

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Análise do impacto da hibridização de parques eólicos com solar fotovoltaico

José Pedro Silva Coelho



Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Prof. José Nuno Fidalgo

28 de Fevereiro de 2025

Resumo

O seguinte trabalho de dissertação reflete uma abordagem estratégica adotada em Portugal para atingir as metas de descarbonização e neutralidade carbónica até 2050. Com a crescente aposta em fontes de energia renovável, como a solar fotovoltaica e a eólica, surgem novos desafios relacionados à intermitência da sua disponibilidade, dada a dependência destas tecnologias de fatores meteorológicos. Este cenário impõe uma complexidade adicional aos operadores do sistema elétrico na gestão do equilíbrio entre oferta e procura de energia.

A introdução do conceito de centrais híbridas renováveis em Portugal surge como uma solução inovadora para enfrentar este tipo de desafios. Ao permitir a integração de diferentes fontes de geração, como solar e eólica, e eventualmente sistemas de armazenamento, estas centrais exploram a complementaridade entre as tecnologias para mitigar a variabilidade na produção de energia. A sinergia entre fontes reduz as oscilações naturais associadas à intermitência, promovendo um fornecimento mais estável e previsível. O aproveitamento otimizado do solo é também um dos benefícios mais relevantes da hibridização eólico-solar, permitindo a maximização do uso do mesmo espaço para diferentes tecnologias de geração de energia. Como os aerogeradores ocupam uma área reduzida ao nível do solo, existe um potencial significativo para a instalação de painéis solares no mesmo local, sem comprometer a operação dos parques eólicos. No entanto deve ser tido em conta o sombreamento causado pelos aerogeradores, de modo a que não prejudique a produção do solar fotovoltaico.

As centrais híbridas podem também contribuir de forma mais ativa para a gestão da rede elétrica, aumentando a flexibilidade e a eficiência do sistema. Esta abordagem reforça o compromisso de Portugal em liderar a transição energética, utilizando soluções inovadoras para equilibrar os objetivos ambientais.

Os estudos realizados confirmam a complementaridade entre a produção eólica e solar, evidenciada pelos diagramas em oposição de fase, onde a produção solar atinge o seu pico durante o dia, enquanto a produção eólica tende a ser mais significativa durante a noite e em períodos de menor radiação solar. Além disso, os resultados demonstram que a performance da previsão conjunta da produção eólica e solar supera a previsão isolada da produção eólica, uma vez que a combinação das duas fontes reduz a variabilidade e melhora a fiabilidade da estimativa. Este facto favorece a sua participação no mercado de energia, tornando a oferta renovável mais previsível e competitiva, o que contribui para uma maior integração destas fontes no sistema elétrico.

O presente trabalho foi realizado num formato de parceria com a Jayme da Costa, Energia e Sistemas S.A. (JdC), uma empresa portuguesa focada no desenvolvimento tecnológico de produtos e soluções inovadoras na área da Energia. Sendo também a JdC um dos principais EPCistas em Portugal, também esta possui parques híbridos no seu portfólio. O foco deste trabalho de dissertação centra-se nos Parques Eólicos e Solares de Urze e Alecrim, na ilha da Madeira. Estes parques que foram construídos em 2020, inicialmente apenas com a parte eólica, e foi ampliado em 2024/2025 com produção solar.

Abstract

The following dissertation reflects a strategic approach adopted in Portugal to achieve the goals of decarbonization and carbon neutrality by 2050. With the increasing investment in renewable energy sources, such as solar photovoltaic and wind, new challenges arise related to the intermittency of their availability, given the dependence of these technologies on meteorological factors. This scenario imposes additional complexity on electricity system operators in managing the balance between energy supply and demand.

The introduction of the concept of hybrid renewable power plants in Portugal emerges as an innovative solution to address this type of challenge. By allowing the integration of different generation sources, such as solar and wind, and eventually storage systems, these plants exploit the complementarity between technologies to mitigate variability in energy production. The synergy between sources reduces the natural oscillations associated with intermittency, promoting a more stable and predictable supply. Optimized land use is one of the most relevant benefits of wind-solar hybridization, allowing the maximization of the use of the same space for different energy generation technologies. Since wind turbines occupy a reduced area at ground level, there is significant potential for installing solar panels in the same location, without compromising the operation of wind farms. However, the shading caused by wind turbines must be taken into account so that it does not harm photovoltaic solar production.

Hybrid power plants can also contribute more actively to the management of the electricity grid, increasing the flexibility and efficiency of the system. This approach reinforces Portugal's commitment to leading the energy transition, using innovative solutions to balance environmental objectives.

The studies carried out confirm the complementarity between wind and solar production, evidenced by the phase opposition diagrams, where solar production reaches its peak during the day, while wind production tends to be more significant at night and in periods of lower solar radiation. Furthermore, the results demonstrate that the performance of the joint forecast of wind and solar production outperforms the isolated forecast of wind production, since the combination of the two sources reduces variability and improves the reliability of the estimate. This fact favors their participation in the energy market, making the renewable supply more predictable and competitive, which contributes to a greater integration of these sources in the electrical system.

This work was carried out in partnership with Jayme da Costa, Energia e Sistemas S.A., a Portuguese company focused on the technological development of innovative products and solutions in the Energy sector. As JdC is one of the leading EPC contractors in Portugal, it also has hybrid parks in its portfolio. The focus of this dissertation work is on the Urze e Alecrim Wind and Solar Parks, on the island of Madeira. This parks were built in 2020, initially with only wind power, and were expanded in 2024/2025 with solar production.

Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) das Nações Unidas [15] foram estabelecidos em 2015 como parte da Agenda 2030, um plano de ação global para promover o desenvolvimento sustentável em todas as suas dimensões: social, ambiental e económica. Esses objetivos sucederam os Objetivos de Desenvolvimento do Milénio (ODM), ampliando o seu alcance e estabelecendo metas mais ambiciosas para garantir um futuro mais justo, inclusivo e equilibrado para todas as nações.

Os 17 ODS abrangem uma ampla gama de desafios globais, incluindo erradicação da pobreza, fome zero, saúde e bem-estar, educação de qualidade, igualdade de género, água potável e saneamento, energia acessível e limpa, trabalho digno e crescimento económico, redução das desigualdades, inovação e infraestrutura, ação climática, proteção dos ecossistemas terrestres e marinhos, entre outros. Cada objetivo é complementado por metas específicas e indicadores que permitem monitorizar o progresso até 2030.

Uma das grandes inovações dos ODS é a sua abordagem integrada e interdependente, reconhecendo que o desenvolvimento sustentável só pode ser alcançado se houver equilíbrio entre crescimento económico, proteção ambiental e inclusão social. A transição energética, por exemplo, está diretamente ligada à mitigação das alterações climáticas, ao desenvolvimento tecnológico e à criação de empregos sustentáveis. Da mesma forma, a erradicação da pobreza depende do acesso a recursos básicos como educação, saúde, emprego digno e condições ambientais adequadas.

A implementação dos ODS exige compromisso e ação coordenada entre governos, setor privado, sociedade civil e organismos internacionais. O financiamento sustentável, a inovação tecnológica e a formulação de políticas públicas eficazes são essenciais para que cada país consiga adaptar as metas globais à sua realidade local. Além disso, o papel das energias renováveis, da digitalização e da economia circular é cada vez mais relevante para garantir um desenvolvimento sustentável sem comprometer os recursos das futuras gerações.

Ao adotar os ODS como um guia estratégico para o desenvolvimento global, as Nações Unidas reforçam a importância da cooperação internacional e da responsabilidade coletiva na construção de um mundo mais resiliente, justo e equilibrado. A próxima década será decisiva para a concretização dessas metas, exigindo inovação, mudanças estruturais e um compromisso contínuo para transformar os desafios atuais em oportunidades de progresso sustentável.

Alguns destes objetivos e metas estão estreitamente relacionadas com a implementação de tecnologias de energia renovável, como a hibridização de sistemas fotovoltaicos e eólicos, para promover sustentabilidade energética e mitigação das mudanças climáticas, como é possível verificar na tabela 1.

Particularmente, a hibridização de sistemas eólicos e solares fotovoltaicos pode ser um caminho estratégico para aumentar a participação de fontes renováveis na matriz energética, como

exigido pela meta ODS 7.2.1. Integrando este tipo de tecnologias, é possível reduzir a dependência de fontes de energia não renováveis e contribuir para uma matriz energética mais sustentável e diversificada.

Além disso, também a implementação de sistemas híbridos de energia renovável também permite um uso mais eficiente dos recursos naturais, como o vento e o sol, contribuindo diretamente para a gestão sustentável desses recursos. O estudo da hibridização desses sistemas alinha-se com a meta 12.2.1, promovendo uma produção de energia mais responsável e sustentável.

De igual modo, por outro lado, a análise do impacto da hibridização de parques eólicos e solares pode fornecer subsídios para políticas climáticas mais eficazes, promovendo soluções energéticas que mitiguem as alterações climáticas. Ao integrar essas tecnologias nos planos de desenvolvimento nacional, a dissertação contribui para a redução das emissões de carbono e a adoção de estratégias sustentáveis, estando em concordância com a meta 13.2.2..

Objetivo	Meta	Indicadores e Métricas de Performance
7 - Energias Renováveis e Acessíveis	7.2. - Até 2030, aumentar substancialmente a quota de energia renovável no âmbito energético global	7.2.1. - Quota de participação das energias renováveis no consumo total final de energia
12 - Consumo e Produção Responsáveis	12.2. - Até 2030, alcançar a gestão sustentável e o uso eficiente dos recursos naturais.	12.2.1. Total de emissões de gases com efeito de estufa por ano
13 - Ações Climáticas	13.2. - Integrar as medidas de alterações climáticas nas políticas, estratégias e planeamento nacionais	13.2.2. Total de emissões de gases com efeito de estufa por ano

Tabela 1: Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas relacionados com a dissertação.

Agradecimentos

A realização da presente dissertação não seria possível sem o precioso apoio de várias pessoas.

Em primeiro lugar, agradeço ao Prof. Doutor José Nuno Fidalgo, orientador do projeto, pela dedicação e atenção incansáveis ao longo deste trabalho de dissertação, mesmo perante os tempos atribulados que precederam o seu início, demonstrando sempre disponibilidade e compromisso para guiar este trabalho com rigor e excelência. A sua ajuda foi fundamental não só para o sucesso desta dissertação como também para a conclusão do mestrado.

À equipa de engenharia da Jayme da Costa, em particular ao Engº Duarte Afonso e ao Engº José Queirós, pelo apoio, acompanhamento e prontidão demonstradas ao longo de todo o processo de trabalho que esta dissertação requiriu.

Ao Engº Emanuel Cavaleiro, da Eletricidade da Madeira, pela gentileza na disponibilização de dados fundamentais ao sucesso desta dissertação.

À minha namorada, Sara Barbosa, pela paciência, sacrifício e apoio demonstrados nos momentos mais críticos.

À minha família, Mãe, Pai e Irmão, pela paciência, pelo carinho e por nunca terem deixado de me apoiar nesta etapa da minha vida. Sem dúvida que são o meu pilar e sem vocês nada disto seria possível.

Por fim, uma palavra especial de agradecimento à minha Avó Irene que, mesmo nas fases mais difíceis, me deu forças para continuar.

A todos, o meu Obrigado!

José Coelho

*“Muchas gracias afición,
Esto es para vosotros. Siuu!”*

Cristiano Ronaldo

Índice

1	Introdução	1
1.1	Motivação	1
1.2	Objetivos	3
1.3	Estrutura da Dissertação	3
1.4	Contexto empresarial	3
2	Estado da Arte	6
2.1	Contextualização do Tema	7
2.1.1	Panorama Energético Global e Nacional:	7
2.1.2	Importância da Hibridização:	8
2.1.3	Legislação e Políticas Públicas	8
2.2	Fundamentos Tecnológicos	10
2.2.1	Energia Eólica	10
2.2.2	Energia Solar Fotovoltaica	10
2.2.3	Hibridização de Sistemas Renováveis	11
2.3	Benefícios e Desafios da Hibridização	12
2.3.1	Benefícios	12
2.3.2	Desafios	13
3	Caracterização do Parque	15
3.1	Caracterização do Parque Eólico de Pico da Urze e Alecrim	15
3.1.1	Sub-Parque Eólico do Pico da Urze	17
3.1.2	Sub-Parque Eólico de Alecrim	19
3.2	Caracterização da Central Fotovoltaica de Pico da Urze e Alecrim	20
4	Metodologia	22
4.1	Abordagem Geral	22
4.2	Recursos Solar e Eólico	23
4.2.1	Complementaridade entre os recursos solar e eólico	23
4.2.2	Complementaridade entre os recursos solar e eólico aplicado à região da Madeira, Portugal	25
4.3	Caracterização do processo de previsão da produção de energias renováveis	27
4.3.1	Redes Neurais e Matlab nftool	28
4.4	Previsão de produção energética	29
4.4.1	Previsão da produção eólica	29
4.4.2	Previsão da produção conjunta eólica+solar	30
4.5	Risco de penalidades decorrentes do incumprimento de ofertas no mercado de eletricidade	30

4.5.1	Avaliação e estimação do risco de penalidades aquando de entrada em mercado energético	31
5	Demonstração de Resultados	33
5.1	Previsão da produção eólica	33
5.1.1	Não havendo previsões da velocidade do vento para o dia seguinte	34
5.1.2	Considerando que existem boas previsões do vento para o dia seguinte . .	37
5.2	Previsão da produção conjunta eólica+solar	41
5.3	Estimação do risco de penalidades em ambiente de mercado	44
5.3.1	Análise da distribuição de erros de previsão (Eólico versus Eólico+Solar)	44
5.3.2	Análise da distribuição de erros de previsão - caso Eólico + 3*Solar . . .	46
5.3.3	Conclusões	48
6	Conclusões e Trabalho Futuro	50
6.1	Conclusões	50
6.2	Trabalho Futuro	51
	Referências	53

Lista de Figuras

1.1	Fotografia tirada por drone do Parque de Urze e Alecrim.	2
1.2	Jayme da Costa - Energia e Sistemas, S.A.	5
2.1	Fotografia tirada por drone do Parque de Urze e Alecrim.	7
2.2	Fotografia tirada por drone do Parque de Urze e Alecrim.	14
3.1	Localização do Parque Eólico.	15
3.2	Localização geográfica e limites do Parque.	16
3.3	Planta Geral do Parque Eólico.	17
3.4	Gráfico Produção vs Velocidade do Vento no G1 do Pico da Urze.	18
3.5	Gráfico Produção vs Velocidade do Vento no G2 do Pico da Urze.	18
3.6	Gráfico Produção vs Velocidade do Vento no G1 de Alecrim.	19
3.7	Gráfico Produção vs Velocidade do Vento no G2 de Alecrim.	20
4.1	Gráfico complementaridade teórica entre produção eólica e solar em Portugal. . .	24
4.2	Gráfico Produção Solar média por hora.	25
4.3	Gráfico Produção Eólica de Urze e Alecrim.	26
4.4	Gráfico complementaridade real entre a produção eólica e solar.	26
4.5	Gráfico da produção média horária anual do conjunto entre a produção eólica e solar.	27
5.1	Diagrama representativo da rede neuronal aplicada à previsão da produção eólica.	35
5.2	Progresso do treino na utilizando a ferramenta nftool do Matlab R2024b.	36
5.3	Resumo do progresso de treino - print screen apresentado pelo nftool do Matlab R2024b.	36
5.4	Resultados da previsão Eólica em comparação com a produção real.	37
5.5	Diagrama representativo da rede neuronal aplicada à previsão da produção eólica tendo em conta o vento do próprio dia e hora.	38
5.6	Progresso do treino na utilizando a ferramenta nftool do Matlab R2024b.	39
5.7	Resumo do progresso de treino - <i>print screen</i> apresentado pelo nftool do Matlab R2024b.	40
5.8	Resultados da previsão Eólica em comparação com a produção real.	41
5.9	Resultados da previsão conjunta eólico+solar em comparação com a produção real conjunta de ambas as tecnologias.	43
5.10	Histograma da distribuição de erros para o cenário da produção combinada (Eólico + Solar).	45
5.11	Gráfico dos casos com penalidade para o cenário da produção combinada (Eólico + Solar).	46
5.12	Gráfico dos casos sem penalidade para o cenário da produção combinada (Eólico + Solar).	46

5.13	Histograma da distribuição de erros para o cenário da produção combinada (Eólico + 3 * Solar).	47
5.14	Casos com penalidade para o cenário da produção combinada (Eólico + 3 * Solar).	48
5.15	Casos sem penalidade para o cenário da produção combinada (Eólico + 3 * Solar).	48

Lista de Tabelas

1	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas relacionados com a dissertação.	iv
3.1	Caraterísticas do Parque Eólico do Pico da Urze	17
3.2	Caraterísticas da turbina eólica utilizada no Pico da Urze e Alecrim	18
3.3	Caraterísticas do Parque Eólico de Alecrim	19
3.4	Caraterísticas conjunto dos parques constituintes da Central Fotovoltaica do Pico da Urze e Alecrim, respetivamente	21
5.1	Tabela de penalidades.	47

Lista de Acrónimos

ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
SDG	Sustainable Development Goals
ODM	Objetivos de Desenvolvimento do Milénio
JdC	Jayme da Costa, Energia e Sistemas, S.A.
EDP	Energias de Portugal
PT	Portugal
EMS	Sistemas de gestão de energia
RNT	Rede Nacional de Transporte
EPC	Engineering, Procurement e Construction
G1	Gerador 1
G2	Gerador 2
PEUA	Parque Eólico de Urze e Alecrim
CFUA	Central Fotovoltaica de Urze e Alecrim
ANN	Artificial Neural Network
BESS	Battery Energy Storage System

Capítulo 1

Introdução

A presente dissertação foi realizada no âmbito do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores - Especialização em Energia, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

O primeiro capítulo tem como finalidade introduzir o trabalho realizado no domínio da dissertação "Análise do impacto da hibridização de parques eólicos com solar fotovoltaico". Neste enquadramento é apresentada a motivação, os objetivos principais a atingir e ainda a estrutura do documento.

1.1 Motivação

"O futuro de Portugal está no vento e no sol. Temos o privilégio de dispor destes recursos, mas também a responsabilidade de os usar sabiamente.- João Pedro Matos Fernandes. Ex-Ministro do Ambiente e da Ação Climática de Portugal. [22]



Figura 1.1: Fotografia tirada por drone do Parque de Urze e Alecrim.

A transição energética é um dos pilares fundamentais para a mitigação das alterações climáticas e a construção de um futuro sustentável. Portugal, inserido no contexto europeu e mundial, destaca-se como um dos países líderes na integração de fontes renováveis na sua matriz energética, graças à abundância de recursos naturais, como o vento e o sol, e a uma visão estratégica alinhada com os objetivos da União Europeia para a neutralidade carbónica até 2050 [21].

A hibridização de parques eólicos com sistemas fotovoltaicos surge como uma solução inovadora para maximizar a eficiência energética e otimizar o uso dos recursos existentes. Esta abordagem combina duas das fontes renováveis mais maduras, complementando os padrões sazonais e diários de geração e promovendo uma utilização mais equilibrada da infraestrutura de rede elétrica. No contexto português, onde o setor eólico já contribui significativamente para a produção de eletricidade, a integração de sistemas fotovoltaicos nos mesmos parques é uma evolução natural, com potencial para melhorar a estabilidade do sistema elétrico e reduzir custos associados à intermitência das energias renováveis. Além disso, esta solução permite otimizar o uso do terreno, que passa a servir simultaneamente para dois tipos de produção de energia, evitando a necessidade de ocupação de novas áreas em outros locais e contribuindo para uma gestão territorial mais eficiente e sustentável.

Portugal tem dado passos importantes na promoção deste tipo de projetos, apoiado por um quadro legislativo favorável. O Decreto-Lei nº 15/2022 [36], que regula o setor das energias renováveis no país, introduz mecanismos que facilitam a implementação de projetos híbridos e incentiva o aproveitamento de pontos de ligação à rede já existentes. Esta legislação, em sintonia com as metas do European Green Deal [20] e da Diretiva Europeia para Energias Renováveis (RED II) [9], cria um ambiente propício para a adoção de soluções híbridas, reforçando o compromisso

do país com a sustentabilidade energética.

No cenário global, a hibridização também ganha destaque como uma técnica essencial para atender à crescente procura por eletricidade limpa e combater os desafios da intermitência. Nesta dissertação são explorados o impacto, os benefícios e os desafios da integração de sistemas híbridos eólico-solares.

1.2 Objetivos

O objetivo da presente dissertação passa por analisar a viabilidade técnica da integração de um sistema solar fotovoltaico num sistema eólico já existente. O foco principal é evidenciar as vantagens técnicas da hibridização, nomeadamente a redução da intermitência e a melhoria da previsibilidade da produção. Para isso, serão analisados os impactos da combinação das duas fontes renováveis, sem considerar os custos de instalação ou de exploração, uma vez que o objetivo é sobretudo demonstrar os benefícios operacionais e estratégicos desta solução. Deste modo, será necessário cumprir os seguintes pontos:

- Análise de potenciais benefícios da hibridização eólico com solar fotovoltaico;
- Análise dos possíveis riscos associados a este tipo de hibridização;
- Análise dos ganhos em termos de previsibilidade da produção do parque híbrido;
- Análise da hipótese de redução das flutuações da produção;
- Avaliação do impacto da hibridização na estabilidade da oferta ao mercado;

1.3 Estrutura da Dissertação

Para além da introdução, esta dissertação contém mais 5 capítulos.

No capítulo 2, é descrito o estado de arte.

No capítulo 3, é realizada uma caracterização detalhada do parque do Paúl da Serra.

No capítulo 4, é descrita a metodologia dos trabalhos realizados e os casos de estudo relativos a processos de previsão tanto do eólico como do solar.

No capítulo 5, são demonstrados os resultados obtidos do trabalho realizado e apresentado no capítulo anterior.

No capítulo 6, são apresentadas as conclusões retiradas assim como sugestões de possíveis trabalhos futuros.

1.4 Contexto empresarial

Este trabalho, em conjunto com a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto [18], foi realizado no âmbito de um projeto da Jayme da Costa - Energia e Sistemas, S.A. [27]

A Jayme da Costa é uma empresa portuguesa com mais de um século de história, fundada em 1916 por Artur Augusto dos Santos, Joaquim Mendes da Costa e Artur Martins Nogueira, inicialmente sob o nome “Santos, Costa Nogueira, Lda.”. Ainda nesse ano, Jayme da Costa passou a integrar a sociedade, desempenhando um papel determinante no seu crescimento, o que levou à mudança da designação para “Jayme da Costa, Limitada”.

A empresa deu os seus primeiros passos em Lisboa, focando-se na fabricação e comercialização de equipamentos elétricos de baixa e média tensão. Desde cedo, destacou-se pela qualidade e inovação dos seus produtos, tornando-se uma referência no processo de eletrificação do país. Durante o período colonial, manteve fábricas em Angola e Moçambique, desempenhando um papel relevante nesses mercados. Após a Revolução de 1974, apesar da instabilidade económica e política, continuou a ser um dos principais fornecedores de infraestruturas elétricas, colaborando estreitamente com as entidades que, mais tarde, dariam origem à Energias de Portugal (EDP).

Na década de 1980, a empresa enfrentou dificuldades financeiras devido à crise económica, o que levou a uma reestruturação profunda. Em 1989, mudou-se para Grijó, onde se encontra atualmente a sua sede. Com essa modernização, passou a adotar normas internacionais de qualidade, obtendo certificações como a EN NP ISO 9002 e, mais tarde, a ISO 9001 e a ISO 14001.

A partir dessa fase de reorganização, a Jayme da Costa registou um forte crescimento, apostando na prestação de serviços e no setor das energias renováveis, além de expandir a sua presença internacional, especialmente em Angola e França. Em 2020, ocorreu uma alteração na estrutura acionista com a entrada da Core Capital e da Visabeira Global, fortalecendo a empresa e impulsionando o seu crescimento.

Em 2023, a Jayme da Costa passou a integrar totalmente o grupo Visabeira Global, reforçando a sua estabilidade financeira e operacional através da inclusão num grupo empresarial diversificado e internacional. Atualmente, a empresa é um dos principais agentes no setor das energias renováveis e da distribuição de energia em Portugal, participando ativamente no desenvolvimento de parques fotovoltaicos pelo país. Paralelamente, tem uma forte presença no setor dos transportes, estando envolvida em diversos trabalhos tanto do Metro do Porto como do Metro de Lisboa.

Neste contexto, a Central Fotovoltaica de Urze e Alecrim irá ser o objeto de estudo para a investigação acerca da possibilidade de instalação de uma central fotovoltaica tendo em conta a disponibilidade dos terrenos do parque eólico.

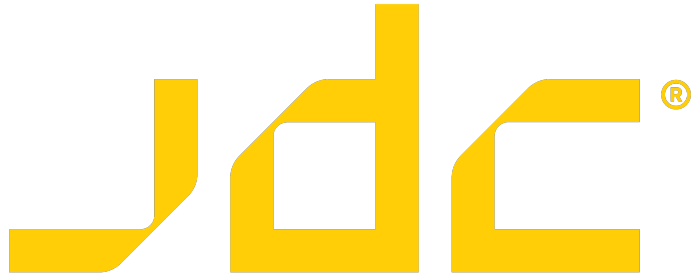


Figura 1.2: Jayme da Costa - Energia e Sistemas, S.A.

Capítulo 2

Estado da Arte

A crescente necessidade de transição para sistemas energéticos sustentáveis tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias inovadoras e a integração de fontes renováveis. Entre as soluções emergentes, a hibridização de parques eólicos com sistemas fotovoltaicos destaca-se pela sua capacidade de mitigar a intermitência das fontes renováveis, aumentar a eficiência dos recursos disponíveis e otimizar a infraestrutura existente.

Neste contexto, este capítulo explora os principais avanços tecnológicos, os benefícios e desafios associados à hibridização, e o enquadramento legal que facilita a sua implementação. Particularmente em Portugal, um país com elevado potencial eólico e solar, e metas ambiciosas de descarbonização, o tema adquire relevância especial. Esta secção apresenta uma revisão crítica da literatura científica, descreve os fundamentos tecnológicos envolvidos e analisa as políticas e ferramentas que têm moldado esta abordagem inovadora, destacando as lacunas e as oportunidades que guiam o avanço desta área de estudo.



Figura 2.1: Fotografia tirada por drone do Parque de Urze e Alecrim.

2.1 Contextualização do Tema

2.1.1 Panorama Energético Global e Nacional:

- Tendências mundiais no uso de energias renováveis

A transição energética global tem sido um dos pilares fundamentais para o combate às mudanças climáticas. Nas últimas décadas, o mundo testemunhou uma crescente adoção de fontes de energia renovável, com destaque para a solar e a eólica. Este avanço foi estimulado por vários fatores, incluindo os compromissos assumidos no Acordo de Paris [8], a pressão por parte de sociedades e governos para a redução de emissões de gases de efeito estufa e a queda significativa nos custos das tecnologias. Em 2022, pela primeira vez, a capacidade instalada de fontes renováveis superou a de combustíveis fósseis em vários países, marcando um ponto de inflexão no setor energético global [1]. Apesar do progresso, os desafios permanecem, especialmente no que diz respeito à intermitência e à necessidade de armazenamento em larga escala.

- Situação energética de Portugal no contexto europeu

Portugal tem sido um dos líderes na transição para uma matriz energética mais limpa e sustentável. Beneficiando-se de condições naturais favoráveis, como elevados índices de radiação solar e regimes de vento consistentes, o país tem alcançado resultados expressivos no uso de energias renováveis. Em 2022, aproximadamente 60% da eletricidade consumida foi proveniente de fontes renováveis, com destaque para a energia eólica, que contribuiu

com cerca de 26%, e a solar, que apresentou uma penetração crescente. No âmbito do Plano Nacional de Energia e Clima (PNEC 2030) [35], Portugal visa atingir 80% de eletricidade renovável até 2030 e neutralidade carbónica até 2050, consolidando-se como um modelo para outros países europeus.

2.1.2 Importância da Hibridização:

- Desafios da intermitência nas fontes renováveis

A intermitência é um dos principais entraves para a expansão de fontes renováveis como solar e eólica. Enquanto a energia solar está diretamente ligada à disponibilidade de luz solar, sendo interrompida durante a noite e limitada por condições meteorológicas, a energia eólica depende de padrões de vento que variam significativamente ao longo do dia e das estações. Essa imprevisibilidade dificulta a previsão da geração, exigindo soluções tecnológicas que permitam mitigar seus impactos na rede elétrica. Além disso, a intermitência pode levar ao subaproveitamento de recursos, como subestações e linhas de transmissão.

- Vantagens da integração de eólica e solar em projetos híbridos

A hibridização surge como uma solução eficaz para mitigar os desafios da intermitência, ao combinar duas fontes de geração que se complementam. Em Portugal, por exemplo, os ventos tendem a ser mais fortes à noite, enquanto a radiação solar atinge seu pico durante o dia. Essa complementaridade permite uma geração mais contínua e previsível, reduzindo a dependência de fontes de backup e contribuindo para a estabilidade da rede. Além disso, a integração de sistemas híbridos pode otimizar o uso de infraestrutura existente, reduzindo custos e aumentando a eficiência económica dos projetos.

2.1.3 Legislação e Políticas Públicas

- Enquadramento regulatório (Decreto-Lei n.º 15/2022 e outros documentos pertinentes) - PT

O Decreto-Lei n.º 15/2022 [36], recentemente implementado em Portugal, representa um marco no enquadramento legal para projetos de energias renováveis, incluindo sistemas híbridos. Este documento não apenas simplifica o processo de licenciamento, mas também incentiva o uso eficiente de recursos partilhados, como subestações e pontos de conexão. Além disso, promove o desenvolvimento de novos modelos de negócio, incluindo contratos bilaterais de longo prazo e participação em mercados de capacidade, aumentando a atratividade económica dos projetos híbridos.

- Incentivos e programas de apoio à implementação de sistemas híbridos - PT

Portugal conta com vários instrumentos de apoio financeiro, tanto em âmbito nacional quanto europeu. O Plano de Recuperação e Resiliência (PRR) [34] destina fundos significativos para a transição energética, incentivando projetos que combinem múltiplas fontes

renováveis. Estes incentivos incluem reduções fiscais, subsídios diretos e financiamentos a taxas reduzidas, que visam mitigar os custos iniciais elevados associados à hibridização.

- Diretiva RED II e objetivos do European Green Deal

A Diretiva RED II (Renewable Energy Directive) da União Europeia estabelece uma meta de 32% de energias renováveis no consumo final de energia até 2030 [9]. Este objetivo é reforçado pelo European Green Deal, que propõe uma redução de 55% nas emissões de gases de efeito estufa até o mesmo ano [20]. Para isso, os Estados-membros são incentivados a desenvolver soluções inovadoras, como sistemas híbridos, que maximizem o potencial das fontes renováveis.

- Políticas de outros países líderes em sistemas híbridos

Em países como a Alemanha, os Estados Unidos e a China, as políticas públicas têm desempenhado um papel crucial no avanço dos sistemas híbridos. Esses países oferecem subsídios substanciais, parcerias público-privadas e incentivos regulatórios que promovem a adoção de tecnologias de ponta. A Alemanha, por exemplo, lidera em iniciativas de armazenamento combinado, enquanto a China investe fortemente na integração de infraestruturas renováveis.

- Desafios da intermitência nas fontes renováveis

A intermitência é um dos maiores desafios enfrentados pelas fontes renováveis de energia, como a eólica e a solar. A natureza variável dessas fontes significa que a geração de eletricidade não ocorre de maneira constante, dependendo diretamente das condições climáticas. Por exemplo, a energia solar só é gerada durante o dia, com níveis de produção que variam conforme a intensidade da radiação solar, enquanto a energia eólica está sujeita a flutuações nos padrões de vento, que podem ser sazonais ou imprevisíveis. Essa variabilidade cria dificuldades na previsibilidade e no equilíbrio entre oferta e demanda, exigindo soluções técnicas e operacionais para evitar problemas na estabilidade da rede elétrica. A legislação desempenha um papel fundamental na mitigação desses desafios. O Decreto-Lei n.º 15/2022, por exemplo, ao simplificar processos de licenciamento e promover o uso de infraestruturas compartilhadas, facilita a implementação de soluções híbridas que combinam geração eólica e solar, maximizando a utilização de recursos [36]. Adicionalmente, a Diretiva RED II [9] e os objetivos do European Green Deal [20] incentivam a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias avançadas de armazenamento e gestão de energia, que são cruciais para equilibrar a intermitência e integrar maior volume de fontes renováveis na rede elétrica.

- Vantagens da integração de eólica e solar em projetos híbridos

A integração de sistemas eólicos e solares em projetos híbridos traz inúmeras vantagens que vão além da simples soma de suas capacidades individuais. Primeiramente, a complementaridade entre essas fontes permite suavizar a intermitência na geração de energia. Durante o

dia, a energia solar garantidamente alcança o seu pico, enquanto que a geração eólica pode ser mais elevada durante a noite ou em dias nublados. Esse equilíbrio contribui para uma produção mais estável e previsível ao longo do tempo, o que é fundamental para reduzir a necessidade de fontes fósseis como backup e para melhorar a fiabilidade do sistema elétrico.

A legislação nacional e europeia reconhece essas vantagens e cria mecanismos para as incentivar. O Decreto-Lei n.º 15/2022 [36] promove explicitamente a partilha de infraestruturas, como subestações e pontos de conexão, reduzindo custos de capital. No contexto do European Green Deal [20], as políticas europeias encorajam a integração de fontes renováveis, viabilizando projetos que melhorem o uso de terrenos e otimizem a utilização de recursos naturais. Além disso, programas como o PRR [34] fornecem suporte financeiro para soluções híbridas, que demonstram ser estratégicas para atender às metas climáticas e energéticas.

Em termos económicos, os projetos híbridos aumentam o fator de capacidade das instalações, permitindo uma melhor utilização dos ativos ao longo do tempo e, consequentemente, um maior rendimento. No contexto português, onde tanto a energia eólica quanto a solar já desempenham papéis significativos, a combinação dessas tecnologias em um único projeto representa uma evolução natural e estratégica. Essa abordagem também contribui para atender às metas de descarbonização e para a transição energética em direção a um futuro mais sustentável.

2.2 Fundamentos Tecnológicos

2.2.1 Energia Eólica

– Perfis de geração e variabilidade sazonal/diária

A energia eólica é caracterizada pela sua dependência de padrões de vento, que variam significativamente ao longo do tempo e do espaço. Durante os meses de inverno, é comum observar maiores índices de geração devido à intensificação de sistemas atmosféricos, enquanto no verão, os ventos tendem a ser mais fracos e menos regulares. Além disso, a variabilidade diária é influenciada por fatores locais, como a topografia e as condições climáticas. Esses aspectos reforçam a necessidade de uma planificação criteriosa e de ferramentas de previsão para garantir a estabilidade da rede e a otimização da produção. [42]

2.2.2 Energia Solar Fotovoltaica

– Potencial de geração solar em Portugal e sua complementaridade com o vento

Portugal apresenta condições ideais para a exploração da energia solar, com elevados índices de radiação ao longo de todo o ano. Regiões como o Alentejo e o Algarve possuem algumas das melhores taxas de incidência solar da Europa, com médias anuais que ultrapassam 2.000 horas de sol [10]. A complementaridade com a energia eólica é particularmente vantajosa, dado que os períodos de maior radiação geralmente coincidem com baixa atividade dos ventos, e vice-versa. Essa sinergia é essencial para maximizar a eficiência e a estabilidade da produção em sistemas híbridos. [11]

2.2.3 Hibridização de Sistemas Renováveis

– Conceito e definições de sistemas híbridos

Os sistemas híbridos de energia renovável referem-se à integração de diferentes fontes de geração de energia, como solar fotovoltaica e eólica, combinadas em uma única solução com o objetivo de otimizar a produção, melhorar a confiabilidade e maximizar a eficiência do sistema. Essa integração é feita com o auxílio de tecnologias avançadas de gestão de energia, que garantem que as características complementares das fontes sejam aproveitadas ao máximo. [29]

Num sistema híbrido, diferentes fontes renováveis trabalham em conjunto para fornecer uma produção de energia mais constante e previsível, reduzindo os desafios associados à intermitência de cada uma delas. Por exemplo, em muitos locais, os ventos são mais intensos durante a noite, enquanto a radiação solar está disponível durante o dia. Essa complementaridade natural reduz significativamente os períodos de baixa geração, criando um perfil de produção mais equilibrado.

Por outro lado, os sistemas híbridos frequentemente incorporam soluções de armazenamento de energia, como baterias, que ajudam a gerir os excedentes de produção e atender à procura durante períodos em que nenhuma das fontes está disponível [7]. Este aspeto é crucial para garantir a estabilidade da rede.

– Sistemas de integração: sistemas de gestão de energia e de armazenamento de baterias

A implementação de sistemas híbridos exige tecnologias avançadas de integração que possibilitem a operação simultânea e eficiente de diferentes fontes de energia [26]. Entre estas tecnologias, destacam-se:

- * Sistemas de gestão de energia (EMS): Um EMS é o "cérebro" de um sistema híbrido, responsável por coordenar a produção, o armazenamento e o consumo de energia em tempo real. Ele otimiza o uso das fontes disponíveis, priorizando a fonte mais económica ou sustentável e armazenando o excesso para momentos de menor produção. [17]

- * Soluções de armazenamento (baterias): A intermitência característica das fontes renováveis torna o armazenamento um componente indispensável. As baterias de íons de lítio são atualmente a tecnologia predominante, devido à sua alta eficiência e longa vida útil. No entanto, outras tecnologias, como baterias de fluxo e sistemas de hidrogénio, estão emergindo como alternativas promissoras, especialmente para projetos em larga escala. [6]
- Exemplos práticos de hibridização em operação (casos internacionais e nacionais)
Projetos em Portugal, como o parque eólico-solar de Mina de Orgueirel (Sabugal, Guarda) [16], Solara 4 (Alcoutim, Faro) [3], e no mundo, como iniciativas na Alemanha, demonstram a viabilidade técnica e económica da hibridização.

2.3 Benefícios e Desafios da Hibridização

2.3.1 Benefícios

- Benefícios Ambientais

A hibridização reduz emissões de carbono ao otimizar o uso de fontes renováveis e minimizar a dependência de combustíveis fósseis [14].

- Redução das emissões de carbono

A hibridização de sistemas renováveis oferece um impacto positivo direto na redução de emissões de CO₂, substituindo fontes fósseis por soluções limpas e sustentáveis. A complementaridade das fontes solar e eólica permite maximizar a geração renovável e minimizar a necessidade de fontes térmicas de backup.

- Otimização do uso de recursos e mitigação de impactos ambientais

A combinação de tecnologias permite uma melhor utilização de terrenos e infraestruturas. Ao instalar painéis solares em terrenos já utilizados para aerogeradores, desde que se tenha em conta que o sombreamento causado pelos aerogeradores não afeta a produção fotovoltaica, evita-se a necessidade de novas áreas, preservando ecossistemas sensíveis e reduzindo impactos ambientais. [12]

- Redução de custos de infraestrutura

A partilha de infraestruturas, como subestações e linhas de transmissão, diminui significativamente os custos de capital e operação. Além disso, a modularidade dos sistemas híbridos facilita a sua expansão conforme a demanda energética cresce.

- Aumento do fator de capacidade e eficiência energética

O fator de capacidade de um sistema híbrido é significativamente superior ao de sistemas individuais. Essa característica melhora a eficiência económica e a previsibilidade da geração, trazendo mais segurança para investidores e operadores. Uma vez que a potência no

ponto de interligação num sistema híbrido não é igual à soma da potência instalada das duas fontes individualmente, haverá uma maior estabilização da rede, sendo o valor de potência entregue à rede mais constante do que para casos dependentes de apenas uma fonte de energia renovável. [38]

- Melhor utilização de terrenos e pontos de ligação à rede

A hibridização otimiza a ocupação de terrenos ao combinar instalações em áreas já utilizadas por parques eólicos ou solares, reduzindo a pressão para novos desenvolvimentos em áreas virgens.

2.3.2 Desafios

- Complexidade na gestão de geração combinada

Operar e gerenciar sistemas híbridos requer soluções tecnológicas avançadas e especializadas. A variabilidade das fontes adiciona camadas de complexidade na previsão e alocação de recursos, exigindo ferramentas sofisticadas, como algoritmos de machine learning, para atingir o máximo desempenho.

- Impactos na estabilidade da rede elétrica

A potência entregue no ponto de interligação de um parque híbrido eólico-solar tende a ser mais estável, pois as duas fontes complementam-se. Quando a produção eólica é baixa, a solar geralmente está em alta, e vice-versa. Isso reduz a intermitência, melhora a previsibilidade da geração e otimiza o uso da infraestrutura elétrica, garantindo uma entrega de potência mais próxima da nominal ao longo do dia [13]. No entanto, a integração de múltiplas fontes intermitentes pode criar desafios na estabilidade da rede, especialmente em regiões com infraestrutura obsoleta. Picos de produção inesperados ou períodos de baixa geração podem exigir soluções robustas de armazenamento e sistemas de resposta rápida.

- Possível necessidade de investimentos em armazenamento e sistemas de controlo no futuro

Os custos associados à implementação de baterias e sistemas de gestão de energia ainda são significativos. Embora estejam em queda, estas tecnologias representam uma parcela substancial do investimento inicial. Políticas públicas e incentivos financeiros podem ser decisivos para viabilizar esses projetos. Sendo que a potência de interligação é inferior à potência máxima possível de produzir caso ambas as tecnologias estejam a produzir a 100%, o armazenamento em períodos de grande produção e podendo entregar a mesma potência em momentos de maior escassez dos recursos é uma solução que se enquadra bastante bem neste tipo de hibridizações. [24]



Figura 2.2: Fotografia tirada por drone do Parque de Urze e Alecrim.

Capítulo 3

Caracterização do Parque

O capítulo seguinte irá apresentar pormenorizadamente o projeto do Parque Eólico de Pico da Urze e Alecrim, situado na ilha da Madeira.

3.1 Caracterização do Parque Eólico de Pico da Urze e Alecrim

O trabalho da presente dissertação consiste na inclusão de um sistema solar fotovoltaico no parque eólico já existente de Pico da Urze e Alecrim. [19] Este parque está localizado na ilha da Madeira, nomeadamente no Paúl da Serra, junto à Ribeira Brava, como é possível verificar nas imagens 3.1 e 3.2.

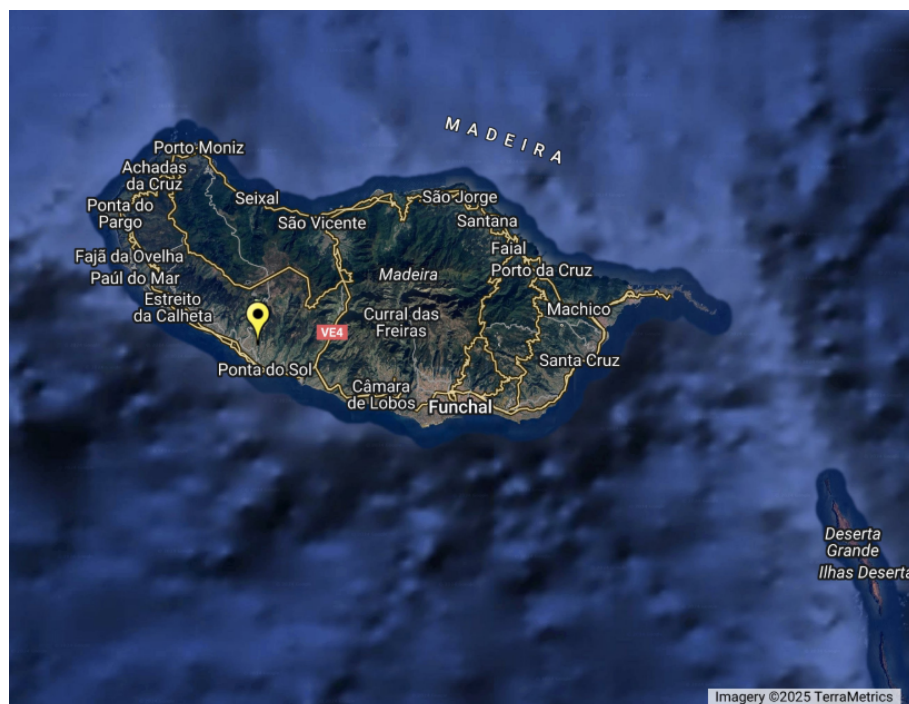


Figura 3.1: Localização do Parque Eólico.

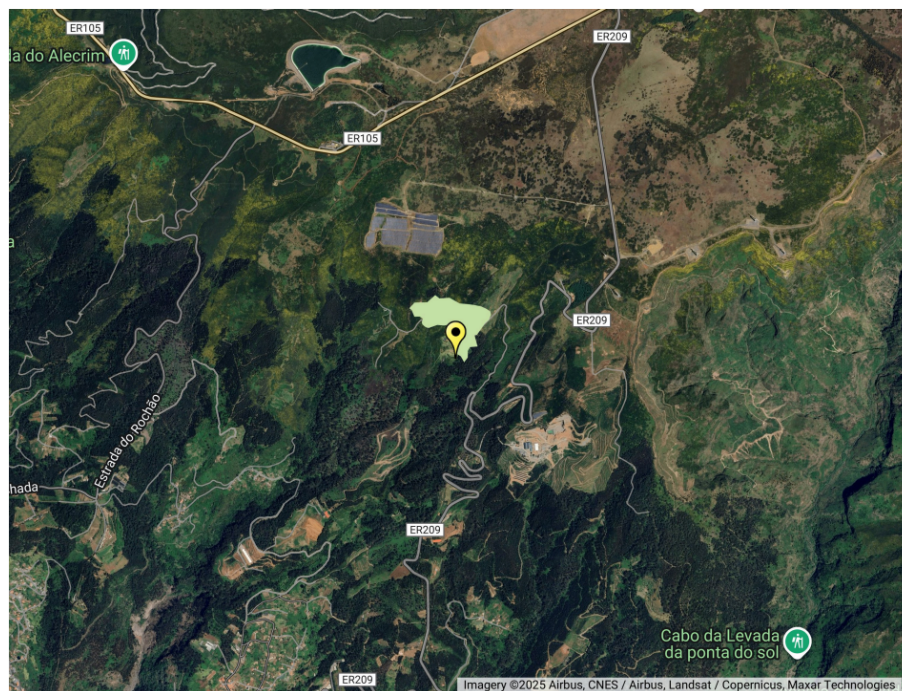


Figura 3.2: Localização geográfica e limites do Parque.

Este aproveitamento eólico é constituído por dois sub-parques eólicos, denominados por Pico da Urze e Alecrim.

O Parque Eólico do Pico da Urze e Alecrim constituem um total de 18MW de potência instalada, sendo que 9MW correspondem ao Pico da Urze e os restantes 9MW correspondem a Alecrim. Na figura 3.3, é possível observar a planta geral do parque eólico do Pico da Urze e Alecrim.

Este parque encontra-se ligado à RNT a 220kV na subestação do Loiral.

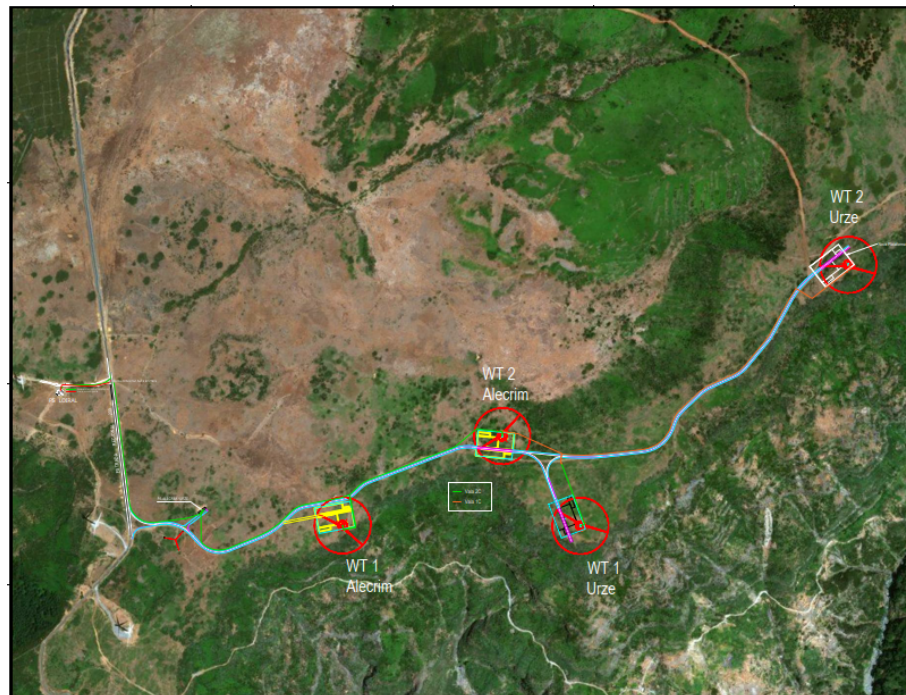


Figura 3.3: Planta Geral do Parque Eólico.

3.1.1 Sub-Parque Eólico do Pico da Urze

O Sub-Parque Eólico do Pico da Urze localiza-se no Paul da Serra, no concelho da Calheta, na ilha da Madeira, e possui uma potência instalada total de 9MW de eólico. Neste parque estão instalados um total de 2 aerogeradores do modelo L136-4.5MW da Lagerwey [2]. A altura da torre é de 120 metros. O Parque Eólico do Pico da Urze encontra-se em funcionamento desde 2020. A tabela 3.1 apresenta as características principais do parque referido.

Localização	Paul da Serra, Calheta
Capacidade instalada (kW)	9000
Nº Turbinas Eólicas	2
Ano de início de operação	2020

Tabela 3.1: Características do Parque Eólico do Pico da Urze

Nos gráficos 3.4 e 3.5, é possível comparar o comportamento da produção em relação à velocidade do vento sentida na nacelle tanto para o aerogerador 1 como para o aerogerador 2 de Urze. Analisando, é possível observar que o gráfico da produção acompanha sensivelmente a velocidade do vento, o que se pode concluir que estas variáveis estão diretamente relacionadas.

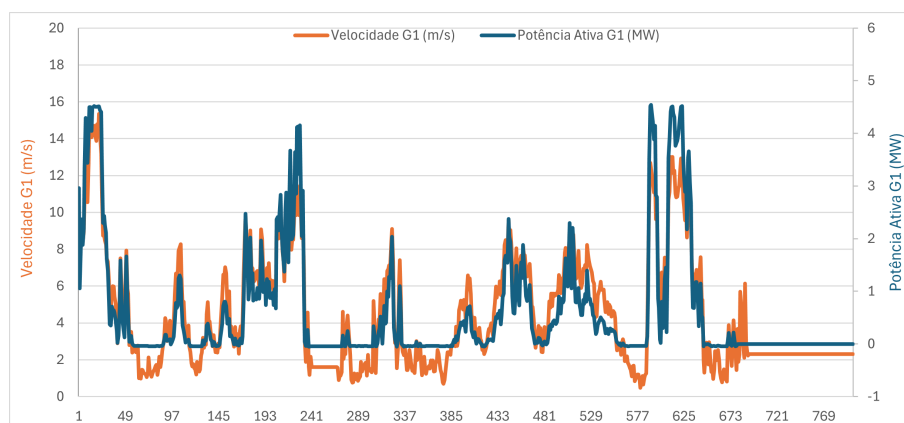


Figura 3.4: Gráfico Produção vs Velocidade do Vento no G1 do Pico da Urze.

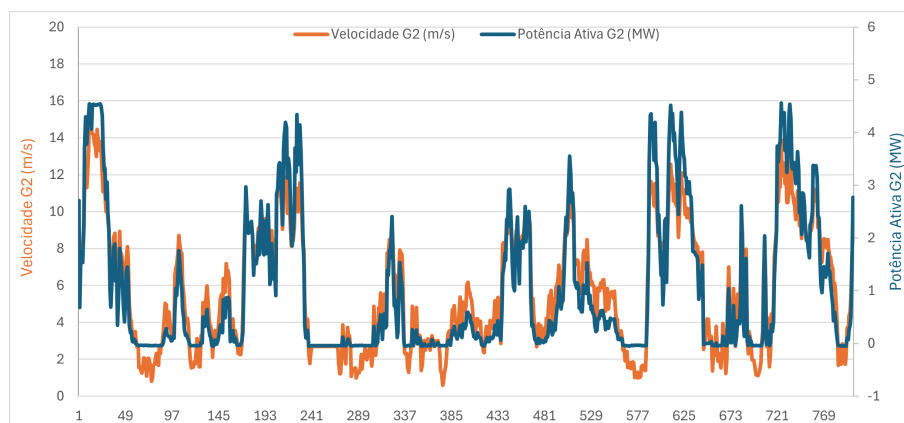


Figura 3.5: Gráfico Produção vs Velocidade do Vento no G2 do Pico da Urze.

Os aerogeradores utilizados no aproveitamento eólico do Pico da Urze são do modelo L136-4.5MW da LAGERWEY, fornecidas pela ENERCON. Desde o ano de 2018 que a LAGERWAY deixou o ativo, no entanto, o fabricante foi assumido pela ENERCON.

De seguida, é possível observar a tabela 3.2 onde estão presentes as principais características deste aerogerador.

Caraterística	Turbina Eólica
Turbina Eólica	L136
Potência nominal (kW)	4500
Velocidade do vento nominal (m/s)	14,5
Velocidade do vento cut-in (m/s)	2,5
Velocidade do vento cut-out (m/s)	25
Diâmetro do rotor (m)	136
Número de pás	3

Tabela 3.2: Características da turbina eólica utilizada no Pico da Urze e Alecrim

3.1.2 Sub-Parque Eólico de Alecrim

O Sub-Parque Eólico de Alecrim também se localiza no Paul da Serra, no concelho da Calheta, na ilha da Madeira, e possui uma potência instalada total de 9MW. Neste parque estão instalados um total de 2 aerogeradores do modelo L136-4.5MW da Lagerwey. A altura da torre é de 120 metros. O Parque Eólico de Alecrim encontra-se em funcionamento desde 2020. A tabela 3.3 apresenta as características principais do parque referido.

Localização	Paul da Serra, Calheta
Capacidade instalada (kW)	9000
Nº Turbinas Eólicas	2
Ano de início de operação	2020

Tabela 3.3: Características do Parque Eólico de Alecrim

Do mesmo modo que no Pico da Urze se verifica que a linha da produção de energia acompanha a velocidade do vento medida nas nacelles dos aerogeradores, o mesmo se aplica para Alecrim. Visualizando os gráficos 3.6 e 3.7, é possível concluir que a produção energética eólica está diretamente relacionada com a velocidade do vento praticada.

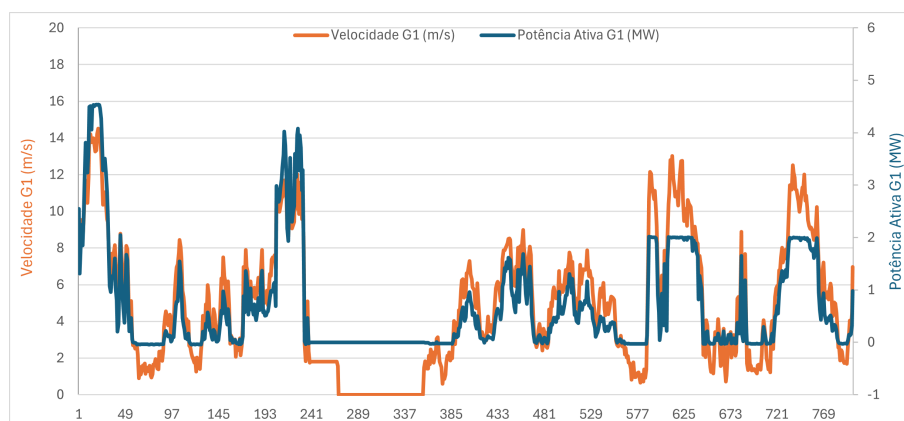


Figura 3.6: Gráfico Produção vs Velocidade do Vento no G1 de Alecrim.

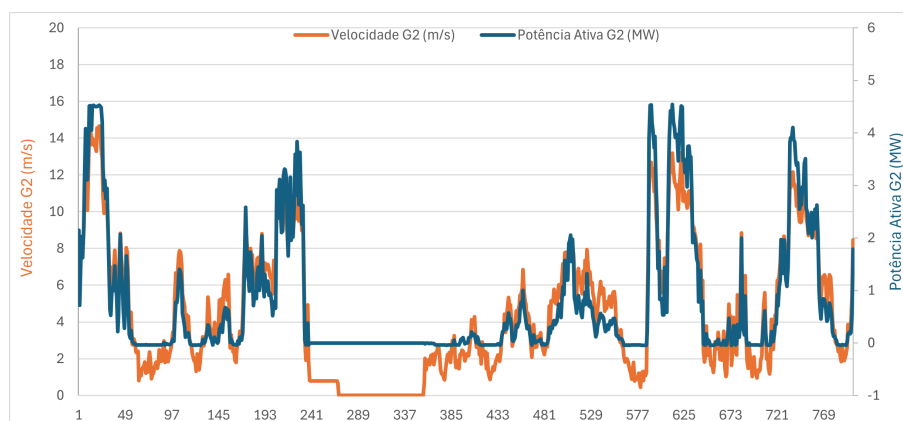


Figura 3.7: Gráfico Produção vs Velocidade do Vento no G2 de Alecrim.

Para Alecrim, a escolha dos aerogeradores tomou o mesmo rumo que o Pico da Urze, uma vez que este parque possui características semelhantes ao do Pico da Urze, tanto de localização como de capacidade. Assim sendo, os aerogeradores selecionados foram também do modelo L136-4.5MW da LAGERWEY, fornecidas pela ENERCON. As suas características estão visíveis no subcapítulo anterior, na tabela 3.2.

3.2 Caracterização da Central Fotovoltaica de Pico da Urze e Alecrim

A central fotovoltaica de Urze e Alecrim (CFUA), foi instalada e dimensionada com um propósito: complementar a produção energética eólica em horas de menor produção/vento. Esta central, a CFUA, pode também ser dividida em dois sub-parques fotovoltaicos, nomeadamente, a Central Fotovoltaica do Pico da Urze e a Central Fotovoltaica de Alecrim. A capacidade máxima eólica por parque é de 9MW (4,5 MW por aerogerador) e a capacidade de injeção no ponto de interligação na rede é também de 9MW. No entanto, a instalação fotovoltaica acrescentada possui uma capacidade de 3MW em Urze mais 3.5MW em Alecrim, constituindo um conjunto de 6.5MW de potência proveniente do solar. Assim, em períodos em que o parque eólico não tenha o potencial para produzir à máxima potência, as centrais fotovoltaicas irão contribuir com a produção energética em falta de modo a que o conjunto dos parques eólico e solar esteja a produzir no máximo da sua capacidade, se possível.

Na tabela 3.4, é possível verificar as principais características de cada parque solar pertencente à Central Fotovoltaica de Urze e Alecrim.

Caraterística	Central Fotovoltaica
Potência nominal da central (MW)	3 + 3.5
Marca do Pannel Fotovoltaico	Seraphim
Modelo do Pannel Fotovoltaico	SRP-620-BTZ-BG-182-2023V2.1
Potência Nominal do Pannel Fotovoltaico	620 Wp
Nº de Painéis Fotovoltaicos	10080
Marca do Inversor	TBEA Xi'an Electric
Modelo do Inversor	TS250KTL-HV-50Hz-40A-V2.0-TUV
Potência Nominal do Inversor	250 kWac
Nº de Inversores	12 + 14

Tabela 3.4: Caraterísticas conjunto dos parques constituintes da Central Fotovoltaica do Pico da Urze e Alecrim, respetivamente

Capítulo 4

Metodologia

O processo de previsão desempenha um papel fundamental na operação eficiente de parques eólicos e solares, permitindo uma melhor gestão da oferta de energia e a otimização do planeamento da rede elétrica. A previsão de produção, baseada em modelos matemáticos e algoritmos avançados, estima a quantidade de energia que será gerada num determinado período. Essas previsões são essenciais para os operadores do sistema elétrico. Além disso, previsões precisas permitem que os produtores de energia renovável maximizem a rentabilidade dos seus ativos, otimizando a participação no mercado de eletricidade e minimizando penalizações por desvios na entrega de energia.

A previsão de recursos naturais, como radiação solar e velocidade do vento, é um passo essencial para garantir a precisão da previsão de produção. Essa capacidade de antecipação permite que os parques ajustem sua operação de forma eficiente, planeiem a manutenção de forma preventiva e reduzam os impactos da variabilidade inerente às fontes renováveis. No contexto da transição energética e da descarbonização, a melhoria contínua dos métodos de previsão torna-se cada vez mais relevante para aumentar a integração das energias renováveis no sistema elétrico e garantir um fornecimento estável e sustentável.

O capítulo seguinte irá servir de introdução e caracterização da metodologia utilizada durante os trabalhos realizados ao longo do processo de dissertação.

4.1 Abordagem Geral

Este trabalho foi estruturado nos seguintes passos fundamentais:

- Análise dos dados de produção eólica e de produção solar.
- Análise da complementaridade entre os recursos eólico e solar.
- Estudos de previsão: eólico, solar e eólico+solar e caracterização dos erros associados ao parque eólico original com o novo parque hibridizado eólico+solar.
- Avaliação do risco de penalidades decorrentes do incumprimento de ofertas no mercado de eletricidade, para 3 cenários distintos (eólico, eólico+solar, eólico+3*solar).

4.2 Recursos Solar e Eólico

O capítulo 4 irá incidir sobre uma análise dos recursos naturais do vento e do sol e sob a possibilidade de combinação destes mesmos recursos na produção de energia. Irão ser analisados dados meteorológicos, assim como dados de produção eólica e solar relativos ao ano 2024. Posteriormente, também irão ser abordadas as particularidades deste tipo de hibridizações na produção, assim como uma contextualização direcionada ao parque e à região em estudo.

4.2.1 Complementaridade entre os recursos solar e eólico

A complementaridade entre as produções solar e eólica ao longo do dia é um dos principais fatores que torna a hibridização dessas duas fontes renováveis uma solução atrativa para maximizar a gestão eficiente de energia e minimizar a intermitência de produção [23]. A complementaridade horária entre as produções solar e eólica em Portugal é um fenómeno que reflete as características sazonais e diárias desses dois recursos renováveis. Essa dinâmica cria oportunidades únicas para integrar ambas as fontes em projetos híbridos, potenciando a gestão eficiente da energia e mitigando os desafios associados à intermitência de produção [41]. Esta análise considera os padrões horários típicos de produção de ambas as fontes e sua interação no contexto da rede elétrica.

O comportamento da radiação solar ao longo do dia:

- **Manhã:** A geração de energia inicia logo após o nascer do sol (primeiras radiações solares do dia) e cresce rapidamente até atingir níveis significativos por volta das 10h.
- **Meio do Dia:** O pico de produção ocorre entre 12h e 13h, dependendo da localização e da estação do ano. Ocorre quando o ângulo solar é mais favorável e a intensidade da radiação atinge o seu máximo.
- **Fim de Tarde:** Após as 13h, a produção começa a diminuir gradualmente, chegando a valores nulos aquando do pôr do sol (ausência de radiação solar).

A energia solar é altamente previsível, com um padrão diário bem definido. É, assim, possível verificar que o comportamento da energia solar se encontra, maioritariamente, em concordância com as horas de maior procura diurna, como é o exemplo consumo comercial e empresarial.

Por outro lado, o comportamento eólico é menos previsível e depende de fatores meteorológicos, como frentes atmosféricas e gradientes de pressão. Deste modo, o vento possui características distintas no que toca à sua variação ao longo do dia:

- **Manhã e Início da Tarde:** Durante o dia, os ventos tendem a ser mais fracos devido ao aquecimento da superfície terrestre, que estabiliza a atmosfera e reduz a intensidade do vento em muitos locais.
- **Fim de Tarde e Noite:** A produção eólica geralmente aumenta ao anoitecer, quando a temperatura do solo diminui e cria condições favoráveis para ventos mais fortes. Durante

a noite e as primeiras horas da manhã, a geração eólica tende a atingir seus níveis mais elevados, especialmente em regiões costeiras ou montanhosas.

Este padrão permite que a energia eólica complemente a solar, uma vez que os ventos são mais fortes em horários de baixa ou nenhuma geração solar.

A interação e complementaridade entre a energia solar e a eólica representam uma estratégia eficaz para enfrentar os desafios inerentes às fontes de energia renovável. A complementaridade é particularmente evidente quando se observa os horários de produção de ambas as fontes, como se pode verificar na figura 4.1.

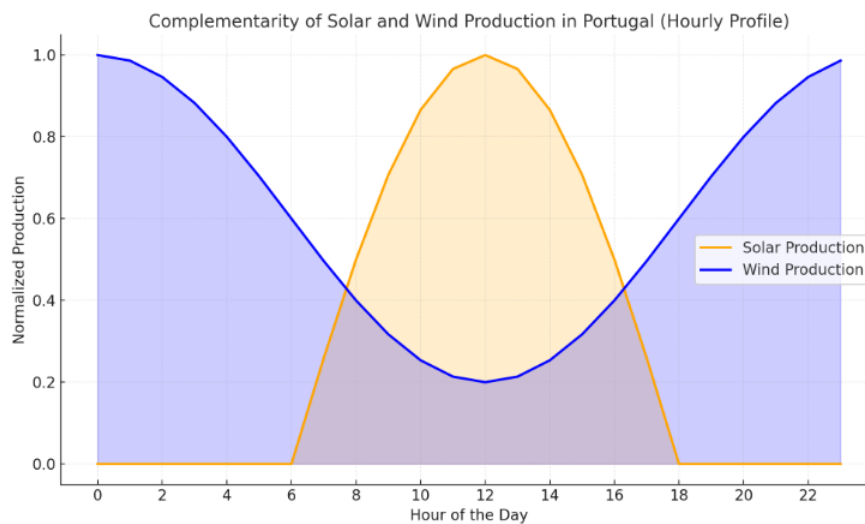


Figura 4.1: Gráfico complementaridade teórica entre produção eólica e solar em Portugal.

A energia solar desempenha um papel predominante durante o dia, aproveitando a radiação solar mais intensa, enquanto a energia eólica assume maior relevância à noite, quando os ventos tendem a ser mais constantes em muitas regiões. Essa alternância natural reduz significativamente as lacunas na geração de energia ao longo de um período de 24 horas, diminuindo a dependência de fontes fósseis como alternativa, por exemplo.

Além disso, a combinação das duas fontes contribui para a redução dos efeitos da intermitência. Cada fonte, por si só, apresenta variabilidades naturais que podem dificultar a previsibilidade e a estabilidade da geração de energia. No entanto, ao integrar energia solar e eólica em sistemas híbridos, é possível criar um perfil de geração mais uniforme e confiável, mitigando, deste modo, as flutuações que ocorreriam em cada um dos sistemas se estes se encontrassem isolados [4].

Do ponto de vista da rede elétrica, essa complementaridade também tem benefícios e implicações positivas. A interação entre essas fontes auxilia no equilíbrio da carga da rede, reduzindo a ocorrência de picos e vales extremos na oferta de energia. Este facto não apenas melhora a estabilidade da rede, mas também diminui os custos associados à gestão da intermitência e à necessidade de armazenamento de energia. Em suma, a complementaridade entre energia solar e

eólica é uma solução estratégica que maximiza o aproveitamento dos recursos naturais disponíveis, promovendo maior eficiência e sustentabilidade no sistema elétrico.

4.2.2 Complementaridade entre os recursos solar e eólico aplicado à região da Madeira, Portugal

A região da Madeira, com suas características climáticas únicas, apresenta um contexto específico para a complementaridade entre a produção solar e eólica [23]. O clima subtropical da ilha, aliado à sua topografia montanhosa e localização geográfica, influencia os padrões de radiação solar e de ventos, moldando a viabilidade da hibridização de fontes renováveis.

Assim, o comportamento das produções solar e eólica na região da Madeira pode ser caracterizado da seguinte forma:

- **Produção Solar na Madeira:** A Madeira beneficia de altos níveis de radiação solar ao longo do ano, com uma distribuição sazonal moderada. A produção solar apresenta um padrão diurno, com o pico de geração próximo ao meio-dia, similar ao observado no continente [33]. No gráfico da figura 4.2 está representada a produção média horária anual da tecnologia solar.

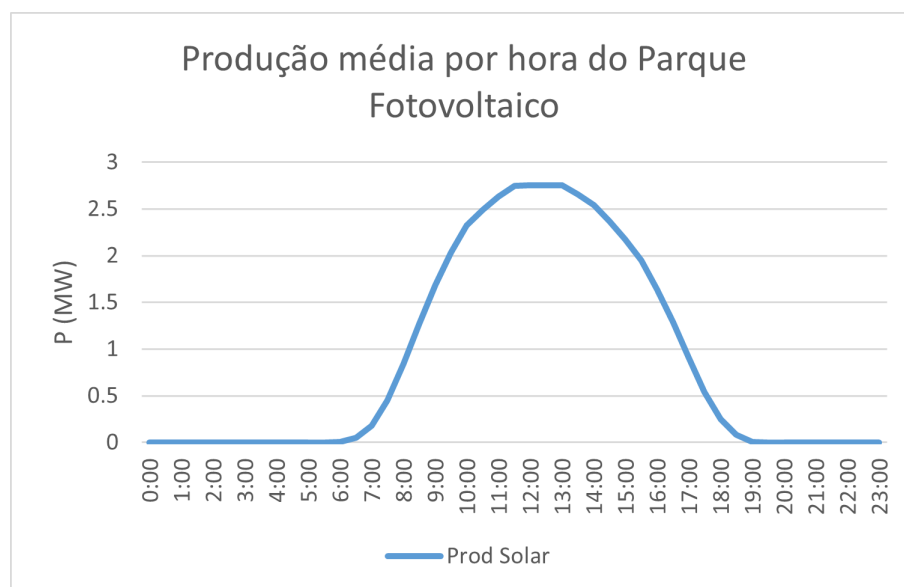


Figura 4.2: Gráfico Produção Solar média por hora.

- **Produção Eólica na Madeira** A ilha é caracterizada por ventos constantes ao longo do ano, especialmente nas zonas costeiras e em áreas de maior altitude. Durante o inverno, os ventos tendem a ser mais fortes, complementando a menor produção solar típica desta estação. A direção e intensidade dos ventos são influenciadas pela topografia acentuada, o que exige um posicionamento estratégico das turbinas para otimizar a captação do recurso eólico. Na figura 4.3 é visível a produção média anual ao longo do dia tanto do Pico da Urze como de Alecrim.

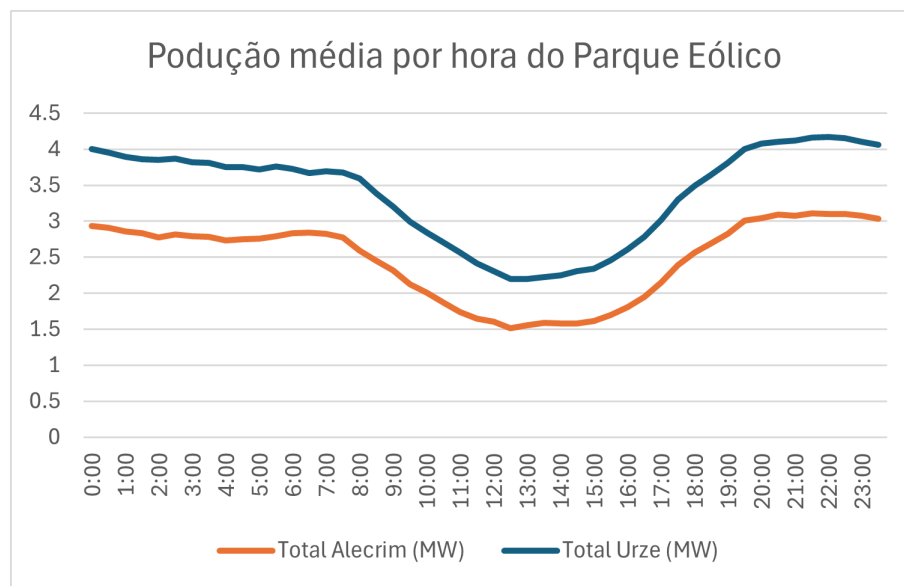


Figura 4.3: Gráfico Produção Eólica de Urze e Alecrim.

- Produção Conjunta Solar-Eólica** O padrão eólico noturno e a produção solar diurna criam uma complementaridade natural que ajuda a mitigar a intermitência de ambas as fontes. Durante os meses de verão, quando o consumo de energia para refrigeração é elevado, a produção solar atinge picos que correspondem às necessidades diurnas. Nos meses de inverno, o aumento da produção eólica compensa a menor disponibilidade de energia solar, garantindo, deste modo, maior estabilidade ao sistema. O gráfico da figura 4.4 representa o comportamento complementar das médias anuais horárias da produção de cada tipo de tecnologia.

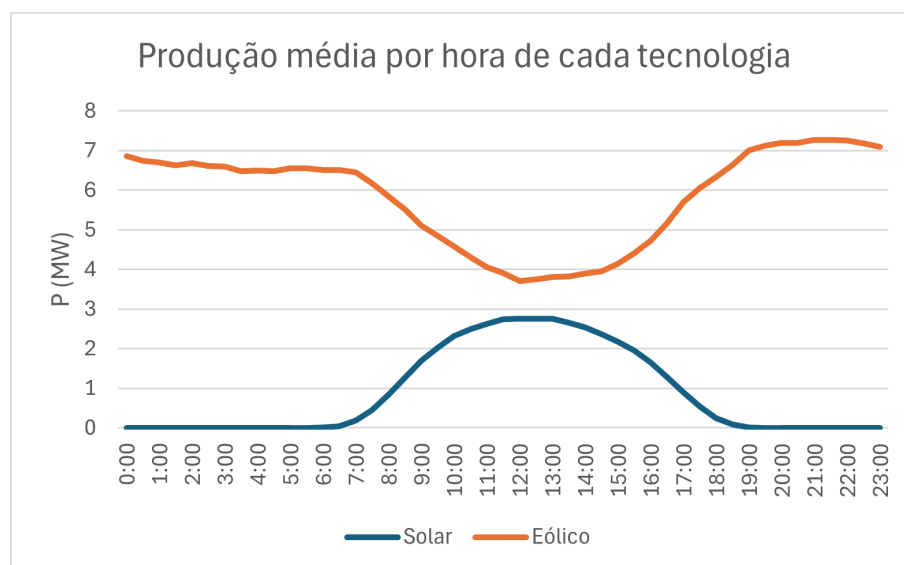


Figura 4.4: Gráfico complementaridade real entre a produção eólica e solar.

Esta complementaridade é particularmente valiosa no contexto insular da Madeira, onde a gestão eficiente da energia é crucial devido às limitações da rede elétrica local [33]. O gráfico 4.5 representa a soma da produção média horária anual das tecnologias eólica e solar.

No gráfico 4.5 é possível observar que a soma entre a produção eólica e solar ao longo do dia, apesar de cada um dos recursos possuir horas específicas de maior produção, estes complementam-se provocando assim uma linha de produção quase constante. Desta forma, é possível concluir que existe uma compatibilidade entre os recursos eólico e solar, e que é possível tirar o máximo rendimento ambos os recursos complementando-se mutuamente num parque híbrido eólico e solar.

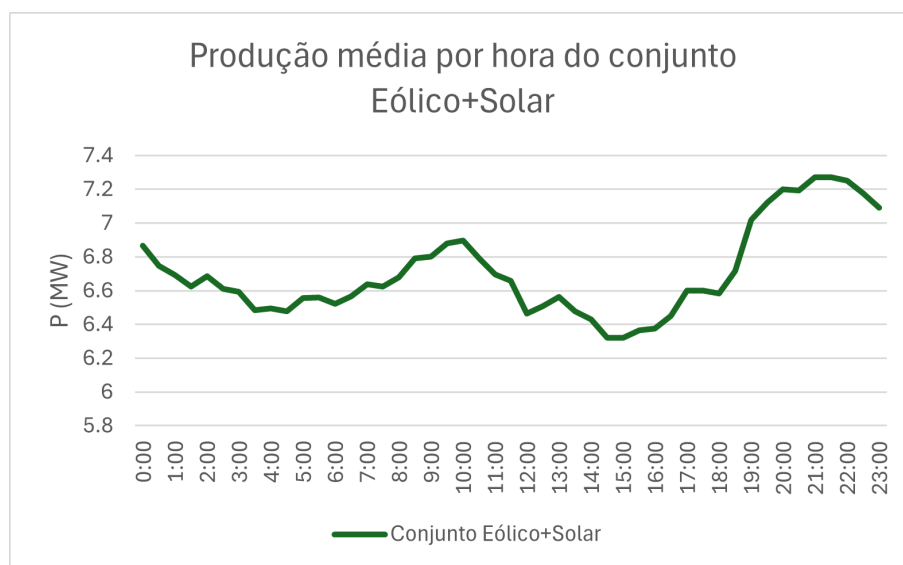


Figura 4.5: Gráfico da produção média horária anual do conjunto entre a produção eólica e solar.

4.3 Caracterização do processo de previsão da produção de energias renováveis

A previsão da produção de energia a partir de fontes renováveis, tanto eólica como solar, desempenha um papel essencial na gestão e operação dos sistemas elétricos modernos. Devido à intermitência natural dessas fontes, a capacidade de prever com precisão a quantidade de energia que será gerada nas horas ou dias seguintes é fundamental para garantir a estabilidade da rede elétrica e otimizar o planeamento da produção. [37]

A prática da previsão de produção de energia renovável permite uma maior estabilidade da rede elétrica. Uma vez que a geração eólica e solar varia de acordo com as condições meteorológicas, podem ocorrer oscilações na oferta de energia. Assim, previsões precisas permitem que os operadores do sistema ajustem a oferta e a procura, evitando assim sobrecargas ou subcargas que poderiam comprometer a estabilidade da rede.

Estas previsões permitem também que os produtores de energia ajustem a sua participação nos mercados de eletricidade, vendendo energia com maior precisão e evitando penalizações por

desvios na entrega da energia prevista. Deste modo, com um planeamento com previsões mais fiáveis, é também possível gerir melhor o fluxo de energia nas redes de transmissão e distribuição.

A previsão da produção eólica e solar é uma ferramenta essencial para garantir a estabilidade e eficiência do setor elétrico. A sua aplicação permite reduzir custos, melhorar a integração de energias renováveis no mercado e minimizar o impacto da intermitência, promovendo uma transição energética mais sustentável e confiável. [40]

4.3.1 Redes Neurais e Matlab nftool

Para realizar o estudo da previsão da produção de energia fez-se recurso a um modelo de Redes Neurais Artificiais no qual se realiza a previsão para o dia seguinte.

A utilização de Redes Neurais Artificiais (ANN - Artificial Neural Networks) para a previsão da produção eólica e solar tem-se tornado uma abordagem amplamente adotada devido à sua capacidade de modelar relações complexas entre variáveis meteorológicas e geração de energia. As ANN conseguem aprender padrões não lineares a partir de grandes volumes de dados históricos, tornando-as particularmente eficazes na previsão de fontes renováveis, que apresentam alta variabilidade. No contexto da previsão de produção para o dia seguinte ($P(d+1)$), as ANN utilizam como entrada, por exemplo, dados meteorológicos passados, como velocidade do vento ou a radiação solar, para estimar a potência a ser gerada nas próximas 24 horas. [5]

Para que se consiga atingir uma previsão o mais próxima possível da realidade, são realizados treinos para a rede neuronal. O treino de uma Rede Neuronal Artificial (ANN) é um processo fundamental no seu desenvolvimento, pois é durante esta fase que a rede ajusta os seus pesos e parâmetros internos para aprender padrões e relações entre os dados de entrada e saída. O treino consiste em alimentar a rede com um conjunto de dados históricos, onde os valores esperados já são conhecidos, permitindo que o modelo aprenda a minimizar o erro entre as previsões e os valores reais. A otimização dos pesos é realizada através de algoritmos como backpropagation, que ajusta gradualmente os parâmetros da rede com base em métricas de erro, como o Mean Squared Error (MSE). A quantidade de treinos, ou épocas (conjunto de treinos), influencia diretamente a eficácia da previsão, pois poucas iterações podem resultar num modelo subajustado, incapaz de capturar a complexidade dos dados, enquanto um número excessivo pode levar ao sobreajustamento, tornando a rede menos generalizável para novos dados. Assim, encontrar um equilíbrio no número de treinos é crucial para garantir previsões precisas e confiáveis, especialmente em aplicações como a previsão de produção de energia renovável, onde a variabilidade das condições meteorológicas exige modelos robustos e bem ajustados. [25]

Deste modo, a previsão da produção de energia renovável, especialmente em parques eólicos e solares, é essencial para a gestão eficiente do sistema elétrico, permitindo uma melhor integração dessas fontes na rede.

Portanto, este tipo de previsão é fundamental tanto para operadores de rede como para produtores de energia, permitindo um planeamento mais eficiente e uma melhor integração das energias renováveis no sistema elétrico.

4.4 Previsão de produção energética

A previsão da produção de energia renovável é um fator crucial para a gestão eficiente de sistemas elétricos, especialmente em parques eólicos e solares, cuja variabilidade pode impactar a estabilidade da rede.

Para o trabalho a realizar em prol da dissertação, trabalho esse de obter precisão nas previsões e otimizar a integração destas fontes intermitentes, será utilizado um modelo baseado em redes neurais artificiais, recorrendo à ferramenta nftool do MATLAB.

Este método permitirá analisar padrões históricos de produção e variáveis meteorológicas para prever a geração de energia no dia seguinte ($P(D+1)$). A escolha do MATLAB e da ferramenta nftool deve-se à sua capacidade de criar e treinar redes neurais de forma eficiente, permitindo testar diferentes configurações para obter um modelo preciso e robusto. Com esta abordagem, espera-se reduzir a incerteza das previsões e contribuir para uma gestão mais eficiente da produção renovável.

Para a realização deste estudo, foram considerados inicialmente dois cenários de dois casos de estudo: inicialmente, previsão da produção eólica e, posteriormente, previsão da produção conjunta eólica+solar. Estes casos irão ser caracterizados e explicados nos subcapítulos seguintes.

Estes estudos só foram possíveis graças à disponibilização de dados de produção e dados meteorológicos referentes ao ano completo de 2024, cedidos pela Eletricidade da Madeira e pelo Eng.º Emanuel Cavaleiro. A obtenção destes dados foi fundamental para a realização das previsões, permitindo treinar e validar os modelos de redes neurais artificiais com informações reais e representativas das condições locais. Dessa forma, foi possível desenvolver uma análise robusta e avaliar com precisão a complementaridade entre a produção eólica e solar na região, contribuindo para uma gestão mais eficiente das energias renováveis no sistema elétrico. [30]

4.4.1 Previsão da produção eólica

Este primeiro caso de estudo irá ser focado na previsão da produção de energia elétrica a partir da fonte renovável eólica. O objetivo é desenvolver um modelo preditivo baseado em redes neurais artificiais para estimar a produção do dia seguinte ($P(D+1)$), utilizando como entrada dados históricos das variáveis mais relevantes para esta tecnologia.

Assim sendo, inicialmente para este caso, a previsão da produção eólica será realizada com base na produção do dia anterior e na velocidade do vento registada nesse mesmo período transato. A inclusão da velocidade do vento como variável de entrada justifica-se pela sua forte influência na geração eólica, permitindo capturar melhor a variabilidade do recurso.

Posteriormente, a previsão da produção eólica será realizada com base na produção do dia anterior e na velocidade do vento registada no próprio dia da previsão. A inclusão da velocidade do vento em tempo real como variável de entrada tem como propósito aumentar a precisão do modelo, uma vez que a geração eólica depende diretamente da intensidade e variabilidade instantânea deste recurso.

Com este estudo, pretende-se analisar o impacto da inclusão da velocidade do vento no próprio dia em comparação com a utilização da velocidade do vento no dia anterior na previsão eólica, avaliando a eficácia das redes neurais artificiais na estimativa da produção renovável e contribuindo para uma melhor integração destas fontes no sistema elétrico, garantindo uma gestão mais eficiente da sua intermitência.

4.4.2 Previsão da produção conjunta eólica+solar

A previsão da produção de energia renovável desempenha um papel fundamental na gestão e operação do sistema elétrico, permitindo uma melhor integração das fontes intermitentes no mercado de eletricidade. No contexto de sistemas híbridos eólico-solares, irá ser tida uma nova abordagem distinta que consiste na previsão direta da produção combinada do sistema híbrido eólico-solar.

Dessa forma, será realizada a previsão da produção combinada do sistema híbrido utilizando redes neurais artificiais. A avaliação dessas metodologias permitirá verificar se a modelagem conjunta pode proporcionar ganhos na fiabilidade da previsão, contribuindo para uma melhor otimização da participação deste tipo de sistemas no mercado de eletricidade.

Em relação à previsão da produção eólica, foram tidos como dados de entrada dados horários, dados da produção do dia anterior e dados da velocidade do vento do próprio dia, de modo a obter uma previsão tão próxima da realidade quanto possível. No que diz respeito à energia solar fotovoltaica, a previsão será baseada exclusivamente na produção do dia anterior. Esta abordagem mantém-se devido à forte correlação entre dias consecutivos na disponibilidade do recurso solar, considerando que padrões meteorológicos tendem a apresentar continuidade diária. Dessa forma, a produção do dia anterior continua a ser um indicador relevante para estimar a produção futura.

O pretendido é ilustrar as vantagens da hibridização de parques eólicos com tecnologia solar fotovoltaica, destacando a complementaridade entre as duas fontes de energia e os benefícios operacionais que essa integração pode proporcionar. Uma das vantagens mais relevantes está relacionada à melhoria na previsão da produção elétrica, o que pode reduzir o erro preditivo e, consequentemente, minimizar o risco de penalidades associadas ao incumprimento de ofertas no mercado de eletricidade.

4.5 Risco de penalidades decorrentes do incumprimento de ofertas no mercado de eletricidade

A participação de centrais eólicas e solares no mercado de eletricidade está sujeita a um elevado grau de incerteza devido à variabilidade dos recursos naturais. No contexto dos mercados de eletricidade, as ofertas de produção são feitas com 24 horas de antecedência, obrigando os produtores a estimar antecipadamente a quantidade de energia que serão capazes de injetar na rede. No entanto, devido à intermitência do vento e da radiação solar, frequentemente ocorrem desvios entre a produção prevista e a real, resultando em potenciais penalidades por incumprimento das

ofertas. Estas penalidades podem representar custos significativos para os produtores, tornando essencial a análise e minimização do risco associado. [32]

A avaliação do risco de penalizações passa, primeiramente, pela implementação de modelos robustos de previsão da produção, reduzindo a margem de erro na estimativa da energia a disponibilizar. No entanto, mesmo com modelos avançados, a incerteza nunca pode ser totalmente eliminada, exigindo uma abordagem baseada na análise de risco e incerteza. Métodos probabilísticos, como intervalos de previsão e distribuições estatísticas da produção futura, permitem quantificar a probabilidade de desvios e antecipar possíveis impactos financeiros. Além disso, a simulação de cenários extremos, considerando condições meteorológicas adversas ou variações súbitas na disponibilidade de recurso, pode ajudar a identificar períodos de maior vulnerabilidade. [31]

Uma estratégia complementar para mitigar o risco de penalidades passa pela diversificação das fontes de receita e pela adoção de mecanismos de flexibilização. A hibridização de parques eólicos e solares já é, por si só, uma forma de reduzir a intermitência global do sistema, pois permite uma oferta mais estável ao longo do dia.

Outra abordagem relevante é a participação em mercados de ajuste ou serviços de balanço, onde os produtores podem corrigir desvios de última hora através da compra ou venda de energia em prazos mais curtos. Embora esta estratégia implique custos adicionais, pode evitar penalidades mais severas associadas ao incumprimento das ofertas diárias.

Portanto, a avaliação e minimização do risco de penalizações no mercado de eletricidade requer uma abordagem integrada, combinando previsões precisas, análise de risco, otimização das ofertas e mecanismos de flexibilização. A adoção dessas estratégias permitirá uma maior eficiência económica dos sistemas híbridos e uma participação mais competitiva no mercado elétrico.

4.5.1 Avaliação e estimação do risco de penalidades aquando de entrada em mercado energético

A estimação dos riscos de penalidades na entrada em mercado foi realizada através da análise dos erros entre as previsões e a produção real para os três cenários considerados: (1) apenas eólico, (2) eólico + solar e (3) eólico + 3*solar. Inicialmente, foi calculado o erro entre a previsão e a produção real para cada cenário, sendo posteriormente contado o número de ocorrências em cada intervalo de 0,04, variando de -0,8 a 0,7. A distribuição desses erros foi representada graficamente por meio de um histograma, permitindo uma análise visual das diferenças entre os cenários. [31] [39]

Foi também efetuado um estudo detalhado da contagem de casos com penalidade e sem penalidade para os três cenários, aplicando critérios de penalidade baseados em diferentes limites de erro: $|\text{Erro}| > 0,14$, $|\text{Erro}| > 0,1$, $|\text{Erro}| > 0,06$ e $|\text{Erro}| > 0,02$. Foram elaborados gráficos comparativos para evidenciar a redução do número de penalidades à medida que se transita do cenário eólico puro para os cenários híbridos. [28]

Por fim, foi realizado um exercício semelhante para analisar os casos sem penalidade, seguindo os mesmos critérios de erro.

Capítulo 5

Demonstração de Resultados

O objetivo deste capítulo é ilustrar as vantagens da hibridização de parques eólicos com tecnologia solar fotovoltaica, destacando a complementaridade entre as duas fontes de energia e os benefícios operacionais que essa integração pode proporcionar. Uma das vantagens mais relevantes está relacionada à melhoria na previsão da produção elétrica, o que pode reduzir o erro preditivo e, consequentemente, minimizar o risco de penalidades associadas ao incumprimento de ofertas no mercado de eletricidade.

Dessa forma, os casos de estudo apresentados a seguir analisam e comparam a qualidade da previsão da produção renovável em diferentes cenários. As análises visam avaliar se a integração das previsões individuais do solar e do eólico ou a previsão conjunta da produção híbrida proporcionam melhorias significativas na precisão dos modelos preditivos. A comparação entre os diferentes métodos permitirá quantificar os benefícios da hibridização na fiabilidade da previsão, contribuindo para uma gestão mais eficiente e estratégica da participação destes sistemas no mercado de energia.

Assim, como já referido no capítulo 4, o estudo realizado pode ser dividido em três momentos: Previsão da produção eólica, Previsão da produção conjunta eólica+solar e Análise do risco de penalidades.

5.1 Previsão da produção eólica

Neste primeiro caso de estudo, foi desenvolvido um modelo de previsão da produção de energia elétrica a partir de fontes renováveis intermitentes, nomeadamente eólica, utilizando redes neurais artificiais. A implementação foi realizada recorrendo à ferramenta nftool do MATLAB R2024b, que permite a criação, treino e validação de redes neurais de forma intuitiva e eficiente.

O processo de previsão para este caso foi conduzido da seguinte forma:

- Preparação dos Dados:

Recolha e normalização dos dados históricos de produção eólica e velocidade do vento fornecidos pelo Engº Emanuel Cavaleiro, membro da Eletricidade da Madeira. A normalização foi aplicada para garantir uma melhor convergência do modelo.

- Definição da Arquitetura da Rede Neuronal:

Escolha da topologia da rede, incluindo o número de camadas ocultas e neurónios por camada. Foram testadas diferentes configurações para otimizar a precisão do modelo.

- Treino da Rede:

A rede foi treinada utilizando uma fração dos dados disponíveis, sendo aplicada uma divisão típica entre treino (70%), validação (15%) e teste (15%). O algoritmo de retropropagação foi utilizado para minimizar o erro de previsão.

- Avaliação do Modelo:

Após o treino, a rede foi testada com dados não vistos durante o processo de aprendizagem, permitindo avaliar a sua capacidade de generalização.

- Obtenção das Previsões:

Foram geradas previsões da produção eólica para o dia seguinte, com recurso à ferramenta `nftool` do MATLAB R2024b.

A metodologia adotada permitiu extrair uma previsão aproximada da produção eólica, bem como analisar a eficácia das redes neuronais na previsão da produção destas tecnologias renováveis. A precisão do modelo foi avaliada com base em métricas como o erro médio absoluto (MAE) e o erro quadrático médio (RMSE), demonstrando um desempenho promissor para aplicações futuras na gestão e integração destas fontes no mercado elétrico.

5.1.1 Não havendo previsões da velocidade do vento para o dia seguinte

A previsão da produção energética requer a definição de variáveis de entrada (*predictors*) e variáveis de saída (*responses*) para que a rede possa ser treinada adequadamente. No caso da previsão eólica, foram considerados como *predictors* os dados horários, a velocidade do vento do dia anterior e a produção eólica do dia anterior. Como *response*, os dados de produção real do próprio dia e hora foram tidas em conta. Para além de serem as variáveis que foram facultadas, a escolha destas variáveis justifica-se pela forte correlação entre a produção eólica e a velocidade do vento, sendo essencial incorporar esta informação para melhorar a precisão do modelo.

Como é possível observar na 5.1, para prever a produção eólica $P(h)$ foram considerados os seguintes *Predictors*:

- $P(h-24)$ - produção eólica 24h antes do momento h da previsão;
- $v(h-24)$ - velocidade do vento 24h antes da hora de previsão;
- $\sin(2 * \pi * h/24)$, $\cos(2 * \pi * h/24)$ - seno e cosseno da hora de previsão;
- $\sin(2 * \pi * m/12)$, $\cos(2 * \pi * m/12)$ - seno e cosseno do mês de previsão.

Foi ainda considerado como *Response*:

- $P(h)$ - Produção real do próprio dia e hora.

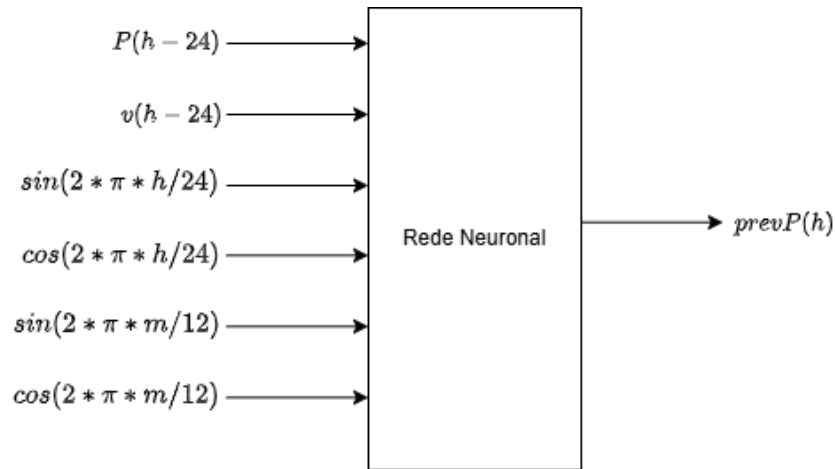


Figura 5.1: Diagrama representativo da rede neuronal aplicada à previsão da produção eólica.

A transformação de variáveis cíclicas, como a hora do dia e o mês do ano, utilizando funções trigonométricas como seno e cosseno, tem se mostrado uma abordagem eficaz para melhorar o desempenho de modelos preditivos. Esse método permite representar a natureza periódica dessas variáveis de forma contínua, evitando descontinuidades artificiais que poderiam comprometer a precisão das previsões. Ao converter essas variáveis em coordenadas no círculo unitário, os modelos conseguem capturar melhor os padrões sazonais e diários, resultando em previsões mais precisas e estáveis, especialmente em aplicações relacionadas à geração de energia renovável, como eólica e solar.

Dada a volatilidade do vento (e da produção eólica), a previsão com base em dados com antecedência de 24h não produz resultados de qualidade, como se pode comprovar com o auxílio dos gráficos da Figura 5.4, onde são comparadas a previsão eólica realizada e a produção real. As Figuras 5.2 e 5.3 mostram o MSE e o R obtidos para este caso. A comparação com os valores da Figura 5.6, confirma a importância de se dispor de previsões adequadas da velocidade do vento.

Model Summary

Train a neural network to map predictors to continuous responses.

Data

Predictors: predET - [17519x6 double]

Responses: respET - [17519x1 double]

predET: double array of 17519 observations with 6 features.

respET: double array of 17519 observations with 1 features.

Algorithm

Data division: Random

Training algorithm: Levenberg-Marquardt

Performance: Mean squared error

Training Results

Training start time: 10-Feb-2025 16:53:16

Layer size: 10

	Observations	MSE	R
Training	12263	21.6525	0.5697
Validation	2628	21.9262	0.5652
Test	2628	22.6431	0.5513

Figura 5.2: Progresso do treino na utilizando a ferramenta nftool do Matlab R2024b.

Training Progress				
Unit	Initial Value	Stopped Value	Target Value	
Epoch	0	47	1000	▲
Elapsed Time	-	00:00:01	-	
Performance	314	21.5	0	
Gradient	568	0.0318	1e-07	
Mu	0.001	0.0001	1e+10	
Validation Checks	0	6	6	▼

Figura 5.3: Resumo do progresso de treino - print screen apresentado pelo nftool do Matlab R2024b.

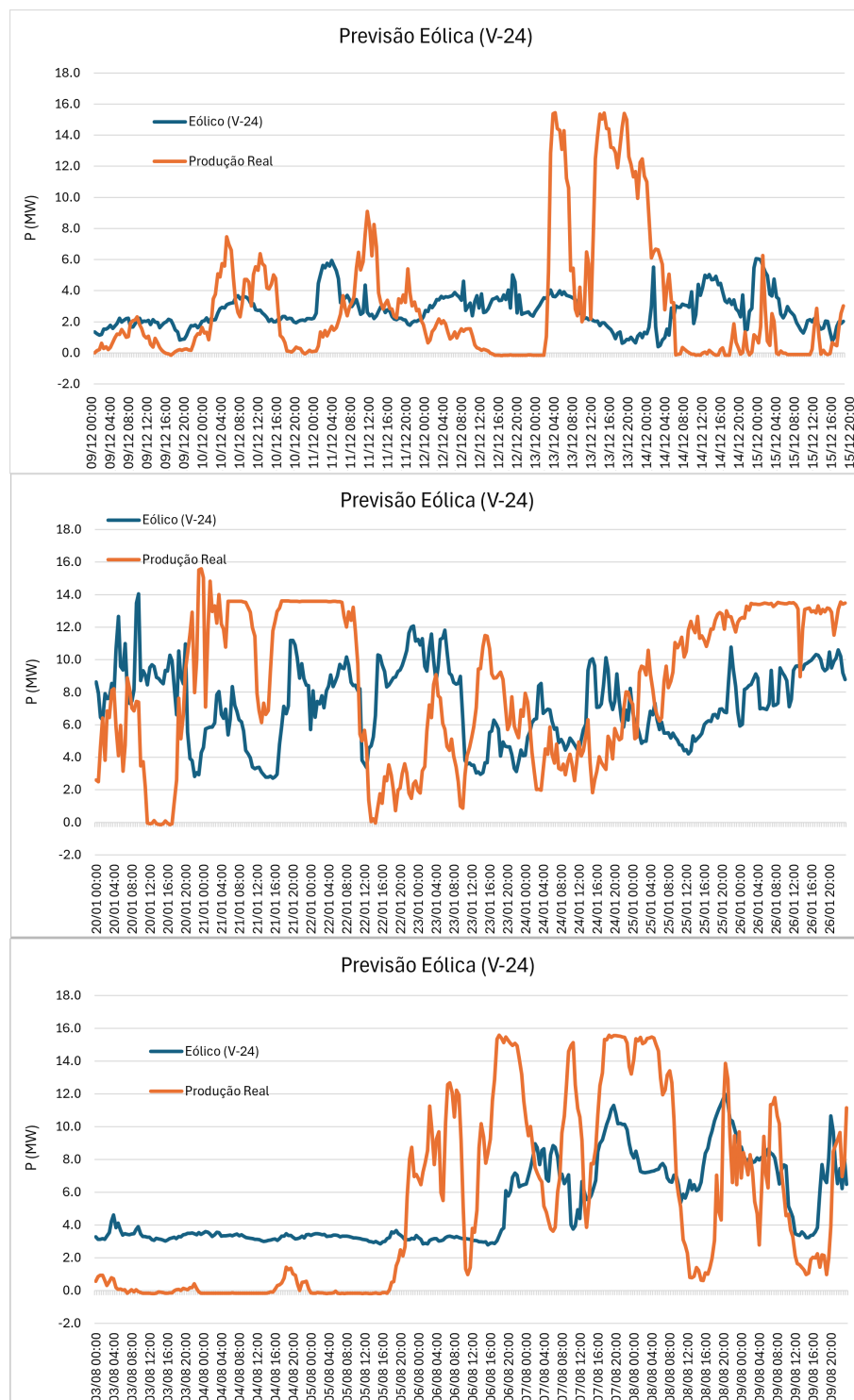


Figura 5.4: Resultados da previsão Eólica em comparação com a produção real.

5.1.2 Considerando que existem boas previsões do vento para o dia seguinte

Neste segundo caso, o objetivo é novamente a previsão da produção eólica com recurso a redes neuronais artificiais utilizando a ferramenta nftool do MATLAB R2024b. No entanto, a principal

diferença em relação ao caso anterior está na escolha das variáveis de entrada para a previsão da produção eólica. Em vez de utilizar a velocidade do vento do dia anterior como *predictor*, passam a ser considerados os dados de velocidade do vento do próprio dia, refletindo uma abordagem mais precisa e adaptativa para a previsão. No entanto, é importante notar que as previsões obtidas neste caso terão um desempenho otimista, uma vez que, na prática, a velocidade do vento não pode ser prevista com precisão absoluta. Assim, considerando a qualidade das previsões atualmente disponíveis, o desempenho real esperado será sempre mais próximo desta situação do que do cenário descrito na secção 5.1.1.

Tal como no caso anterior, este processo baseia-se no treino de uma rede neuronal artificial, onde é necessário definir corretamente os dados de entrada (*predictors*) e os dados de saída (*responses*). A estrutura do modelo pode ser descrita da seguinte forma:

- Predictors e Responses:

Como é possível observar na Figura 5.5, os *Predictors* considerados foram:

- $P(h-24)$ - produção eólica 24h antes do momento h da previsão;
- $v(h)$ - velocidade do vento no momento h da previsão;
- $\sin(2 * \pi * h/24)$, $\cos(2 * \pi * h/24)$ - seno e cosseno da hora de previsão;
- $\sin(2 * \pi * m/12)$, $\cos(2 * \pi * m/12)$ - seno e cosseno do mês de previsão.

Como *Response*, foi considerado:

- $P(h)$ - Produção real do próprio dia e hora.

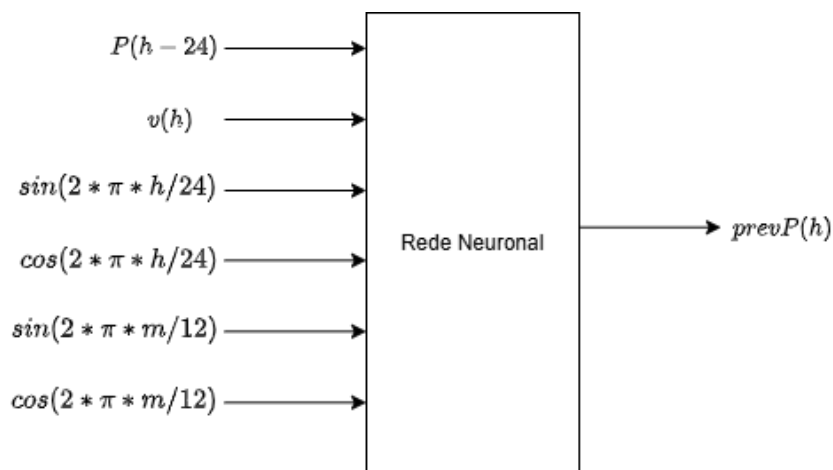
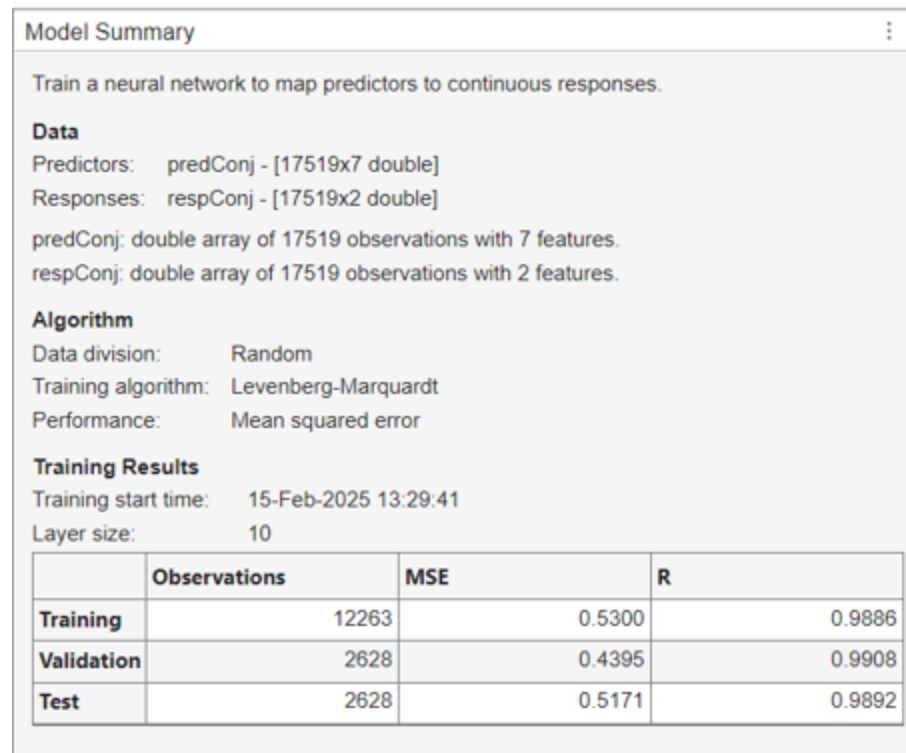


Figura 5.5: Diagrama representativo da rede neuronal aplicada à previsão da produção eólica tendo em conta o vento do próprio dia e hora.

- Treino da Rede Neuronal:

A rede neuronal foi treinada utilizando um conjunto de dados representativo do comportamento da produção eólica ao longo do tempo. Tal como para o caso de estudo anterior, o treino seguiu um processo de otimização iterativa, ajustando pesos e funções de ativação para reduzir o erro entre a previsão e os valores reais. Assim, o nftool apresenta a evolução do erro e de outros parâmetros ao longo do treino, como exemplificado em 5.6.



The screenshot shows the 'Model Summary' window of the nftool. It contains the following information:

- Train a neural network to map predictors to continuous responses.**
- Data**
 - Predictors: predConj - [17519x7 double]
 - Responses: respConj - [17519x2 double]
 - predConj: double array of 17519 observations with 7 features.
 - respConj: double array of 17519 observations with 2 features.
- Algorithm**
 - Data division: Random
 - Training algorithm: Levenberg-Marquardt
 - Performance: Mean squared error
- Training Results**
 - Training start time: 15-Feb-2025 13:29:41
 - Layer size: 10

	Observations	MSE	R
Training	12263	0.5300	0.9886
Validation	2628	0.4395	0.9908
Test	2628	0.5171	0.9892

Figura 5.6: Progresso do treino na utilizando a ferramenta nftool do Matlab R2024b.

- Validação e Teste:

Foram utilizados conjuntos de dados de validação e teste para verificar a capacidade de generalização da rede neuronal. As métricas do Coeficiente de Correlação de Pearson (R), que mede o grau de correlação entre os valores previstos e os valores reais, e o erro quadrático médio (MSE), que mede a média dos quadrados das diferenças entre os valores previstos e os valores reais, foram calculados pela ferramenta nftool para quantificar a precisão do modelo como é possível verificar na Figura 5.7.

Training Progress				
Unit	Initial Value	Stopped Value	Target Value	
Epoch	0	36	1000	
Elapsed Time	-	00:00:03	-	
Performance	106	0.487	0	
Gradient	232	0.278	1e-07	
Mu	0.001	0.0001	1e+10	
Validation Checks	0	6	6	

Figura 5.7: Resumo do progresso de treino - *print screen* apresentado pelo nftool do Matlab R2024b.

- Resultados e Considerações

A utilização dos dados de velocidade do vento do próprio dia permitiu uma previsão eólica mais adaptada às condições reais, reduzindo a incerteza associada à variação do vento, conforme apresentado na Figura 5.8. No entanto, este método depende da disponibilidade e qualidade das medições meteorológicas, o que pode representar desafios adicionais.

Este estudo pretende evidenciar que a qualidade da previsão de produção eólica depende muito do acesso a boas previsões da velocidade do vento.

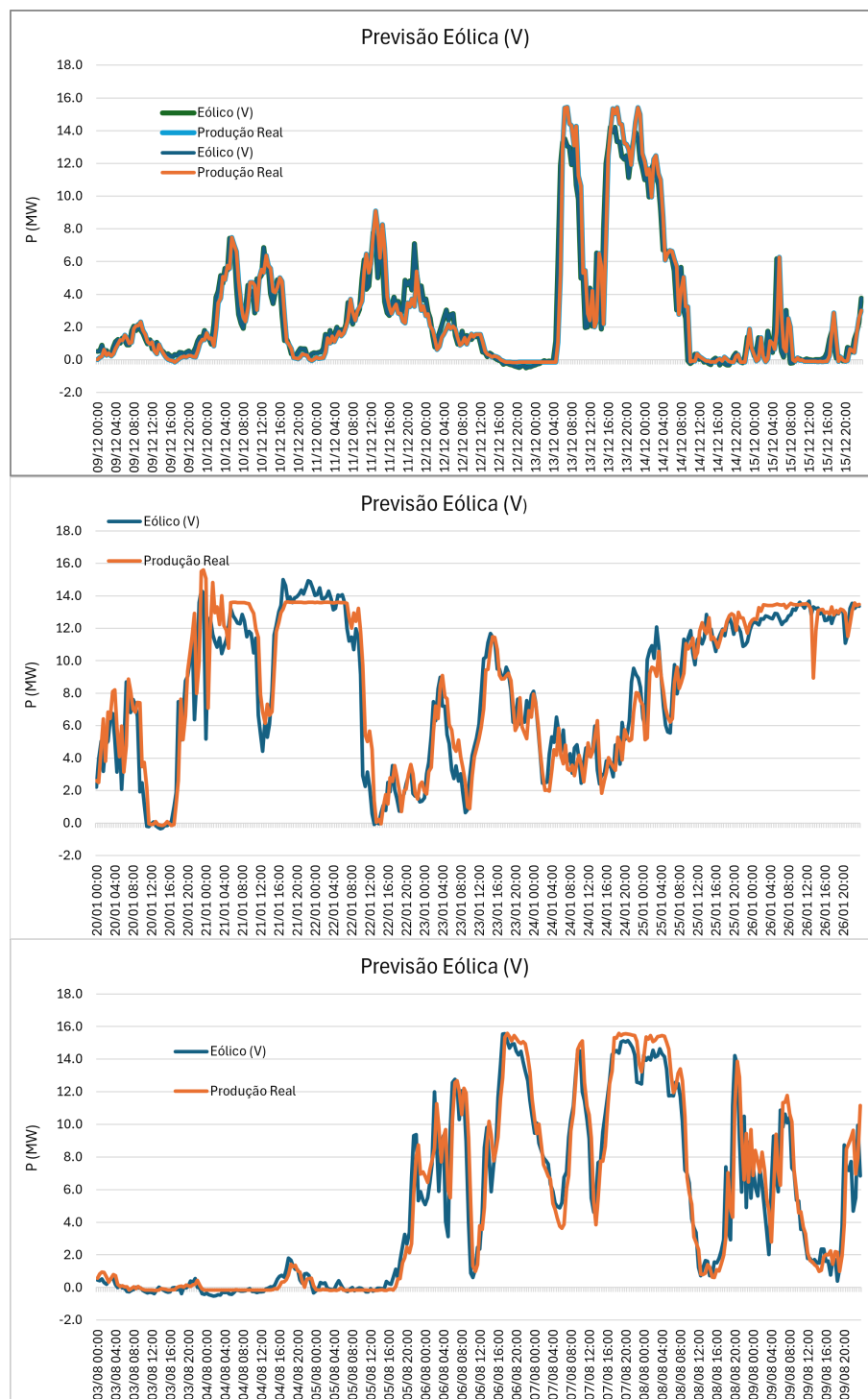


Figura 5.8: Resultados da previsão Eólica em comparação com a produção real.

5.2 Previsão da produção conjunta eólica+solar

Após a realização das previsões individuais para a produção eólica, será agora desenvolvido um novo modelo preditivo para estimar diretamente a produção combinada do sistema híbrido,

de forma a poder comparar comportamentos com os casos de estudo anteriores. O objetivo desta abordagem é avaliar se a previsão conjunta das fontes renováveis pode apresentar melhor desempenho, explorando possíveis interações entre as variáveis de entrada.

Esta previsão será realizada utilizando um modelo baseado em redes neurais artificiais, tal como nas previsões anteriores, mas agora considerando como variável de saída o conjunto da produção eólica e solar. A utilização desta metodologia permitirá avaliar a capacidade do modelo de capturar padrões globais de geração de energia renovável e reduzir erros associados à previsão separada das tecnologias.

- Predictors e Responses

Os dados utilizados para treinar a rede incluem dados horários, velocidade do vento do próprio dia, produção eólica do dia anterior e ainda produção solar do dia anterior, como predictors. Também a produção eólica do próprio dia e a produção solar do próprio dia, representam as respostas dadas à rede neuronal para que realizasse esta previsão. Esta abordagem visa melhorar a precisão da previsão, uma vez que a modelagem conjunta da geração híbrida pode aumentar o desempenho da previsão, além de permitir o aproveitamento da complementaridade entre as duas fontes.

- Processo de Treino e Validação

O treino do modelo seguirá o mesmo processo utilizado nas previsões individuais, recorrendo à ferramenta nftool do MATLAB. A rede será treinada com um conjunto de dados históricos, dividindo-os em treino, validação e teste. A performance do modelo será avaliada através do erro quadrático médio (MSE) e da correlação entre valores previstos e reais.

Com esta abordagem, pretende-se avaliar se a previsão conjunta pode fornecer melhores resultados do que a simples soma das previsões individuais, contribuindo para uma melhor integração das fontes renováveis no sistema elétrico.

De acordo com a Figura 5.9, a previsão da previsão conjunta eólico+solar apresenta uma curva de evolução mais semelhante à curva da produção real.

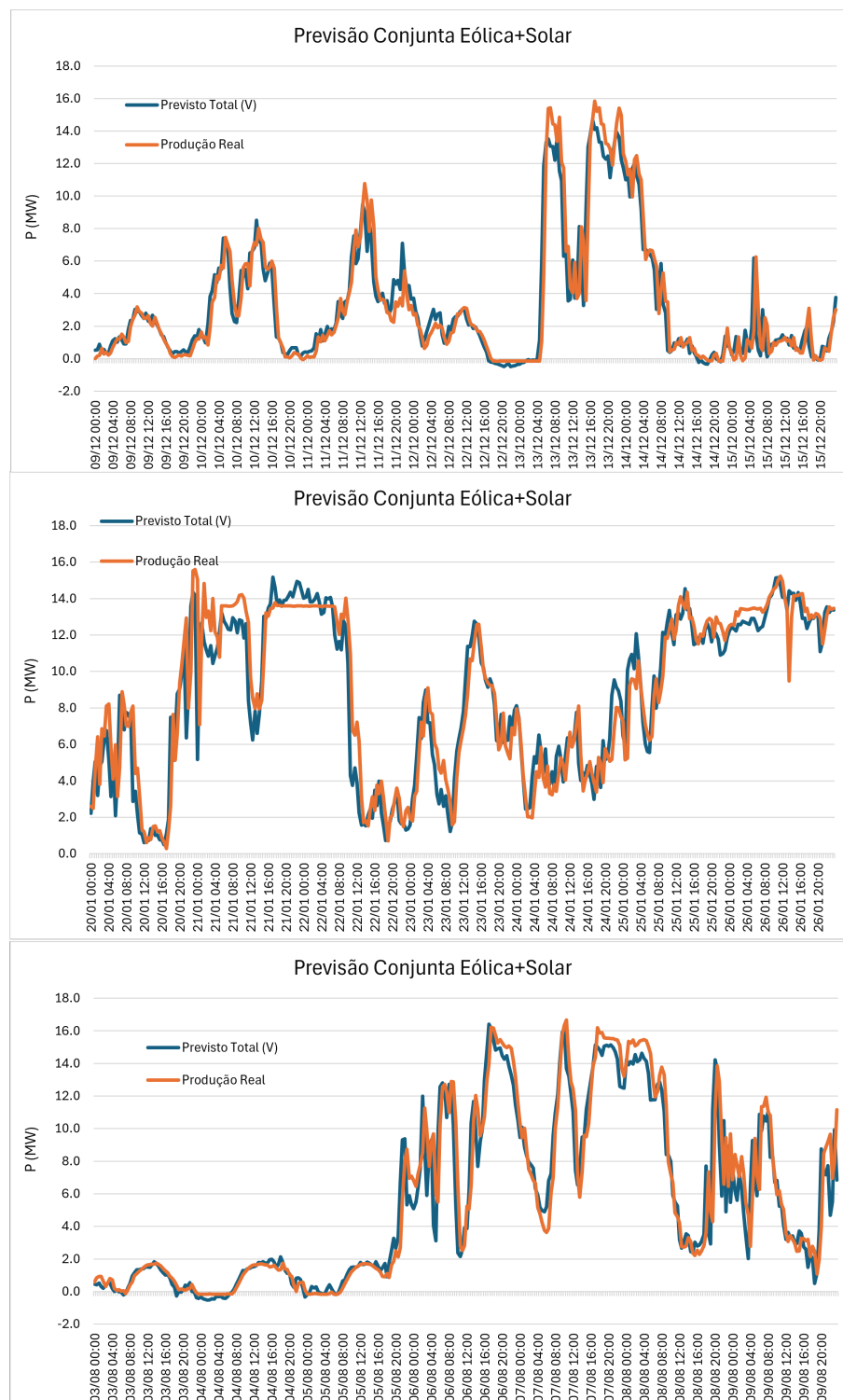


Figura 5.9: Resultados da previsão conjunta eólico+solar em comparação com a produção real conjunta de ambas as tecnologias.

5.3 Estimação do risco de penalidades em ambiente de mercado

A previsão da produção de energia elétrica é um fator determinante para a participação eficiente no mercado de eletricidade. Erros nas previsões podem resultar em desvios significativos entre a energia contratada e a energia efetivamente produzida, levando a penalidades financeiras para os agentes de mercado. A qualidade das previsões, portanto, tem um impacto direto na rentabilidade dos produtores de energia renovável.

O mercado de eletricidade opera com base em ofertas de produção feitas com antecedência, geralmente 24 horas antes da entrega da energia. Caso a produção real não corresponda à oferta apresentada, a diferença pode levar a custos adicionais, seja por necessidade de compra no mercado de balanço ou por aplicação de penalidades contratuais. Assim, a capacidade de minimizar os erros de previsão é essencial para reduzir riscos financeiros e otimizar os retornos dos produtores.

A estratégia de previsão, portanto, deve minimizar os erros, melhorando a capacidade de previsão da produção para reduzir tais penalidades e maximizar os lucros dos agentes de mercado.

Este capítulo está dividido em duas secções:

1) Previsão da produção eólica, previsão do conjunto eólico+solar e consequente comparação entre ambos;

2) Previsão conjunta da produção eólica e solar, assumindo outras alternativas de solar implementado.

Assim, serão analisados os erros associados à previsão da produção e o impacto destes na entrada em mercado, para os diferentes cenários propostos.

5.3.1 Análise da distribuição de erros de previsão (Eólico versus Eólico+Solar)

Inicialmente, considera-se a previsão da produção eólica isoladamente. Como a energia eólica depende diretamente da velocidade do vento, erros na previsão meteorológica podem resultar em variações significativas na geração real. A intermitência e a variabilidade do vento tornam desafiadora a estimativa precisa da produção eólica, aumentando o risco de desvios entre a energia prevista e a energia real injetada na rede.

Para este caso, os erros de previsão foram calculados comparando a produção estimada pela rede neuronal com os valores reais de produção eólica. Os desvios resultantes evidenciam as dificuldades inerentes à previsão eólica, com oscilações significativas ao longo do dia. Esses erros refletem diretamente em potenciais penalidades na entrada no mercado, uma vez que a diferença entre a oferta e a produção deve ser corrigida em mercados de ajuste, geralmente a custos elevados.

Seguidamente, considera-se a previsão da produção híbrida, ou seja, a soma da produção eólica e solar. Uma vez que a produção fotovoltaica depende principalmente da posição do sol e das condições meteorológicas, os modelos de previsão conseguem estimar com maior precisão a sua produção, reduzindo o erro global quando combinada com a energia eólica.

O histograma da distribuição dos erros foi construído através do cálculo da diferença entre a previsão e a produção real para o cenário apenas eólico e para o cenário combinado eólico+solar.

Em seguida, os erros foram organizados em intervalos definidos, permitindo visualizar a frequência de ocorrência dentro de cada faixa.

Posteriormente, foram aplicados diferentes critérios de penalidade baseados no valor absoluto do erro ($|\text{Erro}| > 0.14$, $|\text{Erro}| > 0.1$ e $|\text{Erro}| > 0.06$). Para cada critério, foi contabilizado o número de casos em que a previsão ultrapassava o limite estabelecido, determinando assim a quantidade de ocorrências com penalidade. Em paralelo, foram contados os casos sem penalidade, ou seja, aqueles em que o erro se manteve dentro dos limites definidos.

A construção do histograma da distribuição dos erros da Figura 5.10 começou com o cálculo da diferença entre a previsão e a produção real para o cenário apenas eólico e para o cenário combinado eólico+solar. Os erros foram organizados em intervalos definidos, permitindo visualizar a frequência de ocorrência dentro de cada faixa. A análise do histograma da Figura 5.10 revelou que, no caso eólico+solar, os valores de erro se concentraram mais em torno do zero, indicando uma menor variabilidade e uma previsão mais precisa. No cenário apenas eólico, observou-se uma dispersão mais ampla dos erros, evidenciando maior incerteza na previsão. Já no cenário híbrido, a complementaridade entre as fontes reduziu significativamente as variações, levando a uma distribuição mais concentrada.

Por outro lado, a previsão conjunta da produção híbrida demonstrou uma redução significativa nos erros quando comparada à previsão da produção eólica isolada. Essa melhoria deve-se à menor intermitência da produção combinada, o que facilita a estimativa da geração total. Como consequência, a diferença entre a energia contratada e a energia real torna-se menor, reduzindo as penalidades associadas à participação no mercado de eletricidade.

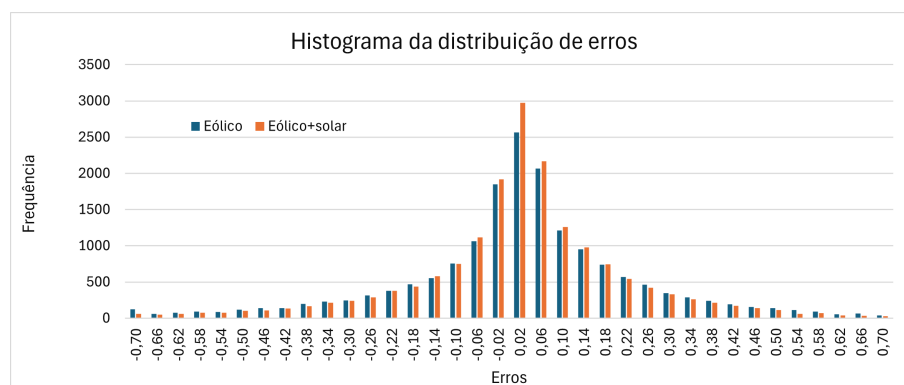


Figura 5.10: Histograma da distribuição de erros para o cenário da produção combinada (Eólico + Solar).

Na análise dos gráficos das Figuras 5.11 e 5.12, é revelada uma clara vantagem da hibridização eólico-solar na redução de penalidades no mercado. No primeiro gráfico, observa-se que o número de casos com penalidade é consistentemente maior no cenário apenas eólico, evidenciando uma maior ocorrência de desvios nas previsões. Já no segundo gráfico, verifica-se que o número de situações sem penalidade é sempre superior no caso eólico+solar, confirmando que a complementaridade entre as duas fontes melhora significativamente a precisão das previsões e reduz a exposição a penalizações.

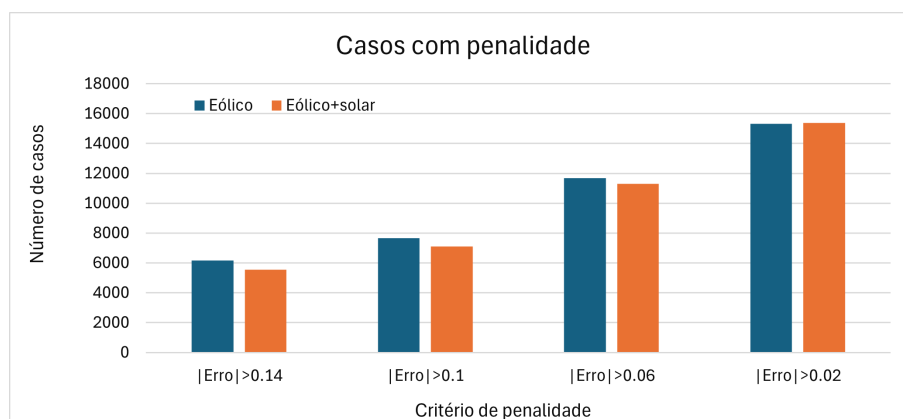


Figura 5.11: Gráfico dos casos com penalidade para o cenário da produção combinada (Eólico + Solar).

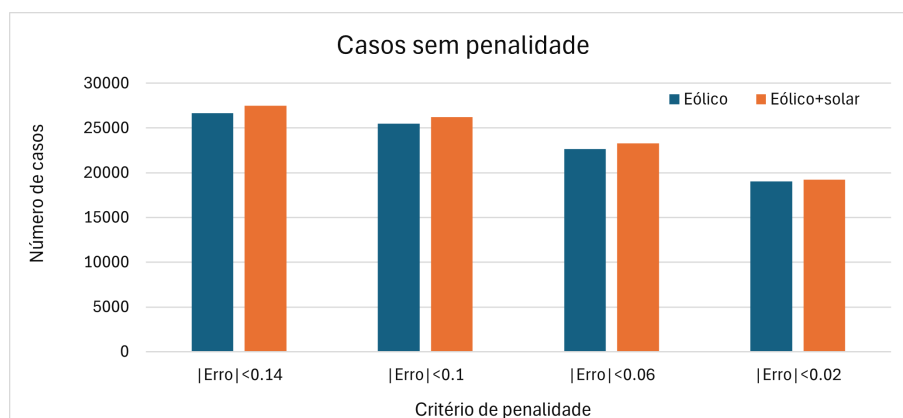


Figura 5.12: Gráfico dos casos sem penalidade para o cenário da produção combinada (Eólico + Solar).

5.3.2 Análise da distribuição de erros de previsão - caso Eólico + 3*Solar

Para reforçar a importância da complementaridade das fontes, a produção solar foi multiplicada por um fator de 3. Com isso, a contribuição da energia solar passa a ser ainda mais significativa, reduzindo os desvios entre previsão e produção real.

Os resultados deste cenário demonstram que o aumento da participação solar reduz drasticamente os erros de previsão, evidenciando que a hibridização não apenas melhora a previsibilidade, mas também diminui os custos de participação no mercado elétrico.

A análise do histograma da Figura 5.13, comparando o caso do eólico com o eólico + 3*solar, evidencia que a maior contribuição da energia solar leva a uma distribuição de erros mais concentrada em torno do zero. No caso apenas eólico, observa-se uma maior dispersão dos erros, indicando variações mais significativas. Já no cenário híbrido, onde a produção solar é triplicada, a redução da variabilidade entre as fontes é ainda mais marcante que no cenário conjunto anterior, reduzindo as flutuações e tornando as previsões mais precisas. Esse resultado reforça que

uma maior participação da energia solar contribui para minimizar os desvios e, consequentemente, diminuir a incidência de penalidades no mercado.

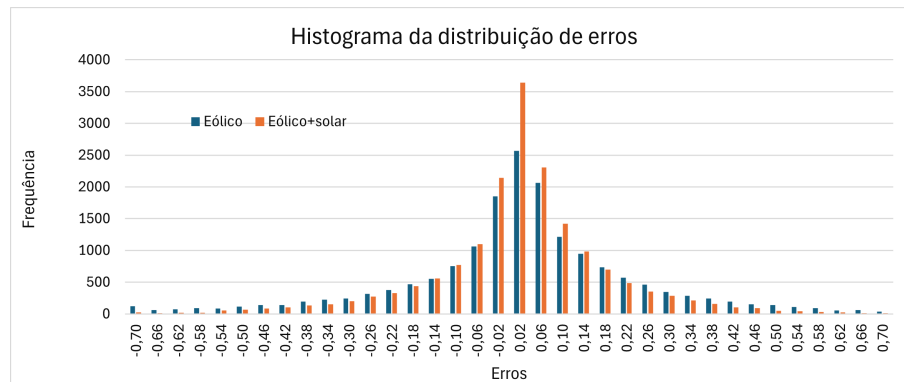


Figura 5.13: Histograma da distribuição de erros para o cenário da produção combinada (Eólico + 3 * Solar).

Após essa análise inicial, foram aplicados diferentes critérios de penalidade baseados no valor absoluto do erro ($|\text{Errol}| > 0.14$, $|\text{Errol}| > 0.1$ e $|\text{Errol}| > 0.06$). Para cada critério, contabilizou-se o número de casos com penalidade, bem como aqueles sem penalidade, isto é, em que o erro se manteve dentro dos limites definidos. A tabela de penalidades 5.1 confirma essa tendência, demonstrando que o cenário eólico+3*solar apresentou a maior redução de penalidades em relação ao eólico, alcançando uma diminuição de 26,9% para $|\text{Errol}| > 0.14$, 21,1% para $|\text{Errol}| > 0.1$ e 9,9% para $|\text{Errol}| > 0.06$. Estes resultados evidenciam que a inclusão da geração solar melhora a precisão das previsões, reduz os desvios e contribui para uma menor exposição a penalidades no mercado.

Critério de Penalidade	Eólico+Solar	Eólico+2*Solar	Eólico+3*Solar
$ \text{Errol} > 0.14$	9.7%	18.6%	26.9%
$ \text{Errol} > 0.1$	7.1%	14.0%	21.1%
$ \text{Errol} > 0.06$	3.4%	6.6%	9.9%

Tabela 5.1: Tabela de penalidades.

A análise dos gráficos de barras 5.14 e 5.15 demonstra um impacto ainda mais positivo da hibridização quando a produção solar é ampliada. No primeiro gráfico, percebe-se que o número de casos com penalidade é sempre maior no cenário apenas eólico, refletindo uma maior incerteza nas previsões. Por outro lado, no segundo gráfico, observa-se que o número de situações sem penalidade é significativamente superior no cenário eólico + 3*solar.

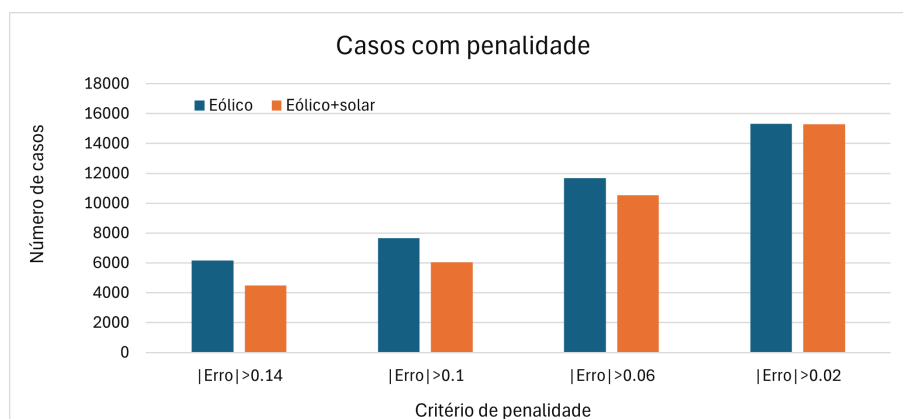


Figura 5.14: Casos com penalidade para o cenário da produção combinada (Eólico + 3 * Solar).

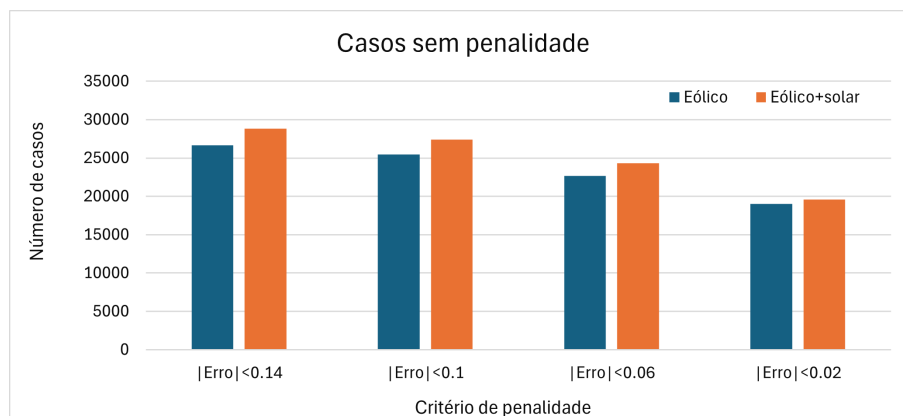


Figura 5.15: Casos sem penalidade para o cenário da produção combinada (Eólico + 3 * Solar).

5.3.3 Conclusões

Os resultados obtidos demonstram que a hibridização de parques eólicos com solar pode trazer vantagens significativas em termos de previsibilidade da produção e, consequentemente, da redução do risco de penalidades no mercado de eletricidade. A análise comparativa mostrou que a previsão isolada da produção eólica apresenta maiores erros e, portanto, maiores riscos financeiros para os agentes do mercado.

Por outro lado, a previsão da produção combinada de eólica e solar permitiu mitigar os desvios, proporcionando maior estabilidade e previsibilidade da oferta de energia. Estes resultados reforçam a importância da hibridização como uma solução viável para otimizar a integração de energias renováveis no mercado, melhorando a rentabilidade dos produtores e contribuindo para um sistema elétrico mais eficiente e sustentável.

Da mesma forma, os resultados finais deste estudo concluem que a menor intermitência da geração híbrida contribui para uma redução dos erros, tornando a diferença entre a energia contratada e a energia real produzida menos expressiva. Como consequência, observa-se uma diminuição considerável do número de casos sujeitos a penalização, com reduções que variam entre 9,7% e

26,9%, dependendo do grau de hibridização considerado. Para um critério de penalidade mais exigente ($|\text{Errol}| > 0,06$), a redução de penalidades atinge 9,9% no cenário com maior contribuição solar, enquanto para critérios mais amplos, como $|\text{Errol}| > 0,14$, essa redução chega a 26,9%. Estes resultados evidenciam, mais uma vez, que a complementaridade entre fontes renováveis não só melhora a eficiência operacional, como também reduz os custos associados a desvios na previsão, tornando os projetos híbridos uma solução mais competitiva e viável no setor dos mercados energéticos.

Capítulo 6

Conclusões e Trabalho Futuro

6.1 Conclusões

Neste trabalho, foi analisado o impacto da hibridização de parques eólicos com solar fotovoltaico, com ênfase na previsão de produção e sua influência na participação no mercado de energia. A previsão da produção é essencial para reduzir os erros de oferta e, consequentemente, minimizar penalidades associadas ao incumprimento das mesmas. Para tal, foram comparadas diferentes abordagens de previsão, considerando tanto a produção eólica isolada quanto a produção combinada eólica-solar.

Assim, como ponto de partida, foi realizada uma análise detalhada à complementaridade entre a produção eólica e solar, com o objetivo de avaliar de que forma a conjugação destas duas fontes renováveis poderia contribuir para uma geração mais estável e previsível. Os resultados demonstraram que, devido às diferenças nos perfis de produção, a energia solar tende a compensar períodos de menor produção eólica, reduzindo assim a intermitência global do sistema. Esta complementaridade revelou-se um fator determinante para justificar o presente trabalho de dissertação, servindo de base para o estudo das previsões de produção e da sua influência na entrada em mercado.

Primeiramente, foram analisadas duas abordagens para a previsão da produção do parque eólico original. Na primeira abordagem, assumiu-se a ausência de previsões da velocidade do vento para o dia seguinte, utilizando apenas a produção do dia anterior como dado de entrada. Os resultados mostraram que essa limitação introduz um erro considerável na previsão, dado o comportamento intermitente e não linear do vento. Na segunda abordagem, considerou-se que existiam boas previsões da velocidade do vento do próprio dia e hora, o que permitiu uma melhoria substancial na qualidade das previsões, evidenciando a importância da disponibilidade de dados meteorológicos de alta precisão.

Posteriormente, foi realizada a previsão da produção do parque eólico hibridizado, considerando tanto a previsão da produção eólica quanto a previsão da produção solar. Os resultados demonstraram que a previsão conjunta da produção híbrida resultou num menor erro preditivo quando comparada com a previsão isolada da produção eólica. Isto deve-se ao facto de a produção

solar apresentar uma menor variabilidade diária, exibindo um padrão mais previsível ao longo do tempo. Assim, a combinação das duas tecnologias contribui para uma suavização das flutuações na geração total, tornando a estimativa mais estável e reduzindo os desvios em relação à produção real.

Em termos de impacto no mercado de energia, foi analisada a estimação do risco de penalidades associadas a eventuais situações de incumprimento das ofertas de produção. Observou-se que o número de penalidades foi significativamente reduzido na previsão conjunta da produção eólica-solar, uma vez que a menor variabilidade da geração permitiu uma maior fiabilidade nas ofertas submetidas ao mercado. Dessa forma, a hibridização mostrou-se uma solução vantajosa não apenas na eficiência da geração energética, mas também na estratégia de participação no mercado elétrico.

Em suma, os estudos realizados confirmam que a integração da energia solar com a energia eólica melhora a qualidade da previsão de produção e reduz os riscos associados ao incumprimento de ofertas no mercado de eletricidade. A otimização da previsão é, portanto, um fator crucial para a maior viabilidade económica e operacional de parques híbridos, tornando a hibridização uma estratégia promissora para o futuro da geração renovável.

6.2 Trabalho Futuro

A presente investigação demonstrou o potencial da hibridização eólica-solar na melhoria da previsibilidade da produção renovável e na sua participação no mercado de eletricidade. No entanto, existem várias áreas que podem ser aprofundadas em estudos futuros, com o objetivo de otimizar ainda mais o desempenho e a viabilidade económica destes sistemas híbridos.

Uma das direções futuras mais promissoras é a minimização dos custos de operação em mercado, através da gestão otimizada das ofertas de produção feitas com 24 horas de antecedência e do controlo da produção em tempo quase real. Embora o controlo da produção nestes sistemas híbridos seja relativamente limitado, existe sempre a possibilidade de reduzir ou cortar a produção para evitar penalizações e melhorar a competitividade no mercado de eletricidade.

Outra linha de investigação relevante passa pela análise de sensibilidade do sistema híbrido sob diferentes condições operacionais. A avaliação do impacto de variações climáticas extremas, bem como das oscilações de preços no mercado, poderá permitir uma melhor compreensão da robustez do modelo preditivo e das suas limitações. Esta análise contribuiria para estratégias mais resilientes de operação e comercialização de energia.

Por fim, um aspeto crucial a explorar será a integração de sistemas de armazenamento de energia. A adição de baterias ou outras formas de armazenamento pode trazer benefícios significativos, nomeadamente na suavização da intermitência, no aumento da previsibilidade da produção e na maximização da rentabilidade da venda de energia. Como também a potência de ligação supera a potência de interligação para o nosso caso, pode ocorrer uma limitação no parque, resultando em perdas de rendimento. No entanto, com a instalação de um sistema de armazenamento de

energia por baterias (BESS), qualquer excedente de produção pode ser armazenado e posteriormente injetado na rede durante períodos de menor disponibilidade, otimizando o aproveitamento da energia gerada. Portanto, avaliar as vantagens e desafios desta integração poderá abrir novas possibilidades para o futuro da geração híbrida eólico-solar.

Deste modo, a continuação deste estudo através destas vertentes permitirá um refinamento do modelo proposto e uma maior aplicabilidade dos resultados obtidos, contribuindo para a transição energética e a integração eficiente das renováveis no mercado elétrico.

Referências

- [1] International Energy Agency (IEA). *Renewables 2022: Analysis and forecast to 2027*. Consultado em: 8 de Dezembro de 2024. 2022. URL: <https://www.iea.org/reports/renewables-2022>.
- [2] Aerogerador Lagerwey L136 4.5MW. *Lagerwey L136 4.5 MW*. Consultado em: 27 de Dezembro de 2024. URL: <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/1720-lagerwey-l136-4.5-mw#datasheet>.
- [3] Agência Portuguesa do Ambiente. *Relatório de Avaliação Ambiental - Volume 1*. Consultado em: 2 de fevereiro de 2025. 2025. URL: <https://siaia.apambiente.pt/AIADOC/AIA3747/volume1rtv120251816331.pdf>.
- [4] Sofia Brandão Ribeiro Batina. «Análise técnico/económica da integração do solar fotovoltaico nos atuais parques eólicos». Em: *Dissertação de Mestrado* (2020). Consultado em: 27 de Dezembro de 2024.
- [5] M. Beck. «NeuralNetTools: Visualization and Analysis Tools for Neural Networks». Em: *Journal of Statistical Software* (2018). Consultado em: 21 de Janeiro de 2025.
- [6] H. F. Carlak e E. Kayar. «Primary Frequency Control for Wind Power Plant using Battery Energy Storage System». Em: *Proceedings of the International Conference on Embedded and Multimedia Computing*. Consultado em: 15 de Dezembro de 2024. IEEE, 2024.
- [7] L. Chrifi-Alaoui et al. «Overview of Photovoltaic and Wind Electrical Power Hybrid Systems». Em: *Energies* (2023). Consultado em: 15 de Dezembro de 2024.
- [8] United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). *Paris Agreement*. Consultado em: 8 de Dezembro de 2024. 2015. URL: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>.
- [9] Parlamento Europeu e Conselho da União Europeia. *Diretiva (UE) 2018/2001 do Parlamento Europeu e do Conselho de 11 de dezembro de 2018 relativa à promoção da utilização de energia de fontes renováveis (RED II)*. Consultado em: 2 de Dezembro de 2024. 2018. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX%3A32018L2001>.
- [10] A. Couto e A. Estanqueiro. «Exploring Wind and Solar PV Generation Complementarity to Meet Electricity Demand». Em: *Energies* (2020). Consultado em: 15 de Dezembro de 2024.
- [11] António Couto e A. Estanqueiro. «Wind power plants hybridised with solar power: A generation forecast perspective». Em: *Journal of Cleaner Production* (2023). Consultado em: 15 de Dezembro de 2024.
- [12] LandGate Craig Kaiser. *Optimizing Land Use: The Power of Hybrid Solar-Wind Farms*. Consultado em: 5 de Janeiro de 2025. 2023. URL: <https://www.landgate.com/news/can-solar-farms-and-wind-farms-share-the-same-property>.

- [13] José Ignacio Cruz. *El autoconsumo eólico*. Consultado em: 5 de Janeiro de 2025. 2024. URL: <https://cadenaser.com/cmadrid/2024/10/21/el-autoconsumo-eolico-ser-madrid-norte/>.
- [14] Paulo Cunha. *As Fontes Renováveis e a Hibridização*. Consultado em: 27 de Dezembro de 2024. 2023. URL: <https://cenariossolar.editorabrasilenergia.com.br/as-fontes-renovaveis-e-a-hibridizacao/>.
- [15] THE 17 GOALS | Sustainable Development. Consultado em: 2 de Dezembro de 2024. URL: <https://sdgs.un.org/goals>.
- [16] EDP. *EDPR coloca em operação primeiro parque híbrido da Península Ibérica com energia solar e eólica*. Consultado em: 2 de Dezembro de 2024. URL: <https://www.edp.com/pt-pt/noticias/edpr-coloca-em-operacao-primeiro-parque-hibrido-da-peninsula-iberica-com-energia-solar-e>.
- [17] P. G. Ellis, P. A. Torcellini e D. Crawley. *Simulation of Energy Management Systems in EnergyPlus*. Citing UNT Libraries Government Documents Department. Consultado em: 15 de Dezembro de 2024. Golden, Colorado, 2008. URL: <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc894711/>.
- [18] FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Consultado em: 2 de Dezembro de 2024. URL: https://sigarra.up.pt/feup/pt/web_page.Inicial.
- [19] Ordem dos Engenheiros. *Tarde de Engenharia: Parques Eólicos do Alecrim e Pico da Urze – 18 MW*. Consultado em: 5 de Janeiro de 2025. 2023. URL: <https://www.ordemdosengenheiros.pt/pt/noticias/tarde-de-engenharia-parques-eolicos-do-alecrim-e-pico-da-urze-18-mw/>.
- [20] Comissão Europeia. *European Green Deal: Roteiro para a Neutralidade Carbónica até 2050*. Consultado em: 2 de Dezembro de 2024. 2019. URL: https://ec.europa.eu/clima/eu-action/european-green-deal_en.
- [21] União Europeia. *Objetivos da União Europeia para a Neutralidade Carbónica até 2050*. Consultado em: 2 de Dezembro de 2024. Ano de publicação. URL: https://ec.europa.eu/clima/eu-action/climate-strategies-targets/2050-long-term-strategy_en.
- [22] João Pedro Matos Fernandes. Ex-Ministro do Ambiente e da Ação Climática de Portugal. 2019.
- [23] Pedro Miguel Silva Ferreira. «Avaliação da complementaridade dos recursos eólico e solar PV, em Portugal». Em: *Dissertação de Mestrado* (2021). Consultado em: 27 de Dezembro de 2024.
- [24] Ebbe Kyhl Gøtske, Gorm Bruun Andresen e Marta Victoria. «Cost and efficiency requirements for a successful electricity storage in a highly renewable European energy system». Em: *arXiv preprint arXiv:2208.09169* (2022). Consultado em: 5 de Janeiro de 2025. URL: <https://arxiv.org/abs/2208.09169>.
- [25] Mohaiminul Islam, Guorong Chen e Shangzhu Jin. «An Overview of Neural Network». Em: *American Journal of Neural Networks and Applications* 5.1 (2019), pp. 7–11. DOI: 10.11648/j.ajnna.20190501.12. eprint: <https://article.sciencepublishinggroup.com/pdf/10.11648.j.ajnna.20190501.12>. URL: <https://doi.org/10.11648/j.ajnna.20190501.12>.

- [26] Masoud Javadi et al. «Battery Energy Storage Technology in Renewable Energy Integration: a Review». Em: *2022 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*. Consultado em: 15 de Dezembro de 2024. 2022, pp. 435–440. DOI: [10.1109/CCECE49351.2022.9918504](https://doi.org/10.1109/CCECE49351.2022.9918504).
- [27] SA JdC - Jayme da Costa. Consultado em: 2 de Dezembro de 2024. URL: <https://www.jaymedacosta.pt/>.
- [28] C. Johnathon et al. «Analyzing Electricity Markets with Increasing Penetration of Large-Scale Renewable Power Generation». Em: *Energies* (2021). Consultado em: 21 de Janeiro de 2025.
- [29] S. Lawan e W. Abidin. «A Review of Hybrid Renewable Energy Systems Based on Wind and Solar Energy: Modeling, Design and Optimization». Em: *Wind Solar Hybrid Renewable Energy System*. Consultado em: 15 de Dezembro de 2024. Elsevier, 2020. DOI: [10.1109/CCECE49351.2022.9918504](https://doi.org/10.1109/CCECE49351.2022.9918504).
- [30] Firuz Ahamed Nahid et al. «Hybrid Neural Networks for Renewable Energy Forecasting». Em: *Advances in Computer and Electrical Engineering*. Consultado em: 21 de Janeiro de 2025. 2021.
- [31] A. Sanchez de la Nieta et al. «Optimal Generic Energy Storage System Offering in Day-Ahead Electricity Markets». Em: *2015 IEEE Eindhoven PowerTech*. Consultado em: 21 de Janeiro de 2025. 2015.
- [32] A. Papakonstantinou e P. Pinson. «Information Uncertainty in Electricity Markets: Introducing Probabilistic Offers». Em: *IEEE Transactions on Power Systems* (2016). Consultado em: 21 de Janeiro de 2025.
- [33] Daniel Pestana, Sandy Rodrigues e F. Morgado-Dias. «Energy and Sustainability for Small Developing Economies (ES2DE)». Em: *2018 Energy and Sustainability for Small Developing Economies (ES2DE)*. Consultado em: 21 de Janeiro de 2025. IEEE, 2018.
- [34] Governo de Portugal. *Plano de Recuperação e Resiliência (PRR)*. Consultado em: 8 de Dezembro de 2024. 2021. URL: <https://www.portugal.gov.pt/pt/gc21/area-de-governo/plano-de-recuperacao-e-resiliencia>.
- [35] Governo de Portugal. *Plano Nacional de Energia e Clima 2030 (PNEC 2030)*. Consultado em: 8 de Dezembro de 2024. 2020. URL: https://www.portugal.gov.pt/pt/gc22/comunicacao/comunicado?i=plano-nacional-energia-e-clima-2030-aprovado-em-conselho-de-ministros&utm_source=chatgpt.com.
- [36] Assembleia da República. *Declaração n.º 15/2022, de 21 de novembro*. Consultado em: 2 de Dezembro de 2024. 2022. URL: <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/declaracao/15-2022-203676997>.
- [37] Diogo Ribeiro et al. Em: *2023 International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET)*. Consultado em: 21 de Janeiro de 2025. IEEE, 2023.
- [38] C. Sanders e J. Doe. «Techno-economic analysis of renewable energy generation at the South Pole». Em: *ArXiv Preprint* (2023). Consultado em: 5 de Janeiro de 2025. URL: <https://arxiv.org/abs/2306.13552>.
- [39] A. K. Srivastava et al. «Electricity Markets: An Overview and Comparative Study». Em: *Proceedings of the IEEE* (2011). Consultado em: 21 de Janeiro de 2025.
- [40] Rita Teixeira et al. «Advancing Renewable Energy Forecasting: A Comprehensive Review of Renewable Energy Forecasting Methods». Em: *Energies* (2024). Consultado em: 21 de Janeiro de 2025.

- [41] Lucien Wald. *Basics in Solar Radiation at Earth Surface*. Consultado em: 21 de Janeiro de 2025. ISTE Ltd e John Wiley & Sons, Inc., 2018.
- [42] S. Watson. «Quantifying the Variability of Wind Energy». Em: *Advances in Energy Systems*. Ed. por P.D. Lund et al. Consultado em: 15 de Dezembro de 2024. Wiley, 2019. Cap. 21. DOI: [10.1002/9781119508311.ch21](https://doi.org/10.1002/9781119508311.ch21). URL: <https://doi.org/10.1002/9781119508311.ch21>.