicadores de continuidade de serviço: Total anual calculado para o concelho de Castelo Branco, por zona de QS

Ano	Zona QS	SAIFI	SAIDI	MAIFI	TIEPI	SAIFI	SAIDI	MAIFI	SAIFI	SAIDI
		AT num	AT min	AT num	MT min	MT num	MT min	MT num	MT num	BT num
2014	zona a	0.00	0.00	0.00	40.55	1.03	51.16	6.83	1.08	70.40
2014	zona b	0.00	0.00	0.00	52.74	2.21	82.19	22.71	1.83	58.19
2014	zona c	0.00	0.00	0.00	99.95	3.09	97.00	28.08	3.22	89.56
2014	Concelho	0.00	0.00	0.00	54.19	2.16	76.72	6.83	1.08	70.40
2015	zona a	0.00	0.00	0.00	35.42	0.70	34.33	5.20	1.14	57.63
2015	zona b	0.00	0.00	0.00	17.39	0.17	12.57	11.86	0.59	58.34
2015	zona c	0.00	0.00	0.00	26.70	1.04	37.43	17.26	1.10	40.77
2015	Concelho	0.00	0.00	0.00	31.96	0.82	34.02	5.20	1.14	57.63
2016	zona a	0.00	0.00	0.00	49.32	1.66	56.64	8.88	1.26	65.92
2016	zona b	0.00	0.00	0.00	55.35	3.90	82.52	22.72	2.59	62.54
2016	zona c	0.00	0.00	0.00	92.51	3.89	93.74	22.37	4.16	111.30
2016	Concelho	0.00	0.00	0.00	59.02	2.96	77.26	8.88	1.26	65.92
2017	zona a	0.00	0.00	0.00	114.41	3.40	122.10	5.02	3.92	116.77
2017	zona b	0.00	0.00	0.00	8.89	0.45	13.71	10.45	0.11	3.29
2017	zona c	0.00	0.00	0.00	64.62	2.45	68.70	13.52	2.31	64.60
2017	Concelho	0.00	0.00	0.00	95.13	2.68	86.44	5.02	3.92	116.77
2018	zona a	0.00	0.00	0.00	24.18	0.62	30.44	4.34	0.53	20.46
2018	zona b	0.00	0.00	0.00	8.57	0.61	28.02	14.82	0.12	7.31
2018	zona c	0.00	0.00	0.00	56.29	1.24	59.91	17.89	1.17	68.30
2018	Concelho	0.00	0.00	0.00	29.76	0.93	44.88	4.34	0.53	20.46
2019	zona a	0.00	0.00	0.00	47.65	2.06	54.12	5.51	2.72	71.78
2019	zona b	0.00	0.00	0.00	8.72	0.63	32.58	9.63	0.24	18.81
2019	zona c	0.00	0.00	0.00	79.31	2.34	86.65	13.22	2.37	90.41
2019	Concelho	0.00	0.00	0.00	51.26	2.09	68.66	5.51	2.72	71.78
2020	zona a	0.00	0.00	0.00	34.05	1.04	30.67	4.38	1.18	45.40
2020	zona b	0.00	0.00	0.00	24.70	1.67	24.49	2.00	2.42	68.92
2020	zona c	0.00	0.00	0.00	169.08	3.46	186.14	17.10	4.25	229.64
2020	Concelho	0.00	0.00	0.00	76.67	2.64	132.23	4.38	1.18	45.40
2021	zona a	0.00	0.00	0.00	5.81	0.19	7.10	1.54	0.12	10.39
2021	zona b	0.00	0.00	0.00	97.76	1.00	76.07	2.71	1.28	110.65
2021	zona c	0.00	0.00	0.00	83.04	2.33	111.10	16.05	2.69	145.42
2021	Concelho	0.00	0.00	0.00	35.90	1.62	77.23	1.54	0.12	10.39
2022	zona a	0.00	0.00	0.00	27.64	0.65	28.51	3.12	0.84	45.39

Tabela 3.3 – Indicadores de continuidade de serviço: Total anual calculado para o concelho de Castelo Branco, por zona de QS (cont.)

ANO	ZQS	SAIFI	SIADI	MAIFI	TIEPI	SAIFI	SAIDI	MAIFI	SAIFI	SAIDI
		AT num	AT min	AT num	MT min	MT num	MT min	MT num	BT num	BT min
2022	zona b	0.00	0.00	0.00	161.22	1.14	121.44	2.86	1.34	149.97
2022	zona c	0.00	0.00	0.00	55.91	1.41	67.95	12.72	1.37	76.15
2022	Concelho	0.00	0.00	0.00	44.19	1.16	56.99	3.12	0.84	45.39
2023	zona a	0.00	0.00	0.00	21.10	0.88	32.23	2.11	1.04	20.41
2023	zona b	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.58	0.05	5.16
2023	zona c	0.00	0.00	0.00	65.93	0.93	69.90	11.54	0.96	72.24
2023	Concelho	0.00	0.00	0.00	34.67	0.88	55.23	2.11	1.04	20.41
2024	zona a	0.00	0.00	0.00	26.30	0.64	34.62	3.31	0.60	19.10
2024	zona b	0.00	0.00	0.00	150.23	1.63	127.81	6.48	2.40	246.28
2024	zona c	0.00	0.00	0.00	72.31	1.13	61.24	13.28	1.20	62.80
2024	Concelho	0.00	0.00	0.00	49.19	1.00	55.58	3.31	0.60	19.10

Tabela 3.4 – Indicadores de continuidade de serviço: Média anual para Portugal continental

Ano	SAIFI	SIADI	MAIFI	TIEPI	SAIFI	SAIDI	MAIFI	SAIFI	SAIDI
	AT num	AT min	AT num	MT min	MT num	MT min	MT num	BT num	BT min
2014	0.07	6.74	0.31	52.72	1.31	61.56	10.48	1.30	62.57
2015	0.05	4.19	0.22	46.76	1.22	55.49	8.26	1.26	56.16
2016	0.05	16.27	0.32	44.53	1.26	52.75	8.44	1.28	54.21
2017	0.03	6.54	0.19	47.10	1.19	55.27	7.50	1.22	56.54
2018	0.05	7.67	0.33	56.47	1.33	67.31	9.35	1.34	69.35
2019	0.04	3.78	0.26	45.54	1.32	53.18	7.42	1.35	57.17
2020	0.02	0.96	0.07	45.65	1.27	51.69	7.22	1.36	59.21
2021	0.02	1.41	0.07	41.92	1.23	47.09	6.97	1.33	57.93
2022	0.02	0.91	0.06	44.68	1.31	49.82	6.46	1.43	59.58
2023	0.03	0.46	0.08	40.48	1.19	44.67	6.66	1.41	65.50
2024	0.02	1.74	0.07	39.61	1.01	43.61	6.38	1.08	49.91

### 3.3. Limitações metodológicas

A metodologia adotada apresenta limitações que resultam do desafio de se utilizar exclusivamente dados do Portal *Open Data* da E-Redes, designadamente devido a:

- Utilização de dados agregados públicos, sem acesso a registos de intervenções de manutenção;
- Impossibilidade de controlo direto sobre as variáveis;
- Ausência de dados para certos períodos e/ou regiões.

De salientar que as limitações referidas condicionam naturalmente a discussão sobre as políticas de manutenção em infraestruturas elétricas. Porém, entende-se a não disponibilização pública dos dados operacionais necessários para o aprofundamento do projeto e ao cálculo detalhado dos indicadores de continuidade de serviço. O facto do Portal *Open Data* não disponibilizar mais informações constitui, simultaneamente, uma limitação metodológica para a realização do estudo e uma medida de mitigação de riscos em termos de cibersegurança para o sistema elétrico. A divulgação de informação operacional sensível, nomeadamente dados ao nível dos ativos, registos de eventos, tempos de atuação e estados funcionais da rede, poderia aumentar significativamente a superfície de ataque das infraestruturas elétricas, facilitando a identificação de ativos críticos, padrões de falha e vulnerabilidades operacionais suscetíveis de exploração maliciosa.

## 4. RESULTADOS E ANÁLISE

O presente capítulo apresenta e analisa os resultados obtidos através da metodologia implementada.

### 4.1. Caracterização do estudo

O estudo centra-se na região de Nomenclatura de Unidade Territorial, NUT III da Beira Baixa, incidindo especificamente sobre o concelho de Castelo Branco (Figura 4.1). Uma vista geral do comportamento dos indicadores de continuidade de serviço na região NUT III para os anos de 2023 e 2024 pode ser consultada no Anexo 3. A escolha do concelho de Castelo Branco deveu-se ao facto deste ser um território com condições particularmente favoráveis ao desenvolvimento de soluções energéticas sustentáveis, resultado da interação entre os seus recursos naturais, perfil socioeconómico e estrutura infraestrutural. Situada na região Centro de Portugal, apresenta um clima mediterrânico continental marcado por elevada radiação solar, ventos moderados e extensas áreas florestais, fatores que sustentam um elevado potencial para a integração de fontes de energia renovável, especialmente solar fotovoltaica e biomassa florestal.



Figura 4.1 – Mapa do distrito de Castelo Branco

Fonte: ANMP (2020)

A Tabela 4.1 apresenta informação técnica relativa às subestações elétricas do distrito de Castelo Branco. A tabela descreve estas subestações evidenciando características como sua localização, níveis de transformação e potência instalada e as zonas de

qualidade de serviço. O concelho de Castelo Branco possui uma população de 52 272 habitantes e é alimentado pelas subestações de Alcains e Talagueira (ANMP, 2020; *Distrito de Castelo Branco*, 2024).

Tabela 4.1 – Principais características da rede do distrito de Castelo Branco

Descrição das subestações	Relação de transformação AT/MT [KV]	Potência instalada 2024 [MVA]	Ponta 2024 [MW]	Potência de curto-circuito 2024				Corrente de curto-circuito para efeitos de dimensionamento do equipamento		Classificação de Zonas de qualidade de serviço		
				máxima		mínima		AT [kA]	MT [kA]	A	B	C
				AT [MVA]	MT [MVA]	AT [MVA]	MT [MVA]					
Alcains	60/30	31,5	8,9	500	231	479	182	25	8	X	X	X
Alcains	15			500	191	479	113	25	12,5	X	X	X
Belmonte	60/15	20	8,3	698	199	235	88	25	12,5			X
Fundão	60/15	40	20,9	1176	345	758	187	25	16		X	X
Meimoa	60/15	10	5,6	242	89	144	71	25	12,5			X
Oleiros (M)	60/15	31,5	5,3	282	144	279	143	25	12,5			X
Senhora da Graça	60/30	20	8,7	245	118	130	83	25	8			X
Sertã	60/15	32,5	13,5	228	151	144	82	25	12,5			X
Talagueira	60/30	63	36,3	1226	389	229	163	25	8	X		X
Tortosendo	60/15	40	23	1597	354	740	171	25	16		X	X
Vale serrão	60/30	6,5	4,4	372	60	342	59	25	8			X
Várzea	60/15	31,5	24,1	1457	229	838	205	25	12,5		X	X
Vila Velha de Rodão	60/30	20,00	2,8	498	154	274	125	25,0	8,0			X

Adaptado de: E-REDES (2025)

A região selecionada apresenta características que justificam a sua análise detalhada: extensão territorial, envelhecimento das infraestruturas, menor redundância da rede e elevada exposição a riscos ambientais, como incêndios florestais.

## 4.2. Análise de indicadores de continuidade de serviço

Como forma de sustentar a análise realizada ao longo deste capítulo, incluem-se indicadores de continuidade de serviço para o período compreendido entre 2020 e 2024.

Foram calculados valores médios nacionais, para identificar anos em que o desempenho da região de Castelo Branco diverge de forma significativa da média nacional. Esta análise possibilitou a identificação de assimetrias regionais e a discussão do impacto de fatores estruturais, como a dispersão geográfica da rede, o envelhecimento das infraestruturas e a exposição a fenómenos climáticos extremos.

A interpretação dos gráficos apresentados na análise de dados exige a consideração simultânea do comportamento observado para os indicadores SAIDI, SAIFI, MAIFI e TIEPI, bem como a evolução das ordens remotas. Em conjunto, estes

elementos refletem a interação entre o desempenho operacional da rede e o nível em que ocorrem as falhas, especialmente quando se distinguem as redes de Baixa Tensão (BT) e Média Tensão (MT).

Na Figura 4.2, o TIEPI e SAIDI para a rede de média tensão (em minutos), apresentam diferenças relevantes entre as zonas de qualidade de serviço. A zona C geralmente apresenta valores superiores, atingindo nalguns anos valores significativamente mais elevados do que nas zonas A e B. Observa-se que estes dois indicadores apresentam comportamento semelhante ao longo do período em análise com alguns anos em que se verificam valores altos, pode inferir-se à ocorrência de eventos de grande impacto, possivelmente associados a fenómenos climáticos, falhas estruturais ou intervenções de manutenção planeada com interrupção do serviço.

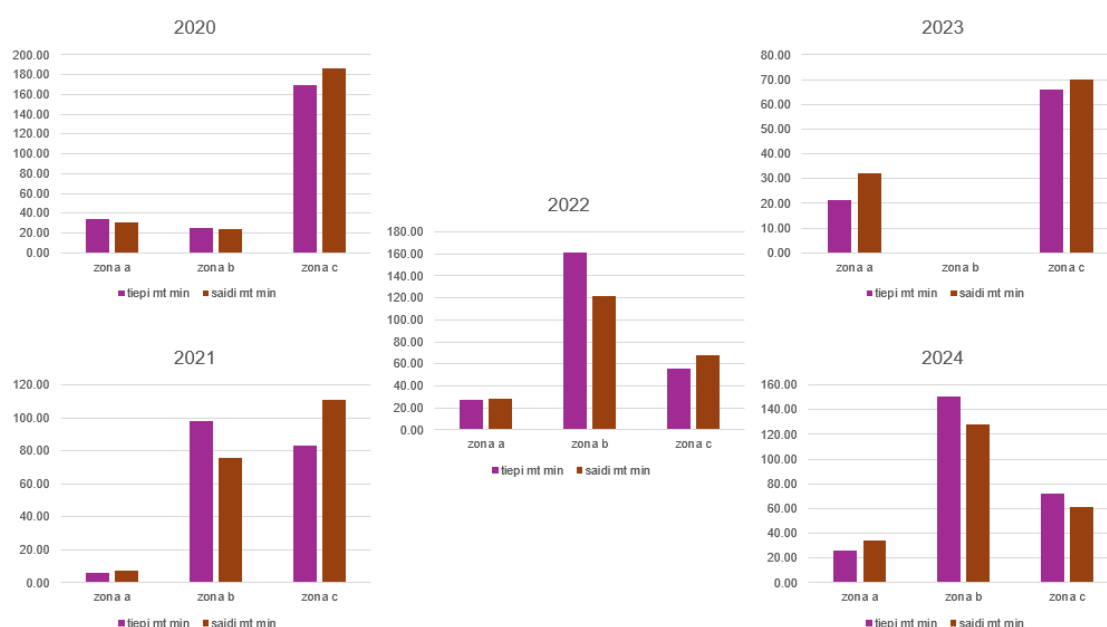


Figura 4.2 – Evolução dos indicadores de continuidade de serviço MT (minutos)

A Figura 4.3 apresenta a evolução dos indicadores, SAIFI e MAIFI para a rede de média tensão em número de ocorrências. O SAIFI refere-se à frequência média de interrupções longas sentidas por consumidor, enquanto o MAIFI representa a frequência de interrupções momentâneas. A comparação entre os dois indicadores permite compreender não apenas a frequência das falhas na rede, mas também a natureza das interrupções, distinguindo entre eventos momentâneos (operações automáticas de proteção e religação da rede), e as interrupções prolongadas (avarias em equipamentos ou eventos climáticos) que afetam diretamente a continuidade do fornecimento de energia. No período analisado e para a zona geográfica selecionada é possível verificar que de modo geral a ocorrência de falhas prolongadas é inferior à ocorrência de falhas breves, constituindo um importante indicador do nível de fiabilidade da rede elétrica.

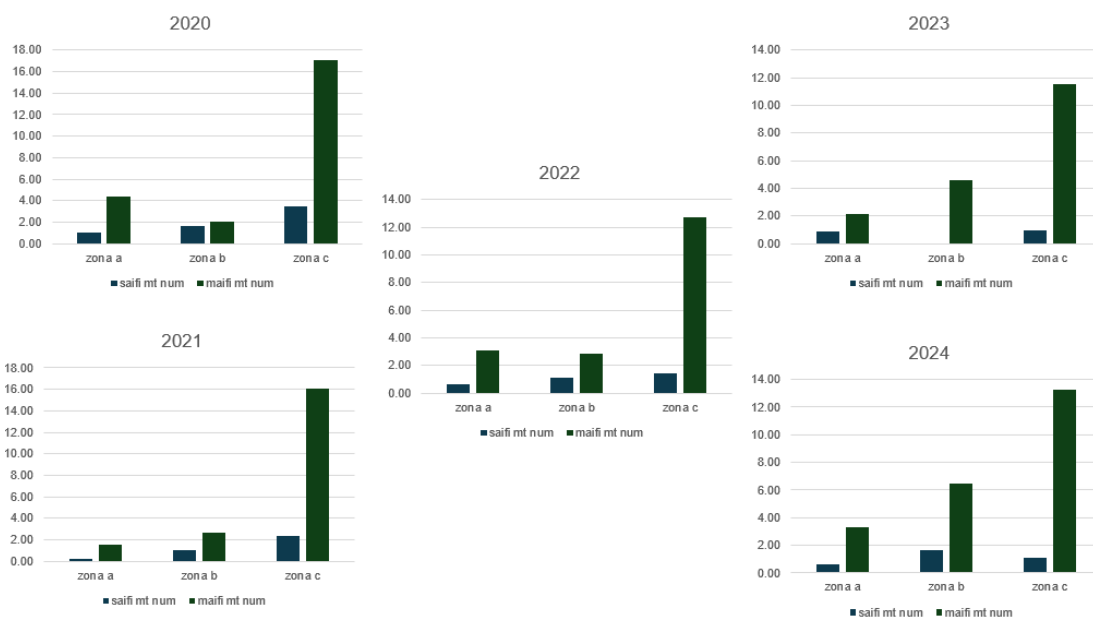


Figura 4.3 – Evolução dos indicadores de continuidade de serviço MT (números)

Por sua vez, a Figura 4.4 apresenta a evolução do indicador SAIDI para a rede de baixa tensão. As oscilações observadas ao longo do período analisado refletem o desempenho da rede em baixa tensão, podendo estar associadas a fatores operacionais, condições ambientais ou intervenções de manutenção.

Os indicadores expressos em minutos, nomeadamente SAIDI e TIEPI, apresentam oscilações concentradas em períodos específicos, coincidindo com a ocorrência de eventos climáticos de maior severidade. Os aumentos pontuais observados refletem interrupções de maior duração e potência afetada, características de falhas em ativos de Média Tensão (MT), cuja influência sobre estes indicadores é particularmente elevada. A recuperação progressiva após os picos, sugere que as infraestruturas, apoiadas por ações de manutenção preventiva e pela modernização de equipamentos, mantêm um desempenho consistente.

De modo geral, a evolução anual destes indicadores indica uma tendência de estabilização e melhoria progressiva da qualidade de serviço, apesar do forte impacto de fatores climáticos nas infraestruturas de distribuição (com maior expressão na tempestade Kirk ocorrida entre 08 e 10 de outubro de 2024), e dos incêndios ocorridos entre os dias 16 e 20 de setembro de 2024 (E-Redes, 2024).

A Figura 4.5 evidencia um aumento significativo das ordens remotas ao longo do período analisado. Esta evolução está fortemente associada à digitalização e automação da rede de MT e explica a redução gradual observada dos indicadores fora do período crítico. Este crescimento traduz uma maior capacidade de atuação rápida sobre falhas, permitindo isolar defeitos, restabelecer o fornecimento de forma seletiva e reduzir a necessidade de deslocação imediata de técnicos ao terreno.

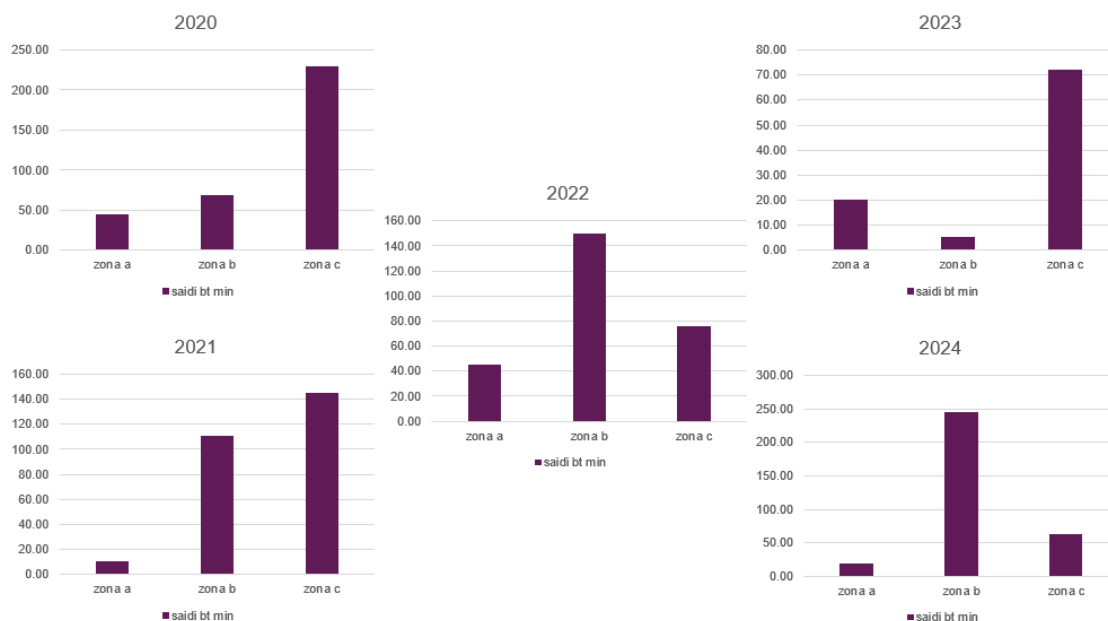


Figura 4.4 – Evolução dos indicadores de continuidade de serviço BT (minutos)

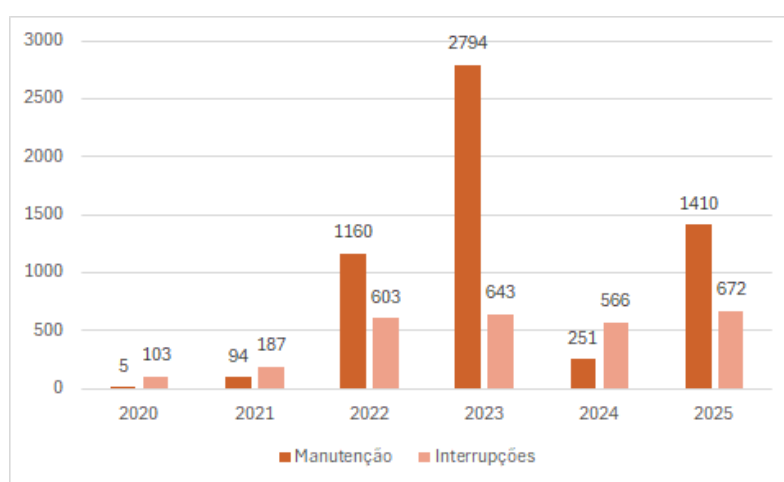


Figura 4.5 – Evolução anual de ordens remotas para Castelo Branco

O número de ordens remotas foi utilizado como indicador indireto do nível de digitalização da rede de distribuição. As ordens remotas correspondem a intervenções executadas à distância sobre equipamentos da rede, como disjuntores, permitindo o isolamento de falhas e o restabelecimento do fornecimento sem necessidade de deslocação imediata de equipas técnicas ao local.

A análise centrou-se na evolução temporal das ordens remotas e na sua relação com os indicadores de continuidade de serviço, procurando verificar se o aumento da automação está associado à redução da duração média das interrupções.

As ordens remotas permitem isolar rapidamente os trechos afetados, encurtar tempos de interrupção e repor fornecimento a segmentos saudáveis da rede, o que se reflete na melhoria contínua dos indicadores ao longo do tempo. Este comportamento demonstra a robustez das infraestruturas elétricas e a eficácia das estratégias de manutenção adotadas, particularmente as de natureza preventiva e preditiva.

A comparação entre os valores médios anuais calculados para Castelo Branco e para Portugal continental revela diferenças no desempenho dos indicadores de continuidade de serviço (Figura 4.6 e Figura 4.7). Os valores SAIDI e TIEPI são, de forma consistente, superiores na região, refletindo interrupções de maior duração e impacto. No indicador SAIFI, as discrepâncias são menos significativas, o diferencial encontra-se na duração e criticidade das falhas, e não no número de ocorrências.



Figura 4.6 – Média anual dos indicadores de continuidade de serviço entre 2014 e 2024 (minutos): a) concelho de Castelo Branco; b) Portugal continental

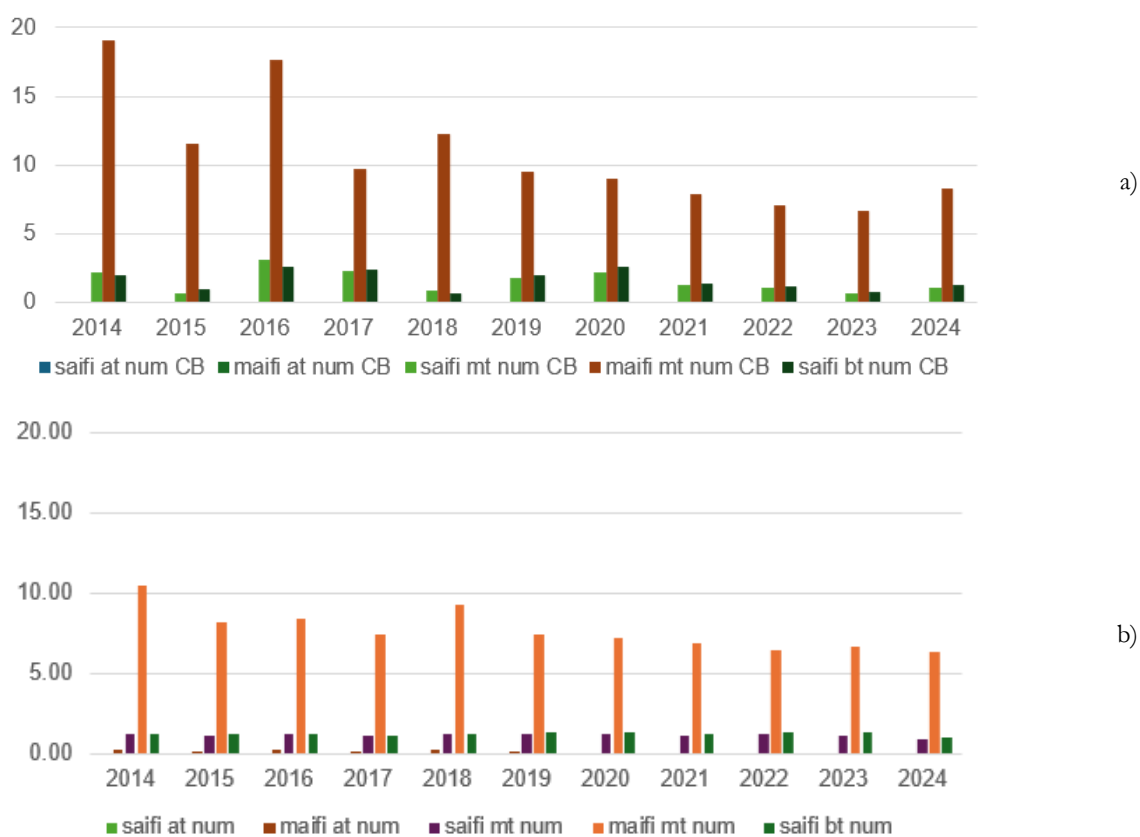


Figura 4.7 – Média anual dos indicadores de continuidade de serviço entre 2014 e 2024 (número): a) concelho de Castelo Branco; b) Portugal continental

Os desvios entre Castelo Branco e a média nacional resultam predominantemente de limitações da rede. A incorporação progressiva de tecnologias digitais demonstra, contudo, potencial para reduzir assimetrias regionais, aproximando o desempenho operacional dos padrões operacionais exigidos pelo RQS e observados a nível nacional.

### 4.3. Contributos e limitações do projeto

Apesar dos resultados obtidos, importa reconhecer algumas limitações associadas ao presente trabalho. Em primeiro lugar, a dependência de dados públicos disponibilizados pela E-Redes, não tendo sido possível o acesso a informação detalhada sobre intervenções individuais de manutenção, nem a consideração de outros fatores que possam influenciar os indicadores de continuidade de serviço. Esta limitação restringe a capacidade de estabelecer relações mais robustas entre práticas de manutenção e o comportamento dos indicadores de continuidade de serviço.

A análise incidiu sobre o concelho de Castelo Branco, o que limita a generalização direta dos resultados ao conjunto do território nacional. A ausência de informação sobre características técnicas dos ativos ou estratégias operacionais da rede, introduz uma certa incerteza na interpretação dos resultados.

Por outro lado, a natureza predominantemente descritiva e comparativa da abordagem metodológica constitui também uma limitação, uma vez que não foram desenvolvidos modelos estatísticos avançados, que permitissem testar hipóteses de forma mais rigorosa ou antecipar comportamentos futuros da rede. Esta opção metodológica, embora adequada ao tipo de dados disponíveis, condiciona o nível de profundidade analítica alcançado.

Não obstante estas limitações, o trabalho desenvolvido apresenta algumas contribuições originais ao se basear em dados exclusivamente de acesso público, num contexto em que a análise da manutenção depende, tipicamente, de dados internos de natureza operacional e com alta granularidade.

Do ponto de vista científico, destaca-se a produção de dois artigos científicos na área da manutenção, apresentados em encontros científicos e incluídos no Anexo 4 e Anexo 5 bem como, a submissão de um terceiro artigo para revista. Ao nível técnico, o estudo permitiu aprofundar a compreensão sobre a gestão da manutenção em infraestruturas elétricas num contexto de crescente digitalização e integração de energias renováveis.

Paralelamente, foram desenvolvidas competências na análise crítica de indicadores de continuidade de serviço, bem como na interpretação de dados reais provenientes de fontes públicas. O trabalho contribuiu ainda para o reforço de competências metodológicas, nomeadamente no domínio da revisão sistemática da literatura e da produção científica estruturada.

Por fim, importa salientar que a aplicação dos conceitos associados à digitalização, automação e monitorização remota em contexto real, permitiu consolidar metodologias de pesquisa científica, revisão sistemática da literatura e escrita técnico-científica, enquanto expôs as limitações inerentes à utilização de dados agregados para suporte à tomada de decisão em sistemas críticos como as redes elétricas.

## 5. CONCLUSÕES E PERSPETIVAS DE TRABALHO FUTURO

O presente trabalho teve como propósito analisar a importância da manutenção de infraestruturas elétricas no contexto da transição energética, com particular foco na integração de fontes de energia renovável, na digitalização das redes e nos desafios associados à cibersegurança. Para esse efeito, foi desenvolvida uma revisão sistemática da literatura, complementada por uma análise empírica de dados reais. Assumiu-se o desafio de usar exclusivamente dados disponibilizados pelo portal *Open Data* da E-Redes.

Relativamente à componente bibliográfica, o processo de revisão foi estruturado tendo em consideração diretrizes reconhecidas, recorrendo à base de dados *Scopus*, definição de palavras-chave e utilização da ferramenta *Bibliometrix R* disponível no *R Studio*. Os dados recolhidos, tratados e analisados, permitiram mapear as conexões entre artigos, autores e temas, e identificar as principais tendências emergentes. Este procedimento revelou-se simples e reproduzível, permitindo identificar tendências e lacunas na literatura.

A caracterização do setor elétrico português confirmou a posição de Portugal como um dos países europeus com maior peso das energias renováveis no *mix* energético. Projetos estruturantes, como o *WindFloat Atlantic* e a comunidade energética da Culatra, constituem exemplos que ilustram a capacidade de inovação e de adaptação das infraestruturas nacionais às exigências da transição energética, tanto ao nível de grandes sistemas como de soluções descentralizadas.

A análise da literatura mostrou de forma consistente a evolução das estratégias de manutenção no sentido da adoção de modelos baseados na condição, na fiabilidade e na análise de risco, fortemente apoiados por tecnologias associadas à Indústria 4.0, nomeadamente a Internet das Coisas, a Inteligência Artificial, os Sistemas Ciberfísicos, os Gémeos Digitais e a Robótica. A aplicação destas tecnologias tem permitido uma monitorização mais contínua dos ativos, a deteção antecipada de anomalias e até a sua predição, e uma tomada de decisão mais sustentada, com impactos evidentes ao nível da redução de custos, do aumento da disponibilidade dos ativos físicos e da melhoria da qualidade de serviço.

Os resultados obtidos, após a análise da literatura, permitem concluir que a manutenção assume, atualmente, um papel claramente estratégico no setor elétrico. A crescente incorporação de fontes de energia renovável, pela sua natureza intermitente e descentralizada, introduz novos níveis de complexidade na operação das redes, tornando progressivamente menos adequado o recurso exclusivo a modelos tradicionais de manutenção corretiva.

No que respeita ao estudo de caso desenvolvido com base nos dados públicos da E-Redes, a análise dos principais indicadores de continuidade de serviço evidenciou que, apesar do aumento da complexidade operacional da rede associada à integração de fontes de energia renovável, os níveis globais de qualidade de serviço permanecem

dentro dos limites regulamentares definidos pela ERSE. Verifica-se, de forma geral, uma tendência de melhoria progressiva ao longo dos últimos anos, refletindo o impacto positivo das estratégias de manutenção preventiva, com ênfase na vertente preditiva, bem como da automação e da digitalização da rede de distribuição.

Importa ainda referir que os fenómenos climáticos extremos, como tempestades e incêndios florestais, continuam a exercer uma influência significativa nos indicadores de continuidade, em particular nas regiões do interior. Ainda assim, a capacidade de deteção remota e a rapidez de intervenção operacional têm permitido mitigar, de forma crescente, os impactos dessas ocorrências nos tempos médios de interrupção.

A análise por regiões NUT III evidenciou diferenças relevantes entre territórios, sendo as zonas caracterizadas por maior dispersão geográfica, menor densidade populacional e infraestruturas mais envelhecidas aquelas que apresentam maior vulnerabilidade a interrupções prolongadas. Estes resultados reforçam a necessidade de uma abordagem diferenciada das políticas de manutenção, ajustada às especificidades regionais.

Em relação às questões de investigação inicialmente apresentadas neste documento, e que orientaram o trabalho desenvolvido, foi possível identificar as políticas de manutenção mais adequadas para redes elétricas em cenários com forte integração de fontes de energia renovável, uma vez que os resultados obtidos evidenciam a importância crescente de estratégias de manutenção preventiva, em especial as baseadas na análise da condição, no contexto das quais os planos de monitorização da rede elétrica se mostram ainda mais relevantes. Estas políticas suportam uma maior capacidade de resposta operacional enquanto contribuem para aumentar a disponibilidade e melhorar a fiabilidade das infraestruturas.

Quanto ao quadro de indicadores mais adequado para a validação das políticas de manutenção, o estudo analisou a aplicação dos principais indicadores de referência regulamentares (SAIDI, SAIFI, MAIFI, TIEFI), confirmando a pertinência da sua utilização para avaliação da continuidade de serviço. Estes indicadores são tecnicamente robustos e referidos de forma recorrente na literatura, porém a sua utilização em cenário de intermitência, característico de fontes de energia renovável ou imprevisibilidade de eventos climáticos extremos, apresenta limitações.

No domínio da cibersegurança, conclui-se que a crescente digitalização das infraestruturas elétricas, embora indispensável para a eficiência e resiliência do sistema, introduz novas vulnerabilidades que não podem ser dissociadas da gestão da manutenção. A proteção dos sistemas de controlo, comunicação e supervisão deve, por isso, ser encarada como parte integrante da estratégia global de manutenção das redes elétricas modernas. Ainda assim, não foi possível validar estas conclusões teóricas com a análise de dados reais uma vez que, neste contexto, não foi possível extrair informação relevante dos *datasets* que serviram de base ao projeto desenvolvido.

As tecnologias de produção de eletricidade, com recurso a fontes de energia renovável, apresentam novos desafios para as políticas de manutenção a adotar, da

mesma forma que a tecnologia dos equipamentos usados para ações de inspeção e recolha de dados em tempo real condiciona a análise de dados possível para suporte das decisões de gestão. Foi ainda possível estabelecer uma relação entre a localização geográfica e a densidade populacional com os valores de referência para os indicadores de continuidade de serviço considerados. Porém não foi possível comprovar analiticamente a relação daquelas com as políticas de manutenção das infraestruturas elétricas daquelas áreas geográficas, o que se apresenta como uma oportunidade de investigação futura.

Em síntese, os resultados obtidos permitem afirmar que a manutenção das infraestruturas elétricas constitui um dos pilares fundamentais da transição energética, contribuindo de forma decisiva para a fiabilidade do sistema, para a sustentabilidade ambiental, para a eficiência económica e para a segurança das infraestruturas críticas.

Como perspetivas de desenvolvimento futuro do trabalho, apontam-se as seguintes linhas de investigação:

- Implementação de modelos de Inteligência Artificial e *Machine Learning* para a previsão de falhas em tempo real;
- Integração de indicadores ambientais, de sustentabilidade e sociais na avaliação do desempenho da manutenção;
- Definição de políticas regionais de manutenção diferenciadas, incorporando variáveis climáticas, topográficas e de risco ambiental;
- Reforço da integração da cibersegurança nos sistemas de gestão da manutenção de infraestruturas críticas;
- Realização de estudos comparativos internacionais sobre estratégias de manutenção em redes com elevada penetração de energias renováveis;
- Aplicação de gémeos digitais na simulação de cenários de falha, apoio à decisão e otimização do investimento em manutenção.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A gestão de referências bibliográficas foi feita com recurso ao Mendeley/Elsevier. Apesar de terem sido registadas informações diversas para as várias fontes consultadas, como por exemplo a data de consulta de páginas *Web* ou cidades e países de algumas publicações, esta informação não aparece visível na lista de referências produzida de forma automática pela plataforma.

- Agostinho, J., Farinha, J. T., Vieira, A., & Raposo, H. (2025a, June 6). Gestão da Manutenção em Redes Elétricas com Penetração de Energias Renováveis: uma revisão sobre desafios e tendências. *5º Congresso Nacional de Manutenção e Gestão de Ativos*. <https://5--congresso-nacional-de-manutencao-e-gestao-de-ativos4.webnode.pt/>
- Agostinho, J., Farinha, J., Vieira, A., & Raposo, H. (2025b). Maintenance Management in Electrical Grids with High Renewable Energy Penetration: a review of challenges and trends. In M. Mendes, J. Farinha, A. Malta, & H. Raposo (Eds.), *Proceedings of PAMDAS 2025 International conference on Physical Asset Management and Data Science* (pp. 354–361). <https://pamdass.rcm2.pt/event/1/attachments/8/134/PAMDAS-2025-proceedings.pdf>
- Alam, M. M., Hossain, M. J., Habib, M. A., Arafat, M. Y., & Hannan, M. A. (2025). Artificial intelligence integrated grid systems: Technologies, potential frameworks, challenges, and research directions. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 211). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115251>
- ANMP. (2020, April 29). *Mapa dos Municípios*. <https://anmp.pt/municipios/municipios/municipios-de-a-a-v/>
- Bengtsson, M., & Lundström, G. (2018). On the importance of combining “the new” with “the old” - One important prerequisite for maintenance in Industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 25, 118–125. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.06.065>
- Boyes, H., Hallaq, B., Cunningham, J., & Watson, T. (2018). The industrial internet of things (IIoT): An analysis framework. *Computers in Industry*, 101, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.04.015>
- Cabral, J. (2021). *Gestão da Manutenção de Equipamentos, Instalações e Edifícios* (L. Lidel -Edições Técnicas, Ed.; 4.ª Edição).
- Cavus, M. (2025). Citation: Cavus, M. *Advancing Power Systems with Renewable Energy and Intelligent Technologies: A Comprehensive Review on Grid Advancing Power Systems with Renewable Energy and Intelligent Technologies: A Comprehensive Review on Grid Transformation and Integration*. <https://doi.org/10.3390/electronics>
- CIMA. (2020). *Culatra 2030*. <https://www.culatra2030.pt/>
- Daniel-Durandt, F., Van Staden, C. Y., Bekker, B., & Rix, A. (2024). Innovative Solutions Addressing South Africa’s Energy Paradox: Integrating

Renewable Energy Resources for Increased Power System Stability and Maintenance Schedule Planning. *Proceedings - 24th IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 8th I and CPS Industrial and Commercial Power Systems Europe, IEEEIC/I and CPS Europe 2024*. <https://doi.org/10.1109/IEEEIC/ICPSEurope61470.2024.10751160>

- De Clercq, S., Proka, A., Jensen, J., & Carrero, M. M. (2019). *ISLANDS TRANSITION HANDBOOK 2 ISLANDS TRANSITION HANDBOOK CLEAN ENERGY FOR EU ISLANDS*.
- DGEG. (2025, August). *Estatística*. Direção Geral de Energia e Geologia. <https://www.dgeg.gov.pt/>
- Distrito de Castelo Branco. (2024, March 27). <https://www.heraldicacivica.pt/dist-castelobranco.html#gsc.tab=0>
- EDP. (2021). *Relatório de Sustentabilidade*. <https://www.edp.com/pt/acao-responsavel/transparencia-relatorios/relatorios>
- EDP. (2023). *Relatório Anual Integrado 2023*. <https://www.edp.pt/quem-somos>
- Emanuela, A., Godinho, A., & Orientador, T. (n.d.). *MESTRADO EM ENGENHARIA E GESTÃO INDUSTRIAL TAGS RFID para apoio à Manutenção Preventiva de Moldes na TRIDEC Portugal*.
- EN 15341. (2019). *Maintenance - Maintenance Key Performance Indicators*.
- E-Redes. (2020). *Portal Open Data da E-REDES*. <https://e-redes.opendatasoft.com/pages/homepage/>
- E-Redes. (2024). *Relatório da Qualidade de Serviço*. [www.e-redes.pt](http://www.e-redes.pt)
- E-Redes. (2025a). *Explore — E-REDES*. <https://e-redes.opendatasoft.com/explore/?exclude.keyword=internal&sort=modified>
- E-REDES. (2025). *Regulamento de Acesso às Redes e às Interligações do Setor Elétrico* (Number Artigo 18).
- E-Redes. (2025b). *Relatório da Qualidade de Serviço 2023 – energia em Rede*. <https://tinyurl.com/3k5nuev7>
- ERSE. (2017). *Manual de Procedimentos da Qualidade de Serviço*.
- ERSE. (2023a). *Manual de Procedimentos da Qualidade de Serviço dos setores elétrico e gás (MPQS)*. [https://www.erse.pt/media/rx0n51ds/regulamento-n-%C2%BA-826\\_2023\\_mpqs\\_capa\\_%C3%ADndice.pdf](https://www.erse.pt/media/rx0n51ds/regulamento-n-%C2%BA-826_2023_mpqs_capa_%C3%ADndice.pdf)
- ERSE. (2023b). Regulamento n. 826/2023. *Diário da República, 2.ª Série PARTE E*, (146), 304–428.

<https://files.diariodarepublica.pt/2s/2023/07/146000000/0030400428.pdf>

- ERSE. (2025). *Plano de Desenvolvimento e Investimento da Rede Nacional de Distribuição 2026 a 2030*. <https://tinyurl.com/22kb428e>
- EUROSTAST. (2023). *Renewable Energy Statistics*. [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Renewable\\_energy\\_statistics](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Renewable_energy_statistics)
- Eze, T. A., & Aroh, C. C.-E. (2020). Management of Information Security in Public Universities in Nigeria. *International Journal for Digital Society*, 11(1), 1575–1578. <https://doi.org/10.20533/ijds.2040.2570.2020.0196>
- Faheem, M., Shah, S. B. H., Butt, R. A., Raza, B., Anwar, M., Ashraf, M. W., Ngadi, M. A., & Gungor, V. C. (2018). Smart grid communication and information technologies in the perspective of Industry 4.0: Opportunities and challenges. *Computer Science Review*, 30, 1–30. <https://doi.org/10.1016/J.COSREV.2018.08.001>
- Farinha, T. (2018). *Asset Maintenance Engineering Methodologies*.
- Fernandes, E. L. (2024). *Inspeções Visuais a Linhas Aéreas de Média Tensão [Dissertação]*. Instituto Politécnico de Tomar.
- Ferreira, L. (2021). *Uma Introdução à Manutenção (2ª Edição)*. Quântica Editora - Conteúdos Especializados. [www.quanticaeditora.pt](http://www.quanticaeditora.pt)
- Gusmaroli, L. (2023). *DOCUMENT INFORMATION Report Number D7.3.6 Title: Feasibility Study Report for Portuguese Replication Site Culatra Case Study Work Package Number WP7 Title: Transferability and replication of HYDROUSA services Format MS Office Word document*.
- Hickie, D., & Hickie, J. (2021). The impact of Industry 4.0 on supply chains and regions: innovation in the aerospace and automotive industries. *European Planning Studies*, 29(9), 1606–1621. <https://doi.org/10.1080/09654313.2021.1963048>
- Ho, Q.-Dung., Gao, Yue., Rajalingham, Gowdemy., & Le-Ngoc, Tho. (2014). *Wireless communications networks for the smart grid*. 108. [https://books.google.com/books/about/Wireless\\_Communications\\_Networks\\_for\\_the.html?hl=pt-PT&id=EWOSBAAAQBAJ](https://books.google.com/books/about/Wireless_Communications_Networks_for_the.html?hl=pt-PT&id=EWOSBAAAQBAJ)
- Honorato, E. (2025). *Cibersegurança em Sistemas Críticos: Protegendo Infraestruturas Críticas na Era Digital* (T. D. Regina, Ed.; Viseu).
- INE. (2024). *Estatísticas do Ambiente 2023*.
- Kalkal, P., & Garg, V. K. (2017). Transition from conventional to modern grids: Modern grid include microgrid and smartgrid. *2017 4th International Conference on Signal Processing, Computing and Control (ISPCC)*, 223–228. <https://doi.org/10.1109/ISPCC.2017.8269679>

- Kardec, A., & Nascif, J. (2001). *Manutenção Função Estratégica* (2ª Edição). Qualitymark.
- Kitchenham, B., Pearl Brereton, O., Budgen, D., Turner, M., Bailey, J., & Linkman, S. (2009). Systematic literature reviews in software engineering - A systematic literature review. In *Information and Software Technology* (Vol. 51, Number 1, pp. 7–15). <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2008.09.009>
- Kitchenham, B., Pretorius, R., Budgen, D., Pearl Brereton, O., Turner, M., Niazi, M., & Linkman, S. (2010). Systematic literature reviews in software engineering – A tertiary study. *Information and Software Technology*, 52(8), 792–805.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.infsof.2010.03.006>
- Kumar, P., Chand, D. S., Gupta, R. K., & Singh, A. B. (2024). Impact of Renewable Energy Integration on Power Quality- Challenges and Solutions. *International Journal of Innovative Research in Engineering and Management*, 11(4), 95–99.  
<https://doi.org/10.55524/ijirem.2024.11.4.12>
- Labelec. (2021). *Inspeção de ativos elétricos e respetivas faixas com recurso a LIDAR*. <https://tinyurl.com/54xx8mzp>
- Lindley, D. (2010). Smart grids: The energy storage problem. *Nature*, 463(7277), 18–20. <https://doi.org/10.1038/463018a>
- Mohamed, N. (2024). Renewable Energy in the Age of AI: Cybersecurity Challenges and Opportunities. *2024 15th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*, 1–6.  
<https://doi.org/10.1109/ICCCNT61001.2024.10724383>
- Monchy, F. (1989). *A Função Manutenção* (J. Karsaklian, Tran.).
- Nikander, J., Manninen, O., & Laajalahti, M. (2020). Requirements for cybersecurity in agricultural communication networks. *Computers and Electronics in Agriculture*, 179, 105776.  
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105776>
- NP EN 13306. (2021). *Manutenção Terminologia de Manutenção*.
- NP EN 15341. (2009). *Manutenção Indicadores de desempenho da manutenção (KPI)*.
- Ourahou, M., Ayir, W., EL Hassouni, B., & Haddi, A. (2020). Review on smart grid control and reliability in presence of renewable energies: Challenges and prospects. *Mathematics and Computers in Simulation*, 167, 19–31.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matcom.2018.11.009>
- OW OFFSHORE S.L. (2021). *Windfloat Atlantic | Offshore wind energy*. <https://www.windfloat-atlantic.com/pt-pt/>
- Parlamento Europeu. (2025). *Política industrial, energética e de investigação*. Fichas Temáticas Sobre a União Europeia.

- Pereira, F. J. D., & Sena, F. V. (2016). *Manutenção De Instalações Técnicas*.  
www.engebook.com
- Santos, A. C. de J., Cavalcante, C. A. V., & Wu, S. (2023). Maintenance policies and models: A bibliometric and literature review of strategies for reuse and remanufacturing. In *Reliability Engineering and System Safety* (Vol. 231). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2022.108983>
- Sezer, E., Romero, D., Guedea, F., Macchi, M., & Emmanouilidis, C. (2018). *An Industry 4.0-enabled Low Cost Predictive Maintenance Approach for SMEs: A Use Case Applied to a CNC Turning Centre*. IEEE.
- Slack, N., Brandon-Jones, A., & Johnston, R. (2018). *Administração da produção* (D. Vieira, Tran.; 8th ed.).
- Straub, A. (2007). Performance-based maintenance partnering: a promising concept. *Journal of Facilities Management*, 5(2), 129–142.  
<https://doi.org/10.1108/14725960710751870>
- Strielkowski, W., Civín, L., Tarkhanova, E., Tvaronavičienė, M., & Petrenko, Y. (2021). Renewable energy in the sustainable development of electrical power sector: A review. In *Energies* (Vol. 14, Number 24). MDPI.  
<https://doi.org/10.3390/en14248240>
- UE Systems. (2022). *Fiabilidade de Equipamentos Eléctricos através da Inspeção por Ultrassons*. 154/155, 48–49.
- Verma, S., Sharma, A., Tran, B., & Alahakoon, D. (2024). A systematic review of digital twins for electric vehicles. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 11(5), 815–834.  
<https://doi.org/10.1016/j.jtte.2024.04.004>
- Wanxingsheng, Z. L. (2014). *analysis of The New Asset Management Standard ISO 55000 AND PAS 55*.
- Xu, L., Feng, K., Lin, N., Perera, A. T. D., Poor, H. V., Xie, L., Ji, C., Sun, X. A., Guo, Q., & O'Malley, M. (2024). Resilience of renewable power systems under climate risks. *Nature Reviews Electrical Engineering*, 1(1), 53–66.  
<https://doi.org/10.1038/s44287-023-00003-8>
- Yaacoub, J. P., Noura, H., Azar, J., Salman, O., & Chahine, K. (2024). Cybersecurity in Smart Renewable Energy Systems. *2024 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC)*, 1534–1540.  
<https://doi.org/10.1109/IWCMC61514.2024.10592561>
- Zeng, S. X., Shi, J. J., & Lou, G. X. (2007). A synergetic model for implementing an integrated management system: an empirical study in China. *Journal of Cleaner Production*, 15(18), 1760–1767.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.03.007>

## **ANEXOS**

Anexo 1 – Dados da DGEG para produção anual renovável.....	61
Anexo 2 – Dados extraídos do <i>Portal Open Data</i> para Castelo Branco .....	62
Anexo 3 – Informação complementar – Portugal continental.....	64
Anexo 4 – Artigo apresentado no Congresso Nacional de Manutenção e Gestão de Ativos (Angola).....	66
Anexo 5 – Artigo apresentado no Physical Asset Management and Data Science Conference (PAMDAS).....	75

## Anexo 1 – Dados da DGEG para produção anual renovável

Quadro 1 - Produção anual (GWh)										
	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	08.2025
<b>Total Renovável<sup>2</sup></b>	33,503	24,309	30,637	28,831	31,655	33,093	29,913	37,181	43,977	43,950
<b>Hídrica</b>	16,916	7,632	13,628	10,243	13,633	13,454	8,841	14,868	18,574	17,964
<i>da qual em bombagem</i>	1,186	1,735	1,235	1,425	1,550	1,547	2,291	2,829	3,893	3,586
> 30 MW	14,909	6,696	11,855	8,700	11,894	11,944	7,654	13,133	16,613	16,022
> 10 MW ≤ 30	780	319	748	602	702	605	451	708	815	801
≤ 10 MW	1,227	617	1,025	940	1,037	905	736	1,027	1,146	1,141
<b>Eólica</b>	12,474	12,248	12,617	13,667	12,299	13,216	13,244	13,145	14,462	14,274
<b>Biomassa<sup>3</sup></b>	2,481	2,573	2,558	2,749	3,206	3,392	3,544	3,250	3,072	2,781
c/ cogeração	1,721	1,775	1,717	1,709	1,753	2,046	2,071	1,896	1,720	1,604
s/ cogeração	760	799	841	1,040	1,453	1,346	1,473	1,354	1,352	1,177
<b>Resíduos Sólidos Urbanos</b>	610	632	573	613	572	613	518	500	635	638
Fração renovável	305	360	327	349	326	346	309	299	379	381
<b>Biogás</b>	285	287	271	264	259	269	261	251	226	207
<b>Geotérmica</b>	172	217	230	215	217	179	195	208	204	195
<b>Fotovoltaica</b>	871	993	1,006	1,343	1,716	2,238	3,519	5,160	7,059	8,149
<b>Total normalizado (Diretiva 2009/28/CE)</b>	29,290	29,802	29,092	29,646	30,787	31,668	34,008	35,568	37,860	39,165
Hídrica normalizada	12,666	12,620	12,091	11,910	12,296	12,204	12,604	12,778	13,014	12,998
Eólica normalizada	12,512	12,752	12,608	12,814	12,767	13,040	13,577	13,622	13,905	14,455
<b>Produção Bruta + Saldo Importador<sup>4</sup></b>	53,505	53,514	55,515	55,558	55,004	52,988	55,770	56,646	57,454	59,200
<b>% de renováveis (Real)</b>	62.6%	45.4%	55.2%	51.9%	57.6%	62.5%	53.6%	65.6%	76.5%	74.2%
<b>% de renováveis (Diretiva<sup>5</sup>)</b>	54.0%	54.2%	52.2%	53.8%	58.0%	58.4%	61.0%	63.0%	65.9%	66.2%

Fonte: DGEG (2025)

## Anexo 2 – Dados extraídos do *Portal Open Data* para Castelo Branco

Ano	Zona QS	SAIFI AT num	SAIDI AT min	MAIFI AT num	TIEPI MT min	END MT MWh	SAIFI MT num	SAIDI MT min	MAIFI MT num	SAIFI BT num	SAIDI BT min
2014	Zona A	0	0	0	40.55	11.96	1.03	51.16	6.83	1.08	70.40
2015	Zona A	0	0	0	35.42	10.35	0.70	34.33	5.20	1.14	57.63
2015	Zona C	0	0	0	26.70	2.43	1.04	37.43	17.26	1.10	40.77
2016	Zona A	0	0	0	49.32	15.87	1.66	56.64	8.88	1.26	65.92
2017	Zona A	0	0	0	114.41	33.40	3.40	122.10	5.02	3.92	116.77
2017	Zona B	0	0	0	8.89	0.30	0.45	13.71	10.45	0.11	3.29
2017	Concelho	0	0	0	95.13	39.37	2.68	86.44	9.69	3.07	89.93
2018	Zona C	0	0	0	56.29	4.87	1.24	59.91	17.89	1.17	68.30
2018	Zona B	0	0	0	8.57	0.28	0.61	28.02	14.82	0.12	7.31
2019	Zona B	0	0	0	8.72	0.29	0.63	32.58	9.63	0.24	18.81
2019	Zona C	0	0	0	79.31	7.24	2.34	86.65	13.22	2.37	90.41
2020	Zona C	0	0	0	169.08	23.00	3.46	186.14	17.10	4.25	229.64
2020	Zona A	0	0	0	34.05	8.56	1.04	30.67	4.38	1.18	45.40
2020	Zona B	0	0	0	24.70	0.59	1.67	24.49	2.00	2.42	68.92
2021	Concelho	0	0	0	35.90	15.30	1.62	77.23	11.08	1.15	67.15
2021	Zona A	0	0	0	5.81	1.41	0.19	7.10	1.54	0.12	10.39
2022	Zona A	0	0	0	27.64	7.90	0.65	28.51	3.12	0.84	45.39
2022	Concelho	0	0	0	44.19	20.26	1.16	56.99	9.39	1.07	63.56
2023	Zona B	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	4.58	0.05	5.16
2023	Zona A	0	0	0	21.10	5.73	0.88	32.23	2.11	1.04	20.41
2024	Zona C	0	0	0	72.31	10.43	1.13	61.24	13.28	1.20	62.80

Fonte: Adaptado de E-Redes (2025a)

<b>Ano</b>	<b>Zona QS</b>	<b>SAIFI AT num</b>	<b>SAIDI AT min</b>	<b>MAIFI AT num</b>	<b>TIEPI MT min</b>	<b>END MT MWh</b>	<b>SAIFI MT num</b>	<b>SAIDI MT min</b>	<b>MAIFI MT num</b>	<b>SAIFI BT num</b>	<b>SAIDI BT min</b>
2014	Zona B	0	0	0	52.74	1.80	2.21	82.19	22.71	1.83	58.19
2014	Zona C	0	0	0	99.95	8.73	3.09	97.00	28.08	3.22	89.56
2014	Concelho	0	0	0	54.19	22.50	2.16	76.72	18.79	1.89	76.35
2015	Concelho	0	0	0	31.96	13.37	0.82	34.02	11.77	1.08	51.88
2015	Zona B	0	0	0	17.39	0.60	0.17	12.57	11.86	0.59	58.34
2016	Zona B	0	0	0	55.35	2.00	3.90	82.52	22.72	2.59	62.54
2016	Concelho	0	0	0	59.02	26.29	2.96	77.26	16.77	2.36	81.49
2016	Zona C	0	0	0	92.51	8.41	3.89	93.74	22.37	4.16	111.30
2017	Zona C	0	0	0	64.62	5.66	2.45	68.70	13.52	2.31	64.60
2018	Zona A	0	0	0	24.18	6.45	0.62	30.44	4.34	0.53	20.46
2018	Concelho	0	0	0	29.76	11.60	0.93	44.88	11.92	0.72	35.96
2019	Concelho	0	0	0	51.26	22.19	2.09	68.66	9.69	2.40	74.00
2019	Zona A	0	0	0	47.65	14.66	2.06	54.12	5.51	2.72	71.78
2020	Concelho	0	0	0	76.67	32.15	2.64	132.23	12.63	2.41	116.02
2021	Zona B	0	0	0	97.76	2.46	1.00	76.07	2.71	1.28	110.65
2021	Zona C	0	0	0	83.04	11.43	2.33	111.10	16.05	2.69	145.42
2022	Zona B	0	0	0	161.22	4.07	1.14	121.44	2.86	1.34	149.97
2022	Zona C	0	0	0	55.91	8.29	1.41	67.95	12.72	1.37	76.15
2023	Zona C	0	0	0	65.93	9.86	0.93	69.90	11.54	0.96	72.24
2023	Concelho	0	0	0	34.67	15.58	0.88	55.23	8.29	0.94	38.56
2024	Zona A	0	0	0	26.30	7.34	0.64	34.62	3.31	0.60	19.10
2024	Zona B	0	0	0	150.23	4.16	1.63	127.81	6.48	2.40	246.28
2024	Concelho	0	0	0	49.19	21.93	1.00	55.58	9.88	0.95	51.57

Fonte: Adaptado de E-Redes (2025a)

### Anexo 3 – Informação complementar – Portugal continental

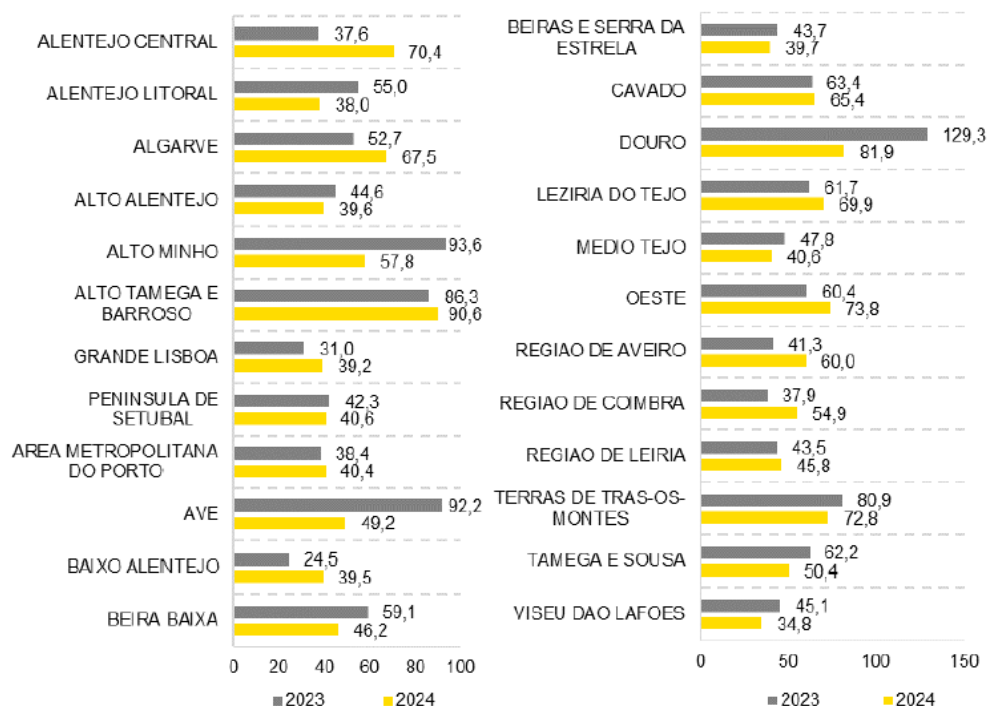


Gráfico 3.13 – Indicador TIEPI MT (min), para instalações de consumo, por regiões NUTS III em 2023 e 2024.

Fonte: E-Redes (2024)

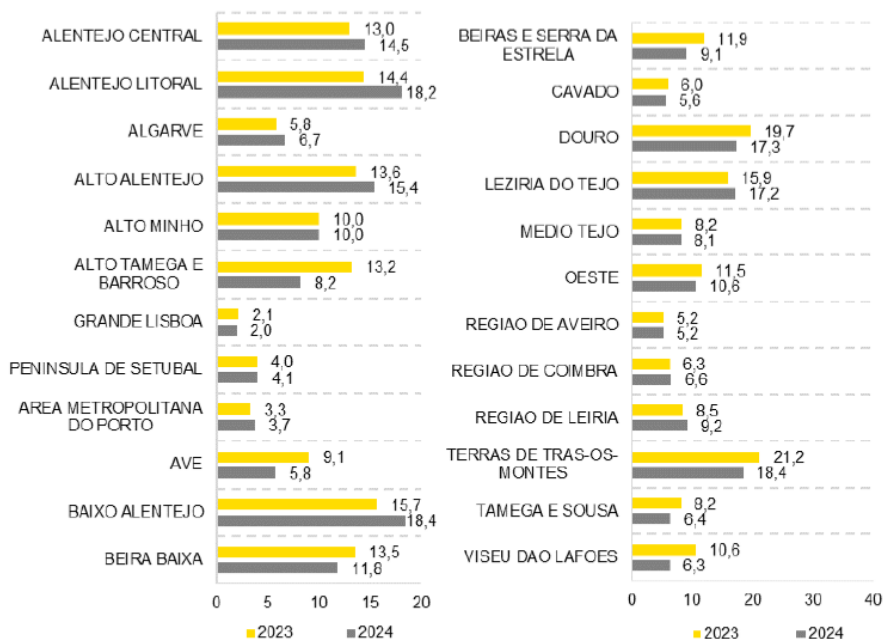


Gráfico 3.17 – Indicador MAIFI MT (n.º), para instalações de consumo, por regiões NUTS III em 2023 e 2024.

Fonte: E-Redes (2024)

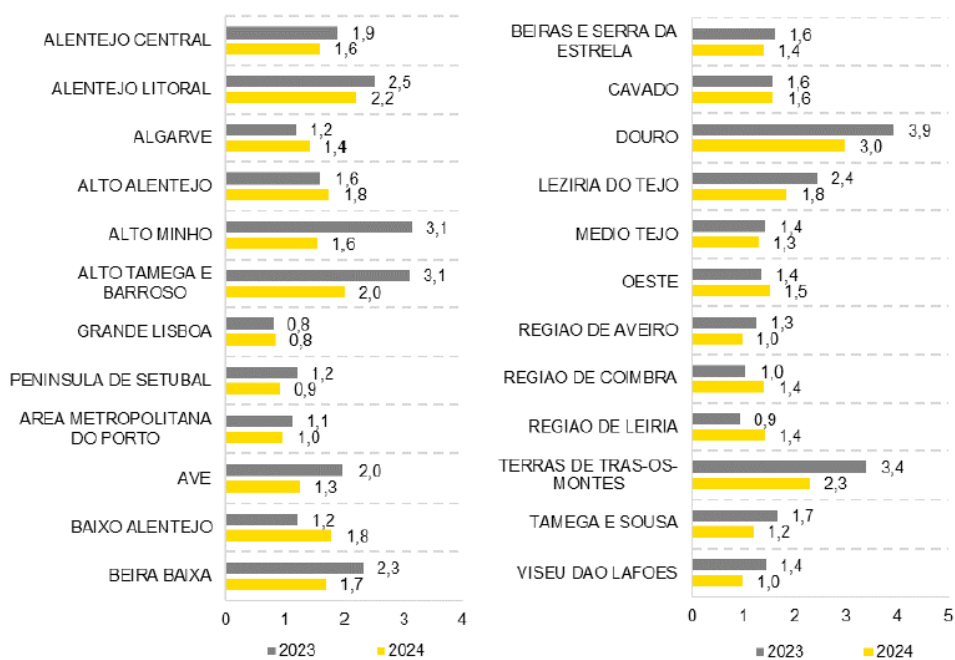


Gráfico 3.15 – Indicador SAIFI MT (n.º), para instalações de consumo, por regiões NUTS III em 2023 e 2024.

Fonte: E-Redes (2024)

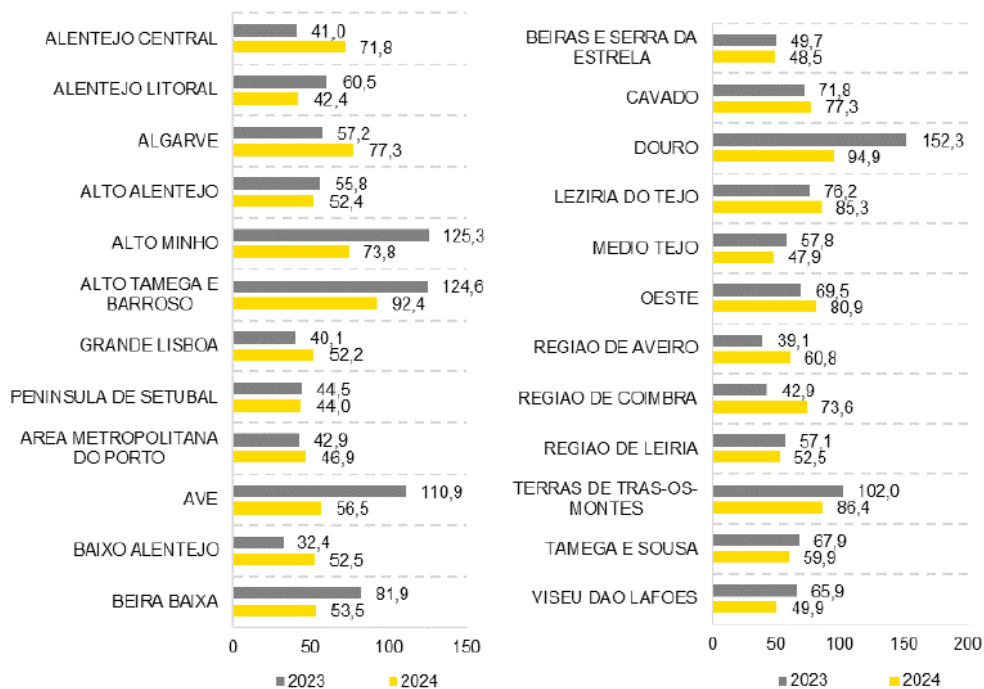


Gráfico 3.16 – Indicador SAIDI MT (min), para instalações de consumo, por regiões NUTS III em 2023 e 2024.

Fonte: E-Redes (2024)

Anexo 4 – Artigo apresentado no Congresso Nacional de Manutenção e Gestão de Ativos (Angola)

**AAMGA**  
Associação Angolana de  
Manutenção e Gestão de Activos

**5º CONGRESSO NACIONAL DE MANUTENÇÃO E GESTÃO DE ACTIVOS**  
**11º ENCONTRO DE MANUTENÇÃO DOS PAÍSES DE LÍNGUA OFICIAL PORTUGUESA**

**05 a 07**  
DE JUNHO  
DE **2025**

**MANUTENÇÃO E  
GESTÃO DE ACTIVOS**

**A BASE DA SUSTENTABILIDADE**

LOCAL: ENAPP- E.P ESTRADA DO FUTUNGO - CORIMBA | LUANDA  
CONTACTOS : 941575726  
WWW.AAMGA.CO.AO  
WWW.5CNMGA-AO.COM

PARCEIROS: INFRASPEAK CjE SCS/ISA APM APSEL DPTEC ANEMIP atec PubIndústria\*

## Gestão da Manutenção em Redes Elétricas com Penetração de Energias Renováveis: uma revisão sobre desafios e tendências

---

Joice Agostinho<sup>a</sup>; José Torres Farinha<sup>a,b</sup>; Ana Vieira<sup>a,b</sup>; Hugo Raposo<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup> Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Instituto Politécnico de Coimbra,  
Rua Pedro Nunes, 3030-199 Coimbra, Portugal

<sup>b</sup> RCM2+ Research Centre for Asset Management and Systems Engineering,  
Instituto Politécnico de Coimbra, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra,  
Rua Pedro Nunes - Quinta da Nora, 3030-199 Coimbra, Portugal

---

### Resumo

A transição energética tem provocado uma reconfiguração estrutural dos sistemas elétricos, impulsionada por metas ambientais e inovações tecnológicas. As redes elétricas, enquanto infraestrutura vital, têm enfrentado novos desafios à medida que se intensifica a integração de fontes renováveis e a digitalização, designadamente através do controlo centralizado. Este artigo explora as transformações necessárias na gestão da manutenção dessas infraestruturas, referindo práticas e tecnologias que contribuem para a eficiência, a segurança e a sustentabilidade do sistema elétrico, destacadas na literatura. Inicialmente são abordadas as políticas de manutenção com ênfase na manutenção preditiva, cujo papel tem sido ampliado pelo uso de tecnologias digitais como a Internet das Coisas (IoT), Inteligência Artificial, Realidade Aumentada e Robótica. A integração destas soluções permite a monitorização dos ativos, reduzindo custos operacionais e aumentando a fiabilidade da rede. A implementação de *microgrids* surge como uma alternativa para reforçar a resiliência da rede, especialmente face às mudanças climáticas. Com base no contexto português, o artigo evidencia a importância da inovação tecnológica para enfrentar os desafios futuros. Discute-se, ainda, a importância da gestão da manutenção moderna e proativa para garantir a continuidade do serviço, a estabilidade e eficiência do sistema.

**Palavras-chave:** Gestão de ativos, manutenção, sustentabilidade, energias renováveis, redes elétricas

## 1 Introdução

A transição energética tem sido uma prioridade global na busca por sistemas de energia mais sustentáveis e resilientes. O incremento de fontes de energia renovável representa um marco neste processo, mas impõe também desafios significativos para a operação e a manutenção das redes elétricas, nomeadamente a intermitência, a variabilidade da produção e a modernização das redes.

Os modelos tradicionais de manutenção mostram-se insuficientes face à complexidade dos sistemas modernos, o que tem levado à adoção de abordagens baseadas em dados, com destaque para a manutenção preditiva.

Neste contexto, a manutenção das infraestruturas elétricas desempenha um papel determinante na garantia da continuidade do fornecimento de serviço e na maximização do desempenho dos ativos, refletindo a complexidade e a necessidade de eficiência nas operações destes sistemas.

## 2 Estado da Arte

### 2.1 Gestão da Manutenção

De acordo a NP EN 13306:2021, *“a manutenção é combinação de todas as ações técnicas, administrativas e de gestão, durante o ciclo de vida de um bem, destinadas a mantê-lo ou repô-lo num estado em que ele pode desempenhar a função requerida”*.

Para que uma organização alcance a excelência dos seus serviços e produtos é indispensável fazer a gestão da manutenção, visando encontrar o equilíbrio entre o benefício e o custo, de forma a maximizar o contributo positivo da manutenção para a rentabilidade dos investimentos efetuados.

A gestão da manutenção é uma função estratégica em sistemas industriais e infraestruturas, especialmente quando se trata de ativos críticos como as redes elétricas. Uma gestão eficaz da manutenção permite aumentar a fiabilidade e a disponibilidade dos equipamentos, reduzir falhas e custos de operação, garantir segurança e continuidade do serviço.

A gestão da manutenção é fundamental para garantir o funcionamento seguro e eficiente das redes elétricas. Tradicionalmente, aplica-se uma combinação de três estratégias principais: manutenção corretiva, manutenção preventiva e manutenção preditiva (Matos, 2021). A manutenção preditiva, em particular, destaca-se por permitir

uma abordagem baseada em dados e monitorização contínua, com objetivo de “prever e evitar” em vez de “reagir e reparar”.

No contexto das redes elétricas modernas, marcadas pela crescente complexidade operacional e penetração de fontes renováveis, a manutenção preditiva assume um papel estratégico. Esta abordagem contribui significativamente para a redução de custos operacionais, o aumento da eficiência na gestão de ativos críticos da rede e minimização de interrupções, mesmo em cenários de elevada variabilidade.

## **2.2 Tecnologias utilizadas na gestão da manutenção**

A tecnologia é o principal catalisador para a digitalização do setor elétrico e, conseqüentemente para a transição energética. As tecnologias aqui citadas têm sido fundamentais para inspeções de linhas críticas, combinadas com modelos analíticos e preditivos que auxiliam na gestão de vegetação e na prevenção de falhas.

### **2.2.1 Internet das coisas (IoT)**

Sensores IoT fornecem dados sobre o estado dos equipamentos em tempo real, o que, por sua vez, facilita a automação de processos, bem como a melhoria das decisões a serem tomadas (Hickie & Hickie, 2021). Em sistemas de distribuição, por exemplo, sensores IoT, instalados em transformadores podem identificar aquecimentos anómalos ou vibrações irregulares.

### **2.2.2 Inteligência Artificial (IA)**

Permite a análise preditiva para prever falhas e otimizar operações; a capacidade de criar algoritmos e modelos tecnológicos possibilita a automação de processos, a prevenção de padrões e a otimização de operações (Hickie & Hickie, 2021). A IA aprende com padrões de falha anteriores e consegue sugerir períodos ótimos de manutenção e substituição de componentes.

### **2.2.3 Realidade Aumentada**

A realidade aumentada oferece a visualização e interação de informação digital em ambiente físico ou virtual. Para além de possibilitar uma experiência enriquecedora ao cliente, facilita a manutenção ao fornecer instruções claras e visuais para os colaboradores, reduzindo erros nas operações (Hickie & Hickie, 2021).

#### 2.2.4 Robótica

Utilizada para inspeções rápidas e seguras de infraestruturas, reduzindo a necessidade de intervenções humanas.

#### 2.3 Microgrids: Conceito, Componentes e Papel na Transição Energética

A integração de fontes renováveis num sistema elétrico, dado o seu caráter intermitente e descentralizado, impõe desafios técnicos, nomeadamente de previsão e estabilidade da rede (Daniel-Durandt et al., 2024). Para garantir a estabilidade são necessários sistemas de armazenamento de energia e redes inteligentes que aumentem a flexibilidade e a capacidade de resposta da rede.

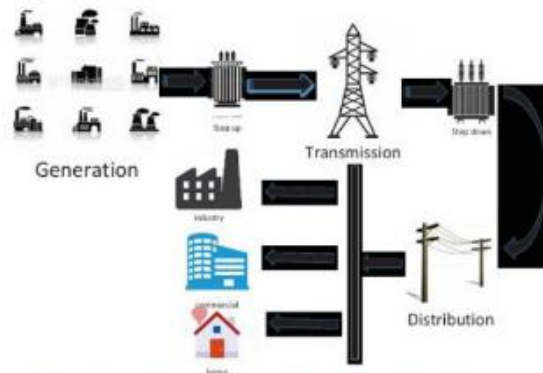


Figura 1 - Rede Convencional (Kalkal & Garg, 2017)

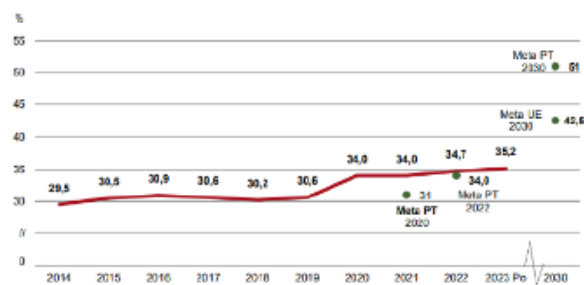
O conceito de *microgrids* surge como resposta aos desafios da integração de fontes de energia renovável, porque as interrupções dentro desta rede são restringidas localmente e não afetam toda a rede como nos sistemas tradicionalmente utilizados, representados na Figura 1 (Lindley, 2010; Kalkal & Garg, 2017).

As *microgrids* podem funcionar de forma autónoma ou em conexão com a rede elétrica principal, oferecendo flexibilidade, segurança energética e melhor aproveitamento da energia renovável.

Para Xu *et al.* (2024), o uso de sistemas de energia descentralizados melhora a capacidade das redes em absorver a intermitência das fontes renováveis, equilibrando a oferta e a procura de energia de forma mais sustentável.

### 3 Setor Elétrico Nacional (SEN) português

Portugal enfrenta desafios na integração de fontes renováveis, especialmente devido ao aumento significativo, verificado nos últimos anos, da penetração de energia solar e eólica no SEN. Desde 2014, Portugal registou um aumento significativo na capacidade de produção de energia renovável, refletindo o seu compromisso com a transição energética. Além da aposta na produção de eletricidade com recurso a fontes renováveis, Portugal tem investido na modernização da sua rede elétrica, incluindo o uso de sistemas de armazenamento e redes inteligentes para mitigar os impactos da intermitência das fontes renováveis (Bird *et al.*, 2016;EDP, 2023).



NOTA: Indicador calculado de acordo com a metodologia da Diretiva 2009/28/CE.  
FONTE: DGEG

**Figura 2 - Contribuição de fontes de energia renovável para o consumo final bruto**

Para que os resultados presentes na Figura 2 fossem alcançados e para garantir o bom desempenho da rede de distribuição, têm sido realizados investimentos específicos e planos de manutenção dos ativos de rede, bem como os projetos de modernização e automatização das redes desenvolvidos ao longo da última década, constatando-se uma estabilização dos principais indicadores de continuidade de serviço nos últimos anos, confirmando uma evolução generalizada que espelha o bom desempenho da E-REDES na melhoria da qualidade de serviço técnico na distribuição de energia elétrica (EDP, 2023).

Apesar dos avanços na produção de eletricidade com base em energias renováveis, Portugal continua a apresentar uma certa dependência energética da interligação com Espanha, o que representa uma vulnerabilidade estratégica, como ficou evidente no apagão de 28 de Abril de 2025. Neste dia, uma falha no sistema elétrico espanhol originou uma instabilidade que se propagou rapidamente à rede

portuguesa. Este evento destacou a importância de reforçar a autonomia e resiliência do SEN Português, bem como investir em soluções locais.

O SEN, consciente desses desafios, tem recorrido à utilização de drones e sensores IoT para a inspeção remota de linhas e subestações (como ilustra a evolução histórica da Figura 3), além da implementação de sistemas baseados em IA para a previsão de falhas em equipamentos críticos, reforçando assim a fiabilidade do sistema e a continuidade do serviço (ERSE, 2025; E-Redes, 2023, Labelec, 2021).

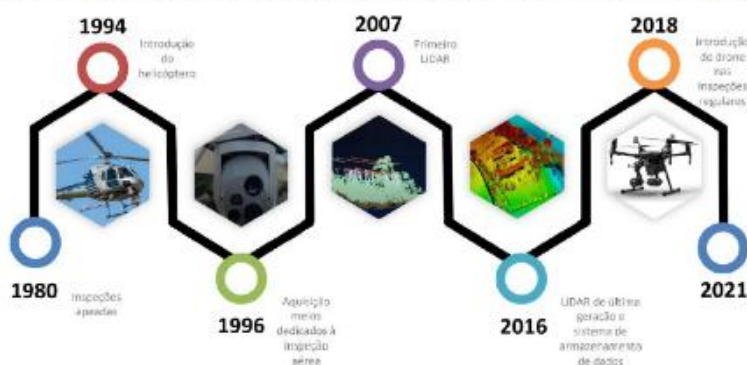


Figura 3 - Perspetiva histórica: Inspeção de ativos elétricos e respetivas faixas (Labelec, 2021)

Importa referir que um dos principais focos de investimento e modernização no SEN tem sido a melhoria dos padrões da qualidade de serviço, reduzindo assimetrias no território nacional. Os efeitos deste investimento traduziram-se em bons resultados de qualidade de serviço comercial, e qualidade de serviço técnico, nomeadamente os relacionados com continuidade de serviço (ERSE, 2025). A título de exemplo, refere-se o caso das redes MT, onde se verificou uma redução progressiva do indicador referente à Duração Média das Interrupções Longas do Sistema SAIDI (*System Average Interruption Duration Index*), e a redução de oito pontos percentuais, entre 2017 e 2023, da Frequência Média de Interrupções do Sistema SAIFI (*System Average Interruption Frequency Index*) MT (ERSE, 2025; E-Redes, 2023).

Perspetiva-se que se mantenha o investimento em manutenção preventiva e em tecnologias de apoio ao diagnósticos das diferentes redes do SEN, uma vez que a "modernização da rede é decisiva para o aumento da sua resiliência, permitindo controlar o envelhecimento e degradação dos ativos". Importa pois investir na renovação de ativos mas, também, na supervisão e automação (de acordo com os

Planos de Monitorização da Qualidade da Energia Elétrica) como forma de promover a contínua melhoria da qualidade de serviço, mas também em matérias de cibersegurança, por exemplo através do programa “Sistemas Inteligentes de Supervisão e Operação e Telecomunicações” (ERSE, 2025; E-Redes, 2023; EU, 2024; Labelec, 2021).

#### 4 Conclusão

A integração de energias renováveis nas redes elétricas representa um avanço crucial para a sustentabilidade, mas também impõe desafios técnicos significativos, sobretudo no que diz respeito à gestão da manutenção e à resiliência das infraestruturas. Este artigo evidenciou que abordagens modernas são essenciais para garantir a fiabilidade, segurança e continuidade do serviço. Recomenda-se que as empresas invistam em tecnologias emergentes e na capacitação técnica para maximizar os benefícios da transição energética e garantir a sustentabilidade das redes elétricas. No entanto, os desafios e as soluções associadas à manutenção das redes elétricas, num cenário de crescente penetração de energias renováveis, requerem constante inovação, colaboração e adaptação das infraestruturas elétricas.

#### Referências

- Bird, L., Lew, D., Milligan, M., Carlini, E. M., Estanqueiro, A., Flynn, D., Gomez-Lazaro, E., Holttinen, H., Menemenlis, N., Orths, A., Eriksen, P. B., Smith, J. C., Soder, L., Sorensen, P., Altiparmakis, A., Yasuda, Y., & Miller, J. (2016). Wind and solar energy curtailment: A review of international experience. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 65, pp. 577–586). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.082>
- Daniel-Durandt, F., Van Staden, C. Y., Bekker, B., & Rix, A. (2024). Innovative Solutions Addressing South Africa’s Energy Paradox: Integrating Renewable Energy Resources for Increased Power System Stability and Maintenance Schedule Planning. *Proceedings of the 24th IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 8th I and CPS Industrial and Commercial Power Systems Europe, IEEEIC/I and CPS Europe 2024*. <https://doi.org/10.1109/IEEEIC/ICPSEurope61470.2024.10751160>
- EDP (2023). *Relatório Anual Integrado 2023*. [Online]. <https://www.edp.pt/quem-somos> [Acedido em 4 maio 2025]

- E-Redes (2023). Relatório da Qualidade de Serviço 2023 – energia em Rede. [Online] <https://tinyurl.com/3k5nuev7> [Acedido em 8 maio 2025].
- ERSE (2025). Plano de Desenvolvimento e Investimento da Rede Nacional de Distribuição 2026 a 2030. <https://tinyurl.com/22kb428e> [Acedido em 8 maio 2025].
- Hickie, D., & Hickie, J. (2021). The impact of Industry 4.0 on supply chains and regions: innovation in the aerospace and automotive industries. *European Planning Studies*, 29(9), 1606–1621. <https://doi.org/10.1080/09654313.2021.1963048>
- Kalkal, P., & Garg, V. K. (2017). Transition from conventional to modern grids: Modern grid include microgrid and smartgrid. 2017 4th International Conference on Signal Processing, Computing and Control (ISPC), 223–228. <https://doi.org/10.1109/ISPC.2017.8269679>
- Labellec (2021). Inspeção de ativos elétricos e respetivas faixas com recurso a LIDAR. [Online] <https://tinyurl.com/54xx8mzp> [Acedido em 8 maio 2025].
- Lindley, D. (2010). Smart grids: The energy storage problem. *Nature*, 463(7277), 18–20. <https://doi.org/10.1038/463018a>
- Matos, C. (2021). Gestão da Manutenção e da Reserva Estratégica em Subestações Elétricas Caso de Estudo da EDP Distribuição.
- EU (2024). Regulamento Delegado (UE) 2024/1336 da Comissão, de 11 de março de 2024, que estabelece um código de rede relativo a regras setoriais para os aspetos ligados à cibersegurança dos fluxos transfronteiriços de eletricidade. *Jornal Oficial da União Europeia, Série L PT*. [Online]. <https://tinyurl.com/rfhc4esn>. [Acedido em 8 maio 2025].
- Xu, L., Feng, K., Lin, N., Perera, A. T. D., Poor, H. V., Xie, L., Ji, C., Sun, X. A., Guo, Q., & O'Malley, M. (2024). Resilience of renewable power systems under climate risks. *Nature Reviews Electrical Engineering*, 1(1), 53–66.

## Anexo 5 – Artigo apresentado no Physical Asset Management and Data Science Conference (PAMDAS)

# Proceedings of PAMDAS 2025 International conference on Physical Asset Management and Data Science

Thursday, July 17, 2025 - Friday, July 18, 2025

Coimbra Institute of Engineering (ISEC), Polytechnic University of  
Coimbra, Portugal



### Organization



### Endorsements



ISBN: 978-989-8331-19-9

PAMDAS 2025

## Maintenance Management in Electrical Grids with Renewable Energy High Penetration: a review of challenges and trends

Joice Agostinho<sup>1</sup>, José Torres Farinha<sup>1,2</sup>; Ana V Vieira<sup>1,2,3,4</sup>; Hugo Raposo<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Instituto Politécnico de Coimbra, Rua Pedro Nunes, 3030-199 Coimbra, Portugal

<sup>2</sup> RCM2+ Research Centre in Asset Management and Systems Engineering, Polytechnic Institute of Coimbra, Higher Institute of Engineering of Coimbra, Rua Pedro Nunes-Quinta da Nora, 3030-199 Coimbra, Portugal

<sup>3</sup> CISE - Electromechatronic Systems Research Centre, Universidade da Beira Interior, Calçada Fonte do Lameiro, P – 6201-001 Covilhã, Portugal

<sup>4</sup> Ci2 - Smart Cities Research Center, Polytechnic Institute of Tomar, Portugal

\*{joice.agostinho@outlook.com }; tfarinha@isec.pt; avieira@isec.pt ; hugo.raposo@isec.pt

### Abstract

The increasing integration of renewables into electrical grids has led to a significant reconfiguration of energy systems, requiring new maintenance approaches to ensure reliability, efficiency and sustainability. This study, motivated by the challenges of the energy transition, conducts a critical review of the literature on practices, technologies and trends in the maintenance management of electrical networks. The methodology adopted focuses on the analysis of strategies adopted in Portugal and other countries with a strong penetration of renewables, highlighting more effective approaches. Maintenance policies are analysed, with a focus on predictive maintenance, leveraged by technologies such as IoT, Artificial Intelligence, Augmented Reality and Robotics. The results show operational gains and point to the importance of microgrids and architectures with greater redundancy as strategies to strengthen the resilience of the grid face of extreme weather events and localized failures. The analysis reveals that the modernization of the physical assets, combined with technological innovation, is crucial to ensure the continuity and stability of the electricity system. This work contributes to the state of the art by integrating international perspectives and highlighting practical solutions that can guide public policies and strategic decisions in the energy sector.

**Keywords:** Asset management, maintenance, sustainability, renewable energy, electrical grids

## 1 Introduction

The energy transition has become a global priority in search of a more sustainable and resilient energy systems. The increase in renewable energy sources represents a milestone in this process but also imposes significant challenges to the operation and maintenance of electrical grids, namely intermittency, variability of production and grid modernisation.

Traditional maintenance models are insufficient facing the complexity of modern systems, which has led to the adoption of data-driven approaches, with an emphasis on predictive maintenance.

In this context, the maintenance of electrical infrastructures plays a decisive role in ensuring the continuity of service provision and maximizing asset performance, reflecting the complexity and need for efficiency in the operations of these systems.

## **2 State of the Art**

### **2.1 Maintenance Management**

According to NP EN 13306:2021, "maintenance is a combination of all technical, administrative and management actions, during the life cycle of an asset, aimed at maintaining or restoring it to a state in which it can perform the required function".

For an organization to achieve excellence in its services and products, it is essential to manage maintenance, aiming to find a balance between benefits and costs, to maximize the positive contribution of maintenance to the profitability of the investments made.

Maintenance management is a strategic function in industrial systems and infrastructures, especially when it comes to critical assets such as power grids. Effective maintenance management allows to increase the reliability and availability of equipment, reduce failures and operating costs, ensure safety and service continuity.

Maintenance management is essential to ensure the safe and efficient operation of power grids. Traditionally, a combination of three main strategies is applied: corrective maintenance, preventive maintenance, and predictive maintenance. Predictive maintenance stands out for allowing a data-driven approach and continuous monitoring, with the aim of "predict and avoid" rather than "react and repair" [1].

In the context of modern electrical grids, marked by increasing operational complexity and penetration of renewable sources, predictive maintenance plays a strategic role. This approach contributes significantly to reducing operational costs, increasing efficiency in managing critical network assets, and minimizing disruptions, even in high-variability scenarios.

## **3 Technologies used in maintenance management**

Technology is the main catalyst for the digitalization of the electricity sector and, consequently, for the energy transition. The technologies mentioned here have been fundamental for inspections of critical lines, combined with analytical and predictive models that help in vegetation management and failure prevention.

### **3.1.1 Internet of Things (IoT)**

IoT sensors provide data on the state of equipment in real time, which, in turn, facilitates the automation of processes, as well as the improvement of decisions to be made. In distribution systems, for example, IoT sensors installed in transformers can identify anomalous heating or irregular vibrations [2].

### **3.1.2 Artificial Intelligence (AI)**

They enable predictive analytics to predict failures and optimize operations. The ability to create algorithms and technological models makes it possible to automate processes, prevent patterns, and optimize operations. AI learns from previous failure patterns and can suggest optimal maintenance and replacement periods for components [2].

### **3.1.3 Augmented Reality**

Augmented reality offers the visualization and interaction of digital information in a physical or virtual environment. In addition, to enabling enriching customer experience, it facilitates maintenance by providing clear and visual instructions for employees, reducing errors in operations [2].

### **3.1.4 Robotics**

Robotics is used to perform fast and safe infrastructure inspections, minimizing the need for human intervention in hazardous environments.

### 3.2 Microgrids: Concept, Components and Role in the Energy Transition

The integration of renewable sources into an electricity system, given its intermittent and decentralised nature, imposes technical challenges, namely in terms of forecasting and grid stability. To ensure stability, energy storage systems and smart grids are needed to increase the flexibility and responsiveness of the grid [3].

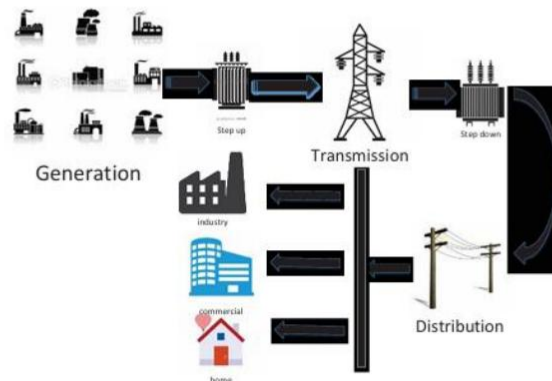


Figure 1 - Conventional network [4]

The concept of microgrids emerges as a response to the challenges of integrating renewable energy sources, since interruptions in this grid are locally restricted and do not affect the entire grid as in the traditionally used systems, represented in Figure 1 [5][4].

Microgrids can operate autonomously or in connection with the main electrical grid, offering flexibility, energy security and a better use of renewable energies.

The use of decentralized energy systems improves the ability of grids to absorb the intermittency of renewable sources, balancing energy supply and demand in a more sustainable way [6].

## 4 Cybersecurity in electrical grids

The digitalisation of electrical grids with high penetration of renewables is a significant milestone in the modernisation of the energy sector, transforming the way energy is generated, produced and consumed. However, this technological transformation introduces a new range of cyber threats, which compromise its security, reliability and resilience of infrastructures. Many of these threats are complex, discrete, and difficult to detect, requiring monitoring and defence solutions.

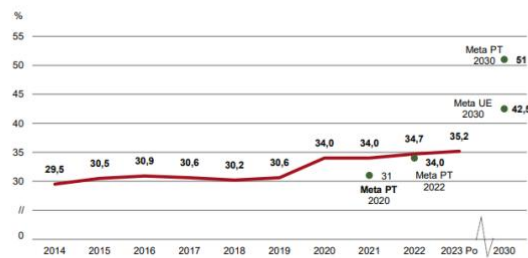
The increasing interconnectivity of networks, fuelled by the proliferation of the use of IoT devices and digital control systems, exposes systems to a variety of cyberattacks, such as distributed denial-of-service, false data injection, ransomware, and even coordinated physical sabotage. These attack modalities exploit flaws in communication protocols, poor authentication and the absence of security updates on peripheral devices, posing significant risks to the continuous operation of the network [7].

In this scenario, technological developments, while essential for the sustainable energy transition, must be accompanied by an equally sophisticated and integrated cybersecurity approach.

The challenge lies in reconciling innovation with protection, ensuring that operational gains do not compromise the robustness of the electrical system. Cybersecurity, therefore, is no longer a technical complement and becomes a pillar for the energy transition. It is imperative that security policies keep pace with technological innovation.

## 5 Portuguese National Electric System

Portugal faces challenges in the integration of renewable sources, especially due to the significant increase in the penetration of solar and wind energy in the Portuguese national electric system (*Sistema Eléctrico Nacional-SEN*) in recent years. Since 2014, Portugal has seen a significant increase in renewable energy production capacity, reflecting its commitment to the energy transition (Figure 2). In addition to investing in electricity production from renewable sources, Portugal has invested in the modernization of its electrical grid, including the use of storage systems and smart grids to mitigate the impacts of intermittency from renewable sources [8][9].



NOTA: Indicador calculado de acordo com a metodologia da Diretiva 2009/28/CE.  
 FONTE: DGE

Figure 2 - Contribution of renewable energy sources to gross final consumption

Despite advances in electricity production from renewable energies, Portugal continues to have a certain energy dependence on interconnection with Spain, which represents a strategic vulnerability, as was evident in the blackout of April 28, 2025. On this day, a failure in the Spanish electrical system caused instability that quickly spread to the Portuguese grid. This event highlighted the importance of strengthening the autonomy and resilience of the SEN, as well as investing in local solutions.

The SEN, aware of these challenges, has resorted to the use of drones and IoT sensors for the remote inspection of lines and substations (as illustrated by the historical evolution illustrated in Figure 3), in addition to the implementation of AI-based systems for the prediction of failures in critical equipment, thus reinforcing the reliability of the system and the continuity of service [10][11][12].

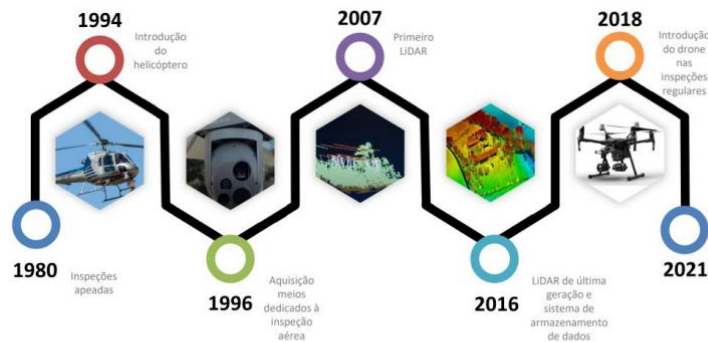


Figure 3 - Historical perspective: Inspection of electrical assets and their lanes [12]

It should be noted that one of the main focuses of investment and modernization in the SEN has been the improvement of service quality standards, reducing asymmetries in the national territory. The effects of this investment have been translated into good results in terms of quality of commercial service, and quality of technical service, particularly those related to continuity of service. As an example, the case of MV networks was mentioned, where there was a progressive reduction in the indicator referring to the Average Duration of Long Interruptions of the System Average Interruption Duration Index (SAIDI), and a reduction of eight percentage points, between 2017 and 2023, in the Average Frequency of Interruptions of the System Average Interruption Frequency Index (SAIFI) [10][11].

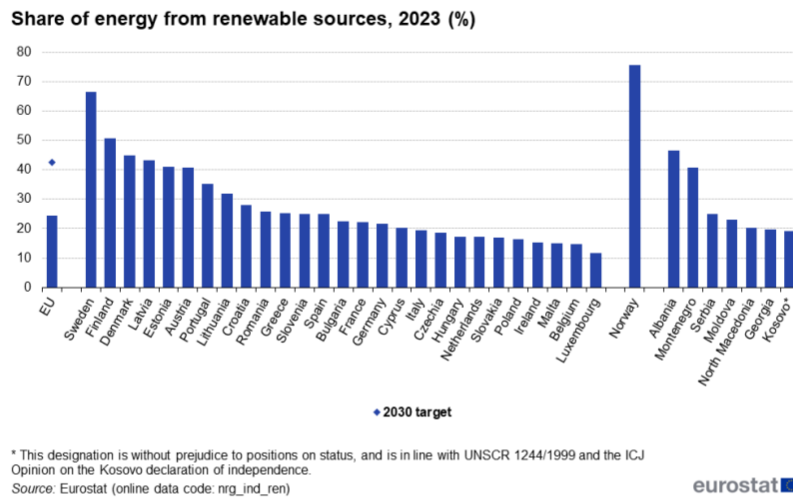


Figure 4 - Share of energy from renewable sources in 2023 [13]

According to data from EUROSTAT (Figure 4), Portugal is positioned as one of the countries in the European Union with the highest integration of renewable energies. The European countries that have made the most progress in the energy transition share well-defined and coordinated energy policies. They have set ambitious targets for reducing greenhouse gases and increasing renewable production, in line with the energy guidelines set by the European Parliament. To boost this transition, they implemented several incentive mechanisms, such as support for self-consumption, tax benefits, and financing of sustainable projects. In addition, they invest significantly in technological innovation and in the improvement of energy infrastructure. They also bet on the diversification of renewable sources, the integration of electricity systems and the promotion of energy efficiency [13] [14].

In the field of cybersecurity, European countries established a comprehensive framework to support Member States, businesses and citizens in the fight against cybersecurity threats and attacks. However, continuous development and improvement in data protection mechanisms and related services remain essential[10][15]. The 2024 Report on State of Cybersecurity in the union of European Union Agency for Cybersecurity (ENISA) presents an evidence-based analysis of cybersecurity posture across EU Member States. The report identifies persistent and emerging threats such as ransomware, distributed denial-of-service (DDoS) attacks, and supply chain compromises as significant risks to the Union’s digital resilience [15].

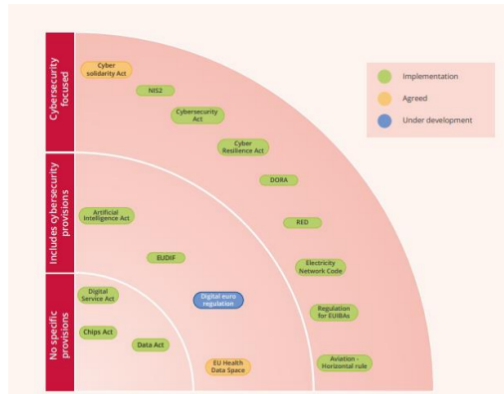


Figure 5 - EU Legislative Landscape on Cybersecurity [15]

Figure 5 provides a structured overview of the European Union's evolving legislative framework related to cybersecurity. It categorizes legislative instruments across three levels of relevance. The colour coding illustrates legislative progress: green indicates legislation under implementation, yellow reflects instruments that have been politically agreed upon but not yet fully enacted, and blue denotes legislative acts still under development. This visual map highlights both the depth and maturity of EU cybersecurity policy and the need for continued integration of security principles across all digital sector [15].

It is expected that investment in preventive maintenance and technologies to support the diagnostics of the different SEN networks will be maintained, since the "modernization of the network is decisive for increasing its resilience, allowing the aging and degradation of assets". It is therefore important to invest in the renewal of assets, but also in supervision and automation (in accord to Electricity Quality Monitoring Plans) as a way to promote the continuous improvement of the quality of service, but also in matters of cybersecurity, for example through the "Intelligent Systems for Supervision and Operation and Telecommunications" program [10][11][12].

## 6 Conclusion

The integration of renewables into electrical grids represents a crucial step forward for sustainability, but it also poses significant technical challenges, especially regarding the management of infrastructure maintenance and resilience. This article highlighted that modern approaches are essential to ensure reliability, security, and continuity of service. It is recommended that companies invest in emerging technologies and technical capacity building to maximize the benefits of the energy transition and ensure the sustainability of electrical grids. However, the challenges and solutions associated with the maintenance of electrical grids, in a scenario of increasing penetration of renewable energies, require constant innovation, collaboration and adaptation of electricity infrastructures.

The benefits of modernising electrical grids can only be fully reaped if they are accompanied by an integrated and strategic approach to cybersecurity.

In this regard, future research could explore the integration of emerging technologies such as blockchain for decentralized grid development or edge computing for real-time maintenance diagnostics. Another promising line of inquiry involves the incorporation of advanced cybersecurity frameworks to ensure both system resilience and data integrity. In addition, comparative studies between countries with

renewable energy high penetration, such as Portugal, could yield valuable insights into the scalability and adaptability of maintenance and automation practices, particularly in response to extreme weather events and cross-border interconnection vulnerabilities.

## References

- [1] C. Matos, “Gestão da Manutenção e da Reserva Estratégica em Subestações Eléctricas Caso de Estudo da EDP Distribuição,” 2021.
- [2] D. Hickie and J. Hickie, “The impact of Industry 4.0 on supply chains and regions: innovation in the aerospace and automotive industries,” *European Planning Studies*, vol. 29, no. 9, pp. 1606–1621, Sep. 2021, doi: 10.1080/09654313.2021.1963048.
- [3] F. Daniel-Durandt, C. Y. Van Staden, B. Bekker, and A. Rix, “Innovative Solutions Addressing South Africa’s Energy Paradox: Integrating Renewable Energy Resources for Increased Power System Stability and Maintenance Schedule Planning,” in *Proceedings - 24th IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 8th I and CPS Industrial and Commercial Power Systems Europe, IEEEIC/I and CPS Europe 2024*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2024, doi: 10.1109/IEEEIC/ICPSEurope61470.2024.10751160.
- [4] P. Kalkal and V. K. Garg, “Transition from conventional to modern grids: Modern grid include microgrid and smartgrid,” in *2017 4th International Conference on Signal Processing, Computing and Control (ISPC)*, 2017, pp. 223–228, doi: 10.1109/ISPC.2017.8269679.
- [5] D. Lindley, “Smart grids: The energy storage problem,” *Nature*, vol. 463, no. 7277, pp. 18–20, 2010, doi: 10.1038/463018a.
- [6] L. Xu *et al.*, “Resilience of renewable power systems under climate risks,” *Nature Reviews Electrical Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 53–66, Jan. 2024, doi: 10.1038/s44287-023-00003-8.
- [7] J. P. Yaacoub, H. Noura, J. Azar, O. Salman, and K. Chahine, “Cybersecurity in Smart Renewable Energy Systems,” in *2024 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC)*, 2024, pp. 1534–1540, doi: 10.1109/IWCMC61514.2024.10592561.
- [8] L. Bird *et al.*, “Wind and solar energy curtailment: A review of international experience,” Nov. 01, 2016, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.rser.2016.06.082.
- [9] EDP, “Relatório Anual Integrado 2023.” Accessed: May 08, 2025. [Online]. Available: <https://www.edp.pt/quem-somos>
- [10] ERSE, “Plano de Desenvolvimento e Investimento da Rede Nacional de Distribuição 2026 a 2030.” Accessed: May 08, 2025. [Online]. Available: <https://tinyurl.com/22kb428e>
- [11] E-Redes, “Relatório da Qualidade de Serviço 2023 – energia em Rede.” Accessed: May 08, 2025. [Online]. Available: <https://tinyurl.com/3k5nuev7>
- [12] Labelec, “Inspeção de ativos elétricos e respetivas faixas com recurso a LIDAR,” 2021, Accessed: May 08, 2025. [Online]. Available: <https://tinyurl.com/54xx8mzp>
- [13] EUROSTAT, “Renewable Energy Statistics.” Accessed: May 21, 2025. [Online]. Available: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Renewable\\_energy\\_statistics](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Renewable_energy_statistics)
- [14] Parlamento Europeu, “Política industrial, energética e de investigação,” Fichas Temáticas sobre a União Europeia.
- [15] European Union Agency for Cybersecurity, “2024 Report on the State of the Cybersecurity in the Union.” Accessed: Jun. 01, 2025. [Online]. Available: <https://www.enisa.europa.eu/publications/2024-report-on-the-state-of-the-cybersecurity-in-the-union>



**Instituto Superior  
de Engenharia**

Politécnico de Coimbra