

Passive House Premium: uma integração energética viável em Portugal?

Catarina Isabel Costa Gonçalves

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia e Gestão de Energia

Orientador: Prof. Manuel Guilherme Caras Altas Duarte Pinheiro

Júri

Presidente: Prof. Jorge de Saldanha Gonçalves Matos

Orientador: Prof. Manuel Guilherme Caras Altas Duarte Pinheiro

Vogal: Prof. Carlos Augusto Santos Silva

Novembro 2019

À minha mãe, Odete Costa

Agradecimentos

Primeiramente, ao meu orientador, Professor Doutor Manuel Guilherme Caras Altas Duarte Pinheiro, pela sua disponibilidade e ajuda, ao longo da realização da dissertação.

Aos meus pais, por todas as oportunidades e condições, que me permitiram ingressar e continuar o meu percurso académico.

Um especial agradecimento à minha mãe, pelo constante apoio. Apesar da distância, a força demonstrada e transmitida, em todos os momentos, foi crucial para a superação desta etapa.

Ao meu irmão, Rodrigo, por toda a disponibilidade e ajuda, sempre que precisei.

À família que escolhi, as minhas amigas. Sara, Filipa e Marta, obrigada pela compreensão nos momentos de ausência, por me fazerem feliz e por demonstrarem que esta amizade prevalecerá no tempo.

Finalmente, aos amigos que conheci na faculdade, e que permanecerão na minha vida. Manuel e Francisco, pelo companheirismo e épicos momentos de reflexão.

Resumo

Os edifícios são responsáveis por cerca de 30% de consumo de energia primária em Portugal, o que explica a importância de medidas a aplicar no edificado, que contribuam para a descarbonização, através da eficiência energética, implementação de renováveis e mitigação dos combustíveis fósseis.

A integração das energias renováveis no âmbito de micro geração, representa um contributo importante na proliferação de um setor energético mais sustentável. Os sistemas de energia renovável caracterizam-se por serem infraestruturas e tecnologias eficientes, flexíveis e sustentáveis.

Nesta dissertação, é realizada a avaliação da implementação das energias renováveis, nomeadamente o sistema fotovoltaico e a turbina eólica, em edifícios, considerando os requisitos de certificação de Passive House Premium, mais concretamente no limite imposto da energia renovável primária.

O potencial de geração de energia renovável, envolvendo os sistemas fotovoltaicos e turbinas eólicas, é avaliado para várias localizações em Portugal, cujos resultados permitem afirmar que o potencial está dependente da localização e das várias condições inerentes ao local, cuja seleção do mix energético é característica ao edifício em estudo. A avaliação económica dos casos em estudo mostra que, as turbinas eólicas, em análise, ainda apresentam custos que, em muitas vezes, comprometem a viabilidade económica do mix energético dos projetos.

Palavras-chave:

Edifícios; renováveis; energia renovável; sistema fotovoltaico; turbina eólica; Passive House Premium

Abstract

Buildings are responsible for 30% of primary energy consumption in Portugal, which translates the importance of measures to be applied in buildings, that contributes for the decarbonisation, through energy efficiency, implementation of renewables and mitigation of fossil fuels.

The integration of renewables regarding micro generation, is an important contribution to the growth of a more sustainable energy sector. The renewable energy systems are infrastructures and technologies efficient, flexible and sustainable.

In this dissertation, there is an evaluation of the implementation of renewable energy, through photovoltaic system and wind turbines, in buildings, according the requirements of Passive House Premium certification, considering the minimum imposed of primary renewable energy.

The potential of renewable energy, considering the photovoltaic system and wind turbine, is evaluated in several locations, in Portugal, which indicates the influence of the geographical location and the conditions associated on site, in choosing the preferable renewable solutions and their specifications in the buildings in question. The economic evaluation demonstrates that in most of the cases, the use of wind turbines, of lower power, in question, still are costly, which jeopardizes the economic feasibility of the projects, according to the renewable solutions in analysis.

Keywords

Buildings; renewables; renewable energy; photovoltaic system; wind turbine; Passive House Premium

Índice

Agradecimentos	iii
Resumo	iv
Abstract	v
Índice	vi
Lista de figuras	ix
Lista de tabelas	xi
Lista de siglas e acrónimos	xiv
Lista de abreviaturas e símbolos	xiv
1. Introdução	1
1.1. Contexto.....	1
1.2. Objetivo	3
1.3. Hipótese	3
1.4. Metodologia.....	4
1.5. Estrutura.....	5
2. Passive House Premium	8
2.1. Conceito Passive House Premium	8
2.2. Certificação e necessidades energéticas	9
2.3. Casos de estudo.....	12
3. Modelação da produção de renováveis	15
3.1. Estimar necessidades e produção de energia	15
3.2. Energia Solar Fotovoltaica	16
3.2.1. Irradiância horizontal e irradiância em superfície inclinada efetiva.....	16
3.2.2. Modelo 1 díodo e 3 parâmetros	19
3.2.3. Efeito da irradiância.....	21
3.2.4. Efeito da temperatura	22
3.2.5. Potência máxima.....	23
3.2.6. Energia	24
3.2.7. Ligação à rede	26
3.2.8. Configuração do sistema fotovoltaico.....	29
3.3. Energia Eólica	31
3.3.1. Caracterização da velocidade do vento (distribuição Weibull)	31

3.3.2.	Determinação e correção de parâmetros	32
3.3.3.	Potência corrigida.....	33
3.3.4.	Curva de potência	33
3.3.5.	Energia	34
4.	Viabilidade económica	36
4.1.	Principais aspetos a considerar	36
4.1.1.	Indicadores de Avaliação de Investimento	37
4.1.2.	Custo das Renováveis.....	38
5.	Produção de Energia – opções e resultados	40
5.1.	Avaliação da produção energética em diferentes localizações	40
5.2.	Variabilidade	40
5.3.	Influência da inclinação no sistema fotovoltaico	46
5.4.	Energia do sistema fotovoltaico	47
5.5.	Energia da turbina eólica	49
5.6.	Influência da rugosidade.....	51
5.7.	Influência da orografia	53
5.8.	Influência da altura	53
5.9.	Mix energético	55
5.9.1.	Disponibilidade mensal.....	58
5.9.2.	Área do sistema fotovoltaico.....	61
5.10.	Área de referência	62
5.11.	Análise económico-financeira	63
5.11.1.	Investimento inicial	63
5.11.2.	Resultados económico-financeiros	63
6.	Avaliação de caso de estudo – Lisbon Green Valley	65
6.1.	Análise económico-financeira	68
6.2.	Considerações.....	71
7.	Discussão de resultados.....	72
7.1.	Modelo de cálculo.....	72
7.2.	Área necessária.....	72
7.3.	Mix energético	73
7.4.	Energia.....	74
7.5.	Outros parâmetros.....	74

7.5.1. Instalação.....	74
7.5.2. Seleção do painel fotovoltaico e turbina eólica.....	75
7.5.3. Avaliação económico-financeira	76
7.5.4. Aplicabilidade	76
8. Conclusão.....	77
8.1. Passive house é uma integração viável?.....	77
8.2. Desenvolvimentos futuros.....	79
9. Referências.....	81
Anexos	84
A1 – Derate.....	85
A2 – Latitude e longitude de todas as localizações	86
A3 – Ficha técnica: Painel fotovoltaico AS-6P30 (módulo policristalino) – 255W (STC)	88
A4 – Ficha técnica: Turbina Iskra HAWT 5kW	89
A5 – Ficha técnica: Turbina Windspot 7,5kW	90
A6 – Ficha técnica: Turbina Aeolos – H 20kW	92
A7 – Configurações do sistema fotovoltaico.....	93
A8 – Energia do mix energético: sistema fotovoltaico e turbina 5kW, em todas as localizações..	94
A9 – Energia do mix energético: sistema fotovoltaico e turbina 7,5kW em todas as localizações	95
A10 – Número de painéis e área do sistema fotovoltaico, para os diferentes conjuntos de solução energética, em todas as localizações.....	96
A11 – Investimento inicial e custos de operação e manutenção, para todos os conjuntos de soluções considerados, em todas as localizações.....	97
A12 – Resultados da avaliação económica, de acordo com o investimento maior e menor em cada conjunto de solução considerado.	98
A13 – Plantas dos apartamentos Lisbon Green Valley no piso 3 do Lote 10.....	99
A14 – Recomendações para os distritos e cidades atingirem o limite de energia renovável primária (120 kWh/m ²), para área de referência de 100m ²	101

Lista de figuras

Figura 1 - Modelo desenvolvido para o cálculo da energia do sistema fotovoltaico..	4
Figura 2 - Modelo desenvolvido para o cálculo da energia da turbina eólica.	4
Figura 3 - Primeira Passive House Premium em Bavaria, Alemanha, (Passive House Plus, s.d.).....	13
Figura 4 - Passive House Premium, Provence Alpes Côte d'Azur, França, (Plataforma digital dedicada a todos os profissionais no setor de edifícios com interesse em sustentabilidade: Construction 21 International, s.d.).	13
Figura 5 - Passive House Premium em Creuse, França, (Passive House Database, s.d.).....	14
Figura 6 - Circuito equivalente de célula fotovoltaica - diodo ideal.	20
Figura 7 - Curva IV de um painel fotovoltaico.	20
Figura 8 - Fatores de derate utilizados para o derate total.	26
Figura 9 - Corrente e tensão de um módulo típico com 36 células ligadas em séries, adaptado (Masters G. M., Renewable and Efficient Electric Power System, 2004).....	29
Figura 10 - Curva I-V para módulos em série: soma de tensões a uma dada corrente, adaptado (Masters G. M., Renewable and Efficient Electric Power System, 2004).....	30
Figura 11 - Curva I-V para módulos em paralelo: soma de correntes a uma dada tensão, adaptado (Masters G. M., Renewable and Efficient Electric Power System, 2004).	30
Figura 12 - Curva I-V do sistema com 3 séries e 2 paralelo, adaptado (Masters G. M., Renewable and Efficient Electric Power System, 2004).	30
Figura 13 - Curva de potência típica de uma turbina eólica com velocidade do vento constante.	34
Figura 14 - Variabilidade de energia gerada pela turbina eólica de 5kW, para cada distrito e cidade.	41
Figura 15 - Variabilidade da energia gerada pelo sistema fotovoltaico, para cada distrito e cidade.....	42
Figura 16 - Energia do sistema fotovoltaico (7,65 kW) ao longo do ano na localização nº1 em Viana do Castelo.	42
Figura 17 - Energia do sistema fotovoltaico (7,65 kW) ao longo do ano, na localização 3 em Lisboa.	42
Figura 18 - Energia do sistema fotovoltaico (7,65 kW) ao longo do ano, na localização 1 em Faro.	43
Figura 19 - Energia do sistema fotovoltaico (7,65 kW) ao longo do ano, na localização 2 em Funchal.	43
Figura 20 - Energia do sistema fotovoltaico (7,65 kW) ao longo do ano, na localização 1 em Ponta Delgada.	43
Figura 21 - Energia da turbina eólica (5kW) ao longo do ano, na localização 4 no Porto.....	44
Figura 22 - Energia da turbina eólica (5kW) ao longo do ano, na localização 2 no Porto.....	44

Figura 23 - Energia da turbina eólica (5kW) ao longo do ano, na localização 1 em Lisboa.....	44
Figura 24 - Energia da turbina eólica (5kW) ao longo do ano, na localização 3 em Lisboa.....	44
Figura 25 - Energia da turbina eólica (5kW) ao longo do ano, na localização 1 no Funchal.....	45
Figura 26 - Energia da turbina eólica (5kW) ao longo do ano, na localização 4 no Funchal.....	45
Figura 27 - Energia da turbina eólica (5kW) ao longo do ano, na localização 1 em Ponta Delgada.	45
Figura 28 - Energia da turbina eólica (5kW) ao longo do ano, na localização 6 em Ponta Delgada.	45
Figura 29 - Energia gerada pelo sistema fotovoltaico para várias inclinações.	47
Figura 30 - Energia gerada pela turbina eólica de 5kW para diferentes valores de rugosidade.	52
Figura 31 - Energia gerada pela turbina eólica (5kW) para diferentes alturas, em cada distrito e cidade.	54
Figura 32 - Energia gerada ao longo do ano pelo sistema fotovoltaico (FV) e pela turbina eólica 7,5kW, na localização 3, em Viana do Castelo.....	58
Figura 33 - Energia gerada ao longo do ano pelo sistema fotovoltaico (FV) e pela turbina eólica 5kW, na localização 1, em Vila Real.....	58
Figura 34 - Energia gerada ao longo do ano pelo sistema fotovoltaico (FV) e pela turbina eólica 5kW, na localização 2, no Porto.....	59
Figura 35 - Energia gerada ao longo do ano pelo sistema fotovoltaico (FV) e pela turbina eólica 5kW, na localização 6, em Coimbra.	59
Figura 36 - Energia gerada ao longo do ano pelo sistema fotovoltaico (FV) e pela turbina eólica 5kW, na localização 4, em Lisboa.	59
Figura 37 - Energia gerada ao longo do ano pelo sistema fotovoltaico (FV) e pela turbina eólica 5kW, na localização 6, em Évora.	59
Figura 38 - Energia gerada ao longo do ano pelo sistema fotovoltaico (FV) e pela turbina eólica 5kW, na localização 4, em Faro.	60
Figura 39 - Energia gerada ao longo do ano pelo sistema fotovoltaico (FV) e pela turbina eólica 5kW, na localização 4, no Funchal.	60
Figura 40 - Energia gerada ao longo do ano pelo sistema fotovoltaico (FV) e pela turbina eólica 5kW, na localização 3, em Ponta Delgada.	60
Figura 41 - Relação entre a área de referência e a energia necessária à certificação Passive House Premium.....	62
Figura 42 - Imagem do edifício de dois blocos de apartamentos em avaliação, (Grupo André Jordan, 2019a).	65
Figura 43 - Energia gerada por 3 turbinas 7,5 kW e pelo sistema fotovoltaico.....	67

Figura 44 - Energia gerada por 2 turbinas 20 kW e pelo sistema fotovoltaico.....	68
Figura 45 - Energia gerada por 3 turbinas 20 kW e pelo sistema fotovoltaico.....	68
Figura 46 - Valores padrão dos vários fatores de derate.....	85
Figura 47 - Planta de apartamento do Lote 10, Bloco B, Piso 3-ESQ. (<i>Grupo André Jordan,2019b</i>)...	99
Figura 48 - Planta de apartamento do Lote 10, Bloco B, Piso 3-DTO. (<i>Grupo André Jordan,2019b</i>)...	99
Figura 49 - Planta de apartamento do Lote 10, Bloco A, Piso 3-ESQ. (<i>Grupo André Jordan,2019b</i>)...	100
Figura 50 - Planta de apartamento do Lote 10, Bloco A, Piso 3-DTO. (<i>Grupo André Jordan,2019b</i>)...	100

Lista de tabelas

Tabela 1 - Requisitos segundo a norma Passive House, adaptado (PHI, 2016, p. 5)	11
Tabela 2 - Modelo que exemplifica método utilizado para o cálculo da energia.	35
Tabela 3 - Condições que implicam a viabilidade do projeto.	38
Tabela 4 - Custos em relação ao investimento necessário e de operação e manutenção para o sistema fotovoltaico e turbina eólica.	39
Tabela 5 - Número de painéis fotovoltaicos utilizados (N) e respetiva potência do sistema (P (kW)), para determinada localização do distrito e cidade.	46
Tabela 6 - Localizações utilizadas para cada distrito e cidade, para avaliar a inclinação.	46
Tabela 7 - Número de painéis fotovoltaicos mínimo e máximo, de acordo todas as localizações dos distritos e cidades, para ângulo de inclinação de 35° e área de referência 100m ²	48
Tabela 8 - Área mínima e máxima, de acordo com o número de painéis fotovoltaicos e das localizações dos distritos e cidades analisadas.	48
Tabela 9 - Valores das rugosidades utilizadas no modelo, para cada distrito e cidade.....	49
Tabela 10 - Energia anual gerada pela turbina eólica de 5kW, em cada localização de cada distrito e cidade.....	49
Tabela 11 - Energia anual gerada pela turbina de 7,5 kW, em cada localização de cada distrito e cidade.	50
Tabela 12 - Percentagem que indica o aumento de energia gerada pela turbina eólica de 7,5 kW, em relação à turbina eólica de 5 kW.....	50
Tabela 13 - Valores de comprimento rugosidade de superfície e respetiva rugosidade analisados.....	51
Tabela 14 - Percentagem que relaciona o aumento ou diminuição de energia anual gerada pela turbina eólica (5kW), para uma rugosidade de 0,294 em relação à rugosidade de 0,125.....	53

Tabela 15 - Percentagem relativamente ao aumento de energia gerada pela turbina eólica (5kW) para a altura de 100 metros, quando comparada com altura de 30 metros, em todas as localizações.	55
Tabela 16 - Percentagem relativamente ao sistema fotovoltaico (PV) e turbina eólica de 5kW do mix energético, para Viana do Castelo, Vila Real, Porto e Coimbra.....	56
Tabela 17 - Percentagem relativamente ao sistema fotovoltaico (PV) e turbina eólica de 5kW do mix energético, para Lisboa, Évora, Faro, Funchal e Ponta Delgada.....	56
Tabela 18 - Percentagem relativamente ao sistema fotovoltaico (FV) e da turbina eólica de 7,5 kW do mix energético, para Viana do Castelo, Vila Real, Porto e Coimbra.	57
Tabela 19 - Percentagem relativamente ao sistema fotovoltaico (FV) e da turbina eólica de 7,5 kW do mix energético, para Lisboa, Évora, Faro, Funchal e Ponta Delgada.	57
Tabela 20 - Área mínima e máxima para o mix energético do sistema fotovoltaico e a turbina 5kW. ..	61
Tabela 21 - Área mínima e máxima para o mix energético do sistema fotovoltaico e a turbina 7,5kW	62
Tabela 22 - Áreas consideradas para a avaliação do edifício.	66
Tabela 23 - Número de painéis fotovoltaicos (N) e respetiva potência do sistema, para as várias opções de turbinas.	66
Tabela 24 - Resultados relativamente às diferentes opções para o sistema fotovoltaico e turbina eólica de 7,5kW.....	66
Tabela 25 - Resultados relativamente às diferentes opções para o sistema fotovoltaico e turbina eólica 20kW.	67
Tabela 26 - Resultados da avaliação económica do conjunto de sistema fotovoltaico (FV) e turbina, para as várias opções consideradas, para o edifício em estudo Lisbon Green Valley.....	70
Tabela 27 - Valores dos derates utilizados no modelo de cálculo do sistema fotovoltaico.....	85
Tabela 28 - Latitude e longitude de Viana do Castelo, Vila Real, Porto, Coimbra e Lisboa.	86
Tabela 29 - Latitude e longitude de Évora, Faro, Funchal e Ponta Delgada.....	87
Tabela 30 - Configurações do sistema fotovoltaico para todas as localizações analisadas.....	93
Tabela 31 - Energia gerada pelo sistema fotovoltaico e pela turbina eólica de 5kW, de acordo com o limite total a atingir de 12000 kWh, para a área de referência de 100 m ² , de acordo com certificação PHP, em Viana do Castelo, Vila Real, Porto e Coimbra.	94
Tabela 32 - Energia gerada pelo sistema fotovoltaico e pela turbina eólica de 5kW, de acordo com o limite total a atingir de 12000 kWh, para a área de referência de 100 m ² , de acordo com a certificação PHP, em Lisboa, Évora, Faro, Funchal e Ponta Delgada.	94
Tabela 33 - Energia total gerada pelo mix sistema fotovoltaico e turbina eólica de 5kW, em todas as localizações.	94

Tabela 34 -Energia gerada pelo sistema fotovoltaico e pela turbina eólica de 7,5kW, de acordo com o limite total a atingir de 12000 kWh, para a área de referência de 100 m ² , de acordo com certificação PHP, em Viana do Castelo, Vila Real, Porto e Coimbra.	95
Tabela 35 -Energia gerada pelo sistema fotovoltaico e pela turbina eólica de 7,5kW, de acordo com o limite total a atingir de 12000 kWh, para a área de referência de 100 m ² , de acordo com certificação PHP, em Lisboa, Évora, Faro, Funchal, Ponta Delgada.	95
Tabela 36 - Energia total gerada pelo mix sistema fotovoltaico e turbina eólica de 7,5kW, em todas as localizações.	95
Tabela 37 - Número de painéis fotovoltaicos (N) e respetiva área do sistema fotovoltaico, para a opção de a energia gerada ser unicamente pelo sistema fotovoltaico, pelo sistema fotovoltaico e turbina de 5kW e sistema fotovoltaico e turbina 7,5kW, de acordo a certificação PHP para área de referência de 100 m ²	96
Tabela 38 - Custos relativamente ao investimento inicial e operação e manutenção (O&M), para as várias opções de conjunto de soluções (mix).	97
Tabela 39 - Resultados da avaliação económica para a localização com maior e menor custo para o mix: sistema fotovoltaico, turbina eólica 5kW e sistema fotovoltaico e Turbina eólica 7,5 kW e sistema fotovoltaico.	98
Tabela 40 - Número de painéis fotovoltaicos (N) e Investimento necessário para os vários mix's energéticos atingirem o limite de energia renovável primária de 120 kWh/m ² , para área de referência de 100 m ² , em Viana do Castelo, Vila Real, Porto, Coimbra e Lisboa..	101
Tabela 41 - Número de painéis fotovoltaicos (N) e Investimento necessário para os vários mix's energéticos atingirem o limite de energia renovável primária de 120 kWh/m ² , para área de referência de 100 m ² , em Évora, Faro, Funchal e Ponta Delgada.....	102

Lista de siglas e acrónimos

PER (Primary Energy Renewable)	Energia Renovável Primária
PIB	Produto Interno Bruto
GEE	Gases de Efeito de Estufa
PHP (Passive House Premium)	Casa Passiva Premium
PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System)	Sistema de determinação de soluções fotovoltaicas)
STC (Standard Test Conditions)	Condições Normais de Operação
NOCT (Normal Operating Cell Temperature)	Temperatura Normal de Células em Operação
MPP (Maximum Power Point)	Ponto de Potência Máxima
DC (Direct Current)	Corrente Contínua
AC (Alternating Current)	Corrente Alternada
VAL	Valor Atual Líquido
TIR	Taxa Interna de Rentabilidade
IRP	Índice de Rendibilidade de Projeto
PRI	Período de Retorno de Investimento
IRENA (International Renewable Energy Agency)	Agência Internacional de Energias Renováveis
CAPEX (Capital Expenditure)	Montante de dinheiro despendido na aquisição de bens de uma empresa
OPEX (Operational Expenditure)	Capital para manter ou melhorar bens físicos de uma empresa
IPES	Instituto Português de Energia Solar

Lista de abreviaturas e símbolos

ϕ	Latitude
β	Ângulo de inclinação dos painéis
γ	Azimute

G_{on}	Irradiância extraterrestre incidente no plano normal
G_{sc}	Constante solar (1360 W/m ²)
t_s	Hora solar
L_{loc}	Longitude
w	Ângulo relativamente à hora solar
δ	Declinação
θ_z	Ângulo de incidência da irradiação direta na superfície horizontal
θ	Ângulo de incidência da irradiação direta numa superfície
G_o	Irradiância extraterrestre na superfície horizontal
G	Irradiância horizontal global
G_d	Irradiância horizontal difusa
k_T	Clearness index
G_T	Irradiância da superfície (painel) inclinada
G_r	Irradiância refletida
G_b	Irradiância direta
A_i	Parâmetro que relaciona a irradiância direta e a extraterrestre na superfície horizontal
R_b	Parâmetro que relaciona o ângulo de irradiação direta na superfície horizontal
α_r	Nível de sujidade
$\frac{\tau_{dirt}(0^\circ)}{\tau_{clean}(0^\circ)}$	Fator relativo normal de transmitância que indica nível de sujidade dos painéis
FT_b	Fator de transmitância direto
FT_d	Fator de transmitância difuso
FT_r	Fator de transmitância refletido
$G_{d,EFF}$	Irradiância difusa efetiva
$G_{r,EFF}$	Irradiância refletida efetiva
$G_{b,EFF}$	Irradiância direta efetiva
$G_{total,EFF}$	Irradiância total
I	Corrente
V	Tensão

I_L	Corrente gerada na presença de luz solar
I_D	Corrente que percorre o díodo
T_{ref}	Temperatura de referência
G_{ref}	Irradiância de referência
AM	Relação ar/massa
I_{sc}^{ref}	Corrente de curto circuito de referência
V_{oc}^{ref}	Tensão de circuito aberto de referência
I_{mp}^{ref}	Corrente correspondente ao ponto de potência máxima de referência
V_{mp}^{ref}	Tensão correspondente ao ponto de potência máxima de referência
k	Constante de Boltzman.
q	Carga de eletrão
I_0	Corrente inversa de saturação
$I_{0,ref}$	Corrente inversa de saturação de referência
m'	Fator de idealidade
$V_{T,ref}$	Potencial térmico de referência
V_T	Potencial térmico
I_{sc}	Corrente de curto circuito
T_{amb}	Temperatura ambiente
G	Irradiância
G_{ref}	Irradiância de referência
T_{cell}	Temperatura da célula fotovoltaica
$\alpha(I_{sc})$	Coefficiente de temperatura da corrente de curto circuito
E_g	Energia de hiato
N_c	Número de células de um modulo fotovoltaico
N	Número de painéis fotovoltaicos
V_{mp}	Tensão correspondente ao ponto de potência máxima
I_{mp}	Corrente correspondente ao ponto de potência máxima
P_{mp}	Potência máxima

A	Área do rotor da turbina eólica
ρ	Densidade
U	Velocidade do vento
P	Potência disponível
c	Parâmetro de escala
k	Parâmetro de forma
R	Constante específica de gás para ar seco
h	Altura da turbina
h_{ref}	Altura de referência
α	Rugosidade
z_o	Comprimento de rugosidade da superfície
σ	Desvio padrão
Γ	Função gamma
P_{corr}	Potência corrigida
P_{elec}	Potência elétrica
C_p	Coeficiente de potência

1. Introdução

1.1. Contexto

O setor energético, para além de exercer um papel fundamental no crescimento económico, também tem uma grande influência nos problemas ambientais que o planeta se tem vindo a deparar. O estudo do setor analisa vários períodos, que demonstram a evolução da produção e consumo de energia, influenciada pela disponibilidade e acessibilidade das matérias primas, associadas aos avanços tecnológicos, e até eventos históricos. A intensidade energética é um parâmetro ligado ao crescimento económico, que indica a eficiência energética da economia de um país. Um valor alto representa um alto custo em converter energia em produto interno bruto, um valor menor, o contrário, baixo custo em converter energia em produto interno bruto. O rácio entre a energia final consumida e o produto interno produto (*PIB*) descreve a intensidade energética de uma economia, em que a sua análise, juntamente com outros parâmetros relevantes ao fornecimento e consumo de energia, durante uma série de anos fornece resultados de grande interesse, relativamente a determinados períodos, marcados por disrupções históricas, tecnológicas, económicas, políticas ou sociais (Jarmo, Kaivo-oja, & Luukkanen, 2018). É importante referir que o crescimento económico engloba várias variantes para além da energia mencionada neste capítulo, nomeadamente a influência do conceito de exergia, do investimento ou da produtividade, (Santos, Domingues, Sousa, & Aubyn, 2018). Como já referido, a análise temporal permite identificar períodos de relevância, que impactaram de alguma forma a economia de uma nação, nomeadamente as revoluções industriais, e perante o cenário destrutivo no planeta, com origem no uso desmedido de combustíveis fósseis, prevê-se uma revolução no sentido de substituição do recurso não renovável em renovável, caracterizando-se por uma nova transição energética.

As consequências negativas do excessivo recurso aos combustíveis fósseis são cada vez mais visíveis e estudadas, nomeadamente para o ambiente do planeta e consequente deterioração da saúde e qualidade de vida das populações. Estes acontecimentos alarmantes mudaram prioridades no setor, em que o objetivo passa pela mudança do recurso predominante dos combustíveis fósseis, para as energias renováveis. O estudo do consumo dos combustíveis fósseis, da situação social e política e da macroeconomia, nos vários países europeus, é importante para a avaliação do passado, presente e as expectativas em relação ao futuro, delineando uma estratégia apropriada a cada caso, conforme as considerações que influenciam a forma de efetuar a transição energética, (Singh, Bocca, Gomez, Dahlke, & Bazilian, 2019). O estudo dos combustíveis fósseis, numa perspetiva de sustentabilidade, considerando a importância de economia circular é relevante, de acordo com o consumo de energia e a relação com outras variáveis, como a dependência energética e a parte de energia renovável considerada quando analisando o consumo final bruto de energia. A análise a vários países europeus, realizada pelos autores Florinda Martins, Carlos Felgueiras e Miroslava Smitjova, confirma ainda a forte dependência dos combustíveis fósseis de muitos países (Martins, Felgueiras, & Smitkova, 2018).

A transição energética tem vindo a ser uma aposta dos países que reconhecem as consequências do contínuo recurso aos combustíveis fósseis durante vários anos. A transição energética e a descarbonização da economia são objetivos que têm vindo a ser mais evidenciados na esfera política,

e sido avaliadas como oportunidades de crescimento económico, sendo imprescindíveis para cumprir o compromisso, assumido por Portugal em 2016, de atingir neutralidade carbónica até 2050.

Esta mudança de paradigma poderá ser sustentada numa sinergia entre a eficiência energética e a proliferação de energia renováveis, com muito potencial na procura global de energia, no crescimento económico, diretamente na criação de emprego, sendo uma via para atingir objetivos delineados pelo Acordo de Paris (Gielen, et al., 2019).

As energias renováveis, como já mencionado, fazem parte da solução. Elas têm origem no sol, vento, água ou outras fontes inesgotáveis fornecidas pelo planeta, que contribuem para a diminuição da emissão de gases de efeito de estufa (GEE), e outros poluentes nocivos para a saúde. A introdução de painéis solares térmicos, para aquecimento de águas sanitárias, e de painéis solares fotovoltaicos, para produção de eletricidade, contribuíram para uma maior compreensão e sensibilização da importância da obtenção de energia de fontes naturais e renováveis, resultando diretamente numa poupança energética, não comprometendo a eficiência dos edifícios. A eficiência energética passou também a ser uma prioridade nos edifícios, e a certificação energética passou a ser uma ferramenta fundamental para avaliar os edifícios.

Portugal assumiu o compromisso que obriga a que de todos os novos edifícios sejam energeticamente eficientes, com um balanço energético quase zero. A implementação de medidas que tornem um edifício com necessidades energéticas quase nulas passará a ser obrigatório, em que essas pequenas necessidades deverão ser colmatadas por renováveis, segundo a adição do Decreto-Lei n.º118 / 2013 à publicação da diretiva relativa ao desempenho energético dos edifícios 2010/31/EU (UE, 2010). Estes edifícios caracterizam-se por um desempenho energético elevado, destacando-se as reduzidas, ou quase nulas, necessidades energéticas, que devem ser suprimidas por energia de fonte renovável, produzida no edifício ou local próximo. A mais recente diretiva atribui a cada estado-membro a criação de um plano de ação que estabeleça os requisitos necessários, relativamente ao desempenho energético e à contribuição da energia renovável nos edifícios. Houve necessidade de um novo decreto que indicasse os requisitos relativamente a estes edifícios, que surgiu recentemente, em abril de 2019, decreto n.º98/2019. A 2 de abril de 2019, foi publicada no Diário da República, I Série, a Portaria n.º98/2019, que define a metodologia relativamente à determinação da classe de desempenho energético e os requisitos de comportamento técnico e de eficiência dos sistemas técnicos de edifícios novos e existentes sujeitos a intervenção. Relativamente aos sistemas de energia de origem renovável, estes devem suprir 50% das necessidades anuais de energia primária, dos edifícios de necessidades energéticas quase nulas.

A avaliação do edificado pode ser feita através da norma internacional Passive House. Passive House é um conceito construtivo, assente num padrão de elevado desempenho energético, que contempla o conforto, sustentabilidade e viabilidade económica. O desempenho energético tem por base a redução das necessidades de aquecimento e arrefecimento, através de medidas durante a conceção e construção do edifício, cumprindo os requisitos necessários à certificação (Passive House requirements, 2019). As Passive House são classificadas de acordo com a quantidade de energia renovável gerada e energia renovável primária que necessitam. O potencial energético das passive

house está dependente da sua localização, logo quando as energias renováveis são analisadas, o mix energético selecionado é muito importante para obter os resultados desejados.

As Passive House podem ser agrupadas em três categorias: Classic, Plus e Premium. A categoria Classic é considerada a tradicional, no sentido em que determina os requisitos básicos das necessidades energéticas, nomeadamente a necessidade de aquecimento anual. Os valores reduzidos de necessidades energéticas são conseguidos com o planeamento e a implementação de medidas adotadas na fase de conceção e construção destes edifícios. Os seus requisitos servem de base para as categorias que se seguem, limitando a quantidade de energia útil disponível para aquecimento, assim como a energia necessária para arrefecimento, valores de estanquidade e o estabelecimento do critério que avalia o conforto. As categorias Classic, Plus e Premium divergem nos limites impostos relativamente à necessidade de energia renovável primária e energia renovável gerada. A categoria Classic equilibra os consumos com a produção local, enquanto que na Plus e na Premium a produção local de renováveis excede as necessidades de consumo. A Classic impõe o limite maior para a necessidade de energia renovável anual ($60 \text{ kWh/m}^2\text{a}$) e a Premium o menor limite. Por sua vez, a categoria Premium impõe o maior valor de energia renovável primária gerada ($120 \text{ kWh/m}^2\text{a}$), enquanto que a Classic não contempla sistemas de geração de energia renovável.

A Passive House Premium é a categoria mais recente e suscitou particular interesse devido à quantidade exigida de energia renovável de um edifício, o dobro da categoria que lhe antecede (Plus). A influência da implementação de renováveis, que consigam atingir o limite imposto, nos edifícios ou na área envolvente pelo que motivou o estudo desta mais recente categoria. Esta categoria assume a utilização de vários sistemas de geração de energia de diferente origem renovável, com várias possibilidades de mix's energéticos, com a finalidade de atingir o limite de $120 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ de energia renovável primária.

1.2. Objetivo

Esta dissertação pretende averiguar a implementação das energias renováveis nos edifícios, com a finalidade de obter um balanço energético positivo, considerando os requisitos de uma Passive House Premium e as condicionantes inerentes a cada edifício em estudo, que determinam a performance do mix energético, em Portugal. Em acréscimo da investigação tecnológica, a viabilidade económica também é um dos objetivos a alcançar, sendo uma análise importante, que determina a aceitação e o desenvolvimento de qualquer projeto.

1.3. Hipótese

A hipótese da dissertação consiste na investigação da viabilidade de um edifício, segundo os requisitos das Passive House Premium, que consiste na possibilidade de atingir uma produção de energia renovável primária (PER) no edificado de $120 \text{ kWh/m}^2\text{a}$.

A integração das Passive House Premium, em Portugal, é estudada com especial destaque para a componente renovável, com o intuito de analisar as condicionantes associadas à geração de energia renovável, na medida em que o mix energético para cada caso é de extrema relevância para obter os valores positivos de energia produzida que é pretendido. A exequibilidade financeira também será investigada, sendo imprescindível para a validação do projeto, a nível do investidor e/ou consumidor.

1.4. Metodologia

Primeiramente, os critérios relativamente às necessidades de aquecimento e arrefecimento que validam uma Passive House Premium são confirmados. Como ênfase desta dissertação envolve a geração de energia de fonte renovável, um modelo de cálculo é desenvolvido que analisa as soluções energéticas a serem implementadas para os vários casos em estudo. O modelo de cálculo, do sistema fotovoltaico e da turbina eólica, é aplicado às várias localizações, e, posteriormente, é avaliado o desempenho relativamente ao mix energético. A análise dos resultados é realizada e as principais conclusões são referidas, tendo em conta o potencial energético e a análise económica para o mix energético em questão. A Figura 1 ilustra as etapas principais que estão envolvidas no modelo de cálculo da energia do sistema fotovoltaico (energia solar fotovoltaica). A Figura 2 também indica etapas a destacar do modelo desenvolvido para a energia da turbina eólica (energia eólica).

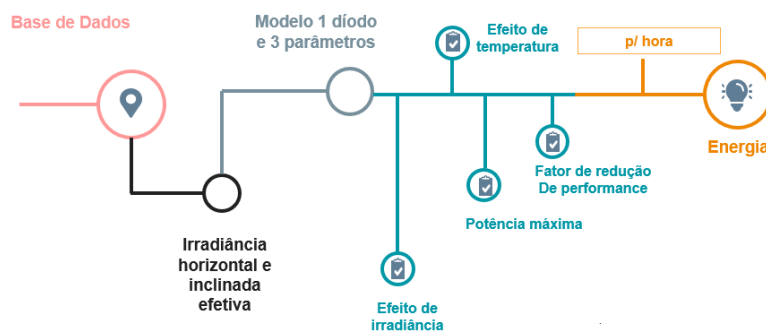


Figura 1 – Modelo desenvolvido para o cálculo da energia do sistema fotovoltaico.

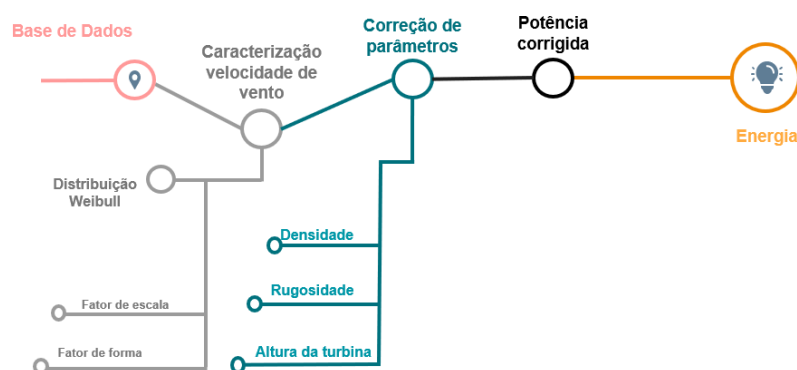


Figura 2 – Modelo desenvolvido para o cálculo da energia da turbina eólica.

1.5. Estrutura

A presente dissertação está estruturada em oito capítulos e anexos.

Capítulo 1 – Introdução

O capítulo inicial apresenta o tema que será abordado na dissertação, contextualizando-o e evidenciando a importância do mesmo. Os objetivos são expostos e a hipótese é revelada, com a finalidade de a validar. De seguida, a metodologia demonstra os caminhos que conduzirão ao resultado final da tese e, finalmente, a estrutura que exhibe e explicita sucintamente o conteúdo dos capítulos.

Capítulo 2 – Passive House Premium

O segundo capítulo introduz a categoria Passive House Premium e destaca os requisitos necessários à sua certificação, com ênfase nas necessidades energéticas e produção de energia primária renovável. Em acréscimo, exemplos de casos pertinentes de Passive Houses Premium são referidos, com o intuito de complementar o conceito exposto e a sua real aplicabilidade.

Capítulo 3 – Modelação da produção de renováveis

Neste capítulo é exibido um modelo concebido, que calcula e analisa o desempenho da instalação das soluções renováveis, nomeadamente através de painéis fotovoltaicos e da turbina eólica. O modelo baseado no estudo da performance das tecnologias de fonte renovável é explicado, considerando as várias etapas e procedimentos envolvidos no método da determinação da energia renovável gerada.

Capítulo 4 – Viabilidade económica

Os indicadores que auxiliam na análise da viabilidade económica são introduzidos, indispensáveis na avaliação e consequente aceitação e desenvolvimento dos projetos, para cada caso a ser estudado. Ainda neste capítulo, são indicados os custos admitidos associados a cada tecnologia, sistema fotovoltaico e turbina eólica, justificando a seleção dos mesmos.

Capítulo 5 – Produção de Energia – opções e resultados

Depois da elaboração do modelo, que avalia a aplicação das renováveis, este é utilizado em vários casos de estudo, com diferentes condicionantes, que permitem obter uma representatividade do potencial de Portugal. A avaliação dos vários casos contempla informações e considerações relativamente ao dimensionamento, desempenho energético e custos que determinam a viabilidade económica das soluções renováveis em estudo.

Capítulo 6 – Avaliação de caso de estudo – Lisbon Green Valley

O caso de um edifício composto por vários apartamentos em Belas, Lisboa é analisado. Para o caso particular é feito o dimensionamento dos sistemas de geração de energia renovável, de acordo com a certificação Passive House Premium e o limite imposto relativamente à energia renovável primária. Adicionalmente, também são determinados os indicadores de avaliação do investimento, e a viabilidade económica do projeto é analisada, finalizando com comentários e recomendações face aos resultados energéticos e económicos.

Capítulo 7 – Discussão de resultados

Os resultados alcançados nos capítulos anteriores suscitam considerações, mencionadas neste capítulo. Essas considerações incluem limitações, que os modelos de cálculo possam ter, de acordo com as condições impostas, recomendações relativamente à utilização dos modelos de cálculo, e ilações que surgem das várias análises dos resultados energéticos, destacando as limitações físicas abrangidas ao local de instalação e seleção do mix energético. Não menos importante, também são discutidas recomendações relativamente ao modelo económico e a implicação dos resultados obtidos em detrimento das condições utilizados no modelo, desde o preço de eletricidade a outros parâmetros económicos.

Capítulo 8 – Conclusões e Recomendações

No último capítulo, através dos resultados obtidos ao longo da dissertação, a resposta à validação da hipótese inicialmente proposta é dada. Após o trabalho realizado são feitas recomendações e considerações com perspetivas futuras, relativamente à integração viável de uma Passive House Premium, tendo em conta o potencial de Portugal.

Anexos:

- A1 – Fatores de perdas ou redução no sistema (Derate)
- A2 – Latitude e longitude de todas as localizações
- A3 – Ficha técnica: Painel fotovoltaico AS-6P30 (módulo policristalino) – 255W (STC)
- A4 – Ficha técnica: Turbina Iskra HAWT 5kW
- A5 – Ficha técnica: Turbina Windspot 7,5kW
- A6 – Ficha técnica: Turbina Aeolos – H 20Kw
- A7 – Configurações do sistema fotovoltaico
- A8 – Energia do mix energético: sistema fotovoltaico e turbina 5kW em todas as localizações
- A9 – Energia do mix energético: sistema fotovoltaico e turbina 7,5kW em todas as localizações

A10 – Número de painéis e área do sistema fotovoltaico, para os diferentes conjuntos de soluções energéticas, em todas as localizações

A11 – Investimento inicial e custos de operação e manutenção, para todos os conjuntos de soluções considerados, em todas as localizações

A12 – Resultados da avaliação económica, de acordo com o investimento maior e menor em cada conjunto de solução considerado

A13 – Plantas dos apartamentos Lisbon Green Valley no piso 3 do Lote 10

A14 – Recomendações para os distritos e cidades atingirem o limite de energia renovável primária (120 kWh/m²), para área de referência de 100m²

2. Passive House Premium

2.1. Conceito Passive House Premium

Edifícios considerados Passive House são caracterizados pelo alto nível de conforto, em simultâneo com baixo consumo de energia, frequentemente denominados por edifícios com necessidades energéticas nulas, ou quase nulas. Estes resultados são obtidos maioritariamente na fase de conceção e construção, conjugando o isolamento térmico, sistema de ventilação adequado, redução de pontes térmicas, qualidade e durabilidade dos materiais usados, entre outros (Passive House Institute, 2018, pp. 35-53). Vários estudos analisam os parâmetros que definem um ar ambiente interior de qualidade, tendo em consideração a concentração de CO₂, que demonstram a possibilidade de um edifício com necessidades energética quase zero, simultaneamente com um ambiente interior de qualidade, juntamente com conforto térmico (Wang, Kuckelkorn, Zhao, Spliethoff, & Lang, 2017). A otimização dos edifícios devem ser analisada para o clima em que estes se inserem, abordando aspetos como sistemas de arrefecimento e aquecimento, condições necessárias à fase de conceção e construção dos edifícios, que devem ser estudadas cumprindo com as leis necessárias à certificação do edifício, (Figueiredo, Kampf, & Vicente, 2016).

A transição de combustíveis fósseis para fontes de energia renováveis suscitou grande interesse, na possibilidade de geração de energia renovável nos edifícios, motivando o surgimento de novas categorias de Passive Houses que enaltecem essa possibilidade, nomeadamente Plus e Premium.

Esta dissertação foca-se na categoria Passive House Premium, que se destaca das outras categorias por gerar energia significativa adicional, quando comparada com as necessidades energéticas do edifício. A energia gerada é baseada na energia renovável primária (PER). O sucesso destes edifícios assenta na implementação de medidas, que resultam na alta eficiência energética, em simultâneo com a geração de energia renovável.

A energia renovável não é deduzida relativamente às necessidades energéticas. Isto é, a utilização de painéis solares térmicos é considerada energia renovável, no entanto essa energia não é contabilizada para o limite de energia renovável primária gerada, pois para além de essa energia reduzir as necessidades energéticas, não fazendo sentido voltar a ser contabilizada, também não origina energia elétrica que possa ser utilizada diretamente pelo edifício. No entanto, é importante referir que, caso a energia renovável gerada seja maior que a imposta pela certificação, o limite baseado na necessidade de energia renovável primária (PER) aumenta. O contrário acontece, quando a necessidade PER é menor que o limite, o valor necessário de energia renovável gerado diminui. Basicamente há uma tolerância e um balanço, para a certificação, entre o limite referente à necessidade PER e a geração de energia renovável primária.

A energia renovável primária gerada tem como referência a área no solo, ou projetada, do edifício (*projected building footprint*), isto é, a projeção vertical da envolvente térmica relativa ao chão. É um aspeto importante, visto ser a abordagem mais correta, pois pondera a possibilidade de os edifícios terem múltiplos pisos e a área que beneficia a geração de energia renovável. Se o parâmetro fosse a

área útil, tal como acontece quando avaliando as necessidades energéticas, iria beneficiar os edifícios com um único piso em detrimento dos com vários pisos, devido ao maior potencial inerente a uma área superior, resultando numa menor geração de energia renovável por metro quadrado (m²). Esta referência permite avaliar edifícios independentemente do número de pisos, seja com apenas um, ou múltiplos, e também aqueles que têm um maior espaço exterior disponível em redor (Passive House Institute, 2018, p. 56).

A energia renovável a ser gerada não está restrita apenas à área relativa à cobertura, ou à próxima, em redor ao edifício. Quando as condições não são favoráveis, seja pela existência de sombras, má orientação, obstáculos ou outros fatores limitadores, os requisitos de energia renovável podem ser alcançados através de sistemas que não estejam associados espacialmente ao edifício, ou ao terreno de construção. Nestes casos, o investimento pode ser através da participação monetária na construção de novos parques eólicos ou fotovoltaicos, em que a quantidade de eletricidade gerada considerada depende da percentagem do sistema total que o edifício detém. No entanto, é relevante salientar que não são considerados os casos em que o proprietário do edifício compra energia renovável de sistemas já existentes, é necessário que participe no investimento da construção de novos sistemas de que irá beneficiar (Passive House Institute, 2018, pp. 56-57).

Os sistemas mais difundidos no que concerne às energias renováveis, nomeadamente os fotovoltaicos ou eólicos, e de maior escala, centrais fotovoltaicas, eólicas ou hídricas fazem parte das possibilidades que permitem gerar energia elétrica de origem renovável.

Apesar da existência de várias tecnologias que geram energia renovável, térmica ou elétrica, algumas, apesar do seu uso no edifício, para efeitos contabilização de geração de energia renovável primária podem ser desprezados. São os casos da utilização de biomassa, centrais para produção de energia a partir de resíduos, uso de energia geotérmica e solar térmica, pois os resultados são deduzidos na necessidade de energia renovável primária. Os sistemas de aquecimento a biomassa, se necessário, podem ser usados, mas caso a energia gerada seja contabilizada, o limite necessário de energia renovável primária imposto aumenta. O aproveitamento de energia geotérmica, em edifícios e centrais de tratamento para a incineração de resíduos, não é considerado renovável sustentável, tendo em conta os métodos e processos. A energia solar térmica, também não convém ser considerada, pois já é contabilizada na geração de calor, reduzindo a necessidade de energia renovável primária (PER) no modelo, não fazendo sentido também adicionar à geração de energia renovável (Passive House Institute, 2018, pp. 56-57).

2.2. Certificação e necessidades energéticas

A certificação de um edifício segundo a norma Passive House deverá ser feita por uma entidade autenticada para tal. A Passivhaus Institut (*Passive House Institute*) é um exemplo de uma instituição independente de investigação pioneira na área, que para além de possuir competência para a certificação de edifícios, também oferece programas de formação a nível global para tal. Atualmente, a norma definida pela instituição contempla edifícios residenciais, não residenciais e antigos. Os critérios

da norma Passive House caracterizam-se pelo elevado conforto térmico, associado ao mínimo consumo de energia. Houve necessidade de incluir os edifícios existentes antigos reabilitados onde os requisitos da Passive House não são totalmente alcançáveis, designado pela norma EnerPHit. Adicionalmente há a Low Energy Building que engloba os edifícios, que por vários motivos, não conseguem cumprir com os requisitos pela norma anteriormente mencionada, com destaque nos diferentes valores para cada clima (Passive House Institute, 2018, pp. 8-10). Apesar da segmentação das normas, todas têm determinados requisitos mínimos gerais (PHI, 2016, pp. 5-17).

A possibilidade da certificação Passive House Premium (PHP), segundo os requisitos necessários, poderá ser avaliada pela norma Passive House ou EnerPHit. Nos requisitos estão incluídos os valores que devem ser cumpridos, através de medidas na conceção dos edifícios, referentes ao isolamento térmico, envolvente do edifício, ventilação, entre outros, assim como os das necessidades energéticas e energia renovável primária mínima a ser gerada (PHI, 2016, pp. 5-17).

O destaque da Passive House Premium consiste na geração de energia de fonte renovável, logo é de extrema relevância sintetizar os requisitos para a sua certificação, com o objetivo de averiguar o potencial energético de Portugal. Os critérios que originam a certificação estão sintetizados na Tabela 1, com especial atenção nas necessidades energéticas e na energia renovável primária, segundo a norma Passive House. A área de referência para o cálculo das necessidades, inclusive a PER, é a área útil do edifício, enquanto que a área de referência para a energia renovável primária gerada é a área projetada, daí que as unidades para este limite serem kWh/m²a.

Tabela 1 - Requisitos segundo a norma Passive House, adaptado (PHI, 2016, p. 5) .

			Critérios			Critérios alternativos
Aquecimento						
Necessidade de aquecimento	[kWh/m ² a _{Área útil}]	≤	15			-
Arrefecimento						
Necessidade de arrefecimento + desumidificação	[kWh/m ² a _{Área útil}]	≤	15 + contribuição de desumidificação			valor limite variável
Estanquidade						
Teste de pressurização n50	[1/h]	≤	0,6			
Energia Renovável Primária (PER)			Classic	Plus	Premium	
Necessidade PER	[kWh/m ² a _{Área útil}]	≤	60	45	30	+- 15kWh/m ² a desvio de Critérios
Energia Renovável gerada	[kWh/m ² a]	≥	-	60	120	

A evolução de uma Passive House Classic para Premium deve-se essencialmente à redução da necessidade de energia renovável primária e ao aumento da energia renovável primária gerada, uma vez que numa Classic os outros parâmetros relativamente, por exemplo, à necessidade de aquecimento ou estanquidade já estão dentro dos limites estabelecidos, sendo que em certos casos poderão ainda ser melhorados, ajudando a diminuir a necessidade de energia renovável primária (PER). A redução da necessidade de energia renovável primária pode ser obtida através da implementação de vários sistemas, como painéis solares térmicos e recuperação de água proveniente de duchas, em simultâneo com um sistema de distribuição de água quente eficiente. A utilização de bombas de calor e medidas que fomentem a eficiência energética, por exemplo, substituição de lâmpadas que aumentem a eficiência elétrica, são também opções que diminuem a necessidade de energia renovável primária. Juntamente com as medidas mencionadas, também são necessárias outras que permitam atingir o

valor pedido relativamente à geração de energia renovável. Os sistemas fotovoltaicos instalados no telhado ou na área permitida, de acordo a certificação, normalmente obtêm resultados satisfatórios, como será demonstrado no subcapítulo 2.3. Caso seja necessário há outras tecnologias que podem ser utilizadas como as turbinas eólicas, que de forma adicional, ou complementar, geram o necessário. A importância do investimento em parques fotovoltaicos ou eólicos pode ser outra solução, mas é de realçar, novamente, que só são válidos para contabilização, caso sejam sistemas novos para o efeito.

As medidas a implementar devem ser analisadas para cada caso em estudo, tendo em conta as necessidades de cada edifício, pois o serviço que cada presta é indicativo das medidas a adotar, logo o mesmo sistema ou medida pode não ter o mesmo impacto em edifícios distintos. Outra condicionante está relacionada com o clima, onde o edifício se localiza, pois para além de influenciar as necessidades energéticas, afeta igualmente o desempenho dos sistemas de energia renovável a serem instalados, evidenciando ainda mais a importância do mix energético, de acordo com a disponibilidade dos recursos naturais usados como fontes para os sistemas, seja o vento ou o sol.

2.3. Casos de estudo

As Passive House Premium são relativamente recentes, portanto em comparação com as Classic, os exemplos encontrados não são muitos. Apesar da existência de poucos exemplos, neste subcapítulo é pretendido demonstrar a exequibilidade de Passive Houses, em diferentes locais, com certificação Premium.

O primeiro a alcançar a acreditação foi desenvolvido em Kaufbeuren, Alemanha, concetualizado para uso comercial e residencial. O número de pisos são três, com uma área útil de 910 m², conhecido como *A Casa da Energia (The House of Energy)*, Figura 3. Neste edifício destaca-se a utilização de painéis fotovoltaicos, bomba de calor geotérmica, estruturas que provocam isolamentos térmicos elevados e a conceção de medidas inteligentes, que resultam na alta eficiência energética, relativamente à necessidade de aquecimento, ventilação e iluminação. A necessidade de energia renovável primária (PER) é de 21 kWh/m²a, ficando abaixo do limite de 30 kWh/m²a, compensando de certa forma a impossibilidade de chegar aos 120 kWh/m²a de geração de energia renovável, através do sistema fotovoltaico instalado de 250 m² no telhado (Passive House Plus, 2019).



Figura 3 - Primeira Passive House Premium em Bavaria, Alemanha, (Passive House Plus, 2019).

O próximo caso refere-se a uma moradia familiar, situada em Provence Alpes Côte d'Azur, França, Figura 4, de área útil 155 m². A moradia é caracterizada pela necessidade de aquecimento reduzida de 1 kWh/m²a e necessidade de energia renovável primária 54 kWh/m²a. Este valor é superior ao limite imposto pela certificação, mas conforme a tolerância admitida para os valores, e o balanço entre a necessidade PER e a energia renovável gerada, admite-se que para ter conseguido alcançar a certificação Premium, o limite de energia renovável primária deve ter sido superior aos 120 kWh/m²a. A energia renovável é obtida através do sistema fotovoltaico de 42 m², e 4 m² de painéis solares térmicos, aproximadamente quatro vezes superior à consumida (Construction 21, 2019).



Figura 4 - Passive House Premium, Provence Alpes Côte d'Azur, França, (Construction 21, 2019).

O último edifício a ser referenciado situa-se em Creuse, França, com 252 m² de área útil e três pisos, Figura 5. Um sistema de aquecimento ou arrefecimento é dispensável, o que reduz as necessidades energéticas para 6 kWh/m²a, enquanto que a necessidade de energia primária é 43 kWh/m². A energia renovável primária é gerada através de um sistema de painéis fotovoltaicos bifacial de 96 m², com

recurso a baterias para armazenamento de energia. A eletricidade gerada é suficiente para os dois edifícios associados ao terreno, incluindo a moradia em questão, denominada por Avenidor. A moradia é particularmente interessante, porque para além da certificação Premium é também 100% autónoma, relevante tendo em conta o local onde se integra, com fraco acesso a eletricidade, tendo ainda a capacidade de filtrar água recuperada ou através de perfuração própria para consumo (Passive House Database, 2019).



Figura 5 - Passive House Premium em Creuse, França, (Passive House Database, 2019).

3. Modelação da produção de renováveis

3.1. Estimar necessidades e produção de energia

O modelo concebido, para a determinação da energia renovável gerada nos edifícios, contempla a energia solar fotovoltaica e a energia eólica. As necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento, bem como a necessidade de energia renovável primária (PER) não são calculadas, visto serem condições preliminares impostas à certificação. A energia resultante do modelo é contabilizada diretamente na parte renovável gerada, não sendo deduzida nas necessidades energéticas, permitindo avaliar os valores alcançados e a possibilidade de chegar aos 120 kWh/m²a, imposta pela certificação Passive House Premium. O valor a atingir é anual, mas o modelo fornece também valores mensais, relevantes para o estudo da energia disponível e consumida nos edifícios a avaliar.

A aquisição de dados é muito importante para o cálculo da energia. A obtenção dos valores, calculados pelo modelo, depende da exatidão dos dados inseridos, e por essa razão, tanto para os painéis fotovoltaicos, como para a turbina eólica, foram usados dados de um ano meteorológico típico. Os dados de um ano meteorológico resultam de uma média de vários anos, suficiente para ter significado e caracterizar uma determinada localização, contemplando e corrigindo as possíveis flutuações, que acontecem no estudo de um ano, ou em poucos anos consecutivos, inferior a 5 anos. O ano meteorológico contempla os valores de todas as 8760 horas de um ano. Estes valores foram utilizados resultando num modelo mais robusto e completo (PVGIS, 2019).

Os dados retirados do ano meteorológico típico e utilizados no modelo de cálculos são relativamente à localização, nomeadamente a latitude e longitude. Especificamente, para o modelo fotovoltaico, os valores a utilizar são a irradiância global horizontal, irradiância difusa horizontal e a temperatura ambiente. No modelo eólico, os dados são a velocidade do vento, a temperatura ambiente, a pressão do ar e altura da estação que fornece os valores. As informações temporais, isto é, hora, minutos e segundos, no modelo fotovoltaico é usado para o cálculo da hora solar, enquanto que no eólico, é importante para obter a média e desvio padrão mensal, conforme será explicado nos capítulos 3.1. e 3.2..

Sempre que possível, os dados introduzidos no modelo para cada localização representam o ano meteorológico típico, no entanto para os casos das ilhas, Madeira e Açores, devido à ausência de qualquer dado na aplicação online da Comissão Europeia, que fornece as informações e os dados geográficas para Portugal Continental (PVGIS, 2019), foram utilizados dados de 3 anos (2004,2005 e 2006) retirados de outra aplicação (Soda pro, 2019). Apesar de não ser o preferível, foi a opção adotada, tendo em conta os dados disponíveis encontrados no website Solar Energy Services for Professionals. O modelo foi aplicado conforme dados disponíveis entre 2004 e 2006, a cada hora de cada ano, e mais tarde aplicou-se uma média dos resultados finais.

3.2. Energia Solar Fotovoltaica

O modelo concebido para o cálculo da energia dos painéis fotovoltaicos envolve várias etapas. A primeira etapa inicia-se com os cálculos preliminares, utilizando dados que dão informação sobre o dia do ano, localização e posição da instalação, em que depois de obter a irradiância horizontal e as suas componentes, a irradiância da superfície inclinada é calculada, já que a instalação de painéis fotovoltaicos com inclinação tende a promover o aumento da energia gerada, sendo uma opção a considerar. A segunda, resulta na determinação da irradiância efetiva, pois nem toda a irradiância calculada anteriormente é usada, efetivamente, para a geração de energia, havendo perdas, associadas ao estado dos painéis, relativamente à posição relativa e outros fatores posteriormente mencionados. A última etapa, usando a irradiância efetiva nas células solares, anteriormente calculada, resulta na obtenção da corrente e tensão, potência e conseqüente energia gerada pelos painéis. De seguida, o modelo é explicado com maior detalhe, relativamente aos passos e cálculos numéricos realizados em todas as etapas.

3.2.1. Irradiância horizontal e irradiância em superfície inclinada efetiva

A determinação da energia dos painéis fotovoltaicos começa primeiramente com a introdução da localização da instalação, consoante a latitude (ϕ), longitude e da inclinação dos painéis (β), e o seu azimute (γ). A irradiância extraterrestre incidente no plano normal (G_{on}) é calculada em cada dia, segundo o parâmetro B , equação (1), considerando a constante solar G_{sc} , dada pela equação (2).

$$B = (n - 1) \frac{360}{365} \quad (1)$$

$$G_{on} = G_{sc}(1,000110 + 0,034221 \cos B + 0,001280 \operatorname{sen} B + 0,000719 \cos 2B + 0,000077 \operatorname{sen} 2B) \quad (2)$$

A equação do tempo em minutos (3) depende do parâmetro B , e o seu valor é usado para a determinação da hora solar (t_s), influenciada pela hora (t) longitude (L_{loc}) e o meridiano padrão para o fuso horário local L_{std} , equação (4). A equação (5) relaciona a hora solar ao respetivo ângulo (w).

$$E = 229,2(0,000075 + 0,001868 \cos B - 0,032077 \operatorname{sen} B - 0,014615 \cos 2B - 0,04089 \operatorname{sen} 2B) \quad (3)$$

$$t_s - t = 4(L_{std} - L_{loc}) + E \quad (4)$$

$$w = 15t_s - 180 \quad (5)$$

O cálculo seguinte é o da declinação (δ), que também é obtido através do parâmetro B , equação (6). Seguidamente, o cosseno do ângulo entre a vertical e a linha do sol, ou seja, o ângulo de incidência da

irradiação direta na superfície horizontal (θ_z), é obtido através da equação (7), influenciado pela latitude (ϕ), ângulo (ω) e declinação (δ).

$$\delta = \frac{180}{\pi}(0,006918 - 0,399912 \cos 2B + 0,070257 \sin B - 0,006758 \cos 2B + 0,000907 \sin 2B - 0,002697 \cos 3B + 0,00148 \sin 3B) \quad (6)$$

$$\cos \theta_z = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta \quad (7)$$

A relação do ângulo de incidência da irradiação direta numa superfície (θ) é expressa através da equação (8). O procedimento até agora referido vai de encontro ao conteúdo do livro *Solar Engineering of Thermal Processes* (Duffie. & Beckam, 2013, pp. 8-29).

$$\cos \theta = \sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \quad (8)$$

A irradiância extraterrestre na superfície horizontal depende da sua componente normal (G_{on}), calculada em função de $\cos \theta_z$, equação (9).

$$G_o = G_{on} \cos \theta_z \quad (9)$$

Os primeiros dados utilizados envolvem a irradiância global (G) e difusa horizontal (G_d), dia do ano, a hora e a temperatura ambiente. Em alguns casos, os valores da irradiância difusa horizontal não são dados, nomeadamente na base de dados utilizada para o caso das ilhas, logo a determinação é feita através das condições expressas na equação (10), sendo que k_T (*clearness index*) traduz o índice dado pela divisão entre a irradiância global horizontal e a irradiância extraterrestre na superfície horizontal (G_o), equação (11). Após o cálculo de $\frac{G_d}{G}$, a irradiância difusa é obtida simplesmente pela multiplicação do valor desta relação pela respetiva irradiância horizontal global dada, G , (Duffie. & Beckam, 2013, pp. 71-77).

$$\frac{G_d}{G} = \begin{cases} 1.0 - 0.09k_T, & k_T \leq 0.22 \\ 0.9511 - 0.1604k_T + 4.388k_T^2 - 16.638k_T^3 + 12.336k_T^4, & 0.22 < k_T \leq 0.80 \\ 0.165, & k_T > 0.8 \end{cases} \quad (10)$$

$$k_T = \frac{G}{G_o} \quad (11)$$

Quando a base de dados contempla a irradiância horizontal difusa, a irradiância direta horizontal (G_b) é obtida subtraindo a irradiância difusa à global horizontal (12). Os painéis podem ser instalados na horizontal, mas também podem ser com inclinação, de maneira a potenciar a geração de energia, conforme o caso e limitações associadas. Com a determinação das componentes da irradiância horizontal, a irradiância da superfície inclinada (G_T) é calculada com a introdução do modelo HDKR (nome com origem nos seus autores: Hay, Davies, Klucker e Reindl) expressa pela equação (13), admitindo que a percentagem de irradiância refletida (G_r), difusa (G_d) e direta (G_b) é a mesma como quando está disposta horizontalmente. A irradiância refletida, referente ao chão, é uma das componentes calculadas através da equação do modelo HDKR, que corresponde à parcela dada pela equação (13) envolvendo o coeficiente de reflexão do chão (ρ_g).

$$G_b = G - G_d \quad (12)$$

$$\frac{G_T}{G} = \left[1 - \frac{G_d}{G} (1 - A_i) \right] R_b + \frac{G_d}{G} (1 - A_i) \left(\frac{1 + \cos\beta}{2} \right) \left[1 + \sqrt{\frac{G_b}{G}} \operatorname{sen}^3 \left(\frac{\beta}{2} \right) \right] + \rho_g \left(\frac{1 - \cos\beta}{2} \right) \quad (13)$$

Em adição à irradiância direta, difusa e global horizontal, o modelo utiliza a inclinação do painel (β), o parâmetro A_i que representa a razão entre a irradiância direta (G_b) e a da extraterrestre na superfície horizontal (G_o), equação (14). A equação (15) indica o cálculo do parâmetro R_b , (Duffie. & Beckam, 2013, pp. 84-88). O modelo HDKR foi seguido de acordo Duffie em Solar Engineering of Thermal Processes (Duffie. & Beckam, 2013, pp. 91-103).

$$A_i = \frac{G_b}{G_o} \quad (14)$$

$$R_b = \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z} \quad (15)$$

Apenas a irradiância denominada efetiva poderá ser transformada em energia útil, logo é importante determinar o seu valor, para ser usada na próxima parte do modelo matemático. Os fatores contabilizados que influenciam o valor efetivo da irradiância direta ($G_{b,EFF}$), dada pela equação (16), são o ângulo de incidência e o estado dos painéis, isto é, o seu nível de sujidade α_r . A transmitância relativa é caracterizada pelo fator relativo normal de transmitância $\frac{\tau_{dirt}(0^\circ)}{\tau_{clean}(0^\circ)}$, e o fator FT_b dado pela equação (17) (Abella, Lorenzo, & Chenlo, 2003) . A contribuição dos componentes difusos isotrópicos é corrigida por um fator de transmitância (FT_d), que traduz a radiação solar desviada pelas moléculas e partículas da atmosfera, dependendo do estado do tempo, resultando na componente difusa efetiva ($G_{d,EFF}$), equação (18), da irradiância global. O fator de transmitância relativa (FT_r) é inserido, resultando na irradiância efetiva refletida ($G_{r,EFF}$), dada pela equação (19), demonstrando a quantidade de radiação refletida pela superfície do planeta, que depende do coeficiente de reflexão da superfície, (Duffie. & Beckam, 2013, pp. 202-223). Para os cálculos, o ângulo de incidência relativo à irradiância

direta, difusa e refletida foi assumido como o mesmo, ao longo do ano, apesar de não ser a consideração mais correta, considera-se aceitável. A soma das componentes direta, difusa e refletida resulta na irradiância efetiva total, equação (20), indispensável ao cálculo da potência e energia gerada pelos painéis fotovoltaicos.

$$G_{b,EFF} = G_{b,tilted} FT_b(\theta) \frac{\tau_{dirt}(0^\circ)}{\tau_{clean}(0^\circ)} \quad (16)$$

$$FT_b(\theta) = 1 - \frac{e^{-\frac{\cos\theta}{a_r}} - e^{-\frac{1}{a_r}}}{1 - e^{-\frac{1}{a_r}}} \quad (17)$$

$$G_{d,EFF} = G_{d,tilted} FT_d \quad (18)$$

$$G_{r,EFF} = G_{r,tilted} FT_r \quad (19)$$

$$G_{total,EFF} = G_{b,EFF} + G_{d,EFF} + G_{r,EFF} \quad (20)$$

3.2.2. Modelo 1 díodo e 3 parâmetros

A conversão da radiação solar em energia elétrica ocorre através de células fotovoltaicas. A capacidade destas células deve-se à presença de um material semicondutor, normalmente o silício. Sucintamente, as células fotovoltaicas são constituídas por células de silício cristalino, formadas por uma junção p-n. A junção é caracterizada pela camada tipo N (cargas negativas livres), de menor espessura relativamente à de tipo P (cargas positivas livres). Na presença de luz, os elétrons movem-se da camada tipo P para a N, e com a ligação a um condutor externo, a corrente elétrica é gerada.

O estudo da célula fotovoltaica é, usualmente, efetuado através da representação de um circuito elétrico equivalente e do recurso a modelos que permitem demonstrar as suas características de funcionamento. O circuito equivalente, representado na Figura 6, introduz a corrente elétrica gerada pela presença do feixe de radiação luminosa (I_L), constante para cada radiação incidente, e a corrente interna unidirecional que percorre o díodo (I_D), sendo que na ausência de radiação solar, a célula comporta-se como um díodo, não havendo produção de tensão ou corrente. A corrente que se fecha pela carga (I), é obtida pela subtração da corrente gerada pela radiação luminosa (I_L) pela corrente relativa ao díodo (I_D), que por sua vez depende da tensão V aos terminais da célula.

$$I = I_L - I_D = I_L - I_0 \left(e^{\frac{V}{mV_T}} - 1 \right) \quad (21)$$

O modelo utilizado será o de 1 diodo e 3 parâmetros com recurso à curva característica IV (corrente-tensão), exemplificado na Figura 7, adaptado às características do painel, segundo dados do fabricante (Masters G. M., Renewable and Efficient Electric Power Systems, 2004, pp. 445-463). O modelo do diodo ideal é simples e de fácil implementação, mas cujos resultados não diferem muito dos modelos mais complexos, nomeadamente o de 4 ou 5 parâmetros.

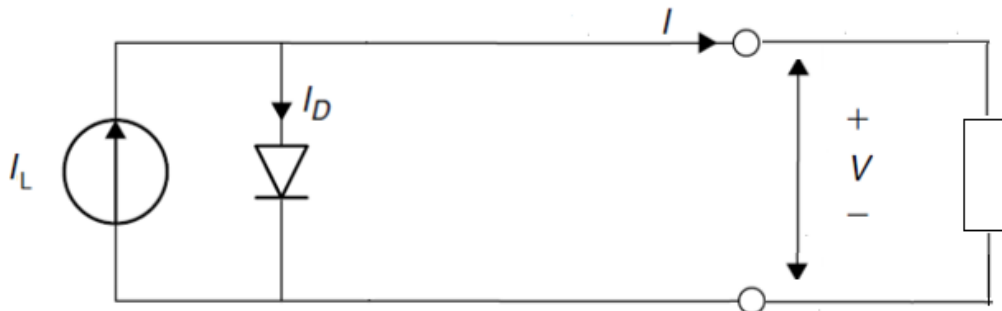


Figura 6 - Circuito equivalente de célula fotovoltaica - diodo ideal.

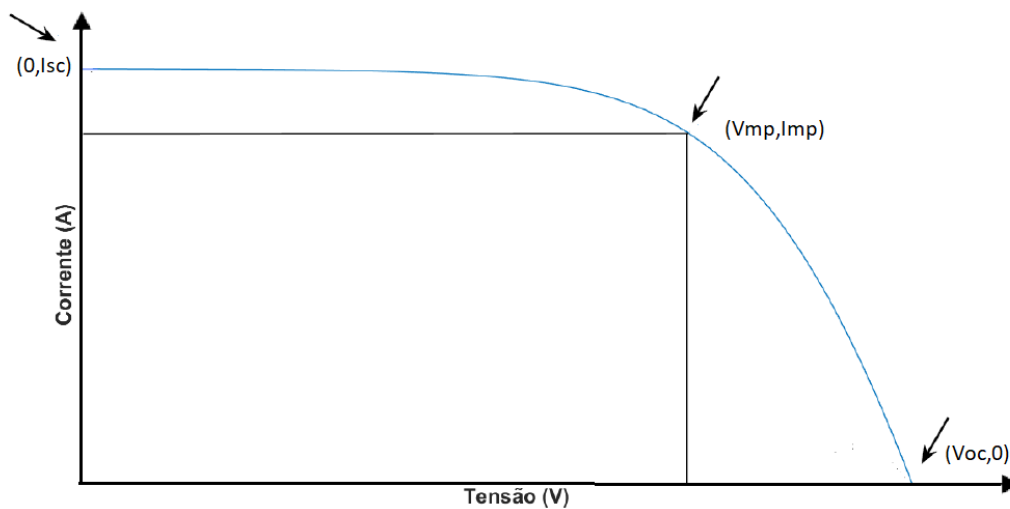


Figura 7 - Curva IV de um painel fotovoltaico.

O modelo consiste no cálculo de três parâmetros, através dos dados fornecidos pelo fabricante da tecnologia, em condições normais de operação (STC), à temperatura de célula de 25°C (T_{ref}), à irradiância de 1000 W/m^2 (G_{ref}) e coeficiente de massa de ar $AM=1,5$ (Masters G. M., Renewable and

Efficient Electric Power Systems, 2004, pp. 473-475). Os parâmetros calculados dependem dos seguintes dados característicos do painel:

- A corrente de curto circuito, I_{sc}^{ref} , caracterizada pelo ponto da curva em que a tensão é nula;
- A tensão de circuito aberto, V_{oc}^{ref} , caracterizada por ser a tensão máxima da célula e pelo ponto em que a corrente elétrica é nula;
- A corrente (I_{mp}^{ref}) e tensão (V_{mp}^{ref}) correspondente ao ponto de potência máxima;
- O número de células do módulo, N_c .

O potencial térmico dado em (22) depende da constante de Boltzman, k , cujo valor é $1,38 * 10^{-23} \frac{J}{K}$, da carga do eletrão, q , de valor $1,6 * 10^{-19} C$ e da temperatura de célula de referência T_{ref} .

A corrente inversa de saturação I_0^{ref} é dada pela equação (23), enquanto que o fator de idealidade (m') é dado em (24).

Os três parâmetros do modelo são a corrente de curto circuito (I_{sc}^{ref}), a corrente inversa de saturação (I_0^{ref}) e o fator de idealidade (m').

$$V_{T,ref} = \frac{k T_{ref}}{q} \quad (22)$$

$$I_0^{ref} = \frac{I_{sc}^{ref}}{\frac{V_{oc}^{ref}}{e^{m' V_T^{ref}} - 1}} \quad (23)$$

$$m' = \frac{V_{mp}^{ref} - V_{oc}^{ref}}{V_T^{ref} \ln \left(\frac{I_{mp}^{ref}}{I_{sc}^{ref}} \right)} \quad (24)$$

3.2.3. Efeito da irradiância

A irradiância tem efeito particular na corrente de curto circuito, logo é necessário efetuar uma correção, implícita numa relação linear dada por (25), que envolve a irradiância de referência (G_{ref}) e a irradiância a cada momento (G), nomeadamente a cada hora, conforme o modelo desenvolvido (Messenger & Ventre, 2005).

$$I_{sc} = I_{sc}^{ref} \frac{G}{G_{ref}} \quad (25)$$

A análise da influência da irradiância incidente é representada através da variação da curva I-V de uma célula. Os resultados permitem constatar que a potência, resultado da multiplicação da corrente e da tensão, aumenta com a irradiância. Em relação à corrente de curto circuito, evolui linearmente com a irradiância. A influência na tensão de curto circuito é reduzida, principalmente para valores de irradiância maiores, podendo ser desprezada em cálculos (Masters G. M., Renewable and Efficient Electric Power Systems, 2004, pp. 473-475) .

3.2.4. Efeito da temperatura

A temperatura ambiente (T_{amb}) e a irradiância (G) são dois fatores, que em simultâneo, influenciam a determinação da temperatura da célula (T_{cell}), assim como a Normal Operating Cell Temperature ($NOCT$), característica do painel e da informação dada pelo fabricante, correspondendo a condições de irradiância 800 W/m^2 e temperatura ambiente 20°C , expressa na equação (26). Após o cálculo da temperatura da célula é assumido que esse valor é o mesmo para a temperatura do módulo, sendo que o módulo consiste na soma do número de células específico a cada painel, (Masters G. M., Renewable and Efficient Electric Power Systems, 2004, pp. 475-477).

$$T_{cell} = T_{amb} + \frac{NOCT - 20}{800} G \quad (26)$$

O potencial térmico, V_T , é calculado de acordo com a temperatura da célula previamente corrigida, equação (27), em que a constante de Boltzman, k , tem o valor de $1,38 * 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$ e a carga do eletrão, q , de valor $1,6 * 10^{-19} \text{ C}$.

$$V_T = \frac{q T_{cell}}{k} \quad (27)$$

A corrente de curto circuito (I_{sc}) também é modificada com a temperatura, dada por (28), envolvendo o coeficiente de temperatura da corrente de curto circuito , $\alpha(I_{sc})$, dado na ficha técnica, e de outros parâmetros, como a temperatura de referência (T_{ref}) de 25°C e da correspondente corrente de curto circuito (I_{sc}^{ref}) e da temperatura da célula T_{cell} . Como a corrente de curto circuito influi com a temperatura e a irradiância, a correção é feita primeiro de acordo com a temperatura e depois de acordo com a irradiância. É importante salientar, que é imprescindível que a correção se efetue com as condições associadas a cada parâmetro de forma correta e concordante, adaptado da equação (2) dada por Muzathik (Muzathik, Photovoltaic Modules Operating Temperature Estimation Using a Simple Correlation, 2014) .

$$I_{sc} = I_{sc}^{ref} \left(1 + \alpha(T_{cell} - T_{ref}) \right) \quad (28)$$

Outro parâmetro que é influenciado pela temperatura é a energia de hiato, E_g , caracterizada pelo valor de energia que permite a deslocação dos eletrões da banda de valência para a banda de condução,

dada pela equação (29), tendo em conta a energia de hiato em condições de referência para silício, temperatura 25 °C, com $E_{g,ref} = 1,121 \text{ eV}$.

$$E_g = [1 - 0,0002677 (T_{cell} - T_{ref}) E_{g,ref}] \quad (29)$$

A corrente inversa de saturação, por sua vez, depende da energia de hiato (E_g), do potencial térmico (V_T) e da temperatura do módulo, assumida como sendo igual à da célula (T_{cell}), anteriormente calculada em (26). A corrente de saturação, dada pela equação (30), envolve a corrente de saturação em condições de referência ($I_{0,ref}$), a temperatura (T_{ref}) 25°C, constante de Boltzman, k , tem o valor de $1,38 * 10^{-23} \frac{J}{K}$, a carga do eletrão, q , de valor $1,6 * 10^{-19} C$, fator de idealidade m' e número de células (N_c), adaptado da equação dada por Muzathik para a corrente inversa de saturação, (Muzathik, Photovoltaic Modules Operating Temperature Estimation Using a Simple Correlation, 2014) .

$$I_0 = I_{0,ref} \left(\frac{T_{cell}}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left[\frac{q N_c}{m'} \left(\frac{E_{g,ref}}{k T_{ref}} - \frac{E_g}{k T_{cell}} \right) \right] \quad (30)$$

Analogamente à análise realizada sobre o efeito da irradiância, também é realizada para a temperatura. Verifica-se que a potência decresce com o aumento da temperatura, a tensão de curto circuito decresce com a temperatura e a corrente de curto circuito varia muito pouco, podendo ser desprezada nos cálculos (Masters G. M., Renewable and Efficient Electric Power Systems, 2004, pp. 473-475) .

3.2.5. Potência máxima

O ponto de potência máxima é obtido de acordo determinadas condições de operação, relativamente à célula fotovoltaica, podendo ser identificado na curva IV (corrente-tensão) da célula, sob determinadas condições. Muitos dos sistemas garantem a contínua operação do sistema no ponto de potência máxima, também denominado por *Maximum Power Point (MPP)*, com o auxílio de um controlador que monitoriza, com objetivo de ir ao encontro da potência máxima com *Maximum Power Point Tracker*.

Primeiramente, a determinação da potência máxima, inicia-se com a tensão máxima (V_{mp}), através de um processo iterativo, que envolve a corrente de curto circuito (I_{sc}), a corrente de saturação (I_0), o potencial térmico (V_T) e o fator de idealidade (m'), equação (31), obtida através da adaptação da equação 9.14 do livro de Soteris A. Kalogirou (Kalogirou, 2014).

$$\frac{V_{mp}}{e^{m'V_T}} = \frac{\frac{I_{sc}}{I_0} + 1}{1 + \frac{V_{mp}}{m'V_T}} \quad (31)$$

Após a determinação da tensão máxima, segue-se a da corrente, correspondente ao ponto de potência máxima, dada pela equação (32). A corrente máxima é calculada através dos valores da tensão correspondente ao ponto de potência máxima, da corrente de curto circuito (I_{sc}), da corrente de saturação (I_0), do potencial térmico (V_T) e do fator de idealidade (m'), adaptada da equação 9.15 de Soteris (Kalogirou, 2014) .

$$I_{mp} = I_{sc} - I_0 \left(e^{\frac{V_{mp}}{m'V_T}} - 1 \right) \quad (32)$$

Finalmente, o ponto de potência máxima é simplesmente calculado pela multiplicação da corrente (I_{mp}) e tensão (V_{mp}) respectiva ao ponto, expressa em (33).

$$P_{mp} = I_{mp} V_{mp} \quad (33)$$

A potência máxima (P_{mp}) é equivalente à potência DC (P_{DC}), sendo que a eficiência associada é dada pela equação (34), envolvendo a irradiância respectiva (G) e área da célula (A).

$$\eta = \frac{P_{DC}}{A G} \quad (34)$$

O fator de forma (FF) indica a qualidade das células do módulo fotovoltaico, de acordo com o seu material e da disposição. Este relaciona a potência máxima, ou DC, com a tensão em circuito aberto (V_{oc}) e a corrente em curto circuito (I_{sc}), expressa pela equação (35). O preferível é potenciar o funcionamento das células com o maior fator de forma possível, sendo que este parâmetro influencia consideravelmente a potência máxima em cada célula (Masters G. M., Renewable and Efficient Electrical Power Systems, 2004, pp. 473-475).

$$FF = \frac{P_{DC}}{V_{oc} I_{sc}} \quad (35)$$

3.2.6. Energia

Após o cálculo da potência, relativamente ao sistema fotovoltaico, é necessário introduzir um parâmetro que traduz as perdas ocorridas no processo. O derate representa um indicador da performance do sistema, em que traduz as perdas avaliadas, que resultam mais tarde na potência disponível e de seguida, energia elétrica efetivamente gerada. Este indicador é, de seguida, explicado em maior detalhe no subcapítulo 3.1.6.1.1..

3.2.6.1.1. Parâmetro de redução de potência do sistema fotovoltaico (derate)

A introdução dos vários fatores, incluídos no parâmetro de redução de potência, traduz a quantidade de energia disponível, contabilizando os fatores que dependem do funcionamento do inversor e transformador, do efeito das ligações do sistema, seja AC e DC, das características ambientais, do dimensionamento e da influência no sombreamento, do estado e idade do sistema (ver anexo A1). Para simplificação, quando houver referência ao parâmetro de redução de potência do sistema fotovoltaico, este será denominado por derate, nome inglês ao qual não há uma tradução literal para português. De seguida, os vários fatores de derate são referidos.

O derate que implica o desajustamento (*mismatch*) considera a tolerância do fabricante relativamente aos módulos fotovoltaicos, com características de corrente-tensão ligeiramente diferentes, que influencia o funcionamento em condições de máxima eficiência, quando as várias componentes do sistema estão ligadas em conjunto.

O fator relativo ao inversor e transformador corresponde à sua eficiência em conjunto, em converter potência DC em AC, concedido pelo fabricante na ficha técnica, caso os painéis fotovoltaicos sejam ligados à rede.

Às ligações DC e AC também é associado um derate, que representa as perdas resistivas nas ligações, entre os módulos e as ligações que os conectam ao inversor, mediante a eventual ligação à rede elétrica.

As condições do sistema influenciam a captação da irradiação solar pelas células do módulo fotovoltaico, seja pela sujidade ou pela existência de neve, condicionadas pela localização e condições meteorológicas.

Em acréscimo à influência das condições ambientais, a idade do sistema também é contabilizada, tendo em conta que a performance decresce ligeiramente com a idade do sistema.

A disponibilidade do sistema é outro fator, que contabiliza o tempo em que o sistema não está em operação, devido a uma possível manutenção ou a interrupções associadas ao inversor.

O fator de sombreamento representa as situações em que o sistema fotovoltaico poderá ser afetado pelo sombreamento de edifícios, objetos ou outra obstrução à irradiação solar.

Os fatores são valores entre 0 e 1, sendo 1 o valor máximo. A multiplicação de todos os fatores resulta no derate total, dada pela equação (36).

Figura 8 - Fatores do parâmetro de redução de potência do sistema fotovoltaico (*derate*).

Fatores de redução de potência do sistema fotovoltaico (<i>derate</i>)
$derate_1$ (Inversor e transformador)
$derate_2$ (Desfasamento do módulo)
$derate_3$ (Díodos e ligações)
$derate_4$ (Ligação DC)
$derate_5$ (Ligação AC)
$derate_6$ (Sujidade)
$derate_7$ (Disponibilidade do sistema)
$derate_8$ (Sombreamento)
$derate_9$ (Idade)

$$derate (total) = \prod_{i=1}^9 derate_i \quad (36)$$

Sendo o *derate* total o parâmetro que envolve os vários fatores que influenciam a performance do sistema, a energia do painel fotovoltaico (E_{painel}) é determinada pela multiplicação do *derate* total pela potência calculada (em (31)) a cada hora do ano (h), dada pela equação (37). A energia gerada pelo sistema fotovoltaico ($E_{sistema}$) é calculada através multiplicação da energia do painel fotovoltaico pelo número de painéis do sistema (N), equação (38).

$$E_{painel} = derate (total) P_{mp} h \quad (37)$$

$$E_{sistema} = E_{painel} N \quad (38)$$

3.2.7. Ligação à rede

Quando é necessário, ou é feita a escolha de efetuar, a ligação do sistema fotovoltaico à rede elétrica, cujo processo consiste na entrega à rede a potência máxima, produzida em cada instante, através de um gerador fotovoltaico. A ligação fica a cargo de equipamentos de regulação, que adaptam o

funcionamento e geração com a finalidade de chegarem à rede, conforme as condições impostas pela mesma.

3.2.7.1.1. Seguidor de Potência Máxima (MPPT)

Como já foi mencionado anteriormente, a potência máxima depende da temperatura e irradiação, e também com a tensão aos terminais do módulo. O funcionamento do sistema, de maneira a potenciar a geração, deve ser conseguido sempre à potência máxima possível.

O seguidor de potência máxima (*Maximum Power Point Tracker - MPPT*) é um sistema digital pertencente aos conversores fotovoltaicos, que calcula a tensão referente à potência máxima, com o objetivo de colocar o módulo fotovoltaico, no ponto correspondente a essa potência máxima. O cálculo do valor da tensão é conseguido através de um modelo, que simula o comportamento do módulo fotovoltaico. O valor é uma referência de entrada do conversor DC/DC, que é utilizado para o ajuste do nível de tensão à saída, à tensão de entrada do inversor.

O dispositivo, seguidor de potência máxima, fortalece a importância da utilização de um método que determine a potência máxima, de acordo os valores dados de irradiação e temperatura, uma vez que é expectável que os módulos do sistema fotovoltaico operem nesse respectivo ponto.

3.2.7.1.2. Inversor

A energia obtida pelos módulos fotovoltaicos caracteriza-se por ser em corrente contínua (*direct current – DC*), mas a rede elétrica opera em corrente alternada (*alternating current – AC*). Esta diferença revela a necessidade de um inversor, que efetue a conversão de corrente contínua em alternada, de maneira a ser admitida na rede elétrica.

O equipamento inversor para além da conversão DC em AC, também constitui uma forma de regulação da tensão de entrada para o valor correspondente, ou seja, geralmente tem nele integrado um seguidor de potência máxima (MPPT), que é explicado no subcapítulo 3.1.7.1.1..

A seleção e dimensionamento dos inversores é de extrema importância, pois as características devem de ir ao encontro às necessidades da potência e tensão do sistema fotovoltaico. Frequentemente, a solução encontrada para um sistema fotovoltaico passa pelo inversor central, com o intuito de suportar todo o sistema gerador. A utilização do inversor central, devido a novos desenvolvimentos, está a desvanecer, dando lugar à instalação de vários inversores de pequena dimensão, nomeadamente inversores de cadeia de módulos e diretamente integrados nos módulos, para sistemas de dimensão média, (GREENPRO, 2004, pp. 3.37-3.51).

Independentemente das várias opções existentes, os inversores têm de satisfazer as necessidades e características do sistema fotovoltaico. A seleção da potência relativamente ao inversor ($P_{inv,DC}$) é realizada tendo em consideração a relação da potência máxima do sistema fotovoltaico, de acordo com a variação expressa em (39), para uma variação de 20%.

$$0.7 P_{mp} < P_{inv,DC} < 1.2 P_{mp} \quad (39)$$

A eficiência do inversor decresce para valores de potências inferiores à potência nominal, sendo preferível escolher um inversor com uma potência menor a do sistema fotovoltaico. A otimização da eficiência do inversor é conseguida, normalmente, através do subdimensionamento, fazendo com que a operação se dê em gamas de potência mais próximas da operacional, uma vez que os sistemas fotovoltaicos disponibilizam aproximadamente 60% ou menos da potência nominal, em condições normais de operação (STC). O procedimento que consiste no sobredimensionamento do sistema fotovoltaico, para uma potência de 20%, permite uma aproximação da potência à saída do gerador fotovoltaico e da potência máxima do inversor, o que resulta numa maximização da quantidade de energia à rede elétrica. Caso o sobredimensionamento seja superior, ou excessivo, poderá causar perdas na energia entregue à rede, devido à potência na saída do gerador fotovoltaico ultrapassar a potência máxima do inversor, (GREENPRO, 2004, pp. 5.8-5.9).

Tensão e corrente do inversor

O sistema fotovoltaico consiste num conjunto de módulos, dispostos em série e paralelo. A tensão total do sistema é dada pela soma das tensões de cada módulo em série, enquanto que a corrente total é obtida através da soma das correntes em paralelo.

A ligação, em série dos módulos, implica que a tensão total dessa fila seja dada pela soma das tensões, nessa ligação. Ou seja, a escolha do inversor, relativamente à tensão, para essa fila deve ter em consideração a tensão dos respetivos módulos. A dependência da tensão do módulo face à temperatura faz com que o seu dimensionamento avalie o funcionamento. Para situações de funcionamento fora do normal, situações extremas de temperatura, que poderão ocorrer nos períodos de Inverno e Verão, obtendo um determinado intervalo de funcionamento, que traduz essas situações. Para as diferentes temperaturas salienta-se a importância do valor da tensão máxima do inversor, que irá determinar a seleção do inversor, visto que a tensão máxima de uma fila do sistema não pode ultrapassar a tensão máxima do inversor, correspondente a essa ligação.

A corrente do sistema fotovoltaico é dada pela soma das correntes em paralelo, e é imposto que não possa exceder a corrente máxima de entrada do inversor correspondente.

Os cálculos que avaliam a tensão máxima que poderá ocorrer em situações extremas de temperatura, dependem das especificações dadas pelas fichas técnicas, fornecidas pelos fabricantes. A tensão de circuito aberto é avaliada para a situação de Inverno, e a tensão correspondente ao ponto de potência máxima para a situação de Verão, (GREENPRO, 2004, pp. 5.9-5.14). Estes cálculos não fazem parte

do modelo do sistema fotovoltaico, pois não influenciam diretamente a geração de energia, uma vez que os casos a estudar não se considera a ligação à rede elétrica, sendo dispensável o inversor. Caso o inversor seja utilizado, a eficiência do inversor deve ser adicionada como um dos fatores de derate, avaliando o seu efeito, relativamente à ligação do sistema fotovoltaico com a rede elétrica, estando em maior detalhe no manual sobre tecnologias, projeto e instalação de sistemas fotovoltaicos (GREENPRO, 2004, pp. 3.43-3.45). Atualmente, há uma vasta oferta no mercado de inversores, para as várias possibilidades de configuração de sistemas fotovoltaicos, pelo que o seu custo, também deve ser contabilizado na análise económica.

3.2.8. Configuração do sistema fotovoltaico

Um módulo é constituído por várias células fotovoltaicas, e um conjunto de módulos origina um sistema fotovoltaico. Os vários módulos são ligados em série, aumentando a tensão, e em paralelo, aumentando a corrente, resultando na potência do sistema, dada pela multiplicação da tensão e corrente total.

O dimensionamento do sistema fotovoltaico envolve a escolha do número de módulos, ligados em série e em paralelo. Os módulos ligados em série são conduzidos pela mesma corrente, e para determinada corrente é possível adicionar as respetivas tensões. A Figura 9 representa as diferenças entre células, módulos e um determinado sistema fotovoltaico, para um típico módulo de 36 células.

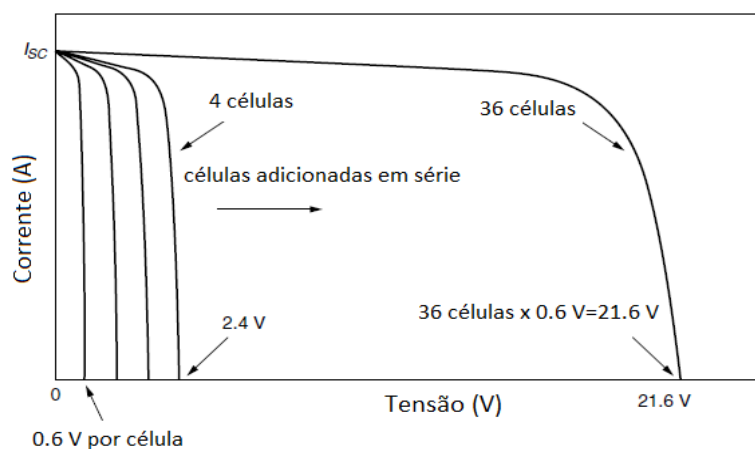


Figura 9 - Corrente e tensão de um módulo típico com 36 células ligadas em séries, adaptado (Masters G. M., *Renewable and Efficient Electric Power System*, 2004).

Um sistema fotovoltaico é o resultado da combinação de módulos, ligados em série e em paralelo, com o objetivo de aumentar a potência. Relativamente à curva I-V (corrente-tensão), os módulos em série representam-se pela soma ao longo da série da tensão de cada módulo, conforme evidenciado na Figura 10. Cada módulo, quando em paralelo, associa-se uma corrente. A curva I-V, que representa a combinação em paralelo, é dada pela soma de cada corrente do módulo numa determinada tensão, Figura 11.

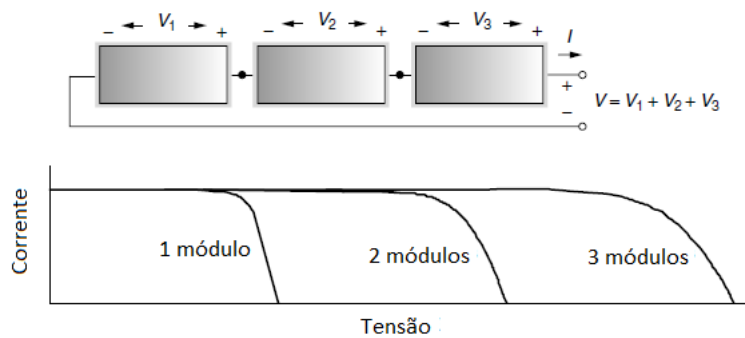


Figura 10 - Curva I-V para módulos em série: soma de tensões a uma dada corrente, adaptado (Masters G. M., Renewable and Efficient Electric Power System, 2004).

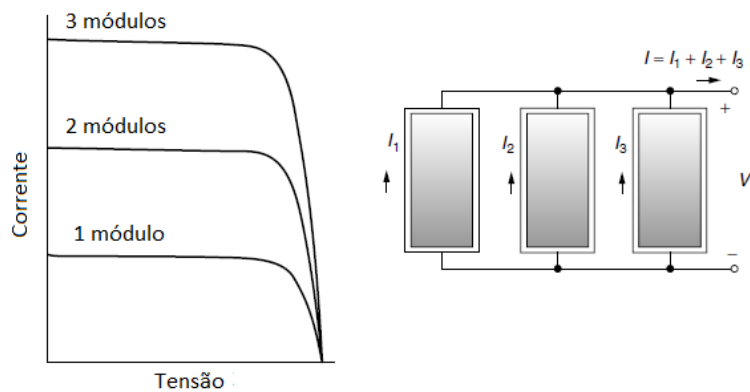


Figura 11 - Curva I-V para módulos em paralelo: soma de correntes a uma dada tensão, adaptado (Masters G. M., Renewable and Efficient Electric Power System, 2004).

A combinação dos módulos em série e em paralelo, originando um sistema fotovoltaico, é representada na Figura 12, para um sistema com 3 séries (soma de tensões) e 2 paralelo (soma de correntes).

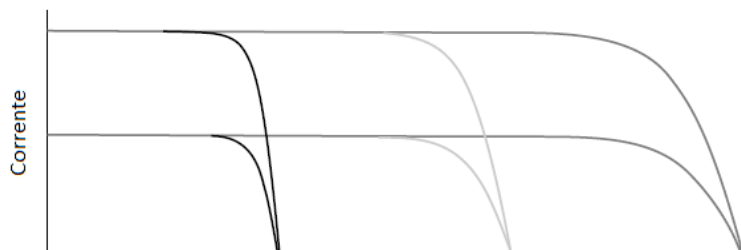


Figura 12 - Curva I-V do sistema com 3 séries e 2 paralelo, adaptado (Masters G. M., Renewable and Efficient Electric Power System, 2004).

3.3. Energia Eólica

A energia disponível do vento, referente a uma turbina, depende muito da sua velocidade (U), como é possível constatar através da análise da equação (40), que calcula a respetiva potência, estando elevada à terceira potência, logo é do interesse a compreensão das características do vento, como recurso à geração de energia elétrica, através de uma turbina eólica. A equação (40) relaciona, para além da velocidade (U), a densidade do ar (ρ) e a área varrida do rotor (A).

A característica mais relevante do vento é a sua alta variabilidade, temporalmente, mas também geograficamente, o que acresce à influência, já mencionada, da velocidade elevada à terceira potência (U^3).

$$P = \frac{1}{2} A \rho U^3 \quad (40)$$

A variabilidade espacial traduz-se nas várias regiões climáticas no mundo, com mais ou menos vento, dependendo da sua localização, em que a latitude relaciona a quantidade de radiação solar que afeta o vento. Mesmo numa determinada região climática, a variabilidade do vento é considerada alta, devido à existência de variação de terra e mar, montanhas e planícies. A quantidade e qualidade de vegetação também influencia, nomeadamente a absorção ou reflexão da radiação solar, que tem efeito na temperatura e/ou na humidade.

O estudo geográfico, localmente, permite inferir que a topografia tem uma maior influência no vento. No topo de montanhas ou em terrenos elevados, o vento é maior, quando comparado com vales cobertos ou sítios de menor altitude. É também importante realçar que a presença de obstáculos, sejam edifícios ou árvores, reduzem significativamente a velocidade do vento disponível, utilizada para o funcionamento da turbina.

Num determinado local, a variabilidade temporal caracteriza-se pela modificação do vento, de ano para ano, que pode dificultar de certa forma o dimensionamento das turbinas, devido a difícil previsão do recurso. A variação num ano também se manifesta, seja por épocas ou estações, ou até mesmo num dia, dependendo da hora. As oscilações que ocorrem em minutos ou segundos, frequentemente denominadas por turbulência, tornam também difícil o dimensionamento para a melhor performance das turbinas.

3.3.1. Caracterização da velocidade do vento (distribuição Weibull)

Os dados necessários aos cálculos da energia, gerada pelas turbinas eólica, são obtidos através da informação dada pelo ano meteorológico típico. A abordagem mais correta, no que concerne à caracterização da velocidade do vento, relativamente à variação apresentada durante um ano, passa por uma distribuição de probabilidade. A distribuição Weibull é uma boa representação da variação em cada hora, da velocidade média do vento num ano em várias localizações, pelo que será usada no modelo. A distribuição é dada pela equação (41), onde $F(U)$ representa a fração de tempo que a

velocidade média por hora excede a velocidade U , o parâmetro de escala, c , e o parâmetro de forma, k .

$$F(U) = \exp\left(-\left(\frac{U}{c}\right)^k\right) \quad (41)$$

A distribuição é caracterizada por dois parâmetros: de escala (c) e forma (k). O parâmetro de escala relaciona a velocidade do vento média anual, enquanto que o de forma descreve a variabilidade sobre a média. Exemplificando, um valor de parâmetro de forma maior que 2, representando a variação de cada hora da velocidade média do vento, indica pouca variabilidade sobre a média, enquanto que um valor menor indica maior variabilidade, em que o termo de comparação é $k=2$, um caso especial da distribuição Weibull, denominado Rayleigh, (Burton, Sharpe, Jenkins, & Bossanyi, Wind Energy Handbook, 2001, pp. 13-15).

3.3.2. Determinação e correção de parâmetros

O acesso aos dados do ano meteorológico típico permite adaptar a distribuição, calculando o parâmetro de escala e de forma, para cada mês do ano e aplicar o método para valores mensais. O procedimento, que culmina na determinação dos parâmetros de forma e escala, é iniciado com as correções feitas à densidade em cada mês, conforme a média mensal da pressão do ar (P), da temperatura ambiente (T_{amb}) e da constante específica de gás para ar seco, R , de valor 287,058 J/(kg·K), através da equação (42).

$$\rho = \frac{P}{T_{amb} R} \quad (42)$$

A velocidade do vento média e o desvio padrão são obtidos para cada mês, sendo que a velocidade média é corrigida relativamente à altura da estação meteorológica, que fornece os dados para a da turbina eólica em estudo, assim como a rugosidade da superfície. A correção da velocidade de acordo com a altura e rugosidade é dada pela equação (43), a velocidade relativa à turbina em estudo (U) é obtida através da velocidade dada pela estação meteorológica (U_{ref}) e da respetiva altura (h_{ref}), da altura da turbina (h) e da rugosidade (α). A rugosidade, α , é determinada com o auxílio de uma tabela que fornece valores do comprimento de rugosidade da superfície (z_0) da equação (44), (Gipe, 2004), caso esta não faça parte da base dados utilizada. Os valores da rugosidade considerados também têm em conta os valores dados, através do website Global Wind Atlas (Windatlas, 2019).

$$U = U_{ref} \left(\frac{h}{h_{ref}}\right)^\alpha \quad (43)$$

$$\alpha = \frac{1}{\ln\left(\frac{h}{z_0}\right)} \quad (44)$$

O cálculo do parâmetro de forma, k , advém da relação linear encontrada do parâmetro de forma, em função da divisão da velocidade média mensal (U) pelo desvio padrão respetivo (σ), expressa pela equação (45), através de uma adaptação do método de momentos, com resultados que verificam a relação, (Tiryakioğlu, 2008). O parâmetro de escala, c , é calculado por intermédio da função gamma (Γ), em função do parâmetro de forma k , e da velocidade média do vento U , expressa em (46), (Burton, Sharpe, Jenkins, & Bossanyi, Wind Energy Handbook, 2001, pp. 14-16).

$$k = 1,2785 \left(\frac{U}{\sigma} \right) - 0,504 \quad (45)$$

$$c = \frac{U}{\Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right)} \quad (46)$$

A escolha da turbina eólica permite obter a curva de potência cujos resultados estão dependentes das condições assumidas como referência.

3.3.3. Potência corrigida

A densidade não se mantém constante, e como já foi expresso anteriormente, procedeu-se à sua correção de acordo com a temperatura ambiente e pressão do ar, fazendo sentido aplicar uma correção à potência, com a densidade corrigida resultando numa ligeira diferença na nova curva de potência. A nova curva de potência foi aproximada com uma linha de tendência polinomial de grau 4, que mostrou ser uma boa aproximação de acordo com o coeficiente de determinação r^2 , originando a equação da potência corrigida (P_{corr}), em função da velocidade do vento (U) para cada mês. O coeficiente de potência (C_p) da turbina eólica indica a eficiência do sistema turbina, expresso pela divisão entre a potência elétrica gerada, análoga à potência corrigida obtida através da equação polinomial de grau 4, e a potência do vento na turbina (P), calculado pela equação (47), (Burton, Sharpe, Jenkins, & Bossanyi, Wind Energy Handbook, 2001, pp. 6-7;44-46).

$$C_p = \frac{P_{ele}}{P} \quad (47)$$

3.3.4. Curva de potência

A curva de potência, característica de uma turbina eólica, é uma representação da potência elétrica que a turbina fornece em função da velocidade do vento. Mediante a escolha da turbina eólica, a sua curva de potência é fornecida pelo fabricante, obtida através de testes experimentais, segundo determinadas condições, quando a turbina é sujeita à ação do vento.

A curva de potência fornece informações de funcionamento de extrema relevância, nomeadamente as condições favoráveis à geração da consequente energia elétrica. A velocidade cut in define a velocidade do vento mínima a que a turbina começa a produzir energia elétrica, através da rotação das

pás após superar a fricção. A velocidade cut out indica a velocidade do vento a que a turbina deixa de funcionar, velocidade máxima operacional, devido a motivos de segurança as pás terminam a sua movimentação, deixando de gerar energia eléctrica. Para melhor compreensão, a Figura 13 representa a curva de potência, que em condições de funcionamento restringe-se a valores entre a velocidade cut out e velocidade cut in.

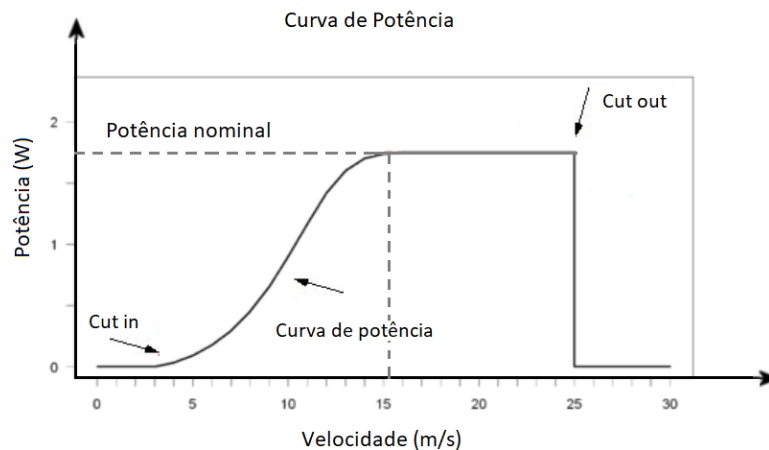


Figura 13 - Curva de potência típica de uma turbina eólica com velocidade do vento constante.

3.3.5. Energia

Relembrando, a energia extraída pela turbina eólica depende fortemente da distribuição da velocidade do vento do local, e das características da velocidade do vento na turbina, representada na curva de potência, a distribuição da velocidade do vento do local é calculada pela função de Weibull, nomeadamente a distribuição, $F(U)$. Com a determinação da nova curva de potência, corrigida à densidade, relativamente à dada pelo fabricante, e com a distribuição $F(U)$ é estabelecida uma ligação entre a distribuição da velocidade com a curva de potência, com o objetivo de encontrar o número de horas que a turbina opera a determinadas velocidades, correspondendo a diferentes níveis de potência, culminando na energia eléctrica gerada em cada mês.

Determinada a distribuição, esta é multiplicada à potência corrigida para cada valor de velocidade do vento, que por sua vez, é multiplicada pelo número de horas total associado a cada mês, obtendo assim a energia gerada pela turbina eólica.

A Tabela 2 serve para demonstrar o método utilizado para cada mês de um ano, com o objetivo de obter a potência gerada pela turbina. Os valores da velocidade mínima (U_{min}) e máxima (U_{max}) são escolhidos de forma razoável, considerando a velocidade de vento disponível e da curva de potência, previamente dada pelo fabricante da turbina. Os respetivos valores da função de distribuição $F(U_{min})$ e $F(U_{max})$ são calculados de acordo com a equação (41), enquanto que a velocidade U_{med} é o valor médio entre a velocidade mínima (U_{min}) e máxima (U_{max}). A potência P refere-se à potência corrigida, previamente determinada, tendo em conta a densidade corrigida e a curva de potência em função da velocidade do vento dada pelo fabricante, obtida por intermédio da respetiva aproximação polinomial

de grau 4, não esquecendo as restrições dadas pela curva de potência relativamente à velocidade cut in e cut out. O parâmetro ΔF é determinado subtraindo $F(U_{min})$ a $F(U_{max})$, sendo mais tarde multiplicado pela potência, P , resultando nos vários níveis de velocidade e potência a que a turbina opera, finalizando com o somatório, que multiplicado pelo número de horas de cada mês resulta na energia gerada total pela turbina mensal.

Tabela 2 - Modelo que exemplifica método utilizado para o cálculo da energia.

U_{min}	U_{max}	$F(U_{min})$	$F(U_{max})$	U_{med}	$P[W]$	ΔF	$P \Delta F$
0	2			1			
2	4			3			
4	6			5			
6	8			7			
8	10			9			
10	12			11			
12	14			13			
14	16			15			
16	18			17			
18	20			19			
Potência total (kW)							$\sum P \Delta F$
Horas de funcionamento							h
Energia Total (kWh)							$[\sum P \Delta F]*h$

4. Viabilidade económica

4.1. Principais aspetos a considerar

A análise do investimento, do ponto de vista económico-financeiro, é determinante na aceitação e desenvolvimento de qualquer projeto, fazendo todo o sentido fazê-la para os casos de estudo em questão. Assim a rentabilidade é analisada, com a introdução de vários indicadores que auxiliam a avaliação económico-financeira, que determinam a viabilidade de um projeto, e que serão aplicados nos sistemas em estudo para cada edifício. Antes da exposição dos indicadores, é importante clarificar alguns conceitos recorrentes na análise económico-financeira, tais como o cash-flow e a taxa de atualização.

Cash-Flow

Cash-flow é o termo inglês, que será usado, apesar de a sua tradução para o português ser fluxo de caixa. Este conceito indica os fluxos financeiros líquidos que o projeto gera, durante o período em estudo. O fluxo é obtido pela diferença entre os valores em numerário das receitas/recebimentos, e os pagamentos/custos. O cash-flow não engloba as amortizações e depreciações, pois estes valores não traduzem saídas efetivas de dinheiro, representando uma receita líquida (CF_L), livre de impostos.

$$CF_L = \text{Receitas} - \text{Custos} \quad (48)$$

Taxa de atualização

A taxa de atualização é utilizada na atualização dos cash-flows, que representam os rendimentos futuros esperados (valor atual dos fluxos futuros). O valor da taxa de atualização envolve vários aspetos, pois reflete simultaneamente o risco inerente ao investimento que representa a empresa e a estrutura de capitais usada no financiamento do projeto. A taxa de atualização, em alguns casos pode ser igual à taxa de juro dada pela instituição bancária envolvida no financiamento, relacionando valores monetários em instantes diferentes. Nos projetos de investimento, a relação de igualdade entre a taxa de juro e da atualização nem sempre é verdadeira. Caso os cash-flows sejam relativos aos capitais próprios, a taxa de atualização deve ser a do custo de oportunidade dos capitais próprios. Caso os fluxos de pagamentos estivessem ligados à dívida (passivo financeiro), os juros dessa dívida (custo de oportunidade dos capitais alheios) devem corresponder à taxa de atualização. Logo, o valor da taxa de atualização a utilizar tem de ser coerente com o processo envolvido no financiamento do investimento, não esquecendo o risco associado ao projeto. Sucintamente a taxa de atualização depende das condições financeiras dos mercados e dos riscos característicos ao desenvolvimento dos projetos. Nos casos em questão, a taxa de atualização utilizada corresponde a do custo de oportunidade dos ativos do projeto, em que na ausência de passivo o ativo será igual aos capitais próprios.

4.1.1. Indicadores de Avaliação de Investimento

4.1.1.1.1. Valor Atual Líquido (VAL)

O Valor Atual Líquido (VAL) é um resultado de relevância no estudo da viabilidade de um projeto, conforme o investimento despendido inicialmente (I_i) e todos os custos ao longo da vida do projeto. O cash-flow líquido (CF_L) é obtido subtraindo as receitas aos custos de operação e manutenção. O valor atual traduz o valor no presente momento, de uma determinada quantia a obter no futuro. Um investimento gera cash-flow no futuro, determinado através de uma taxa de atualização (t), resultando no denominado cash-flow atualizado. Na perspectiva de projeto o VAL pode ser dado pela equação (49), em que o cash-flow líquido é atualizado de acordo com a respetiva taxa de atualização, considerada constante ao longo do período de vida do projeto (Soares, Moreira, Pinho, & Couto, Decisões de Investimento: Análise Financeira de Projetos, 2015, pp. 35-38).

O projeto apresenta rentabilidade positiva se o VAL calculado for positivo. Um VAL nulo significa a completa recuperação do investimento inicial e a obtenção de rendimento exigida pelos investidores. Em caso de VAL negativo, o projeto não é viável economicamente.

$$VAL = \sum_{i=1}^n \frac{CF_L}{(1+t)^i} - I_i \quad (49)$$

$n \equiv$ vida útil , período de análise (anos)

4.1.1.1.2. Taxa Interna de Rentabilidade (TIR)

A Taxa Interna de Rentabilidade (TIR) pode ser definida como a taxa necessária para igualar o valor de um investimento, com os respetivos retornos futuros, pelo que resulta da resolução da equação (50) em ordem a TIR (Soares, Moreira, Pinho, & Couto, Decisões de Investimento: Análise Financeira de Projetos, 2015, pp. 194-201).

$$\sum_{i=1}^n \frac{CF_L}{(1+TIR)^i} - I_i = 0 \quad (50)$$

O projeto é economicamente viável, caso o valor obtido TIR seja superior à taxa de atualização referente ao valor atual líquido (VAL). Nesta situação o projeto tem capacidade de gerar uma taxa de rentabilidade superior ao custo de oportunidade de capital. O contrário, TIR inferior à taxa de atualização traduz um projeto em que a rentabilidade mínima exigida não é alcançada. A TIR é influenciada maioritariamente pelo valor de investimento, a atualização anual e a receita líquida.

De seguida, apresenta-se a Tabela 3 que sintetiza as condições que implicam a consideração do projeto, analisando o valor atual líquido (VAL), a taxa de interna de rentabilidade (TIR) e a taxa de atualização (t).

Tabela 3 - Condições que implicam a viabilidade do projeto.

$\sum_{i=1}^n \frac{CF_L}{(1+t)^i} > I_i$	$t < TIR$	$VAL > 0$	Viável
$\sum_{i=1}^n \frac{CF_L}{(1+t)^i} < I_i$	$t > TIR$	$VAL < 0$	Não Viável
$\sum_{i=1}^n \frac{CF_L}{(1+t)^i} = I_i$	$t = TIR$	$VAL = 0$	Indiferente

4.1.1.1.3. Período de Recuperação do Investimento (PRI)

O Período de Recuperação do Investimento (PRI), relativo ao investimento estabelece o período ao qual todo o investimento inicial é recuperado. É obtido quando a soma do fluxo de caixa (cash-flow) num ano iguala o fluxo de caixa (cash-flow) do investimento inicial, podendo ser determinado conforme a equação (51), (Soares, Moreira, Pinho, & Couto, Decisões de Investimento: Análise Financeira de Projetos, 2015, pp. 203-205).

$$PRI = \frac{I_i}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{CF_L}{(1+t)^i}} \quad (51)$$

4.1.2. Custo das Renováveis

O custo das renováveis é determinado consoante a tecnologia e a sua finalidade. O valor despendido nos painéis fotovoltaicos é diferente do nas turbinas eólicas, embora ambas as tecnologias tenham como propósito a geração de energia elétrica.

A energia elétrica caso fosse comprada à rede teria um preço de mercado, que depende da empresa que fornece o serviço e a tarifa associada. O preço de eletricidade considerado é de 0,2246 €/kWh, valor referente ao ano de 2018, para utilizadores domésticos, segundo várias entidades, consultado no site PORDATA (PORDATA, 2019). A receita anual relativa à eletricidade é obtida através da poupança referente à utilização das tecnologias que geram energia elétrica, dada pelo produto do preço da eletricidade e da produção anual de energia elétrica de origem renovável.

Os custos adotados relativamente ao investimento inicial e de operação e manutenção estão expressos na Tabela 4, para o sistema fotovoltaico e para a turbina eólica. Anteriormente à adoção dos valores, foram analisados os dados recolhidos do relatório dos custos de energias renováveis em 2018, elaborado pela Agência Internacional de Energias Renováveis, IRENA, (International Renewable Energy Agency , 2019).

Os valores referentes ao custo de projetos eólicos, mais concretamente o montante investido necessário à sua realização (CAPEX), foram determinados com o auxílio da análise da Figura 1.3 do relatório, realizado pela IRENA, para projetos de capacidade menor de 1MW, que indica os custos totais do desenvolvimento. Os custos de operação e manutenção, frequentemente denominados por OPEX, foram considerados de acordo com dados do relatório que estuda o potencial de redução de custos da energia solar e eólica até 2025, também elaborado pela IRENA (International Renewable Energy Agency, 2016). Estes valores não estão bem definidos em relatórios, podendo variar com o local e tamanho da instalação. Após uma análise dos valores encontrados no relatório, foi adotado um valor de OPEX de 5% em relação ao CAPEX. O CAPEX para as turbinas eólicas considerado é de 3400€/kW.

Em relação aos sistemas fotovoltaicos, os relatórios elaborados pela IRENA (*International Renewable Energy Agency*) mencionados no parágrafo anterior também foram analisados, mas os valores relativamente ao CAPEX e OPEX tiveram origem num estudo realizado pelo Instituto Português de Energia Solar (IPES) em 2016 (Pereira, Joyce, & Reis, 2016). O estudo divide os valores pelo setor de mercado, em que o projeto se insere. Nos casos em questão considera-se o mercado residencial, em que o CAPEX poderá variar entre 2300€/kWp e 2900€/kWp, incluindo os custos que envolvem os estudos a realizar, obtenção de licenças, infraestruturas de ligação à rede, etc. O OPEX, por sua vez, é considerado ser 1% do CAPEX. Analisando os valores do estudo do IPES, reconheceu-se que são valores altos, considerando a evolução da tecnologia e dos seus preços, no entanto os custos do sistema fotovoltaico foram admitidos de forma conservativa, e para compensar de certa forma, outras simplificações praticadas na avaliação económica.

Tabela 4 - Custos em relação ao investimento necessário e de operação e manutenção para o sistema fotovoltaico e turbina eólica.

	CAPEX (€/kW)	OPEX (% CAPEX)
Sistema Fotovoltaico	2400	1
Turbina eólica	3400	5

5. Produção de Energia – opções e resultados

5.1. Avaliação da produção energética em diferentes localizações

O modelo de cálculo desenvolvido para avaliar a geração de energia, relativamente ao sistema fotovoltaico e à turbina eólica, foi aplicado a diferentes regiões de Portugal. A seleção das regiões consistiu nas diferentes regiões climáticas no país, e na importância de integrar todas as possibilidades encontradas. Considerando as diferentes regiões climáticas, segundo o Despacho nº 15793-F/2013 (Despacho (extrato) n.º 15793-F/2013, 2013), os seguintes distritos, e cidades no caso das ilhas, foram avaliados:

1. Viana do Castelo (Norte);
2. Vila Real (Norte);
3. Porto (Norte);
4. Coimbra (Centro);
5. Lisboa (Lisboa Vale do Tejo);
6. Évora (Alentejo);
7. Faro (Algarve);
8. Funchal (Madeira);
9. Ponta Delgada (Açores).

O modelo utilizou 6 localizações para cada distrito de Portugal Continental e para cada cidade das ilhas, correspondendo no total a 54 localizações, enumeradas no anexo A2, de acordo a latitude e longitude.

O cálculo relativo ao sistema fotovoltaico envolve, sempre, a utilização do mesmo painel fotovoltaico, em que as suas especificações técnicas encontram-se no anexo A3. O derate total introduzido no modelo de cálculo fotovoltaico é igual para todo o ano. É importante referir que os resultados da energia, tanto para o sistema fotovoltaico, como para as turbinas em análise, não consideram ligação à rede elétrica, traduzindo-se nos fatores do derate afetados, e na ausência de perda de energia, considerada posteriormente ao cálculo da energia pelo sistema fotovoltaico e turbina eólica. As especificações das turbinas eólicas (de 5kW e 7,5 kW) testadas no modelo também poderão ser consultadas nos anexos A4 e A5.

5.2. Variabilidade

Para cada distrito e cidade, diferentes localizações foram avaliadas, com o intuito de averiguar a variabilidade da energia gerada pelo sistema fotovoltaico e pela turbina eólica. A escolha das localizações em cada região foi baseada nos mapas de irradiação solar e velocidade do vento em Portugal. A seleção pretende contemplar os diferentes valores da irradiação solar e velocidade do vento

de cada caso, com o intuito de avaliar a dispersão de valores, tentando incluir valores próximos do máximo e mínimo, resultando na geração máxima e mínima de energia do sistema fotovoltaico e da turbina eólica, através da análise dos respetivos mapas que fornecem informação sobre os recursos em questão (irradiação solar e velocidade do vento).

A teoria assente na geração de energia renovável mencionada no capítulo 3, permite afirmar que a energia gerada através de painéis fotovoltaicos depende fortemente da irradiação solar e da temperatura, e da velocidade do vento através da turbina eólica. Analisando mapas que fornecem informações sobre a irradiação solar e velocidade do vento em Portugal, prevê-se as regiões onde mais energia poderá ser gerada.

Os resultados que permitem analisar a variabilidade da energia gerada, pelo sistema fotovoltaico e pela turbina eólica, foram obtidos para determinadas condições. No caso do sistema fotovoltaico, a irradiação solar utilizada é a horizontal, ou seja, a inclinação do painel no modelo é considerada 0 graus. O sistema é de 7,65 kW, composto por 30 painéis fotovoltaicos. Relativamente à turbina eólica, considera-se uma turbina de 5kW, para uma altura de 30 metros.

A Figura 14 e a Figura 15 ilustram os resultados para cada distrito e cidade, relativamente à energia total anual gerada pela turbina eólica e pelo sistema fotovoltaico, respetivamente. Os resultados obtidos corroboram o expectável, em que para determinadas regiões a variabilidade da velocidade do vento, que resulta na variabilidade de energia gerada pela turbina eólica, é alta. A variabilidade da energia gerada pelo sistema fotovoltaico é relativamente reduzida, de acordo com a irradiação solar. No caso da turbina eólica em estudo, Lisboa apresenta ser o caso com maior variabilidade, apesar de as outras regiões também apresentarem uma amplitude considerável de resultados de energia gerada. Em Faro, a variabilidade do sistema fotovoltaico apresenta ser superior, quando comparado com os outros.

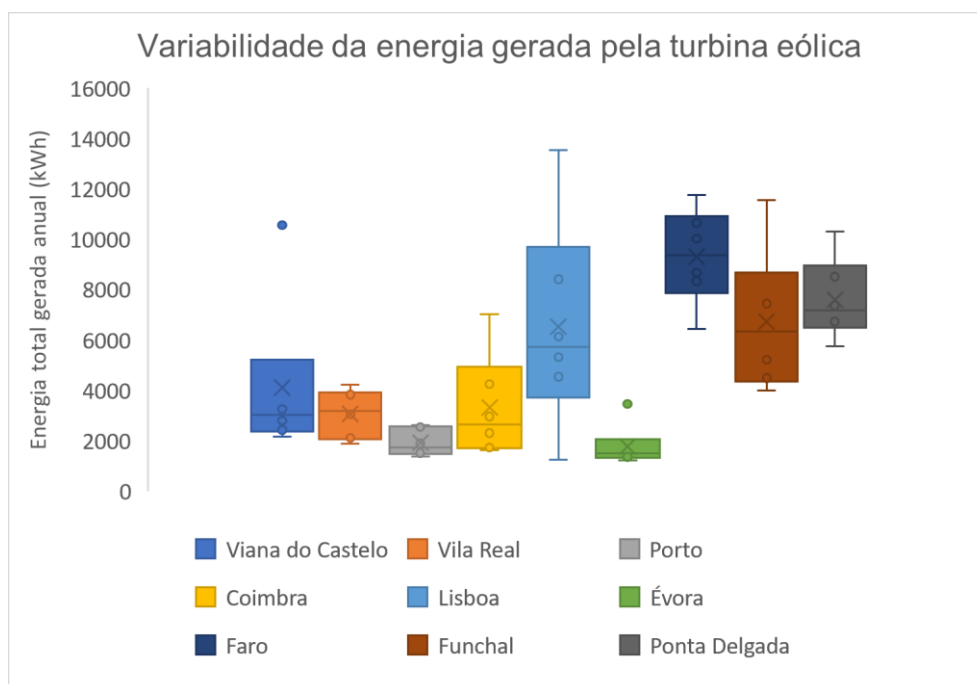


Figura 14 - Variabilidade de energia gerada pela turbina eólica de 5kW, para cada distrito e cidade.

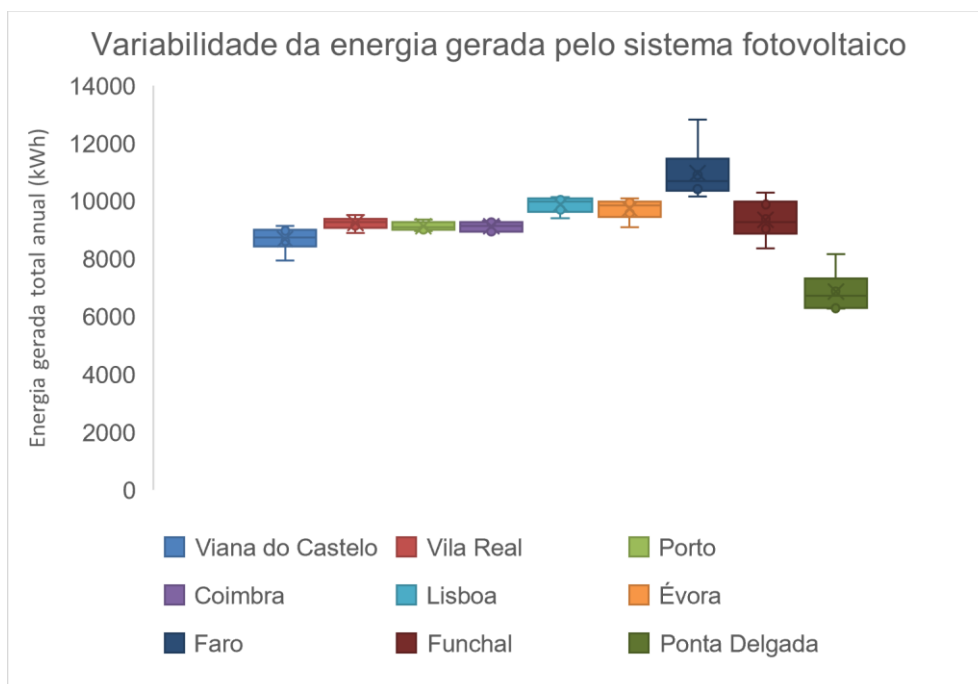


Figura 15 - Variabilidade da energia gerada pelo sistema fotovoltaico, para cada distrito e cidade.

Sistema Fotovoltaico

A irradiância horizontal, dada pela base de dados da plataforma online PVGIS, e no caso das ilhas pela HelioClim-3, e a efetiva calculada pelo modelo mostram uma evolução ao longo do ano semelhante para as várias regiões, em que os maiores valores registam-se nos meses de verão e menores nos de inverno, compatível com a evolução da energia gerada pelo sistema fotovoltaico. As Figuras 16,17,18,19 e 20 ilustram o mencionado, em que para diferentes localizações, em diferentes regiões climáticas, as eventuais diferenças em alguns meses, de algumas localizações não são significativas.

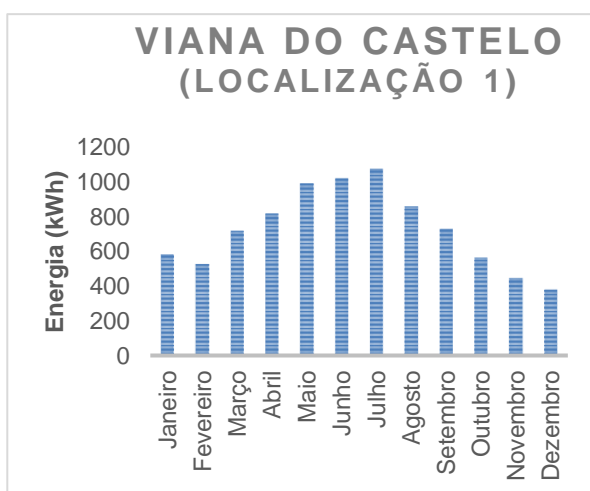


Figura 16 - Energia do sistema fotovoltaico (7,65 kW) ao longo do ano na localização nº1 em Viana do Castelo.

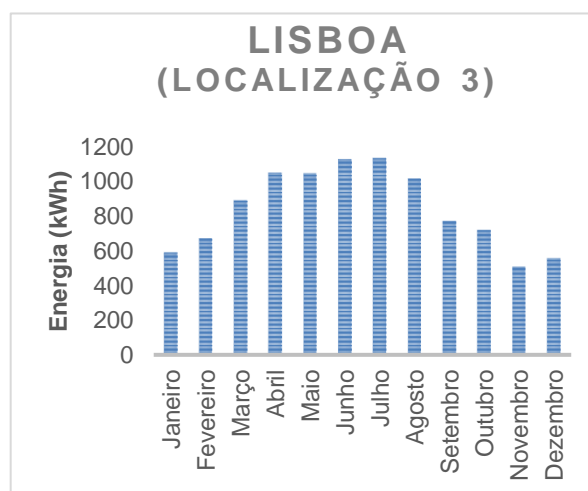


Figura 17 - Energia do sistema fotovoltaico (7,65 kW) ao longo do ano, na localização 3 em Lisboa.

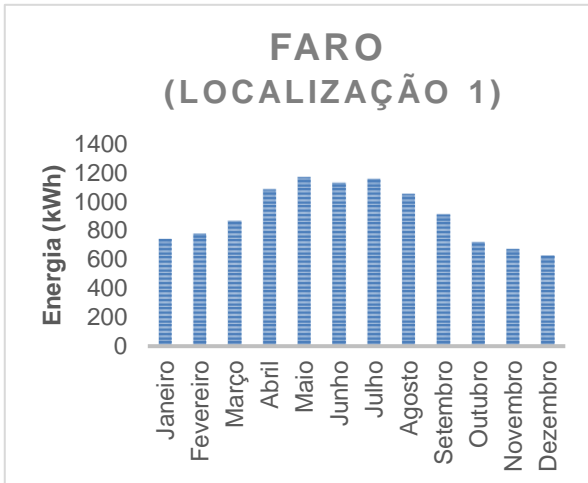


Figura 18 - Energia do sistema fotovoltaico (7,65 kW) ao longo do ano, na localização 1 em Faro.

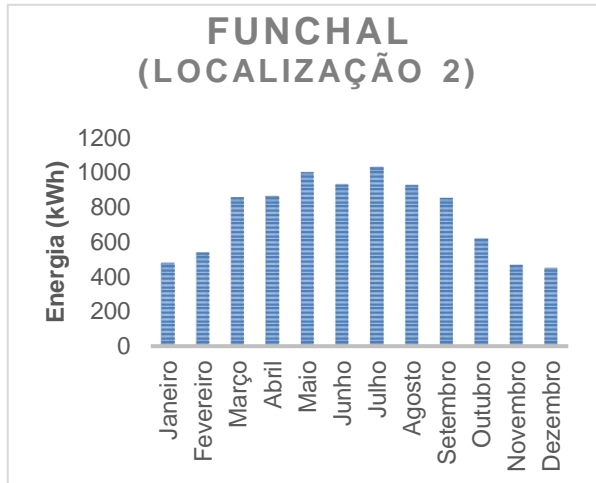


Figura 19 - Energia do sistema fotovoltaico (7,65 kW) ao longo do ano, na localização 2 em Funchal.

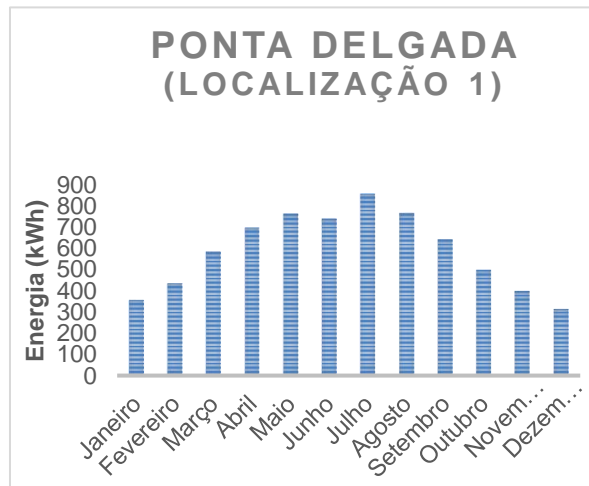


Figura 20 - Energia do sistema fotovoltaico (7,65 kW) ao longo do ano, na localização 1 em Ponta Delgada.

Turbina eólica

A velocidade do vento também fornecida pelas mesmas bases de dados que a irradiância, para além de variar numa determinada região, também varia mensalmente, ao longo do ano. Para diferentes localizações da mesma região, as diferentes evoluções da velocidade do vento originam as diferentes evoluções de energia gerada, através da turbina eólica de 5kW e para altura de 30 metros. As Figuras 21, 22, 23 e 24 exemplificam as diferenças obtidas da energia gerada pela mesma turbina eólica, para diferentes localizações em Lisboa e Porto.

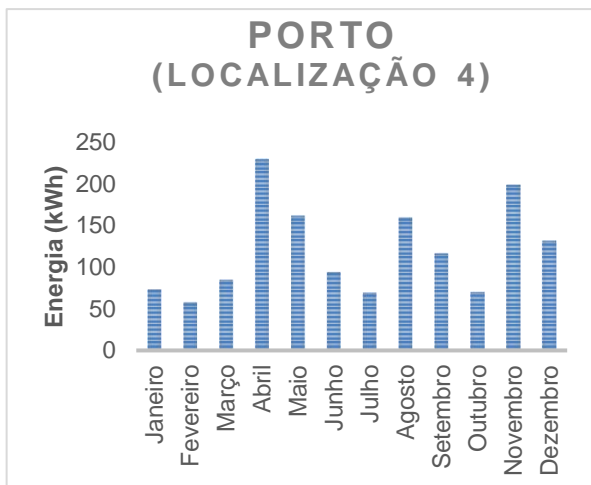


Figura 21 - Energia da turbina eólica (5kW) ao longo do ano, na localização 4 no Porto.

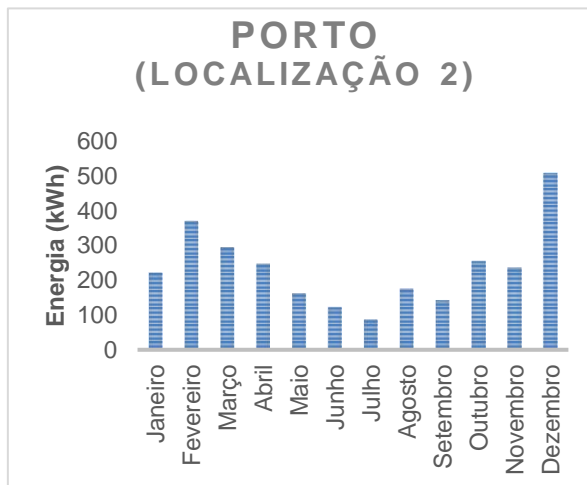


Figura 22 - Energia da turbina eólica (5kW) ao longo do ano, na localização 2 no Porto.

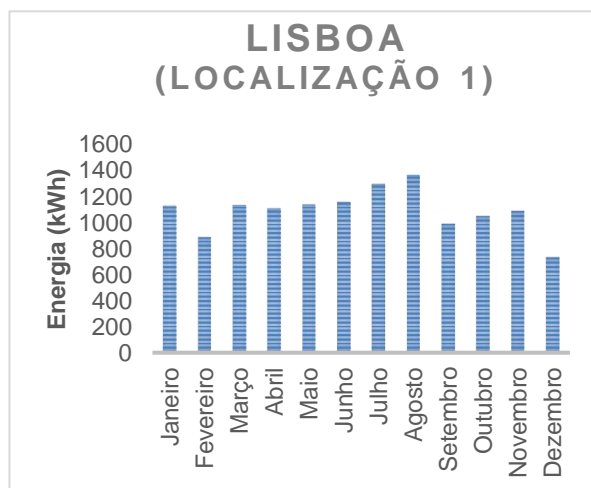


Figura 23 - Energia da turbina eólica (5kW) ao longo do ano, na localização 1 em Lisboa.

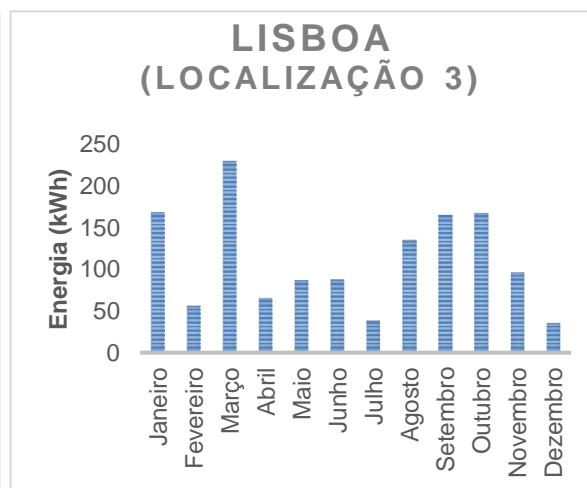


Figura 24 - Energia da turbina eólica (5kW) ao longo do ano, na localização 3 em Lisboa.

Estas diferenças constatarem-se nos vários distritos, sendo que, no caso das ilhas, a evolução ao longo do ano é semelhante nas diferentes localizações das respetivas cidades. As semelhanças entre as evoluções ilustram-se nas Figuras 25 e 26 no caso do Funchal, e nas Figuras 27 e 28 no caso de Ponta Delgada.

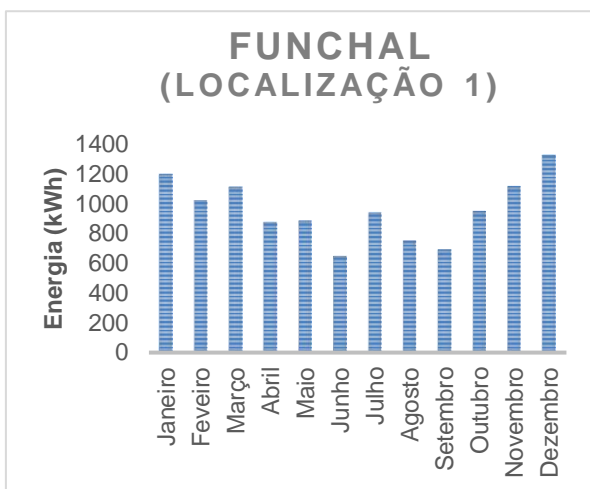


Figura 25 - Energia da turbina eólica (5kW) ao longo do ano, na localização 1 no Funchal.

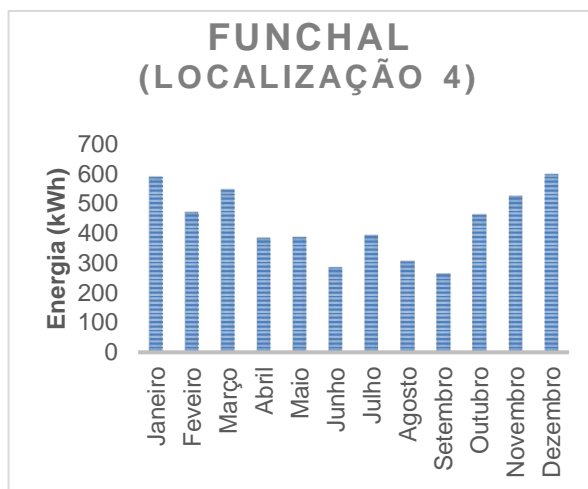


Figura 26 - Energia da turbina eólica (5kW) ao longo do ano, na localização 4 no Funchal.

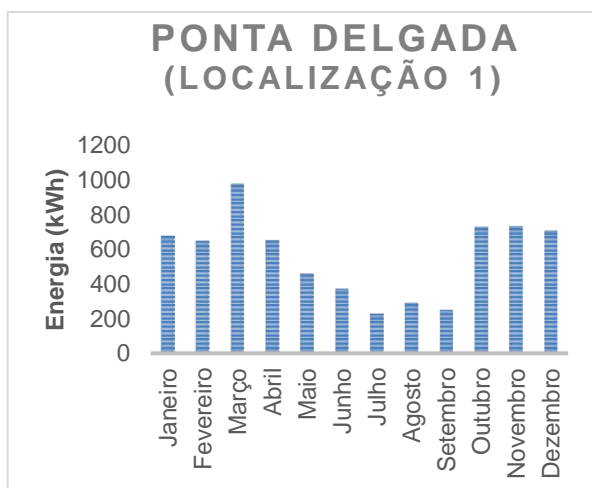


Figura 27 - Energia da turbina eólica (5kW) ao longo do ano, na localização 1 em Ponta Delgada.

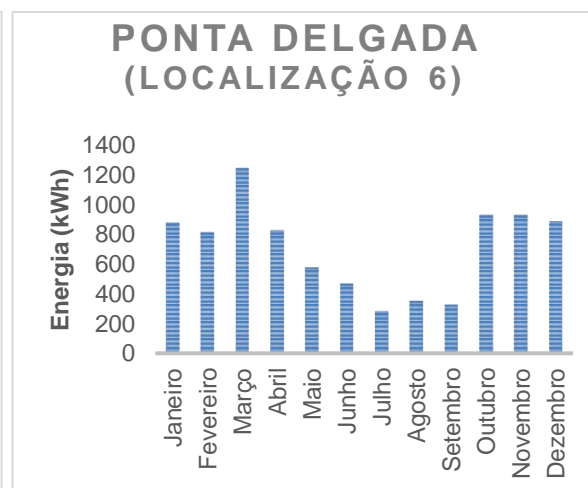


Figura 28 - Energia da turbina eólica (5kW) ao longo do ano, na localização 6 em Ponta Delgada.

É importante realçar que os resultados obtidos estão dependentes dos dados utilizados, ou seja, o facto de a base de dados utilizada para os distritos para Portugal Continental ser diferente das cidades avaliadas nas ilhas, deve ser considerado na análise dos resultados. A particularidade, de a base de dados utilizada para o caso das ilhas fornecer apenas dados dos anos de 2004, 2005 e 2006 constitui uma carência de informação relevante para o estudo de recursos como a irradiância, e em especial a velocidade de vento, que necessita de no mínimo 5 anos de dados, diminuindo a precisão dos resultados obtidos.

A análise dos resultados obtidos para cada região e para cada diferente localização numa região, confirma o mencionado no capítulo 3.2, relativamente à alta variabilidade espacial numa região

climática, e temporal, tornando difícil a previsão da velocidade do vento, devido às mudanças que ocorrem, num ano, mês, dia ou hora. A caracterização da velocidade do vento é complexa podendo criar dificuldades ao desenvolvimento e dimensionamento de turbinas eólicas.

5.3. Influência da inclinação no sistema fotovoltaico

O modelo de cálculo, desenvolvido para o sistema fotovoltaico, contempla a possibilidade de modificar a inclinação da instalação dos painéis fotovoltaicos. Esta opção permite calcular, para várias inclinações, a geração de energia pelo sistema fotovoltaico e avaliar a sua influência. Para tal, foi selecionada uma localização de cada distrito e cidade, e várias inclinações foram testadas. De acordo com as localizações, o número de painéis (N) introduzido no modelo variou para cada localização, mas não para as diferentes inclinações, evidenciado na Tabela 5.

Tabela 5 - Número de painéis fotovoltaicos utilizados (N) e respetiva potência do sistema (P (kW)), para determinada localização do distrito e cidade.

	Viana do Castelo	Vila Real	Porto	Coimbra	Lisboa	Évora	Faro	Funchal	Ponta Delgada
N	35	33	33	34	30	31	26	37	49
P (kW)	8,925	8,415	8,415	8,67	7,65	7,905	6,63	9,435	12,495

Tabela 6 - Localizações utilizadas para cada distrito e cidade, para avaliar a inclinação.

	Localização
Viana do Castelo	1
Vila Real	4
Porto	3
Coimbra	2
Lisboa	3
Évora	4
Faro	1
Funchal	5
Ponta Delgada	5

Após a aplicação do modelo para as condições mencionadas, os resultados foram reunidos e dispostos, conforme pode ser visualizado na Figura 29 que demonstram a influência da inclinação. A análise permite afirmar que a inclinação ótima, na medida que potencia uma maior geração de energia anualmente, encontra-se algures entre os 30 e 40 graus, independentemente da localização. Os resultados confirmam o esperado, tendo em conta a orientação a sul do sistema e a latitude das localizações em Portugal.

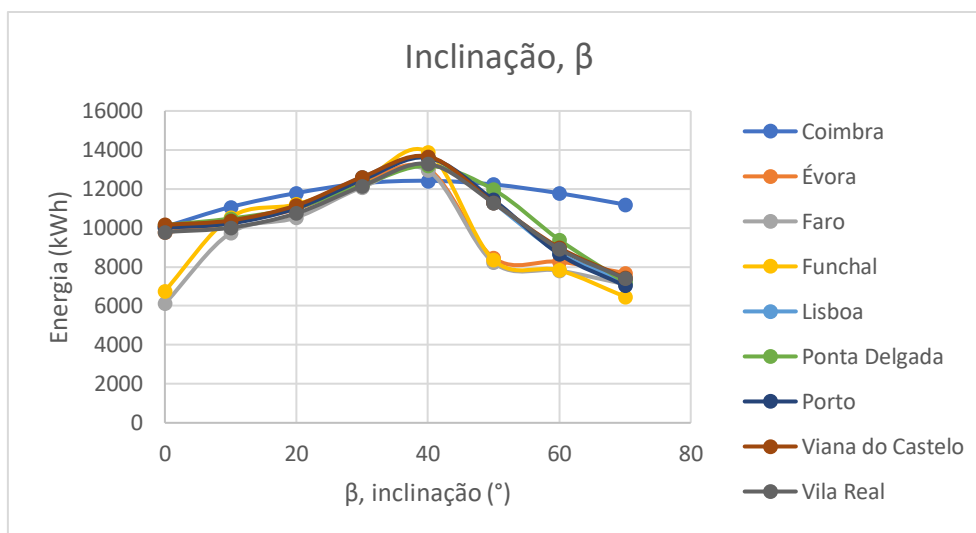


Figura 29 - Energia gerada pelo sistema fotovoltaico para várias inclinações.

Os resultados obtidos, também permitem conferir uma noção da quantidade de painéis necessários, para cada localização em estudo, caso a meta de energia renovável gerada fosse atingida unicamente pelo sistema fotovoltaico, para um valor de área de referência de 100m², ou próximo, segundo a certificação PHP, uma vez que os valores obtidos se encontram próximos dos 12000 kWh. Esta questão será analisada em maior detalhe no subcapítulo 5.2..

5.4. Energia do sistema fotovoltaico

Numa primeira abordagem, considera-se relevante averiguar a possibilidade de a energia gerada ter origem apenas no sistema fotovoltaico. No seguimento dos resultados obtidos, face à influência da inclinação dos painéis fotovoltaicos, foi considerado um ângulo de 35 graus e, posteriormente, o modelo do sistema fotovoltaico foi aplicado a todas as localizações em estudo. A Tabela 7 apresenta o número mínimo e máximo de painéis, para cada distrito e cidade necessários, tendo em conta todas as respetivas localizações em estudo e o limite imposto pela certificação Passive House Premium.

Tabela 7 - Número de painéis fotovoltaicos mínimo e máximo, de acordo todas as localizações dos distritos e cidades, para ângulo de inclinação de 35° e área de referência 100m².

<i>N</i>	Viana do Castelo	Vila Real	Porto	Coimbra	Lisboa	Évora	Faro	Funchal	Ponta Delgada
mínimo	30	29	24	29	26	27	25	27	34
máximo	35	31	31	34	28	44	34	37	49

De acordo com as localizações analisadas em cada distrito e cidade, o número de painéis necessários para garantir a geração de 120 kWh/m² de energia renovável, encontra-se na Tabela 7. Isto é, o número mínimo de painéis está associado à localização com maior potencial de aproveitamento da energia solar fotovoltaica, de cada distrito ou cidade. Pelo contrário o número máximo de painéis indica a localização com menor potencial, pelo que necessita de mais painéis fotovoltaicos para atingir o limite de 120 kWh/m². A obtenção destes valores resultam da consideração da área de referência de 100m².

A Tabela 8 indica o intervalo de área do sistema fotovoltaico, para o número mínimo e máximo de número de painéis fotovoltaicos, associado a cada distrito e cidade. Os valores mínimo e máximo de área, expressa o limite inferior e superior de acordo com as 6 localizações analisadas em cada distrito e cidade. A área total do sistema baseia-se na área individual do mesmo painel, utilizado sempre em todos os cálculos, que envolvem o painel fotovoltaico, de área 1,62688 m², cujas especificações podem ser consultadas no anexo A3.

Tabela 8 - Área mínima e máxima, de acordo com o número de painéis fotovoltaicos e das localizações dos distritos e cidades analisadas.

Área (m ²)	Viana do Castelo	Vila Real	Porto	Coimbra	Lisboa	Évora	Faro	Funchal	Ponta Delgada
mínima	48,81	47,18	39,05	47,18	42,30	43,93	40,67	43,93	55,31
máxima	56,94	50,43	50,43	55,31	45,55	71,58	55,31	60,19	79,72

Os valores obtidos demonstram que, para a energia gerada ser proveniente totalmente do sistema fotovoltaico, é necessário ter disponível para a instalação uma área considerável, podendo ser, ou não, viável em termos logísticos. A área de instalação poderá incluir o telhado ou área envolvente disponível, mas é importante realçar que estes cálculos estão sob a condição de terem uma inclinação de 35 graus.

O eventual problema da área disponível e o facto de a energia gerada pelo sistema fotovoltaico estar restrita ao período de irradiação solar, desencadeia a necessidade de procurar outra fonte de energia, com o objetivo de tentar reduzir a área necessária e a geração de energia com um balanço mais desejável a nível diário e mensal, considerando os momentos de ausência ou menor geração de energia do sistema fotovoltaico.

5.5. Energia da turbina eólica

O potencial da energia gerada pela turbina eólica foi, primeiramente, avaliado para uma turbina de 5kW e posteriormente para uma de 7,5 kW. Ao modelo de cálculo, para além da velocidade do vento obtida da base de dados, conforme explicado em detalhe no capítulo 3.2, foram introduzidas as diferentes rugosidades, de acordo a localização, assim como a correção da altura de referência, isto é, correção da altura relativa à estação da base de dados para a altura em estudo.

As rugosidades (α) consideradas estão indicadas na Tabela 9, para os determinados distritos e cidades em estudo.

Tabela 9 - Valores das rugosidades utilizadas no modelo, para cada distrito e cidade.

	Viana do Castelo	Vila Real	Porto	Coimbra	Lisboa	Évora	Faro	Funchal	Ponta Delgada
α	0,214	0,206	0,206	0,197	0,165	0,149	0,165	0,206	0,197

Para as respetivas rugosidades e para uma altura de turbina de 30 metros, a energia anual pela turbina de 5kW para as várias localizações encontra-se na Tabela 10.

Tabela 10 - Energia anual gerada pela turbina eólica de 5kW, em cada localização de cada distrito e cidade.

Energia anual (kWh) - Turbina 5 kW									
	Viana do Castelo	Vila Real	Porto	Coimbra	Lisboa	Évora	Faro	Funchal	Ponta Delgada
1	2788,67	4220,02	1885,90	1613,69	13526,58	1595,67	10652,77	11555,10	6733,13
2	10552,23	3047,20	2534,33	2959,74	4532,46	1481,60	6428,48	7723,08	10302,44
3	3433,68	2103,71	1544,67	1725,35	1250,73	1362,84	11746,20	7435,83	6965,00
4	2424,59	3824,22	1374,63	4245,07	8403,76	1214,20	8336,59	5209,90	5735,83
5	2162,98	3325,70	2615,92	2303,21	5319,84	1521,16	10024,84	3990,29	7357,53
6	3248,45	1888,80	1511,88	7020,38	6134,05	3462,34	8676,36	4481,35	8513,93

Em primeira análise, a turbina de 5kW, na maior parte dos casos, não consegue gerar a energia total necessária à certificação (120kWh/m²a), para uma área de referência de 100 m². A localização 2 de Viana de Castelo gera energia próxima do limite. O distrito de Lisboa para a primeira localização excede a energia limite imposta, enquanto que em Faro a energia é relativamente superior em relação aos outros distritos, destacando-se a localização 1, 3 e 4. Nas ilhas, os valores de energia são

interessantes, superiores a muitos distritos, nomeadamente na localização 1 da cidade do Funchal, e na localização 2 em Ponta Delgada. A energia relativamente à turbina de 7,5 kW encontra-se na Tabela 11, para as mesmas rugosidades indicadas na Tabela 9 e para uma altura de turbina de 30 metros.

Tabela 11 - Energia anual gerada pela turbina de 7,5 kW, em cada localização de cada distrito e cidade.

Energia anual (kWh) - Turbina 7,5 kW									
	Viana do Castelo	Vila Real	Porto	Coimbra	Lisboa	Évora	Faro	Funchal	Ponta Delgada
1	4040,87	6113,32	2969,33	2377,79	19545,84	2357,69	15359,67	16711,09	9953,28
2	15047,57	5962,68	3772,24	4307,67	7737,65	2203,82	9328,66	11150,75	15127,34
3	5020,85	3164,92	2324,83	2545,15	1924,72	2039,25	16982,92	10789,71	10286,93
4	3618,42	5460,37	2077,19	6115,43	12152,54	1848,23	12090,98	7645,76	8513,09
5	3247,63	4880,61	3893,69	3342,36	7762,41	2250,27	14523,29	5914,41	10881,09
6	4742,77	2902,67	2286,45	10026,14	8921,28	4968,65	12680,64	6611,26	12529,56

Na Tabela 12 visualiza-se, em percentagem, o aumento da geração de energia da turbina de 7,5 kW em relação à turbina de 5 kW, para as mesmas rugosidades e altura.

Tabela 12 - Percentagem que indica o aumento de energia gerada pela turbina eólica de 7,5 kW, em relação à turbina eólica de 5 kW.

Percentagem do aumento de energia anual (%)									
	Viana do Castelo	Vila Real	Porto	Coimbra	Lisboa	Évora	Faro	Funchal	Ponta Delgada
1	44,90	44,86	57,45	47,35	44,50	47,76	44,18	44,62	47,83
2	42,60	95,68	48,85	45,54	70,72	48,75	45,11	44,38	46,83
3	46,22	50,45	50,51	47,51	53,89	49,63	44,58	45,10	47,69
4	49,24	42,78	51,11	44,06	44,61	52,22	45,03	46,75	48,42
5	50,15	46,75	48,85	45,12	45,91	47,93	44,87	48,22	47,89
6	46,00	53,68	51,23	42,81	45,44	43,51	46,15	47,53	47,17

5.6. Influência da rugosidade

O estudo da rugosidade permite avaliar a caracterização das zonas geográficas. A presença de zonas acidentadas e floresta, com elevada densidade de árvores e vegetação, constitui um conjunto de obstáculos que influenciam a rugosidade do terreno, que diminui a velocidade de vento disponível. Os obstáculos também podem ser construções civis, encontradas com mais frequência e em maior dimensão em meio urbano, onde os edifícios atuam de certa forma, como uma barreira relativamente ao vento, com consequências no comportamento eólico normal, influenciando o seu aproveitamento. A caracterização do terreno das várias zonas geográficas, tem auxílio no comprimento da rugosidade, associado a cada tipo de terreno. Os terrenos com menor comprimento de rugosidade estão associados aos terrenos planos. Os terrenos agrícolas são considerados moderadamente rugosos. Terrenos com vegetação mais densa são considerados rugosos. As cidades, onde existe uma forte presença de edifícios e infraestruturas são considerados muito rugosos, com comprimentos de rugosidades superiores.

A porosidade também tem influência na velocidade do vento. Os edifícios sendo sólidos não apresentam porosidade, já as árvores e a vegetação tem porosidade superior. No caso de árvores varia com a altura do ano, em que no inverno, havendo ausência de folhas, uma parte do escoamento do vento atravessa as árvores, pelo contrário, no verão, com mais folhagem a porosidade aumenta.

A avaliação da geração de energia relativa à turbina eólica depende da rugosidade da superfície (α), relacionada com o respetivo comprimento da rugosidade (z_0) e altura da turbina, introduzida no modelo de cálculo. Numa cidade ou numa área mais pequena, a rugosidade poderá variar, de acordo com a superfície em estudo, ou até mesmo ao efeito de obstáculos encontrados na zona. Esta evidência suscita o interesse de averiguar a influência de diferentes rugosidades, na energia obtida através da turbina eólica. A Tabela 13 indica os valores utilizados da rugosidade, dependente do comprimento de rugosidade de superfície e altura de 30 metros, conforme mencionado no subcapítulo 3.2.2. Os resultados estão associados à utilização da turbina de 5kW.

Tabela 13 - Valores de comprimento rugosidade de superfície e respetiva rugosidade analisados.

Comprimento de rugosidade de superfície (z_0) [m]	Rugosidade (α)
0,01	0,125
0,1	0,175
1	0,294

A evolução da energia da turbina eólica em função da rugosidade, foi efetuada para a localização 5 de cada distrito e cidade em estudo, a visualizar na Figura 28.

Analisando a Figura 30, a evolução da energia não é igual para todas as localizações em tudo. Para os casos de Viana do Castelo e Vila Real a energia diminui com a rugosidade, ao contrário dos restantes casos. Esta diferença pode ser explicada pelo cálculo da velocidade e a influência da rugosidade. A velocidade obtida da base de dados tem de ser corrigida para as condições em estudo, e a relação entre altura da estação meteorológica e da turbina, determina se a velocidade aumenta ou diminui com a rugosidade. Conforme explicado, em maior detalhe no subcapítulo 3.3.2, conclui-se que para uma relação de alturas maior que 1, a velocidade aumenta com o aumento da rugosidade, enquanto que para uma relação menor que 1, a velocidade diminui com o aumento da rugosidade. Estas relações correspondem aos diferentes resultados relativamente à energia gerada pela turbina eólica, para as várias rugosidades.

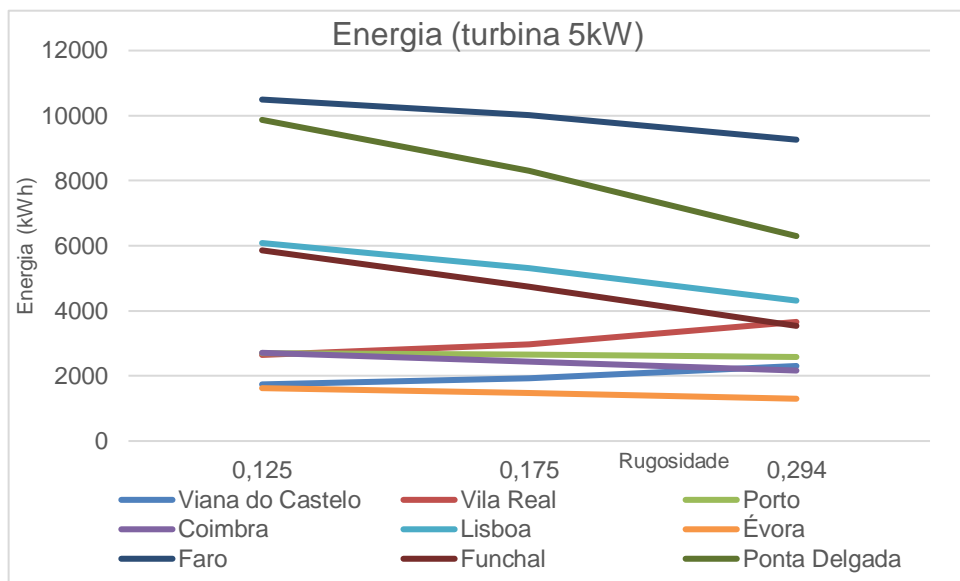


Figura 30 - Energia gerada pela turbina eólica de 5kW para diferentes valores de rugosidade.

A Tabela 14 traduz o aumento e diminuição da energia gerada quando a rugosidade é 0,294, relativamente ao caso inicial de rugosidade 0,125, através de números em percentagem.

Tabela 14 - Percentagem que relaciona o aumento ou diminuição de energia anual gerada pela turbina eólica (5kW), para uma rugosidade de 0,294 em relação à rugosidade de 0,125.

Percentagem da variação da energia anual (%)									
	Viana do Castelo	Vila Real	Porto	Coimbra	Lisboa	Évora	Faro	Funchal	Ponta Delgada
1	22,61	66,19	-16,46	-15,09	9,87	-16,77	13,94	-2,19	-38,10
2	83,23	27,74	-13,49	-17,24	-31,65	-19,82	-22,22	-21,80	-23,59
3	50,90	20,34	-9,95	-12,54	-11,88	-19,21	10,97	-23,49	-37,59
4	24,81	62,75	-5,87	-4,47	-12,41	-12,36	-15,54	-34,78	-42,38
5	32,48	38,36	-4,33	-20,14	-29,08	-20,02	-11,76	-39,61	-36,18
6	39,48	29,16	-9,71	31,00	-27,57	19,95	-26,51	-38,14	-31,17

A Tabela 14 evidencia que em todas as localizações de Viana do Castelo e Vila Real a energia aumenta com a rugosidade. Em certos distritos, determinadas localizações apresentam resultados em que a energia aumenta com a rugosidade, nomeadamente a localização 6 de Coimbra, a localização 1 de Lisboa, localização 6 de Évora e a localização 1 e 3 do distrito de Faro. O aumento de energia maior está associado a Viana do Castelo (localização 2), enquanto que o maior decréscimo em Ponta Delgada (localização 4). Apesar destes resultados, a maior parte das localizações apresentam um decréscimo de geração de energia face ao aumento da rugosidade.

5.7. Influência da orografia

O estudo da orografia indica a variação de elevação do terreno, com influência na velocidade do vento, seja na sua intensidade ou até mesmo na sua direção. As trajetórias com maior elevação associam-se a maiores velocidades de vento. A presenças de vales, por exemplo, pelo contrário, indica valores menores de velocidade de vento.

5.8. Influência da altura

A disponibilidade de uma maior ou menor velocidade de vento, que resulta numa maior ou menor geração de energia por parte da turbina eólica, relaciona-se com a altura da turbina instalada. Com o objetivo de averiguar a influência da altura da turbina na geração de energia, procedeu-se à introdução

de três alturas diferentes: 30, 50 e 100 metros. As rugosidades consideradas são as mesmas indicadas na Tabela 9 do subcapítulo 5.5.

A Figura 31 representa os resultados obtidos para a localização 1, de cada distrito e cidade em estudo, para a turbina de 5kW.

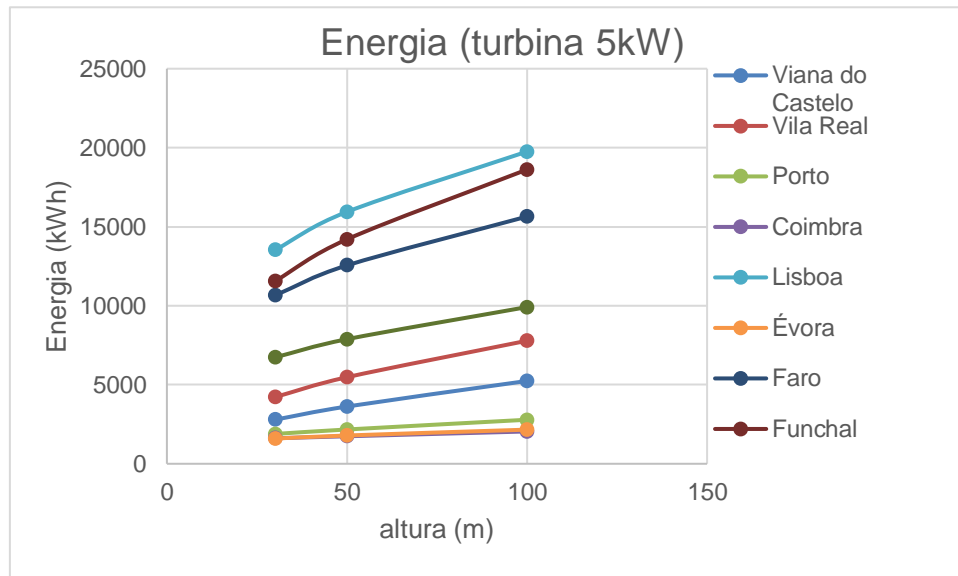


Figura 31 - Energia gerada pela turbina eólica (5kW) para diferentes alturas, em cada distrito e cidade.

A análise da Figura 29 permite afirmar que, conforme o esperado, a geração de energia da turbina eólica, aumenta de acordo com o aumento da altura de instalação, devido às maiores velocidades disponíveis.

Os cálculos para as três alturas em questão foram feitos para todas as localizações, e com eles foi determinado a percentagem, relativamente ao aumento da geração de energia da turbina quando instalada a uma altura de 100 metros, em relação à de 30 metros. Estes resultados podem ser visualizados na Tabela 15. Todas as localizações apresentam aumento de energia, sem exceção. As localizações que apresentam um maior aumento, quando comparado com as restantes, nomeadamente Viana do Castelo e Vila Real, deve-se à maior relação entre a altura da turbina, da altura dada pela estação da base de dados, conforme expresso na equação (43), no subcapítulo 32, quando corrigindo a velocidade.

Tabela 15 - Percentagem relativamente ao aumento de energia gerada pela turbina eólica (5kW) para a altura de 100 metros, quando comparada com altura de 30 metros, em todas as localizações.

Percentagem do aumento de energia anual (%)									
	Viana do Castelo	Vila Real	Porto	Coimbra	Lisboa	Évora	Faro	Funchal	Ponta Delgada
1	87,91	84,53	47,72	26,76	46,05	35,33	46,87	61,12	47,29
2	71,50	76,95	35,85	47,46	38,01	34,23	42,70	62,06	51,56
3	91,42	74,25	14,85	19,47	25,38	34,75	46,05	62,42	47,68
4	89,99	82,58	6,20	61,51	49,07	21,85	44,68	55,12	43,04
5	95,74	83,75	66,97	30,72	43,67	33,25	45,53	43,15	48,66
6	89,73	93,16	8,38	65,58	44,24	56,38	42,19	48,82	50,66

5.9. Mix energético

No seguimento da avaliação individual da geração de energia do sistema fotovoltaico e da turbina eólica, o interesse da junção das duas tecnologias revela-se importante para atingir o limite imposto pela certificação Passive House Premium (120kWh/m²a).

Primeiramente, com os resultados da turbina de 5kW, para as rugosidades da Tabela 9 e altura de 30 metros, foi calculado o número de painéis fotovoltaicos necessárias para perfazer a totalidade de 12000kWh, para a inclinação de 35 graus e área de referência de 100 m². As Tabelas 16 e 17 revelam a percentagem da energia gerada pelo sistema fotovoltaico e pela turbina eólica respetiva, necessária para atingir 120 kWh/m²a. Os resultados mostram que na grande maioria das localizações, o sistema fotovoltaico gera mais de metade da energia. É de destacar as localizações em Faro, onde a maioria da energia é gerada pela turbina eólica. Em Funchal, nas localizações 1, 2 e 3, a turbina eólica é responsável pela maior parte da energia, enquanto que em Ponta Delgada nas localizações 1, 3 e 4 a energia gerada é aproximada para ambas as tecnologias.

O mesmo procedimento foi realizado, para as mesmas condições de rugosidade e altura anteriores, com a introdução da turbina de 7,5 kW, cujos resultados encontram-se nas Tabelas 18 e 19.

Tabela 16 - Percentagem relativamente ao sistema fotovoltaico (PV) e turbina eólica de 5kW do mix energético, para Viana do Castelo, Vila Real, Porto e Coimbra.

Percentagem de cada sistema (%) - Turbina 5kW								
	Viana do Castelo		Vila Real		Porto		Coimbra	
	FV	Turbina	FV	Turbina	FV	Turbina	FV	Turbina
1	77,32	22,68	66,05	33,95	84,49	15,51	86,72	13,28
2	21,67	78,33	74,87	25,13	78,94	21,06	75,30	24,70
3	71,57	28,43	82,84	17,16	87,58	12,42	85,79	14,21
4	79,91	20,09	68,35	31,65	89,99	10,01	59,88	40,12
5	82,33	17,67	72,57	27,43	78,23	21,77	80,88	19,12
6	73,32	26,68	84,32	15,68	87,73	12,27	42,22	57,78

Tabela 17 - Percentagem relativamente ao sistema fotovoltaico (PV) e turbina eólica de 5kW do mix energético, para Lisboa, Évora, Faro, Funchal e Ponta Delgada.

Percentagem de cada sistema (%) - Turbina 5 kW										
	Lisboa		Évora		Faro		Funchal		Ponta Delgada	
	FV	Turbina	FV	Turbina	FV	Turbina	FV	Turbina	FV	Turbina
1	0,00	100,00	86,88	13,12	21,12	78,88	10,76	89,24	44,65	55,35
2	63,39	36,61	87,68	12,32	46,66	53,34	35,97	64,03	18,57	81,43
3	89,66	10,34	88,78	11,22	17,21	82,79	38,61	61,39	43,07	56,93
4	30,05	69,95	90,19	9,81	32,26	67,74	57,43	42,57	53,44	46,56
5	56,17	43,83	87,33	12,67	21,95	78,05	67,45	32,55	39,16	60,84
6	49,82	50,18	71,34	28,66	28,02	71,98	63,93	36,07	29,60	70,40

Tabela 18 - Percentagem relativamente ao sistema fotovoltaico (FV) e da turbina eólica de 7,5 kW do mix energético, para Viana do Castelo, Vila Real, Porto e Coimbra.

Percentagem de cada sistema (%) - Turbina 7,5 kW								
	Viana do Castelo		Vila Real		Porto		Coimbra	
	PV	Turbina	PV	Turbina	PV	Turbina	PV	Turbina
1	66,98	33,02	49,62	50,38	75,37	24,63	80,35	19,65
2	0,00	100,00	50,37	49,63	68,79	31,21	64,83	35,17
3	58,49	41,51	74,63	25,37	81,20	18,80	79,06	20,94
4	71,03	28,97	55,20	44,80	83,00	17,00	50,88	49,12
5	73,20	26,80	59,60	40,40	68,79	31,21	72,76	27,24
6	62,22	37,78	76,29	23,71	81,40	18,60	17,00	83,00

Tabela 19 - Percentagem relativamente ao sistema fotovoltaico (FV) e da turbina eólica de 7,5 kW do mix energético, para Lisboa, Évora, Faro, Funchal e Ponta Delgada.

Percentagem de cada sistema (%) - Turbina 7,5 kW										
	Lisboa		Évora		Faro		Funchal		Ponta Delgada	
	PV	Turbina	PV	Turbina	PV	Turbina	PV	Turbina	PV	Turbina
1	0,00	100,00	80,39	19,61	0,00	100,00	0,00	100,00	18,69	81,31
2	36,86	63,14	81,67	18,33	22,59	77,41	10,93	89,07	0,00	100,00
3	84,38	15,62	83,44	16,56	0,00	100,00	13,07	86,93	17,74	82,26
4	0,00	100,00	85,06	14,94	0,00	100,00	37,30	62,70	30,08	69,92
5	37,51	62,49	81,53	18,47	0,00	100,00	51,26	48,74	9,98	90,02
6	26,22	73,78	59,82	40,18	0,00	100,00	46,45	53,55	0,00	100,00

Os vários valores de percentagem variam para cada localização, evidenciando a importância do estudo da localização específica, e não apenas do distrito ou da cidade. A avaliação da turbina de 7,5 kW demonstra que para certas localizações, a energia gerada passa a ser totalmente da responsabilidade da turbina eólica, nomeadamente em certas localizações em Viana do Castelo, Lisboa, Faro, Funchal e Ponta Delgada. Para outras, aproxima o valor da geração de energia pelo sistema fotovoltaico ao da turbina eólica.

5.9.1. Disponibilidade mensal

O estudo relativo à segmentação da disponibilidade mensal, referente à energia gerada pela turbina eólica e pelo sistema fotovoltaico, desencadeia resultados importantes, nomeadamente, na possibilidade de um sistema substituir ou complementar o outro, quando este tem menor capacidade de produção de energia. Foi selecionada uma localização de cada distrito e cidade, para avaliar a relação entre o sistema fotovoltaico e turbina eólica, e a respetiva geração de energia mensal. A potência da turbina poderá mudar a cada caso, conforme será referido. As somas dos valores de energia mensais atingem o limite anual imposto (120 kWh/m²), visto serem depois aplicados à área de referência de 100 m².

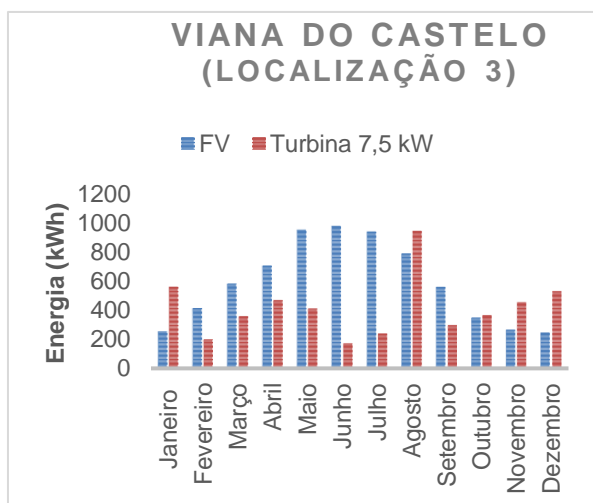


Figura 32 - Energia gerada ao longo do ano pelo sistema fotovoltaico (FV) e pela turbina eólica 7,5kW, na localização 3, em Viana do Castelo.

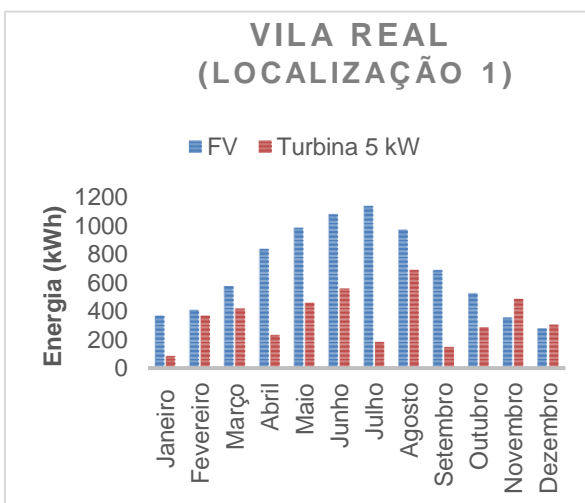


Figura 33 - Energia gerada ao longo do ano pelo sistema fotovoltaico (FV) e pela turbina eólica 5kW, na localização 1, em Vila Real.

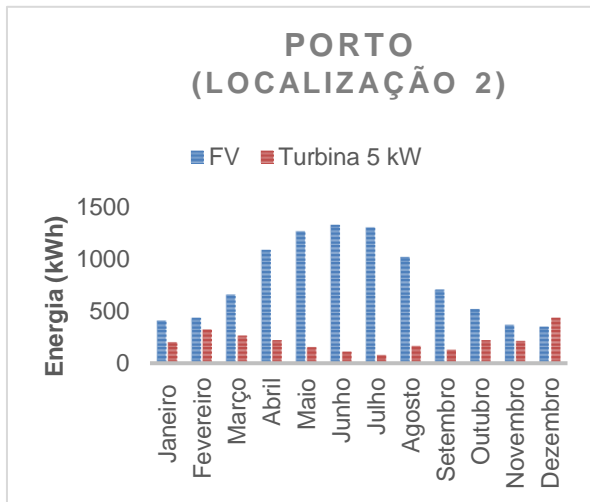


Figura 34 - Energia gerada ao longo do ano pelo sistema fotovoltaico (FV) e pela turbina eólica 5kW, na localização 2, no Porto.

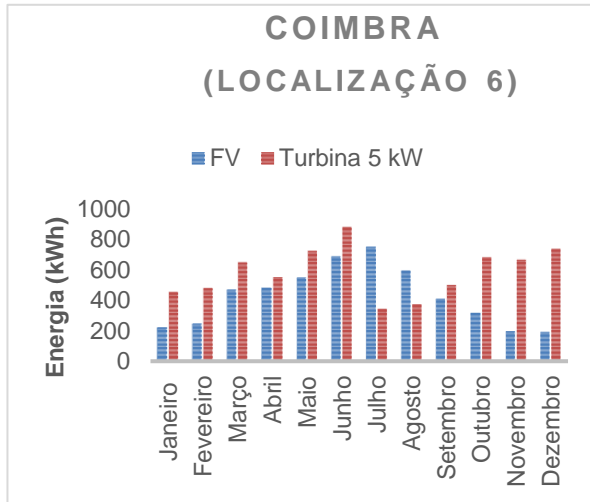


Figura 35 - Energia gerada ao longo do ano pelo sistema fotovoltaico (FV) e pela turbina eólica 5kW, na localização 6, em Coimbra.

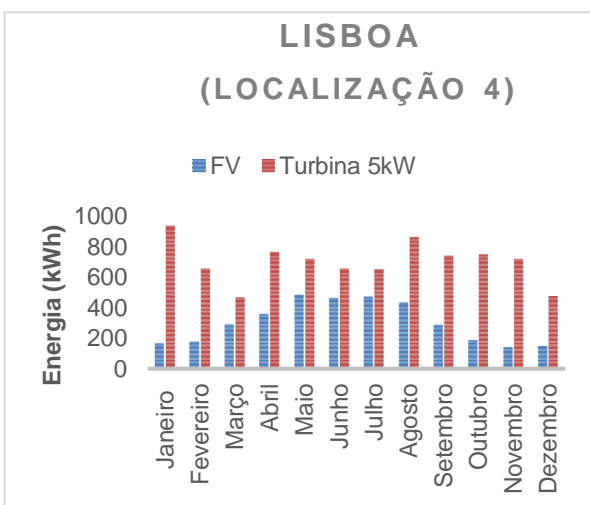


Figura 36 - Energia gerada ao longo do ano pelo sistema fotovoltaico (FV) e pela turbina eólica 5kW, na localização 4, em Lisboa.

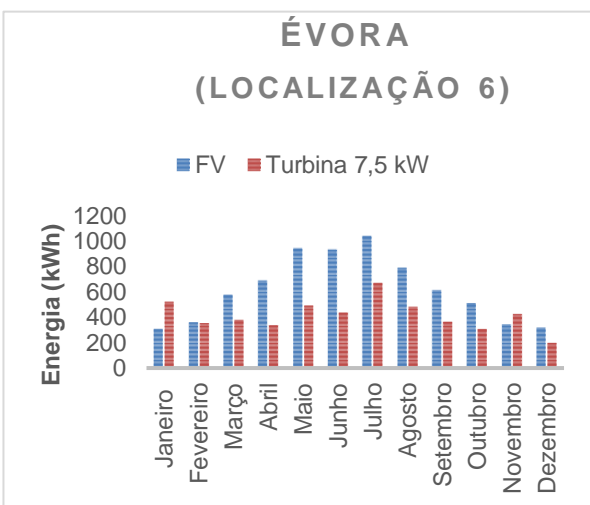


Figura 37 - Energia gerado ao longo do ano pelo sistema fotovoltaico (FV) e pela turbina eólica 7,5kW, na localização 6, em Évora.

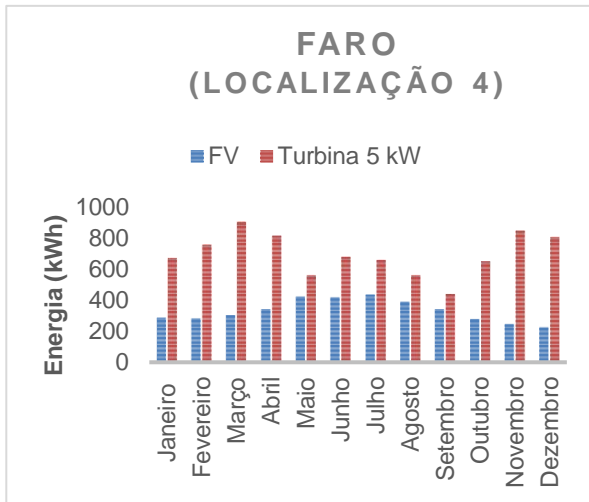


Figura 38 - Energia gerada ao longo do ano pelo sistema fotovoltaico (FV) e pela turbina eólica 5kW, na localização 4, em Faro.

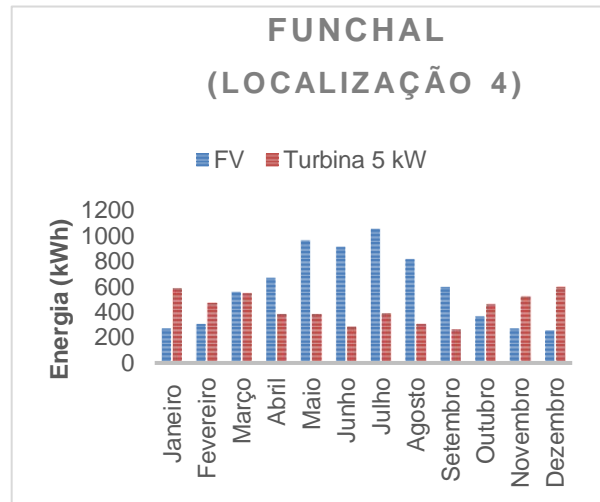


Figura 39 - Energia gerada ao longo do ano pelo sistema fotovoltaico (FV) e pela turbina eólica 5kW, na localização 4, no Funchal.

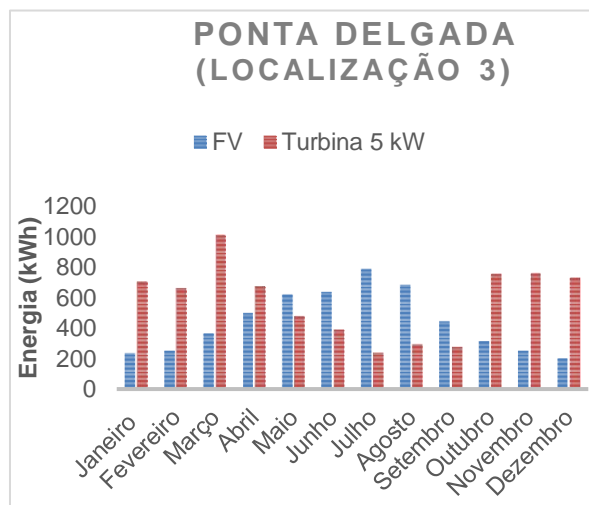


Figura 40 - Energia gerada ao longo do ano pelo sistema fotovoltaico (FV) e pela turbina eólica 5kW, na localização 3, em Ponta Delgada.

As localizações analisadas, para o distrito de Viana do Castelo (Figura 32), e cidades Funchal (Figura 39) e Ponta Delgada (Figura 40), resultam em valores interessantes, visto que nos meses de menor geração de energia pelo sistema fotovoltaico, a turbina eólica compensa, sendo a geração da turbina superior ao do sistema fotovoltaico. Para as mesmas localizações, o contrário também se verifica. Isto é, nos meses de maior geração de energia pelo sistema fotovoltaico, a turbina gera, por sua vez, menos energia, resultando, de certa forma, num balanço interessante relativo à disponibilidade de energia gerada, tendo em conta os recursos necessários e disponíveis de cada tecnologia.

Relativamente ao caso de Lisboa e Faro, Figura 36 e Figura 38, respetivamente, a turbina eólica excede em termos de geração de energia, o sistema fotovoltaico, em todos os meses. Em Coimbra, Figura 35, a energia da turbina eólica é superior ao sistema fotovoltaico, à exceção dos meses julho e agosto. De notar, que a diferença entre os dois diferentes sistemas não é considerável. No Porto, Figura 34, destaca-se a grande diferença entre a energia da turbina e do sistema fotovoltaico, sendo a turbina muito inferior, em todos os meses. Em Vila Real, Figura 33, a energia do sistema fotovoltaico é maioritariamente superior, exceto em novembro e dezembro. Em Évora, Figura 37, a geração de energia pelo sistema fotovoltaico é superior à da turbina eólica, exceto nos meses de janeiro, novembro e dezembro.

5.9.2. Área do sistema fotovoltaico

A área do sistema fotovoltaico depende da irradiação solar de cada localização. Os locais com maior irradiação solar, necessitam de menos painéis fotovoltaicos, para a mesma geração de energia, comparando com locais de menor irradiação solar. O mix energético avaliado consiste na opção da turbina eólica de 5 kW e de 7,5 kW, separadamente, e do sistema fotovoltaico, cuja área também irá ser influenciada pela geração de energia da turbina eólica, isto é, o dimensionamento do sistema fotovoltaico é determinado para completar a geração de energia pela turbina eólica, até atingir o limite necessário à certificação, referente à energia total.

Para todas as localizações foi calculada a área do sistema fotovoltaico, considerando a área de painel fotovoltaico de 1,62688 m², para os dois mix energéticos: sistema fotovoltaico e turbina eólica de 5 kW, e sistema fotovoltaico e turbina eólica 7,5 kW. Todos os resultados obtidos podem ser consultados nos anexos A8 e A9, enquanto que as Tabelas 20 e 21 informam sobre a área mínima e máxima para cada distrito e cidade, para os dois mix energéticos em análise.

Os valores nulos de área mínima, nas Tabelas 20 e 21, para os dois conjuntos de soluções em estudo, significam que para essas localizações a turbina eólica em questão gera a energia renovável necessária à certificação.

Tabela 20 - Área mínima e máxima para o mix energético do sistema fotovoltaico e a turbina 5kW.

Sistema Fotovoltaico com Turbina 5 kW									
	Viana do Castelo	Vila Real	Porto	Coimbra	Lisboa	Évora	Faro	Funchal	Ponta Delgada
Área mínima (m ²)	1,63	32,54	34,16	19,52	0,00	34,16	0,00	1,63	13,02
Área máxima (m ²)	47,18	40,67	43,93	42,30	37,42	61,82	17,90	32,54	37,42

Tabela 21 - Área mínima e máxima para o mix energético do sistema fotovoltaico e a turbina 7,5kW

Sistema Fotovoltaico com Turbina 7,5 kW									
	Viana do Castelo	Vila Real	Porto	Coimbra	Lisboa	Évora	Faro	Funchal	Ponta Delgada
Área mínima (m ²)	0,00	21,15	29,28	9,76	0,00	27,66	0,00	0,00	0,00
Área máxima (m ²)	40,67	37,42	42,30	39,05	35,79	56,94	3,25	27,66	22,78

5.10. Área de referência

A certificação imposta pela Passive House Premium de 120 kWh/m², depende não só da energia gerada, mas da relação entre a energia renovável gerada e a respetiva área de referência. Os resultados até agora tiveram, sempre, em consideração a área de referência de 100 m², mas naturalmente a área poderá tomar outros valores.

Com o objetivo de demonstrar a relação entre a energia a gerar necessária e a área de referência, para a localização 5 de cada distrito e cidade em estudo, foi criado um gráfico que ilustra essa relação linear, presente na Figura 41. Os valores de energia utilizados para a Figura 39, são para o mix energético da turbina de 5 kW e o sistema fotovoltaico.

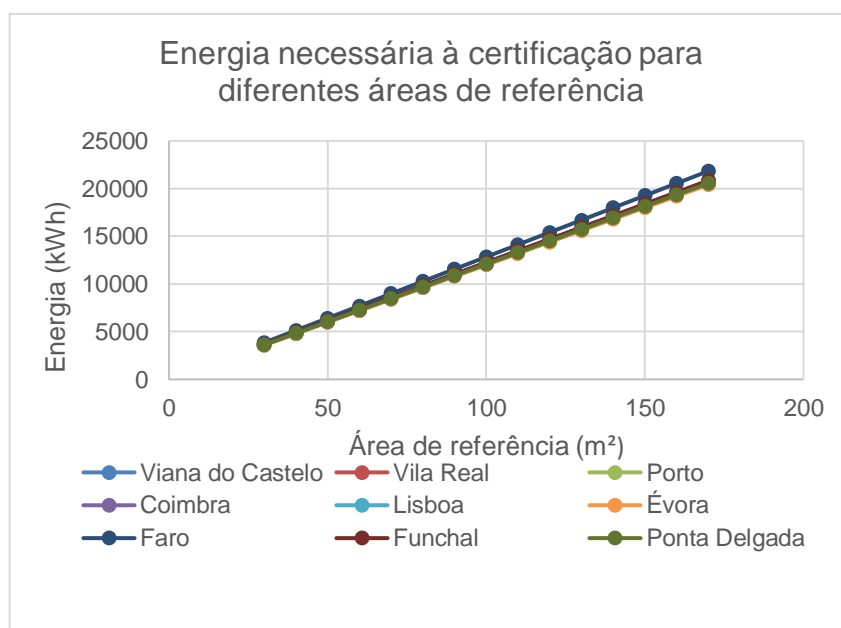


Figura 41 - Relação entre a área de referência e a energia necessária à certificação Passive House Premium.

5.11. Análise económico-financeira

A análise económico-financeira começa com a determinação do investimento inicial, para os vários casos de estudo, isto é, para todas as localizações efetua-se o cálculo do investimento inicial de acordo com os valores referidos na Tabela 4, no subcapítulo 4.1.2.

5.11.1. Investimento inicial

Os valores no que concerne ao investimento inicial, para todas as localizações, pode ser consultado no anexo A11. Os resultados estão sob a condição de inclinação 35 graus do sistema fotovoltaico, altura de 30 metros da turbina eólica, e área de referência de 100 m².

O investimento é na generalidade inferior para opção em que o sistema fotovoltaico fica encarregue da totalidade da energia. Apenas a localização 1 em Lisboa, com a utilização da turbina de 5 kW, consegue gerar a energia total necessária para o limite de 120 kWh/m², sendo nesse caso a opção menos dispendiosa, quando comparado com o sistema fotovoltaico. Quando em estudo está a turbina de 7,5 kW a localização 1 Lisboa também gera o necessário, para além da localização 1,3,4,5 e 6 de Faro. A localização 1 do Funchal e a 6 de Ponta Delgada, unicamente com a turbina de 7,5 kW, também conseguem atingir o limite. Em certas situações, quando a turbina é capaz da geração total da energia, para essa opção verifica-se um menor investimento inicial, como por exemplo a localização 2, 4 e 6 de Faro, e para a localização 1 em Lisboa.

O investimento inicial é sempre superior para o mix entre a turbina eólica de 7,5 kW e o sistema fotovoltaico a completar, quando necessário, a restante geração de energia.

Posteriormente ao cálculo do investimento inicial, e feita a análise dos valores, foi tomada a decisão de seleccionar para cada distrito e cidade, a localização com o investimento superior e inferior.

5.11.2. Resultados económico-financeiros

A determinação dos indicadores de avaliação de investimento, para avaliar a viabilidade económica, foi realizada considerando um período de 20 anos. O tempo de vida do projeto selecionado foi influenciado pelo tempo de vida das tecnologias, dos painéis fotovoltaicos e da turbina eólica, normalmente entre 20 a 25 anos, dado pelos fabricantes. Os painéis fotovoltaicos poderão ter uma duração de vida superior a 20 anos, no entanto existirá sempre degradação de energia, e o aumento do seu tempo de vida, poderá suscitar custos adicionais de eventual reparação ou substituição. As turbinas eólicas estão mais suscetíveis a avarias, danos ou estragos, devido a própria tecnologia e funcionamento. Mesmo considerando 20 anos de projeto, apesar de não serem contabilizados, eventuais reparações ou substituições de determinados equipamentos poderão ser necessárias. Se o período em análise se alargar esses custos adicionais a serem despendidos serão mais frequentes. Os indicadores foram avaliados para vários valores de taxa de atualização, ou de desconto, entre 6% e 10%.

Os indicadores de avaliação de investimento são determinados para as localizações que apresentam o maior e menor investimento inicial, de cada distrito e cidade, para a situação em que apenas o sistema fotovoltaico seja responsável pela geração de energia renovável, para o mix energético de sistema fotovoltaico e turbina de 5 kW e para o sistema fotovoltaico e turbina de 7,5 kW. Estes resultados encontram-se no anexo A12.

A avaliação dos resultados económicos permite aferir que a viabilidade económica está comprometida, para o mix energético que envolve as turbinas de 5 kW e 7,5 kW e o respetivo sistema fotovoltaico. A TIR é sempre inferior às taxas de atualização utilizadas, em alguns casos chegando a dar resultados negativos. O retorno do investimento, para o período de 20 anos, nunca é obtido. Quando a energia renovável é obtida, unicamente, através do sistema fotovoltaico, os resultados são mais satisfatórios, sendo possível associar a viabilidade económica a todas as localizações, exceto à qual corresponde o maior investimento inicial, em Ponta Delgada. Nesta, a TIR é inferior às taxas de atualização, nunca obtendo o retorno do investimento, logo não é um projeto viável economicamente.

O valor atual líquido (VAL) traduz o montante poupado no final do vigésimo ano, em eletricidade, se a energia elétrica fosse comprada à rede elétrica, conforme indicado no subcapítulo 4.1.2. Quando o projeto é viável o VAL é positivo, verificando-se apenas para a situação da geração de energia pelo sistema fotovoltaico, em todas as localizações, excluindo em Ponta Delgada.

6. Avaliação de caso de estudo – Lisbon Green Valley

O Lisbon Green Valley é um local privilegiado na região de Lisboa, mais concretamente em Belas, repleto de infraestruturas de qualidade, com serviços de lazer, turístico e residencial de elevada qualidade. Em termos de oportunidade do mercado imobiliário, na área envolvente encontram-se blocos de apartamentos, townhouses (casas) e ainda terrenos destinados ao desenvolvimento de novas moradias (Grupo André Jordan, 2019).

O caso em estudo considerado é um dos edifícios de dois blocos de apartamentos, de 4 pisos, com 16 apartamentos na totalidade. Os apartamentos têm certificação energética A e certificação de sustentabilidade de A+.



Figura 42 - Imagem do edifício de dois blocos de apartamentos em avaliação, (Grupo André Jordan, 2019).

As características técnicas do edifício cruciais para a avaliação energética renovável são a área de referência e a área disponível, onde os sistemas de geração possam ser instalados. A área de referência, de acordo com a definição no capítulo 2, foi estimada considerando a área de cobertura e a soma da área plana do edifício, dada pela ficha técnica de cada apartamento no piso 0. A área disponível da cobertura do edifício apta para a instalação é considerada ser 40% da área total da cobertura. O valor da área referência e sabendo o limite imposto à certificação Passive House Premium, permite determinar o valor de energia renovável necessário a gerar.

O modelo foi aplicado para o sistema fotovoltaico, para o mesmo painel de potência 255 W, para a inclinação de 35 graus, orientado a sul, enquanto que para a turbina eólica, foi avaliada para a potência de 7,5 kW e de 20 kW. A base de dados que fornece o ano meteorológico é dada pela plataforma online PVGIS. Adicionalmente, para a localização em questão, considerou-se a rugosidade de 0,138 e altura de turbina de 30 metros.

A determinação do conjunto de soluções foi iniciada, calculando a possibilidade da instalação de até 3 turbinas e posteriormente, a potência necessária do sistema fotovoltaico para cada hipótese, que permite obter a certificação Passive House Premium, de acordo a Tabela 23.

Tabela 22 - Áreas consideradas para a avaliação do edifício.

Área de referência (m ²)	700
Área cobertura (m ²)	600
Área disponível cobertura (m ²)	240

Tabela 23 - Número de painéis fotovoltaicos (N) e respetiva potência do sistema, para as várias opções de turbinas.

Nº de turbinas	Mix energético (Turbina 7,5 kW e Sistema Fotovoltaico)		Mix energético (Turbina 20 kW e Sistema Fotovoltaico)	
	N	Potência do sistema fotovoltaico (kW)	N	Potência do sistema fotovoltaico (kW)
1	181	46,155	166	42,33
2	163	41,565	132	33,66
3	144	36,72	98	24,99

Tabela 24 - Resultados relativamente às diferentes opções para o sistema fotovoltaico e turbina eólica de 7,5kW.

Nº de turbinas	Energia - Turbina 7,5 kW (kWh)	Energia - Sistema fotovoltaico (kWh)	Energia Renovável Total (kWh)	Certificação (kWh/m ²)	Área sistema fotovoltaico (m ²)
1	7825,57	76231,82	84057,38	120,08	294,47
2	15651,13	68650,75	84301,89	120,43	265,18
3	23476,70	60648,52	84125,22	120,18	234,27

Tabela 25 - Resultados relativamente às diferentes opções para o sistema fotovoltaico e turbina eólica 20kW.

Nº de turbinas	Energia - Turbina 20 kW (kWh)	Energia - Sistema fotovoltaico (kWh)	Energia Renovável Total (kWh)	Certificação (kWh/m ²)	Área sistema fotovoltaico (m ²)
1	14348,12	69914,26	84262,39	120,37	270,06
2	28696,25	55594,47	84290,72	120,42	214,75
3	43044,37	41274,69	84319,06	120,46	159,43

A energia renovável obtida através do sistema fotovoltaico e das turbinas, revela que a área disponível da cobertura limita a escolha. Relativamente à turbina de menor potência em análise, apenas a opção de três turbinas de 7,5 kW é viável tendo em conta que é a única opção em que a área do sistema fotovoltaico é menor que a área disponível na cobertura ou telhado do edifício, conforme os resultados da Tabela 24. Comparativamente, as opções viáveis são para os casos de duas e três turbinas de 20 kW, em que a área existente na cobertura é suficiente para a instalação ao sistema fotovoltaico, de acordo os resultados na Tabela 25.

Posteriormente à exclusão das hipóteses analisadas, a disponibilidade mensal do conjunto de soluções foi estudada. Das situações analisadas, a menos interessante corresponde ao conjunto de sistemas com 3 turbinas de 7,5 kW e respetivo sistema fotovoltaico (Figura 43), pois a energia gerada mensal pela turbina é sempre inferior ao do sistema fotovoltaico. A evolução da energia das três turbinas de 20 kW e sistema fotovoltaico (Figura 45), indica uma distribuição mais aproximada de energia gerada entre as diferentes tecnologias, havendo substituição em certos meses de uma tecnologia por outra, dependendo da disponibilidade dos recursos.

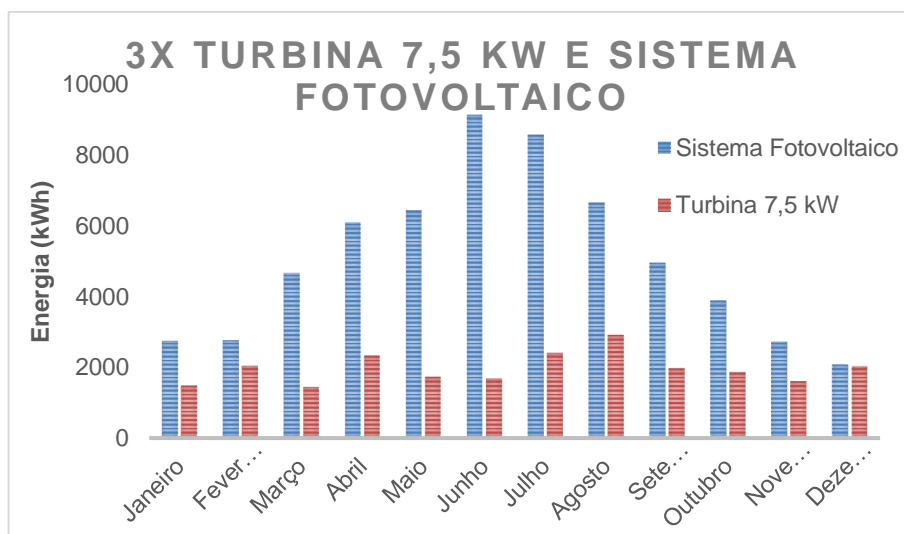


Figura 43 - Energia gerada por 3 turbinas 7,5kW e pelo sistema fotovoltaico.

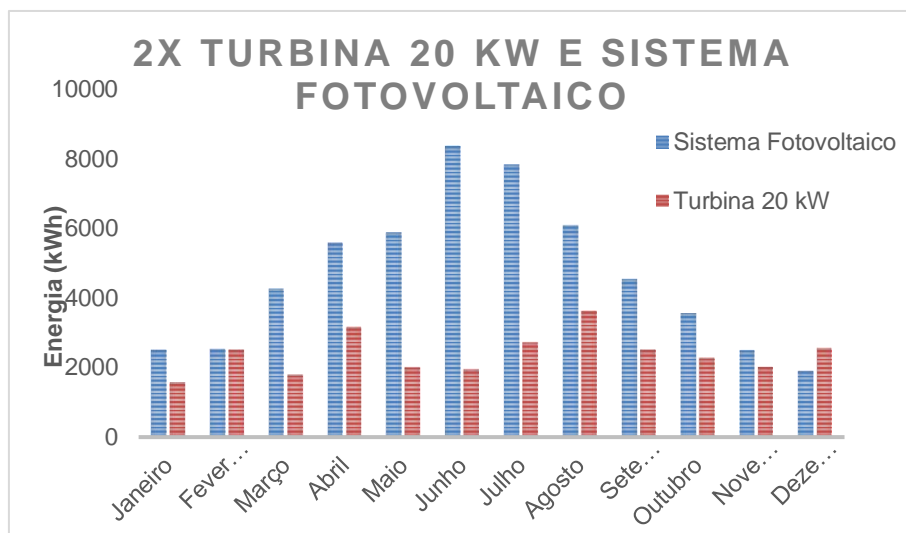


Figura 44 - Energia gerada por 2 turbinas 20kW e pelo sistema fotovoltaico.

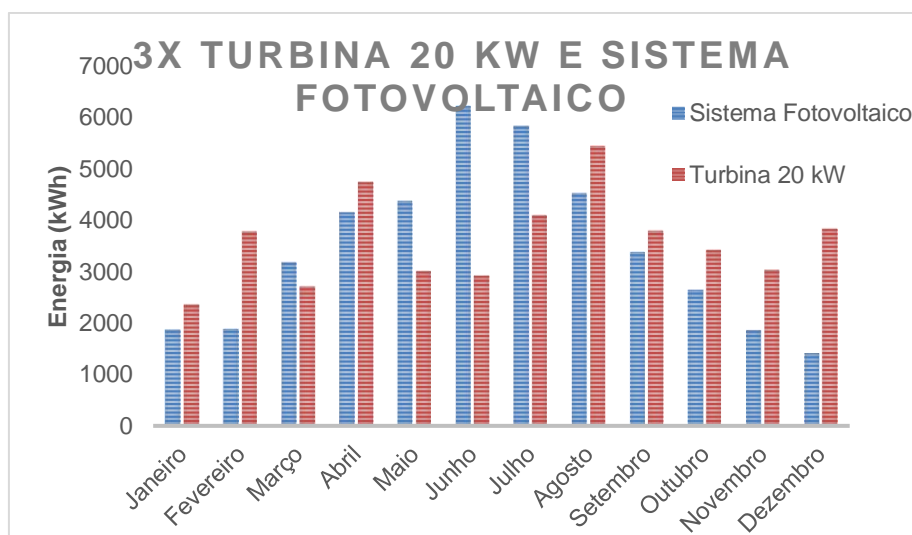


Figura 45 - Energia gerada por 3 turbinas 20kW e pelo sistema fotovoltaico.

6.1. Análise económico-financeira

A análise económica foi realizada para as várias possibilidades de número de turbinas eólicas e potência juntamente com o sistema fotovoltaico, cujos resultados encontram-se na Tabela 26. O tempo em análise do projeto é 20 anos e o procedimento é semelhante ao adotado no subcapítulo 5.11..

Relativamente ao mix energético da turbina 7,5 kW e sistema fotovoltaico, respetivo para o diferente número de turbinas, consoante a geração de energia, os resultados são interessantes, visto ser possível considerar viável economicamente, para determinadas taxas de atualização, de acordo com a TIR conseguida. Quando são três, o número de turbinas de 7,5 kW, a TIR é de 8%, logo para taxas de atualização superiores, deixa de ser viável. Para duas turbinas de 7,5 kW deixa de ser para taxas de

atualização superiores a 9%. Para uma turbina de 7,5 kW, a TIR é de 10%, sendo viável para as taxas de atualização utilizadas. O retorno do investimento para as três situações ultrapassa os 10 anos, isto é, mais de metade da duração da análise do projeto. O período de retorno do investimento (PRI) aumenta conforme o investimento e os custos de operação e manutenção considerados, visto a geração de energia ser próxima em todos os casos, podendo suscitar dúvidas na aceitação do desenvolvimento do projeto.

O estudo do mix energético da turbina de 20 kW e do sistema fotovoltaico, para todas as situações, desde a utilização de uma a três turbinas, não apresenta resultados satisfatórios. Em todos os casos, a TIR é sempre inferior às taxas de atualização, à exceção do mix com uma turbina de 20 kW, em que a TIR iguala a taxa de atualização menor em estudo (6%). Neste conjunto de soluções nunca o retorno do investimento é conseguido, traduzindo-se em todos os casos deste mix, projetos economicamente não viáveis.

Tabela 26 - Resultados da avaliação económica do conjunto de sistema fotovoltaico (FV) e turbina, para as várias opções consideradas, para o edifício em estudo Lisbon Green Valley.

MIX	t (%)	VAL (€)	TIR (%)	PRI (anos)	MIX	t (%)	VAL (€)	TIR (%)	PRI (anos)
Turbina 7,5 kW e FV	6	53190,75	10	12	Turbina 20 kW e FV	6	-2942,36	6	-
	7	38722,32		13		7	-15668,7		-
	8	25906,37		15		8	-26941,4		-
	9	14515,38		16		9	-36960,9		-
	10	4356,967		19		10	-45896,1		-
2x Turbina 7,5 kW e FV	6	40575,44	9	14	2x Turbina 20 kW e FV	6	-47721,4	3	-
	7	25964,31		15		7	-60631,9		-
	8	13021,96		17		8	-72067,9		-
	9	1518,614		20		9	-82232,4		-
	10	-8739,99		-		10	-91297		-
3x Turbina 7,5 kW e FV	6	27555,97	8	16	3x Turbina 20 kW e FV	6	-92500,4	1	-
	7	12879,73		18		7	-105595		-
	8	-120,285		-		8	-117194		-
	9	-11674,9		-		9	-127504		-
	10	-21979,2		-		10	-136698		-

6.2. Considerações

A viabilidade do projeto está dependente dos resultados obtidos referente à energia renovável, gerada pelos sistemas em análise, da área disponível para a instalação e dos resultados económicos. A seleção do mix energético é essencial para alcançar o objetivo da certificação Passive House Premium, mas também determinante para a geração de energia ao longo do ano, de acordo com a disponibilidade dos recursos, como a irradiação solar e a velocidade do vento.

Dos mix energéticos analisados, os resultados mais interessantes, em termos de uma tecnologia substituir outra, numa altura de menor de disponibilidade, são para os casos de duas e três turbinas eólicas de 20 kW e o respetivo sistema fotovoltaico. No entanto, para estes dois conjuntos de soluções, os resultados económicos não traduzem a viabilidade económica.

A viabilidade económica está associada aos casos menos interessantes, quando a análise é realizada em termos dos resultados de energia ao longo do ano, e da desejada relação complementar, entre os dois sistemas de geração. Adicionalmente para os mesmos casos, a área disponível considerada na cobertura do edifício não é suficiente, quando comparada com a área necessária para a instalação do sistema fotovoltaico. A ausência de espaço em volta do edifício, ou numa área próxima, poderá comprometer o desenvolvimento do projeto, sendo fisicamente inviável. Para ultrapassar esta dificuldade, a solução passa pela instalação dos sistemas, numa localização onde a área é suficiente, e porventura, mais afastada do edifício, que poderá influenciar a energia gerada, devido às perdas de energia devido às ligações necessárias entre os sistemas e o edifício, e às diferentes condições meteorológicas do novo local de instalação.

Limitações

A determinação da energia, na utilização simultânea de múltiplas turbinas eólica, confere uma limitação aos resultados apresentados. Efetivamente, o modelo de cálculo foi aplicado para cada turbina em estudo, no entanto, foi considerado que a utilização de múltiplas resulta diretamente na multiplicação da energia de cada turbina, pelo número de turbinas a avaliar. Esta relação pode ser verdadeira, caso cada turbina seja instalada numa área, em que a geração de uma turbina não interfira na de outra, sendo necessário um afastamento relativo de instalação, que deve ser previamente estudado. Quando as turbinas são instaladas próximas entre si, há vários fatores que influenciam a geração de energia de cada turbina, particularmente o denominado *wake effect*. *Wake effect* caracteriza-se pelo surgimento de um cone (*wake*) de ar mais lento e turbulento atrás de uma turbina, logo a instalação de uma turbina atrás da outra compromete a geração de energia da última turbina, (Bartl, Ostovan, Uzol, & Saetran, 2017). Este efeito é ainda mais relevante para um elevado número de turbinas. Os casos em estudo, tomam três como o número máximo de turbinas, apesar de serem relativamente poucas turbinas, o efeito tem de ser considerado, para cada instalação e a influência que pode ter na geração de energia. O desejável é proceder à instalação das várias turbinas com um afastamento suficiente, de maneira a não haver o *wake effect* e a geração de energia de cada turbina não ser afetada.

7. Discussão de resultados

7.1. Modelo de cálculo

O modelo de cálculo desenvolvido, tanto para o sistema fotovoltaico, como para a turbina eólica, está completamente dependente dos dados fornecidos pela base de dados escolhida. Os dados dos distritos em Portugal Continental, correspondem ao ano meteorológico, obtido através dos valores entre 2007 e 2016. No entanto, para as cidades das ilhas em estudo, a diferente base de dados utilizada apenas dispõe de valores entre fevereiro de 2004 e dezembro 2006. O modelo do sistema fotovoltaico calcula a energia para cada hora do respetivo ano. O modelo para a turbina eólica baseia-se num método em que origina resultados mensais, apesar de considerar, também, valores de cada hora do ano, conforme explicado em maior detalhe no capítulo 3.3.

Relativamente ao modelo fotovoltaico, considerou-se um derate igual para todas as horas do ano, embora este parâmetro possa variar ao longo do ano, de acordo com as condições. Adicionalmente, aspetos como o possível sombreamento, ou obstáculos que possam influenciar a captação de irradiação solar, foi ignorada, exceto num dos parâmetros do derate. O modelo de cálculo depende dos valores obtidos da base de dados, mas também da escolha do painel fotovoltaico, visto que atualmente existem vários painéis, com diferentes características e especificações que influenciam a geração de energia.

Os cálculos, que resultam na geração de energia pela turbina eólica, não dependem apenas dos valores da base de dados, algumas condições foram consideradas. A altura da turbina selecionada, de 30 metros, foi influenciada pelas especificações da turbina, no entanto apesar da turbina poder tomar a altura de 30 metros, conforme a instalação, a altura introduzida poderá ser maior, caso esta seja instalada no terreno com maior relevo, ou numa estrutura que aumente a sua altura, relativamente à altura de referência. Outro parâmetro que foi considerado, visto não ser um valor fornecido pela base de dados, é a rugosidade. A rugosidade pode variar para várias localizações de uma cidade, concelho, ou, até mesmo, em áreas menores. As rugosidades selecionadas e introduzidas no modelo para os distritos e as cidades, basearam-se na inspeção visual da plataforma online Global Wind Atlas, logo os valores podem não ser totalmente exatos.

7.2. Área necessária

A área necessária, para chegar à geração de energia renovável imposta pela certificação Passive House Premium, é relativamente grande quando a energia é só gerada pelo sistema fotovoltaico. Com a introdução da turbina eólica de potência de 5 kW, a área necessária reduz. A redução de área é maior com a introdução da turbina de maior potência (7,5 kW). Nas localizações com valores superiores de velocidade de vento, correspondendo a uma maior geração de energia pela turbina eólica, a área necessária desce drasticamente, quando comparada com a energia gerada apenas pelo sistema

fotovoltaico. Ainda assim, a maior parte das localizações avaliadas, revelam que a área disponível é uma condição que pode determinar a viabilidade e o desenvolvimento dos projetos. Os resultados da área, a visualizar no anexo A10, são para uma inclinação de 35 graus, logo a área poderá ser superior para inclinações menos favoráveis de geração anual de energia.

A avaliação da área necessária para o desenvolvimento destes projetos é baseada na área do sistema fotovoltaico, isto é, a área que envolve a instalação da turbina eólica é desprezada, pois a turbina apresenta uma maior flexibilidade relativamente ao local de instalação e a área é muito menor, quando comparada com a do sistema fotovoltaico.

7.3. Mix energético

O conjunto de soluções, que envolve o sistema fotovoltaico e a turbina eólica, responsável pela geração de energia renovável, a ser aplicado num edifício tem por objetivo atingir o limite de 120 kWh/m². Individualmente, cada tecnologia tem a capacidade de gerar a energia necessária, no entanto, essa opção não é a mais indicada, tendo em conta a disponibilidade dos recursos necessários, nomeadamente irradiação solar e vento. A junção das duas tecnologias pretende averiguar se uma tecnologia consegue gerar energia, quando outra tem menor capacidade, devido à escassez dos respetivos recursos.

A evolução anual da energia do sistema fotovoltaico é muito semelhante em todas as localizações estudadas, maior nos meses de verão. A energia mensal relativamente à turbina eólica, por sua vez, difere muito de localização, não sendo possível indicar uma evolução padrão, ao contrário do sistema fotovoltaico. Estes resultados, permitem afirmar que é a velocidade do vento, e a energia da turbina eólica, que determina os resultados do conjunto de soluções, na medida em que a sua evolução é muito variável para cada localização dada a alta variabilidade da velocidade do vento, quando se avalia a relação complementar entre as duas tecnologias.

A avaliação do conjunto de soluções nas várias localizações, permite verificar, efetivamente, que certas apresentam valores de geração de energia ao longo do ano interessantes, isto é, nos meses de menor geração de energia pelo sistema fotovoltaico, a turbina assegura a geração de mais energia, evidenciando a relação complementar, resultando numa maior robustez e flexibilidade do sistema total da energia renovável. No entanto, em outras localizações, essa simbiose não é tão satisfatória, no sentido em que um sistema prevalece sobre o outro, produzindo em todos os meses sempre mais, ou menos energia. Os resultados menos satisfatórios, revelam que certas alterações devem ser feitas, sobretudo através do aumento ou diminuição da potência de instalação, de um ou de ambos os sistemas, para ir de encontro à relação complementar desejada.

A seleção do mix energético terá de ser específica para cada localização, sendo o estudo prévio dos recursos e avaliação do potencial energético imprescindível para a determinação das características de cada sistema a instalar.

7.4. Energia

A avaliação da energia obtida através dos sistemas anual revela a possibilidade de atingir o limite desejado (120 kWh/m²a), relativamente à certificação Passive House Premium, fornecendo resultados mensais ao longo do ano. No entanto, é importante realçar que devido à natureza das energias renováveis, a dependência das condições climáticas, constitui uma vulnerabilidade, devido à sua imprevisibilidade. Os sistemas podem ter a capacidade de gerar a energia necessária anual, mas mais importante, é verificar a relação entre a produção e consumo de energia, em todos os momentos. Em determinados períodos, a produção de energia poderá não colmatar as necessidades energéticas, e noutros, ultrapassar. A seleção dos diferentes sistemas de energia renovável, pretende diminuir essa limitação, mas não é possível garantir, sempre, que a energia gerada é suficiente relativamente às necessidades. O contrário, gerar mais energia que a necessária, também é um problema, devido à eventual perda de energia que não é utilizada, caso não estejam reunidas as condições de armazenamento dessa energia.

Há ainda, a possibilidade de encontrar a capacidade de instalação de cada sistema, que permite assegurar em todos os períodos a produção de energia, com todas as implicações no dimensionamento, e nas restrições físicas e económicas. Perante esta situação, em muitos períodos irá se verificar um aumento de energia adicional, que deverá ser divergida em outras aplicações ou armazenada.

Estas constatações provocam o interesse na possibilidade da utilização de uma rede elétrica, com a capacidade de informar o consumidor a geração de energia, tendo este a possibilidade de ajustar o seu consumo, conforme a produção. O armazenamento de energia, também poderá ser um processo a ponderar, não perdendo a energia gerada adicional.

7.5. Outros parâmetros

7.5.1. Instalação

A aplicabilidade do conjunto de soluções renováveis em edifícios, sistema fotovoltaico e turbina eólica, está dependente das condições associadas ao local de instalação. Nas condições estão incluídas, não só, a disponibilidade dos recursos naturais, indispensável à geração de energia renovável, como também a área disponível, onde possa ser realizada a instalação.

O sistema fotovoltaico, como já mencionado anteriormente, ocupa significativamente uma maior área que a turbina eólica, de maneira que a avaliação do local a instalar deve ser realizada previamente, para determinar se há espaço suficiente para se proceder à instalação. A área disponível pode incluir a do telhado ou da cobertura, ou a área envolvente do edifício, caso seja uma possibilidade. Os painéis fotovoltaicos podem ser montados para várias inclinações, portanto essa hipótese, também deve ser avaliada e as possíveis implicações na instalação e eventuais restrições locais. O peso do sistema é outro fator que deve ser ponderado, caso a intenção seja a instalação na cobertura do edifício.

A montagem da turbina eólica requer um estudo minucioso do local, devido ao complexo comportamento do vento. Em meios urbanos a existência de obstáculos (edifícios, árvores, ou outro tipo de construção) tem um impacto significativo na geração de energia. Adicionalmente às limitações físicas, o ruído sonoro e vibração provenientes da turbina eólica devem ser uma preocupação, principalmente em meios urbanos, ou em locais que possam comprometer o conforto das pessoas sujeitas a esta consequência sonora. Em relação à turbina eólica e a sua instalação, o preferível é a instalação num local estável e seguro, maximizando, quando possível, a altura para uma maior geração de energia, conforme a maior velocidade de vento disponível.

O desenvolvimento destes sistemas, de uma maneira, ou de outra, causa impacto paisagístico, mesmo em pequena escala, como é estudado nesta dissertação. A aceitação do impacto é individual, isto é, há quem não considere relevante o impacto, ou aceita-o para alcançar o objetivo desejado, o de geração de energia renovável. O consentimento deste tipo de projeto e o efeito visual que provoca pode conferir impedimentos ao seu desenvolvimento.

7.5.2. Seleção do painel fotovoltaico e turbina eólica

A seleção do painel fotovoltaico influencia a geração de energia do sistema, de acordo com as determinadas características técnicas. Atualmente, existem vários modelos e dependendo da escolha, podem influenciar favoravelmente o desenvolvimento do sistema fotovoltaico, seja através da redução de área do sistema, ou do aumento da geração de energia, de acordo com as características e a eficiência.

A turbina eólica depende maioritariamente da velocidade do vento, e os melhores valores encontram-se em alturas superiores. O vento a uma baixa altura é altamente turbulento e sujeito a muitos obstáculos, especialmente em meios urbanos, que influenciam negativamente na geração de energia. Na altura de selecionar a turbina eólica, o fabricante normalmente indica a previsão de geração de energia. Esta informação não deve ser considerada como fulcral na escolha, isto porque a geração depende de muitas condicionantes associadas ao local de instalação, que o fabricante não considera nos testes que indicam esse resultado. Uma das características técnicas importantes de uma turbina eólica é a velocidade cut-in, a velocidade a que a turbina começa a gerar energia. Este valor é importante, especialmente para as turbinas de menor potência, onde são instaladas em locais de menor velocidade de vento. É necessário ter especial atenção, quando a velocidade cut-in é próxima da velocidade do vento disponível, porque para estes valores a geração de energia será reduzida. Caso a ligação à rede elétrica seja feita entre a turbina, a energia gerada é ainda menor, sendo que há sempre perda de energia envolvida, para manter o inversor. Adicionalmente, poderá existir confusão relativamente ao que o fabricante considera por velocidade cut-in. Se a esta velocidade, considerar o início do funcionamento da turbina, essa não corresponde ao início de geração de energia, sendo necessário uma velocidade maior para iniciar a geração de energia.

7.5.3. Avaliação económico-financeira

Os indicadores determinados que permitiram avaliar a viabilidade económica dos casos analisados, são influenciados pelas condições consideradas ao projeto em estudo. Nos vários casos analisados, no modelo económico, certos parâmetros não foram contabilizados, causando a obtenção de resultados diferentes.

A condição de o preço de eletricidade considerado ser constante em todos os anos, no modelo económico, durante o tempo de vida útil do projeto, correspondendo à não contabilização da inflação, é a primeira limitação indicada.

As avarias e os constrangimentos associados, como o custo de reparação ou eventual substituição da tecnologia, conferem outra limitação, particularmente no caso das turbinas eólicas, em que as avarias são mais suscetíveis, do que no sistema fotovoltaico.

O funcionamento do sistema fotovoltaico e da turbina eólica, apresenta degradação referente à geração de energia, isto é, a cada ano menos energia é gerada pelos sistemas. Esta diminuição de energia não é contabilizada, afetando a receita anual, que se traduz no valor poupado de eletricidade a pagar, caso fosse comprada à rede, fornecida por uma empresa responsável.

Estas limitações, se incluídas no modelo, agravam os resultados, sendo mais significativo para quando o mix energético envolve as turbinas eólicas, no entanto para esses casos, os resultados já são comprometedores, muitos dos quais já se caracterizam por não serem economicamente viáveis.

7.5.4. Aplicabilidade

Os modelos de cálculo desenvolvidos, que envolvem o sistema fotovoltaico e a turbina eólica, podem ser aplicados a vários edifícios, de diferentes dimensões, para várias localizações, sendo indispensável os valores dos vários parâmetros, necessários à determinação da energia renovável gerada para cada sistema, obtidos através da base de dados, assim como os valores da área de referência e da área disponível para a instalação dos sistemas.

O desenvolvimento dos sistemas fotovoltaicos e turbinas eólicas, com um impacto visual, está dependente da aceitação por parte de entidades que avaliam o projeto e dos indivíduos afetados por ele. A aceitação dos sistemas instalados, no caso de um edifício com múltiplos residentes, requer a aceitação de todos eles, sujeita à opinião individual de cada, podendo constituir um obstáculo ao desenvolvimento destes sistemas. Em meio urbano, o impacto destas tecnologias é ainda maior, devido à eventual falta de espaço disponível, da população afetada e da pendente aceitação por parte de entidades competentes, que determinam a viabilidade ambiental e legal, de acordo com o impacto causado.

Previamente, é necessário avaliar as condições do local a instalar os sistemas de fontes renováveis. Fisicamente, o local de instalação, pode não ter todas as condições necessárias que assegurem a segurança do edifício ou até o correto funcionamento das tecnologias. A viabilidade física tem de ser

avaliada para cada caso e edifício individual, sendo que o estudo e a implementação destas tecnologias podem apresentar mais dificuldades em edifícios já existentes, devido à falta de planeamento prévio e eventuais limitações de construção que podem complicar, ou mesmo comprometer o seu desenvolvimento.

8. Conclusão

8.1. Passive house é uma integração viável?

O objetivo da dissertação passa pela averiguação da viabilidade de uma Passive House Premium, mais especificamente da concretização do limite imposto, relativamente à energia renovável primária gerada ($120 \text{ kWh/m}^2\text{a}$), de acordo com a certificação. Efetivamente, o limite de $120 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ é conseguido em todos os casos avaliados em Portugal, mediante determinadas condições, específicas a cada localização.

O modelo de cálculo desenvolvido para as energias renováveis, envolve a consideração do sistema fotovoltaico e da turbina eólica, visto serem estas as tecnologias consideradas, que contribuem para a energia renovável gerada. A energia gerada pelos painéis fotovoltaicos, depende fortemente da irradiação solar, enquanto que a da turbina eólica, da velocidade do vento, apesar de outros parâmetros influenciarem ambas as tecnologias.

Com o intuito de avaliar o potencial de Portugal, foram analisadas várias localizações de diferentes regiões climáticas, verificando-se, geralmente, que as regiões a norte apresentam menor potencial energético, que as do Sul, quando analisando a energia fotovoltaica. Em relação à energia da turbina eólica, os resultados demonstram maior variabilidade, comparando com a fotovoltaica. A evolução mensal da geração de energia também foi avaliada, verificando-se a tendência de maior geração nos meses de verão, e menor no inverno, semelhante em todas as localizações analisadas. No caso da turbina eólica, não é possível indicar uma tendência, visto variar muito, mesmo para diferentes localizações do mesmo distrito.

Em termos energéticos, é possível atingir o limite imposto pela certificação Passive House Premium, em relação à energia renovável primária. A implementação de um edifício com esta certificação, pode ser conseguida em Portugal, desde que certas condições sejam verificadas. Dependendo das localizações estudadas e dos respetivos resultados, é necessário que haja área suficiente, referente à cobertura, à envolvente em zonas verdes, ou até áreas mais afastadas do edifício, de acordo com as regras da certificação, para que se realize a instalação segura das tecnologias e se assegure o seu correto funcionamento. De acordo os resultados obtidos, para o mix energético que envolve a turbina 5kW e o respetivo sistema fotovoltaico, a área necessária para a instalação do sistema fotovoltaico atinge um valor máximo de $61,82 \text{ m}^2$ em Évora, sendo que o segundo valor mais alto encontra-se em Viana do Castelo de $47,18 \text{ m}^2$. Relativamente ao mix energético composto pela turbina 7,5 kW e o respetivo sistema fotovoltaico, a área máxima que terá de estar disponível para a instalação é de $56,94 \text{ m}^2$, também em Évora, seguido do segundo valor máximo, de área de $40,67 \text{ m}^2$, em Viana do Castelo.

Quando a energia renovável é gerada unicamente pelo sistema fotovoltaico, a área máxima é de 79,17 m², em Ponta Delgada, enquanto que a mínima se encontra no Porto, de valor 39,04 m². Apesar de o valor mínimo de área ser no Porto (Norte), na generalidade as localizações a Sul precisam de menos área, e a Norte mais área, de sistema fotovoltaico, para o mesmo valor de geração de energia.

Em meio urbano o desenvolvimento destes sistemas envolve restrições acrescidas. Para além da área disponível necessária, é necessário avaliar as condições que poderão afetar a geração de energia, seja o sombreamento, no caso do sistema fotovoltaico, ou da presença de obstáculos, no caso das turbinas eólicas. Adicionalmente, nestes meios, as dúvidas ou limitações legais e sociais são acrescidas, podendo complicar a aceitação destes projetos.

Economicamente, a viabilidade pode estar comprometida, principalmente com a introdução e necessidade de instalar turbinas eólicas de menor potência, de acordo com a gama analisada nesta dissertação, sendo uma tecnologia ainda com elevados custos. Os resultados mais satisfatórios, na maior parte dos casos, estão relacionados com a utilização única do sistema fotovoltaico, no entanto essa situação traduz-se num aumento de área necessária à instalação, e na enorme desvantagem de ausência de geração de energia, na falta de irradiação solar. Em todos os casos analisados, para os conjuntos de solução turbina e sistema fotovoltaico, a viabilidade económica não se verifica. A TIR é sempre inferior à taxa de atualização (t) e o VAL nunca é nulo ou positivo.

O caso de estudo do edifício de Lisbon Green Valley, para as áreas consideradas, necessita de gerar energia renovável de cerca 84200 kWh, para obter certificação Passive House Premium. Feita a análise da disponibilidade mensal, para as várias opções de conjuntos de solução considerados, a melhor, tendo em conta um sistema complementar o outro, necessita de uma área de sistema fotovoltaico 159,43 m², menor que a disponível (240 m²). No entanto esta opção não é viável economicamente. Das várias opções analisadas, a área mínima, necessária para a instalação do sistema fotovoltaico, é 159,43 m² e a máxima 294,47 m². A opção que dá a área máxima (1 turbina 7,5kW e respetivo sistema fotovoltaico) não é aceitável, já que é superior à área considerada disponível.

A seleção do mix energético requer a análise e o estudo minucioso do local de instalação, e das condições, físicas e meteorológicas, associadas ao mesmo, considerando as intermitências associadas à geração de energia de cada sistema.

Em síntese a hipótese da tese da viabilidade de um edifício, segundo os requisitos das Passive House Premium, que consiste na possibilidade de atingir uma produção de energia renovável primária (PER) no edificado de 120 kWh/m²a é verificada, apesar de, a área necessária à instalação dos sistemas de geração de energia renovável ser uma limitação, nomeadamente relativamente à área da cobertura do edifício ou em redor do mesmo, constituindo eventualmente, a impedição da implementação dos sistemas nas proximidades dos edifícios. Perante esta situação, os sistemas terão de ser desenvolvidos em locais, onde o espaço é suficiente, provavelmente mais afastados dos edifícios, e onde as condições meteorológicas sejam favoráveis à geração de energia.

8.2. Desenvolvimentos futuros

Atualmente, os painéis fotovoltaicos, são uma tecnologia que apresenta valores de investimento muito interessantes, com resultados económicos positivos, na generalidade dos casos estudados. O contínuo investimento na investigação desta tecnologia promove a descoberta de novos processos e materiais, que permitem melhorar determinadas características. Seja o aumento da eficiência dos painéis, a diminuição de área do painel, para a mesma ou superior geração de energia, ou até a redução do peso do painel traduzem uma evolução positiva no constante desenvolvimento da tecnologia e no aumento da energia renovável.

As turbinas eólicas, de acordo com as características da tecnologia e das localizações estudadas nesta dissertação, não apresentam resultados económicos satisfatórios, em que na maior parte dos casos, em meio urbano, a viabilidade não se verifica. A evolução e investimento na investigação e desenvolvimento nesta tecnologia permitirá obter melhores resultados, seja através do melhoramento de materiais, ou pela introdução de novos processos a complementar e a melhorar a geração de energia. A contínua evolução destes sistemas, mediante o desenvolvimento tecnológico ou a proliferação no mercado, tende a reduzir os seus custos, sendo expectável que esta redução incentive mais a aposta de projetos desta natureza.

Em meios urbanos, a eventual falta de espaço necessário, ou condições meteorológicas essenciais à instalação dos sistemas e correto funcionamento, em simultâneo com as limitações de sombreamentos e obstáculos, que influenciam a energia fotovoltaica e a eólica, respetivamente, suscita a ponderação da instalação destas tecnologias em zonas distantes dos edifícios. Esta alternativa é considerada válida para a certificação Passive House Premium, desde que a participação financeira no desenvolvimento destes projetos tenha origem no proprietário do edifício, ou da sua quota parte, em questão. A geração de energia gerada só é contabilizada, de acordo com a certificação, para sistemas novos, destinados ao propósito de gerar energia renovável para o específico edifício. O tipo de edifício, nomeadamente apartamentos, determina a percentagem pertencente ao sistema total e o respetivo investimento, sendo dividido por proprietário de cada apartamento. É importante referir que a distância dos sistemas em relação ao edifício, suscita mais perdas de energia devido às ligações necessárias entre os dois pontos.

Esta dissertação analisa o mix energético que engloba o sistema fotovoltaico e as turbinas eólicas, mas existem outras opções a considerar que também originam energia elétrica renovável, que poderão ser introduzidas no conjunto das soluções, com o objetivo de obter a certificação Passive House Premium. Dito isto, seria interessante realizar um estudo, que avalie a geração de energia renovável adicionando outros sistemas, e ver qual o melhor conjunto de soluções a conseguir atingir o limite imposto, analisando também a relação complementar desejável, considerando as intermitências associadas.

O armazenamento de energia é um processo que suscita imenso interesse, particularmente através de baterias. Os sistemas capazes de gerar energia renovável, em estudo, caracterizam-se por estarem dependentes da disponibilidade do sol e do vento, e das respetivas condições meteorológicas, ou seja, a energia renovável é intermitente, pelo que a utilização de baterias é uma hipótese de grande relevância a considerar. A introdução de baterias deve ser avaliada para as várias opções de conjuntos

de solução de energia renovável, seja para os considerados nesta dissertação (sistema fotovoltaico e turbina eólica), ou outros que sirvam para o mesmo objetivo. Será importante determinar a influência das baterias no dimensionamento dos sistemas em análise. Nomeadamente averiguar se há oportunidade de reduzir a área do sistema fotovoltaico, conforme as necessidades energéticas dos utilizadores e os períodos de utilização da energia gerada em relação aos momentos de geração. O armazenamento de energia possibilita a utilização de energia fora do período de geração, alargando a capacidade de aproveitamento em meio urbano, nomeadamente através do carregamento de veículos elétricos, contribuindo para a mobilidade elétrica de cidades. A utilização de baterias deverá ser estudada, em relação à implicação que tem nos sistemas de energia renovável e na rede elétrica, mas também, no impacto económico que pode causar nestes projetos.

A relação entre produção de energia renovável e consumo deverá ser avaliado, com maior detalhe. Devido à intermitência e imprevisibilidade das condições necessárias à geração de energia renovável, é importante que as necessidades energéticas sejam asseguradas em todos os períodos. Adicionalmente, de acordo com a avaliação de todas as situações críticas, estudar soluções que as resolvam, seja através de armazenamento de energia, ou outro meio, sistema ou procedimento que assegure a geração de energia, de acordo com as necessidades do(s) utilizador(es).

A viabilidade económica quando não é verificada, origina a eventual possibilidade à necessidade de incentivos das entidades, com o objetivo de cumprir as metas ambientais, e simultaneamente contribuir para o desenvolvimento e proliferação de energia renovável. É também importante que as políticas públicas e legislação, para o desenvolvimento destes projetos, sejam claras e estáveis promovendo o interesse e investimento. Simultaneamente, o estudo de diferentes modelos de negócio neste tipo de projetos deve ser incentivado, e poderá ser um meio de contornar os maus resultados económicos. Modelos de negócio como PPA (Power Purchasement Agreement) ou seus derivados, de acordo com os intervenientes, projetos e condições associadas, poderão ajudar no contínuo desenvolvimento de projetos desta natureza.

Referências

- Construction 21. (2019). *Plataforma digital dedicada a todos os profissionais no setor de edifícios com interesse em sustentabilidade*. Obtido em Junho de 2019, de Web site de Construction 21 International: <https://www.construction21.org/case-studies/fr/first-passive-house-premium-of-france.html> (acedido pela última vez em 2019/10/29)
- Abella, M. A., Lorenzo, E., & Chenlo, F. (2003). Effective irradiance estimation for PV applications. *Proceedings of the 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2*, 2085 - 2089 .
- Bartl, J., Ostovan, Y., Uzol, O., & Saetran, L. (2017). Experimental study on power curtailment of three in-line turbines. Em *Energy Procedia* (pp. 307-315). Elsevier Ltd.
- Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., & Bossanyi, E. (2001). Em *Wind Energy Handbook*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Despacho (extracto) nº15793-F/2013. (3 Dezembro de 2013) *Diário da República*, 2ª série-Nº234.
- Duffie., J. A., & Beckam, W. A. (2013). Em *Solar Engineering of Thermal Processes*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Figueiredo, A., Kampf, J., & Vicente, R. (2016). Passive house optimization for Portugal: Overheating evaluations and energy performance. Em *Energy and Buildings*, vol. 118, 181-196. Elsevier Ltd.
- Gielen, D., Boshell, F., Saygin, D., Brazilian, M. D., Wagner, N., & Gorini, R. (Janeiro de 2019). The role of renewable energy in the global energy transformation. Em *Energy Strategy Reviews* (Vol. 24, pp. 38-50). Elsevier Ltd.
- GREENPRO. (2004). *Energia Fotovoltaica - Manual sobre tecnologias, projeto e instalação*. Obtido de <https://www.portal-energia.com/downloads/guia-tecnico-manual-energia-fotovoltaica.pdf> (acedido pela última vez em 2019/10/29).
- Grupo André Jordan. (2019a). Obtido em Agosto de 2019, de Web site do projeto Lisbon Green Valley do Grupo André Jordan: <https://www.lisbongreenvalley.pt/> (acedido pela última vez em 2019/09/15).
- Grupo André Jordan. (2019b). Obtido em Agosto de 2019, de Web site do projeto Lisbon Green Valley do Grupo André Jordan: <https://www.lisbongreenvalley.pt/apartamentos-lote-10/> (acedido pela última vez em 2019/09/15)
- Instituto independente de eficiência energética em edifícios*. (2019). Obtido em 10 de Junho de 2019, de Web site de Passive House Institute: https://passivehouse.com/02_informations/02_passive-house-requirements/02_passive-house-requirements.htm
- International Renewable Energy Agency . (2019). *Renewable Power Generation Costs in 2018*. IRENA. Obtido de <https://www.irena.org/publications> (acedido pela última vez em 2019/06/5)

- International Renewable Energy Agency. (2016). *The Power to Change: Solar and Wind Cost Reduction Potencial to 2025*. IRENA. Obtido de www.irena.org/publications (acedido pela última vez em 2019/06/5)
- Jarmo, V., Kaivo-oja, J., & Luukkanen, J. (Outubro de 2018). Energy efficiency as a driver of total primary energy supply in the EU-28 countries - incremental decomposition analysis. Em *Heliyon* (Vol. 4). Tampere, Finland: Elsevier Ltd.
- Kalogirou, S. A. (2014). Photovoltaic Systems. Em S. A. Kalogirou, *Solar Energy Engineering* (p. 492). Elsevier Inc.
- Martins, F., Felgueiras, C., & Smitkova, M. (2018). Fossil fuel energy consumption in European countries. *5th International Conference on Energy and Environment Research, ICEER 2018*, (pp. 107-111).
- Masters, G. M. (2004). *Renewable and Efficient Electric Power System*. John Wiley & Sons, Inc.
- Messenger, R. A., & Ventre, J. (2005). Em R. A. Messenger, & J. Ventre, *Photovoltaic Systems Engineering* (p. 49). CRC Press.
- Muzathik, A. M. (2014). Photovoltaic Modules Operating Temperature Estimation Using a Simple Correlation. Em *International Journal of Energy Engineering* (Vol. 4, pp. 151-158).
- Passive House Database*. (2019). Obtido em Junho de 2019, de Web site de Passive House Database: https://passivehouse-database.org/#d_5539 (acedido pela última vez em 2019/06/22)
- Passive House Institute. (2018). Building Certification Guide. Obtido em www.passivehouse.com (acedido pela última vez em 2019/06/22)
- Passive House Plus*. (2019). Obtido em Junho de 2019, de Web site de Passive House Plus: <https://passivehouseplus.ie/news/projects/bavarian-building-becomes-first-in-world-to-earn-passive-house-premium-cert> (acedido pela última vez em 2019/06/22)
- Pereira, M. C., Joyce, A., & Reis, P. C. (2016). *O valor e o custo da electricidade produzida por sistemas solares (Fotovoltaicos)*. IPES. Obtido de <http://www.ipes.pt/ipes/wp-content/uploads/2017/10/IPES-O-valor-e-o-custo-da-electricidade.pdf> (acedido pela última vez em 2019/06/5)
- PHI. (2016). Criteria for the Passive House, EnerPHit and PHI Low Energy Building Standard. Alemanha. Obtido de www.passivehouse.com (acedido pela última vez em 2019/06/22)
- PORDATA. (2019). *Base de Dados Portugal Contemporâneo*. Obtido em setembro de 2019, de PORDDATA:

[https://www.pordata.pt/Europa/Pre%C3%A7os+da+electricidade+para+utilizadores+dom%C3%A9sticos+e+industriais+\(Euro+ECU\)-1477](https://www.pordata.pt/Europa/Pre%C3%A7os+da+electricidade+para+utilizadores+dom%C3%A9sticos+e+industriais+(Euro+ECU)-1477) (acedido pela última vez em 2019/08/29)

PVGIS. (2019). *Centro de investigação da Comissão Europeia com foco no conhecimento de radiação solar e desempenho fotovoltaico*. Obtido em Junho de 2019, de Aplicação online: Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS 5): http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html (acedido pela última vez em 2019/08/29)

Santos, J., Domingues, T., Sousa, T., & Aubyn, M. S. (2018). Useful Exergy Is Key in Obtaining Plausible Aggregate Production Functions and Recognizing the Role of Energy in Economic Growth: Portugal 1960–2009. Em R. Howarth, & S. Baumgärtner (Edits.), *Ecological Economics* (pp. 103-120).

Singh, H. V., Bocca, R., Gomez, P., Dahlke, S., & Bazilian, M. (2019). The energy transitions index: An analytic framework for understanding the evolving global energy system. Em M. Howells (Ed.), *Energy Strategy Reviews* (Vol. 26). Elsevier Ltd.

Soares, I., Moreira, J., Pinho, C., & Couto, J. (2015). Em *Decisões de Investimento: Análise Financeira de Projetos* (4ª ed.). Edições Sílabo, Lda.

Soda pro. (2019). *HelioClim-3 Arquivo grátis de satélite que fornece dados das componentes de radiação*. Obtido em Junho de 2019, de Web site de Solar Energy Services for Professionals: <http://www.soda-pro.com/web-services/radiation/helioclim-3-archives-for-free> (acedido pela última vez em 2019/08/29)

Tiryakioğlu, M. (2008). On Estimating Weibull Modulus by Moments and Maximum Likelihood Methods. *Journal of Materials Science*, 793-798.

UE. (2010). Directiva 2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho de 19 de Maio de 2010 relativa ao desempenho energético dos edifícios (reformulação). *Jornal Oficial das Comunidades Europeias*. (acedido pela última vez em 2019/05/4)

Wang, Y., Kuckelkorn, J., Zhao, F.-Y., Spliethoff, H., & Lang, W. (2017). A state of art of review on interactions between energy performance and indoor environment quality in Passive House buildings. Em *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol.72, pp.1303-1319). Elsevier Ltd.

Windatlas. (setembro de 2019). Obtido de Web site de Global Wind Atlas: <https://globalwindatlas.info/> (acedido pela última vez em 2019/09/15)

Anexos

A1 – Fatores de perdas ou redução no sistema (Derate)

The following table shows the default values for the PVWatts overall DC to AC derate factor¹ and Enphase's recommended adjustment to the derate factors in PVWatts with changed component derate values in bold. Further explanation of these changes follows the table.

Enphase Adjustments To PVWatts Default Derate Factors

Derate Category	PV Watts Default (String)	PV Watts Adjusted (Enphase Systems)	PV Design Tools (Enphase Systems)
PV Module Nameplate DC Rating	0.950	0.950	0.950
Inverter and Transformer*	0.920	0.965	0.965
Mismatch*	0.980	0.995 (Max Value)	1.000
Diodes and Connections	0.995	0.995	0.995
DC Wiring*	0.980	0.990 (Max Value)	0.995
AC Wiring	0.990	0.980	0.980
Soiling	0.950	0.970	0.970
System Availability*	0.980	0.995 (Max Value)	0.998
Shading (See Table)	1.000	1.000	1.000
Sun-tracking	1.000	1.000	1.000
Age	1.000	1.000	1.000
Total Derate Factor (Project Efficiency)	0.770	0.850	0.861

1

© 2014 Enphase Energy Inc. All rights reserved.

July 2014

Figura 46 - Valores padrão dos vários fatores de derate.

Tabela 27 - Valores dos derates utilizados no modelo de cálculo do sistema fotovoltaico.

DERATES (Parâmetro de redução de potência do sistema fotovoltaico)	[0,1]
Inversor e transformador [0,88-0,98]	1
Desfasamento do módulo [0,97-0,995]	0,99
Díodos e ligações [0,99-0,997]	0,99
Ligações DC [0,97-0,99]	0,98
Ligações AC [0,98-0,993]	1
Sujidade[0,3-0,995]	0,95
Disponibilidade do sistema [0-0,995]	0,979
Sombreamento [0-0,95]	0,94
Seguimento (ou rastreamento) do sol [0,95 -1,00]	1
Idade [0,7-1]	1
Derate total	0,840

A2 – Latitude e longitude de todas as localizações

Tabela 28 - Latitude e longitude de Viana do Castelo, Vila Real, Porto, Coimbra e Lisboa.

Localização		Latitude	Longitude
Viana do Castelo	1	41,754002	-8,035
	2	41,743	-8,639
	3	41,735001	-8,299
	4	41,98	-8,526
	5	41,969002	-8,284
	6	42,025002	-8,233
Vila Real	1	41,360001	-7,431
	2	41,467999	-7,365
	3	41,6617999	-7,335
	4	41,773998	-7,544
	5	41,584999	-7,702
	6	41,244999	-7,768
Porto	1	41,373001	-8,57
	2	41,123001	-8,531
	3	41,231998	-8,37
	4	41,125999	-8,169
	5	41,34	-8,566
	6	40,952	-8,4
Coimbra	1	40,195999	-8,314
	2	40,248001	-8,555
	3	40,266998	-8,373
	4	40,195	-8,766
	5	40,116001	-8,429
	6	40,127998	-8,829
Lisboa	1	38,703999	-9,398
	2	38,820999	-9,211
	3	38,339001	-7,3
	4	38,702999	-9,452
	5	38,785	-9,336
	6	38,844002	-9,411

Tabela 29 - Latitude e longitude de Évora, Faro, Funchal e Ponta Delgada.

Localização		Latitude	Longitude
Évora	1	38,176998	-7,608
	2	38,438999	-8,202
	3	38,157001	-7,784
	4	38,710999	-7,367
	5	38,459	-7,781
	6	38,277	-8,376
Faro	1	37,033001	-7,924
	2	37,124001	-8,025
	3	37,074001	-8,005
	4	37,081001	-7,873
	5	37,103001	-8,29
	6	37,106998	-8,845
Funchal	1	32,651	-16,907
	2	32,647	-16,903
	3	32,642	-16,929
	4	32,66	-16,892
	5	32,685	-16,895
	6	32,674	-16,946
Ponta Delgada	1	37,739	-25,431
	2	37,756	-25,677
	3	37,803	-25,769
	4	37,842	-25,758
	5	37,882	-25,743
	6	37,808	-25,672

A3 – Ficha técnica: Painel fotovoltaico AS-6P30 (módulo policristalino) – 255W (STC)

ELECTRICAL CHARACTERISTICS AT STC								
Nominal Power (P_{max})	240W	245W	250W	255W	260W	265W	270W	275W
Open Circuit Voltage (V_{oc})	37.7V	37.9V	38.0V	38.1V	38.2V	38.3V	38.4V	38.5V
Short Circuit Current (I_{sc})	8.57A	8.66A	8.75A	8.83A	8.90A	8.98A	9.06A	9.15A
Voltage at Nominal Power (V_{mp})	29.9V	30.1V	30.3V	30.5V	30.7V	30.9V	31.1V	31.3V
Current at Nominal Power (I_{mp})	8.03A	8.14A	8.26A	8.37A	8.47A	8.58A	8.69A	8.79A
Module Efficiency (%)	14.75	15.06	15.37	15.67	15.98	16.29	16.60	16.90
Operating Temperature	-40°C to +85°C							
Maximum System Voltage	1000V DC							
Fire Resistance Rating	Type 1(UL1703)/Class C(IEC61730)							
Maximum Series Fuse Rating	15A							

STC: Irradiance 1000W/m², Cell temperature 25°C, AM1.5

ELECTRICAL CHARACTERISTICS AT NOCT								
Nominal Power (P_{max})	177W	180W	184W	188W	191W	195W	199W	202W
Open Circuit Voltage (V_{oc})	34.7V	34.9V	35.0V	35.1V	35.2V	35.3V	35.4V	35.5V
Short Circuit Current (I_{sc})	6.94A	7.01A	7.09A	7.15A	7.21A	7.27A	7.34A	7.41A
Voltage at Nominal Power (V_{mp})	27.2V	27.4V	27.6V	27.8V	27.9V	28.1V	28.3V	28.5V
Current at Nominal Power (I_{mp})	6.51A	6.57A	6.67A	6.77A	6.85A	6.94A	7.04A	7.09A

NOCT: Irradiance 800W/m², Ambient temperature 20°C, Wind Speed 1 m/s

MECHANICAL CHARACTERISTICS	
Cell type	Polycrystalline 156x156mm (6x6inches)
Number of cells	60 (6x10)
Module dimensions	1640x992x40mm (64.57x39.06x1.57inches)
Weight	18.5kg (40.8lbs)
Front cover	3.2mm (0.13inches) low-iron tempered glass
Frame	Anodized aluminum alloy
Junction box	IP67, 3 diodes
Cable	4mm ² (0.006inches ²), 900mm (35.43inches)
Connector	MC4 or MC4 compatible

TEMPERATURE CHARACTERISTICS	
Nominal Operating Cell Temperature (NOCT)	45°C±2°C
Temperature Coefficients of P_{max}	-0.43%/°C
Temperature Coefficients of V_{oc}	-0.33%/°C
Temperature Coefficients of I_{sc}	0.056%/°C

PACKAGING	
Standard packaging	26pcs/pallet
Module quantity per 20' container	312 pcs
Module quantity per 40' container	728 pcs

A4 – Ficha técnica: Turbina Iskra HAWT 5kW

POWER		Unit
1) Rated power	5	kW
2) Rated wind speed	11	m/s
3) Cut-in wind speed	3	m/s
4) Cut-out wind speed	60	m/s
5) Maximum wind speed the turbine can withstand	216	km/h
DIMENSIONS		
6) Nacelle and rotor weight	280	kg
7) Rotor diameter	5.4	m
8) Rotor height (for VAWT only)	-	m
9) Swept area	22.9	m ²
10) Height of the mast	12 to 30	m

OTHER INFORMATION		
11) Maximum rpm	200	At rated wind speed
12) Gear box type	None	
13) Brake system	Electro-dynamic	
14) Number of blades	3	
15) Blades material	Composite fibre glass	
16) Output voltage	Variable	V
17) Minimum operation temperature	-20	°C
18) Maximum operation temperature	+50	°C
19) Acoustic levels at a distance of 20 m ? at nacelle ? (wind = 5 m/s)	DK	DB
20) Lifetime	20	Years
21) Is the machine self-starting	Yes	
22) Use of an asynchronous generator	No	
23) Yaw control system	Tail vane	
24) Upwind or downwind	Upwind	

Calculated power curve

Wind speed (m/s)	Power (W)
1	0
2	0
3	96
4	367
5	771
6	1284
7	1901
8	2547
9	3253
10	3965
11	4397
12	4888
13	5000
14	5000
15	5000

A5 – Ficha técnica: Turbina Windspot 7,5kW

Power

Rated power:	7.5 kW
Flexible power ratings:	-
Cut-in wind speed:	3.0 m/s
Rated wind speed:	12.0 m/s
Cut-out wind speed:	20.0 m/s
Survival wind speed:	-
Wind zone (DIBt):	-
Wind class (IEC):	-

Rotor

Diameter:	6.3 m
Swept area:	31.2 m ²
Number of blades:	3
Rotor speed, max:	-
Tipspeed:	-
Type:	-
Material:	Polyester resin reinforced Fiber glass
Manufacturer:	-
Power density 1:	240.4 W/m ²
Power density 2:	4.2 m ² /kW

Gear box

Type:	direct drive
Stages:	-
Ratio:	-
Manufacturer:	-

Generator

Type:	synchronous permanent
Number:	1.0
Speed, max:	-
Voltage:	220.0 V
Grid connection:	inverters
Grid frequency:	50/60 Hz
Hersteller:	Windspot

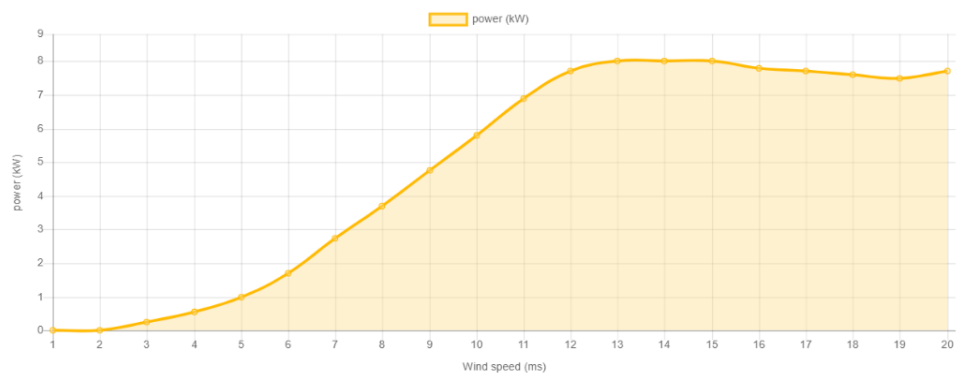
Tower

Hub height:	12/14/18 m
Type:	steel tube
Shape:	cylindrical
Corrosion protection:	-
Manufacturer:	-

Weight

Total weight:	0.4 t
---------------	-------

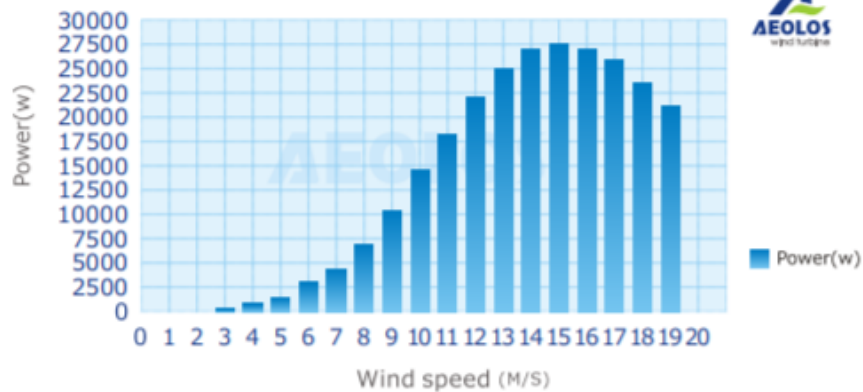
Power curve



A6 – Ficha técnica: Turbina Aeolos – H 20kW

Turbine	
Rated power	20 kW
Max Power	27.5 kW
Cut-in wind speed	3 m/s (6.7 mph)
Rated Wind speed	11.5 m/s (25.7 mph)
Survival wind speed	50 m/s (111.5 mph)
Design lifetime	20 years
Overall weight	820 kg (1807.8 lbs)
Rotor	
Rotor diameter	10.0 m (32.8 ft)
swept area	78.5 m ² (844.5 ft ²)
Rotor speed	90 rpm
Blade material	Fiber Glass
Generator	
Drive Type	Direct Drive (Without Gearbox)
Generator Type	Permanent Magnet Generator
Generator Voltage	360 VDC (Grid-off) 450 VDC (Grid-on)
Efficiency	95%
Controller	
Control System	PLC with Touch Screen
Remote Monitoring	Optional
Safety	
Main Brake System	Yaw Control & Electronic Brake
Secondary Brake System	Mechanical Hydraulic Brake
Tower	
Monopole Tower	18m 24m 30m
Hydraulic Tower	18m 24m
Warranty	
Standard warranty	5 years

Wind Speed / Power Curve



Aeolos-H 20kW Wind Turbine Output

Wind Speed(m/s)	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Generator Power(w)	295	745	1550	2750	4500	6950	10250	14500	18500
Annual Energy Output(kwh)	5992	11747	23083	38544	59130	85235	116727	152424	194472

A7 – Configurações do sistema fotovoltaico

Tabela 30 - Configurações do sistema fotovoltaico para todas as localizações analisadas.

		N (100% PV)	Potência FV (kW)	Área sistema PV (m ²)	Energia (kWh)
Viana do Castelo	1	35	8,925	56,94	12130,22
	2	33	8,415	53,69	12158,38
	3	31	7,905	50,43	12181,74
	4	32	8,16	52,06	12345,86
	5	30	7,65	48,81	12093,89
	6	33	8,415	53,69	12274,39
Vila Real	1	30	7,65	48,81	12314,93
	2	30	7,65	48,81	12379,63
	3	29	7,395	47,18	12274,45
	4	31	7,905	50,43	12191,26
	5	31	7,905	50,43	12397,97
	6	30	7,65	48,81	12184,29
Porto	1	31	7,905	50,43	12248,95
	2	31	7,905	50,43	12272,48
	3	24	6,12	39,05	12106,72
	4	27	6,885	43,93	12364,01
	5	30	7,65	48,81	12258,07
	6	30	7,65	48,81	12011,37
Coimbra	1	30	7,65	48,81	12155,47
	2	34	8,67	55,31	12270,34
	3	30	7,65	48,81	12014,98
	4	29	7,395	47,18	12001,73
	5	30	7,65	48,81	12176,53
	6	29	7,395	47,18	12397,84
Lisboa	1	26	6,63	42,30	12053,74
	2	28	7,14	45,55	12271,99
	3	26	6,63	42,30	12204,27
	4	26	6,63	42,30	12184,09
	5	28	7,14	45,55	12289,88
	6	27	6,885	43,93	12225,84
Évora	1	44	11,22	71,58	12244,49
	2	28	7,14	45,55	12307,46
	3	27	6,885	43,93	12130,47
	4	30	7,65	48,81	12402,07
	5	27	6,885	43,93	12313,11
	6	28	7,14	45,55	12186,04
Faro	1	25	6,375	40,67	12210,16
	2	26	6,63	42,30	12117,89
	3	25	6,375	40,67	12030,74
	4	34	8,67	55,31	12219,00
	5	25	6,375	40,67	12069,51
	6	33	8,415	53,69	12065,46
Funchal	1	31	7,905	50,43	12106,72
	2	32	8,16	52,06	12515,84
	3	27	6,885	43,93	12085,18
	4	31	7,905	50,43	12465,84
	5	37	9,435	60,19	12222,60
	6	29	7,395	47,18	12004,11
Ponta Delgada	1	42	10,71	68,33	12343,28
	2	41	10,455	66,70	12042,04
	3	44	11,22	71,58	121300,63
	4	46	11,73	74,84	12215,44
	5	49	12,495	79,72	12383,33
	6	34	8,67	55,31	12398,82

A8 – Energia do mix energético: sistema fotovoltaico e turbina 5kW, em todas as localizações

Mix energético – Sistema fotovoltaico e Turbina 5 kW

Tabela 31 - Energia gerada pelo sistema fotovoltaico e pela turbina eólica de 5kW, de acordo com o limite total a atingir de 12000 kWh, para a área de referência de 100 m², de acordo com certificação PHP, em Viana do Castelo, Vila Real, Porto e Coimbra.

Geração de energia (kWh) - Sistema fotovoltaico e Turbina 5 kW								
	Viana do Castelo		Vila Real		Porto		Coimbra	
	PV	Turbina	PV	Turbina	PV	Turbina	PV	Turbina
1	9508,05	2788,67	8209,95	4220,02	10273,31	1885,90	10534,74	1613,69
2	2919,64	10552,23	9078,40	3047,20	9501,28	2534,33	9024,96	2959,74
3	8645,10	3433,68	10158,17	2103,71	10896,05	1544,67	10412,98	1725,35
4	9645,20	2424,59	8258,60	3824,22	12364,01	1374,63	6335,67	4245,07
5	10078,25	2162,98	8798,56	3325,70	9397,85	2615,92	9741,22	2303,21
6	8926,83	3248,45	10153,58	1888,80	10810,23	1511,88	5130,14	7020,38

Tabela 32 - Energia gerada pelo sistema fotovoltaico e pela turbina eólica de 5kW, de acordo com o limite total a atingir de 12000 kWh, para a área de referência de 100 m², de acordo com a certificação PHP, em Lisboa, Évora, Faro, Funchal e Ponta Delgada.

Geração de energia (kWh) - Sistema fotovoltaico e Turbina 5 kW										
	Lisboa		Évora		Faro		Funchal		Ponta Delgada	
	PV	Turbina	PV	Turbina	PV	Turbina	PV	Turbina	PV	Turbina
1	0,00	13526,58	10562,21	1595,67	2852,01	10652,77	1393,13	11555,10	5432,605	6733,125
2	7849,39	4532,46	10549,25	1481,60	5623,33	6428,48	4338,45	7723,08	2349,041	10302,44
3	10848,24	1250,73	10782,64	1362,84	2441,66	11746,20	4675,64	7435,83	5268,579	6965,001
4	3610,10	8403,76	11161,86	1214,20	3969,38	8336,59	7029,58	5209,90	6584,166	5735,834
5	6818,24	5319,84	10488,95	1521,16	2819,16	10024,84	8270,10	3990,29	4735,211	7357,532
6	6091,09	6134,05	8617,27	3462,34	3377,76	8676,36	7941,71	4481,35	3580,004	8513,932

Tabela 33 - Energia total gerada pelo mix sistema fotovoltaico e turbina eólica de 5kW, em todas as localizações.

Geração de energia total (kWh) - Sistema fotovoltaico e Turbina 5 kW									
	Viana do Castelo	Vila Real	Porto	Coimbra	Lisboa	Évora	Faro	Funchal	Ponta Delgada
1	12296,71	12429,98	12159,21	12148,43	13526,58	12157,88	13504,78	12948,23	12165,73
2	13471,87	12125,59	12035,61	11984,71	12381,85	12030,86	12051,81	12061,54	12651,48
3	12078,78	12261,87	12440,72	12138,33	12098,97	12145,49	14187,86	12111,47	12233,58
4	12069,80	12082,82	13738,65	10580,74	12013,86	12376,07	12305,97	12239,48	12320,00
5	12241,22	12124,26	12013,78	12044,43	12138,08	12010,11	12844,00	12260,39	12092,74
6	12175,28	12042,38	12322,11	12150,52	12225,14	12079,61	12054,11	12423,06	12093,94

A9 – Energia do mix energético: sistema fotovoltaico e turbina 7,5kW em todas as localizações

Mix energético – Sistema fotovoltaico e Turbina 7,5 kW

Tabela 34 -Energia gerada pelo sistema fotovoltaico e pela turbina eólica de 7,5kW, de acordo com o limite total a atingir de 12000 kWh, para a área de referência de 100 m², de acordo com certificação PHP, em Viana do Castelo, Vila Real, Porto e Coimbra.

Geração de energia (kWh) - Sistema fotovoltaico e Turbina 7,5 kW								
	Viana do Castelo		Vila Real		Porto		Coimbra	
	PV	Turbina	PV	Turbina	PV	Turbina	PV	Turbina
1	8196,59	4040,87	6019,98	6113,32	9087,93	2969,33	9724,37	2377,79
2	0,00	15047,57	6051,61	5962,68	8313,62	3772,24	7941,97	4307,67
3	7075,18	5020,85	9311,65	3164,92	10041,80	2324,83	9611,98	2545,15
4	8873,59	3618,42	6726,68	5460,37	10144,83	2077,19	6335,67	6115,43
5	8868,86	3247,63	7200,77	4880,61	8580,65	3893,69	8929,45	3342,36
6	7810,98	4742,77	9341,29	2902,67	10009,47	2286,45	2053,82	10026,14

Tabela 35 -Energia gerada pelo sistema fotovoltaico e pela turbina eólica de 7,5kW, de acordo com o limite total a atingir de 12000 kWh, para a área de referência de 100 m², de acordo com certificação PHP, em Lisboa, Évora, Faro, Funchal, Ponta Delgada.

Geração de energia (kWh) - Sistema fotovoltaico e Turbina 7,5 kW										
	Lisboa		Évora		Faro		Funchal		Ponta Delgada	
	PV	Turbina	PV	Turbina	PV	Turbina	PV	Turbina	PV	Turbina
1	0,00	19545,84	9665,92	2357,69	0,00	15359,67	0,00	16711,09	2287,413	9953,279
2	4517,53	7737,65	12398,36	2203,82	2721,59	9328,66	1368,19	11150,75	0	15127,34
3	10396,23	1924,72	10274,27	2039,25	0,00	16982,92	1621,98	10789,71	2218,349	10286,93
4	0,00	12152,54	10524,39	1848,23	0,00	12090,98	4548,55	7645,76	3663,072	8513,088
5	4659,84	7762,41	9933,02	2250,27	0,00	14523,29	6220,40	5914,41	1205,685	10881,09
6	3169,87	8921,28	7398,67	4968,65	0,00	12680,64	5735,68	6611,26	0	12529,56

Tabela 36 - Energia total gerada pelo mix sistema fotovoltaico e turbina eólica de 7,5kW, em todas as localizações.

Geração de energia total (kWh) - Sistema fotovoltaico e Turbina 7,5 kW									
	Viana do Castelo	Vila Real	Porto	Coimbra	Lisboa	Évora	Faro	Funchal	Ponta Delgada
1	12237,46	12133,30	12057,26	12102,16	19545,84	12023,61	15359,67	16711,09	12240,69
2	15047,57	12014,29	12085,86	12249,64	12255,18	14602,18	12050,25	12518,94	15127,34
3	12096,03	12476,58	12366,63	12157,13	12320,96	12313,52	16982,92	12411,69	12505,28
4	12492,00	12187,05	12222,02	12451,11	12152,54	12372,62	12090,98	12194,31	12176,16
5	12116,49	12081,39	12474,34	12271,82	12422,25	12183,29	14523,29	12134,81	12086,78
6	12553,74	12243,96	12295,92	12079,96	12091,15	12367,32	12680,64	12346,94	12529,56

A10 – Número de painéis e área do sistema fotovoltaico, para os diferentes conjuntos de solução energéticos, em todas as localizações

Tabela 37 - Número de painéis fotovoltaicos (N) e respetiva área do sistema fotovoltaico, para a opção de a energia gerada ser unicamente pelo sistema fotovoltaico, pelo sistema fotovoltaico e turbina de 5kW e sistema fotovoltaico e turbina 7,5kW, de acordo a certificação PHP para área de referência de 100 m².

		N (100% PV)	Área (m ²)	N (sistema PV & turbina 5kW)	Área (m ²)	N (sistema PV & turbina 7,5kW)	Área (m ²)
Viana do Castelo	1	35	56,94	29	47,18	25	40,67
	2	33	53,69	1	1,63	0	0,00
	3	31	50,43	22	35,79	18	29,28
	4	32	52,06	25	40,67	23	37,42
	5	30	48,81	25	40,67	22	35,79
	6	33	53,69	24	39,05	19	30,91
Vila Real	1	30	48,81	20	32,54	13	21,15
	2	30	48,81	22	35,79	13	21,15
	3	29	47,18	24	39,05	22	35,79
	4	31	50,43	21	34,16	16	26,03
	5	31	50,43	22	35,79	17	27,66
	6	30	48,81	25	40,67	23	37,42
Porto	1	31	50,43	26	42,30	23	37,42
	2	31	50,43	24	39,05	19	30,91
	3	24	39,05	21	34,16	18	29,28
	4	27	43,93	27	43,93	26	42,30
	5	30	48,81	23	37,42	21	34,16
	6	30	48,81	27	43,93	25	40,67
Coimbra	1	30	48,81	26	42,30	24	39,05
	2	34	55,31	26	42,30	22	35,79
	3	30	48,81	26	42,30	24	39,05
	4	29	47,18	20	32,54	17	27,66
	5	30	48,81	24	39,05	22	35,79
	6	29	47,18	12	19,52	6	9,76
Lisboa	1	26	42,30	0	0,00	0	0,00
	2	28	45,55	19	30,91	11	17,90
	3	26	42,30	23	37,42	22	35,79
	4	26	42,30	8	13,02	0	0,00
	5	28	45,55	16	26,03	11	17,90
	5	28	45,55	16	26,03	11	17,90
Évora	6	27	43,93	14	22,78	4	6,51
	1	44	71,58	38	61,82	35	56,94
	2	28	45,55	24	39,05	23	37,42
	3	27	43,93	24	39,05	23	37,42
	4	30	48,81	27	43,93	25	40,67
	5	27	43,93	23	37,42	22	35,79
Faro	6	28	45,55	21	34,16	17	27,66
	1	25	40,67	0	0,00	0	0,00
	2	26	42,30	11	17,90	2	3,25
	3	25	40,67	1	1,63	0	0,00
	4	34	55,31	11	17,90	0	0,00
	5	25	40,67	1	1,63	0	0,00
Funchal	6	33	53,69	7	11,39	0	0,00
	1	31	50,43	1	1,63	0	0,00
	2	32	52,06	11	17,90	1	1,63
	3	27	43,93	10	16,27	1	1,63
	4	31	50,43	17	27,66	11	17,90
	5	37	60,19	20	32,54	17	27,66
Ponta Delgada	6	29	47,18	18	29,28	13	21,15
	1	42	68,33	19	30,91	8	13,02
	2	41	66,70	8	13,02	0	0,00
	3	44	71,58	19	30,91	8	13,02
	4	46	74,84	23	37,42	14	22,78
	5	49	79,72	18	29,28	3	4,88
	6	34	55,31	10	16,27	0	0,00

A11 – Investimento inicial e custos de operação e manutenção, para todos os conjuntos de soluções considerados, em todas as localizações

Tabela 38 - Custos relativamente ao investimento inicial e operação e manutenção (O&M), para as várias opções de conjunto de soluções (mix).

CUSTOS(€)							
LOCALIZAÇÃO	MIX	INVESTIMENTO INICIAL				O&M	
		100% PV	100% Turbina 5kW	Turbina 5kW & PV	Turbina 7,5 kW & PV	Turbina 5kW & PV	Turbina 7,5 kW & PV
Viana do Castelo	1	21420	17000	34748	40800	1027,48	1428
	2	20196	17000	17612	25500	856,12	1275
	3	18972	17000	30464	36516	984,64	1385,16
	4	19584	17000	32300	39576	1003	1415,76
	5	18360	17000	32300	38964	1003	1409,64
	6	20196	17000	31688	37128	996,88	1391,28
Vila Real	1	18360	17000	29240	33456	972,4	1354,56
	2	18360	17000	30464	33456	984,64	1354,56
	3	17748	17000	31688	38964	996,88	1409,64
	4	18972	17000	29852	35292	978,52	1372,92
	5	18972	17000	30464	35904	984,64	1379,04
	6	18360	17000	32300	39576	1003	1415,76
Porto	1	18972	17000	32912	39576	1009,12	1415,76
	2	18972	17000	31688	37128	996,88	1391,28
	3	14688	17000	29852	36516	978,52	1385,16
	4	16524	17000	33524	41412	1015,24	1434,12
	5	18360	17000	31076	38352	990,76	1403,52
	6	18360	17000	33524	40800	1015,24	1428
Coimbra	1	18360	17000	32912	40188	1009,12	1421,88
	2	20808	17000	32912	38964	1009,12	1409,64
	3	18360	17000	32912	40188	1009,12	1421,88
	4	17748	17000	29240	35904	972,4	1379,04
	5	18360	17000	31688	38964	996,88	1409,64
	6	17748	17000	24344	29172	923,44	1311,72
Lisboa	1	15912	17000	17000	25500	850	1275
	2	17136	17000	28628	32232	966,28	1342,32
	3	15912	17000	31076	38964	990,76	1409,64
	4	15912	17000	21896	25500	898,96	1275
	5	17136	17000	26792	32232	947,92	1342,32
	6	16524	17000	25568	27948	935,68	1299,48
Évora	1	26928	17000	40256	46920	1082,56	1489,2
	2	17136	17000	31688	39576	996,88	1415,76
	3	16524	17000	31688	39576	996,88	1415,76
	4	18360	17000	33524	40800	1015,24	1428
	5	16524	17000	31076	38964	990,76	1409,64
	6	17136	17000	29852	35904	978,52	1379,04
Faro	1	15300	17000	17000	25500	850	1275
	2	15912	17000	23732	26724	917,32	1287,24
	3	15300	17000	17612	25500	856,12	1275
	4	20808	17000	22508	25500	905,08	1275
	5	15300	17000	17612	25500	856,12	1275
	6	20196	17000	21284	25500	892,84	1275
Funchal	1	18972	17000	17612	25500	856,12	1275
	2	19584	17000	23732	26112	917,32	1281,12
	3	16524	17000	23120	26112	911,2	1281,12
	4	18972	17000	27404	32232	954,04	1342,32
	5	22644	17000	29240	35904	972,4	1379,04
	6	17748	17000	28016	33456	960,16	1354,56
Ponta Delgada	1	25704	17000	28628	30396	966,28	1323,96
	2	25092	17000	21896	25500	898,96	1275
	3	26928	17000	28628	30396	966,28	1323,96
	4	28152	17000	31076	34068	990,76	1360,68
	5	29988	17000	28016	27336	960,16	1293,36
	6	20808	17000	23120	25500	911,2	1275

A12 – Resultados da avaliação económica, de acordo com o investimento maior e menor em cada conjunto de solução considerado.

Tabela 39 - Resultados da avaliação económica para a localização com maior e menor custo para o mix: sistema fotovoltaico, turbina eólica 5kW e sistema fotovoltaico e Turbina eólica 7,5 kW e sistema fotovoltaico.

100% Sistema Fotovoltaico				
	t (%)	VAL (€)	TIR (%)	PRI (ano)
Lisboa	6	12338,48	14	9
-	7	10087,64		10
localização 2	8	8093,884		10
	9	6321,801		11
	10	4741,47		12
Ponta Delgada	6	-2361,61	5	-
-	7	-4471,32		-
localização 5	8	-6340,07		-
	9	-8001,04		-
	10	-9482,28		-
MIX: Turbina 5 kW & Sistema Fotovoltaico				
Faro	6	-3206,37	4	-
-	7	-4773,82		-
localização 2	8	-6162,25		-
	9	-7396,31		-
	10	-8496,83		-
Évora	6	-21352,4	-2	-
-	7	-22796		-
localização 1	8	-24074,7		-
	9	-25211,2		-
	10	-26224,8		-
MIX: Turbina 7,5 kW & Sistema Fotovoltaico				
Faro	6	-10445,4	1	-
-	7	-11688,5		-
localização 2	8	-12789,6		-
	9	-13768,3		-
	10	-14641,2		-
Évora	6	-33026,5	-6	-
-	7	-34087,5		-
localização 1	8	-35027,3		-
	9	-35862,6		-
	10	-36607,5		-

A13 – Plantas dos apartamentos Lisbon Green Valley no piso 3 do Lote 10

As Figuras 45, 46, 47 e 48 ilustram a planta dos apartamentos do piso 3, cujas áreas foram analisadas previamente à seleção da área de referência utilizada para a obtenção da certificação Passive House Premium (PHP).



Figura 47 - Planta do apartamento do Lote 10, Bloco B, Piso 3-ESQ, (Grupo André Jordan, 2019b).



Figura 48 - Planta do apartamento do Lote 10, Bloco B, Piso 3-DTO, (Grupo André Jordan, 2019b).



QUADRO DE ÁREAS	
Hall entrada / Hall	4,0 m ²
Sala / Living Room	33,2 m ²
Cozinha / Kitchen	18,1 m ²
Lavandaria / Laundry	2,3 m ²
Circulação / Circulation	4,0 m ²
WC	4,6 m ²
Quarto / Bedroom	13,1 m ²
Suíte / Bedroom Suite	21,0 m ²
WC	6,0 m ²

Este documento não constitui elemento contratual. As áreas são aproximadas. O layout dos espaços e instalações sanitárias é indicativo.

This document does not constitute a contractual element. The areas are approximate. The layout of kitchens and sanitary facilities is indicative.



LOTE 10 / BLOCO A / PISO 3 - ESQ. / T2
 Área Coberta / Interior Area - 122,2 m²
 Área Terraço / Terrace Area - 41,0 m²
 Área Total / Total Area - 163,2 m²
 Área Arrecadação / Storage Area - 12,2 m²
 Lugares de Estacionamento / Parking Places - 2



PROMOTOR / DEVELOPER

André Jordan Group

COLONADE

CONTACTOS / CONTACTS
 Tel. (+351) 219 626 616
 www.lisbongreenvalley.pt

Figura 49 - Planta do apartamento do Lote 10, Bloco A, Piso 3 -ESQ, (Grupo André Jordan, 2019b).

9



QUADRO DE ÁREAS	
Hall entrada / Hall	6,1 m ²
Sala / Living Room	45,9 m ²
Cozinha / Kitchen	20,1 m ²
Lavandaria / Laundry	2,3 m ²
Circulação / Circulation	6,2 m ²
WC	4,6 m ²
Quarto / Bedroom	16,5 m ²
Quarto / Bedroom	15,9 m ²
Suíte / Bedroom Suite	22,3 m ²
WC	6,0 m ²

Este documento não constitui elemento contratual. As áreas são aproximadas. O layout dos espaços e instalações sanitárias é indicativo.

This document does not constitute a contractual element. The areas are approximate. The layout of kitchens and sanitary facilities is indicative.



LOTE 10 / BLOCO A / PISO 3 DTO. / T3+1
 Área Coberta / Interior Area - 169,0 m²
 Área Terraço / Terrace Area - 78,9 m²
 Área Total / Total Area - 247,9 m²
 Área Arrecadação / Storage Area - 14,4 m²
 Lugares de Estacionamento / Parking Places - 2



PROMOTOR / DEVELOPER

André Jordan Group

COLONADE

CONTACTOS / CONTACTS
 Tel. (+351) 219 626 616
 www.lisbongreenvalley.pt

Figura 50 - Planta do apartamento do Lote 10, Bloco A, Piso 3 -DTO, (Grupo André Jordan, 2019b).

A14 – Recomendações para os distritos e cidades atingirem o limite de energia renovável primária (120 kWh/m²), para área de referência de 100m²

Tabela 40 - Número de painéis fotovoltaicos (N) e Investimento necessário para os vários mix's energéticos atingirem o limite de energia renovável primária de 120 kWh/m², para área de referência de 100 m², em Viana do Castelo, Vila Real, Porto, Coimbra e Lisboa.

		100% Sistema Fotovoltaico		Mix FV & Turbina 5kW		Mix FV & Turbina 7,5kW	
		N	Investimento Total (€)	N	Investimento Total (€)	N	Investimento Total (€)
Viana do Castelo	1	35	21420	29	34748	25	40800
	2	33	20196	1	17612	0	25500
	3	31	18972	22	30464	18	36516
	4	32	19584	25	32300	23	39576
	5	30	18360	25	32300	22	38964
	6	33	20196	24	31688	19	37128
Vila Real	1	30	18360	20	29240	13	33456
	2	30	18360	22	30464	13	33456
	3	29	17748	24	31688	22	38964
	4	31	18972	21	29852	16	35292
	5	31	18972	22	30464	17	35904
	6	30	18360	25	32300	23	39576
Porto	1	31	18972	26	32912	23	39576
	2	31	18972	24	31688	19	37128
	3	24	14688	21	29852	18	36516
	4	27	16524	27	33524	26	41412
	5	30	18360	23	31076	21	38352
	6	30	18360	27	33524	25	40800
Coimbra	1	30	18360	26	32912	24	40188
	2	34	20808	26	32912	22	38964
	3	30	18360	26	32912	24	40188
	4	29	17748	20	29240	17	35904
	5	30	18360	24	31688	22	38964
	6	29	17748	12	24344	6	29172
Lisboa	1	26	15912	0	17000	0	25500
	2	28	17136	19	28628	11	32232
	3	26	15912	23	31076	22	38964
	4	26	15912	8	21896	0	25500
	5	28	17136	16	26792	11	32232
	6	27	16524	14	25568	4	27948

Tabela 41 - Número de painéis fotovoltaicos (N) e Investimento necessário para os vários mix's energéticos atingirem o limite de energia renovável primária de 120 kWh/m², para área de referência de 100 m², em Évora, Faro, Funchal e Ponta Delgada.

		100% Sistema Fotovoltaico		Mix FV & Turbina 5kW		Mix FV & Turbina 7,5kW	
		N	Investimento Total (€)	N	Investimento Total (€)	N	Investimento Total (€)
Évora	1	44	26928	38	40256	35	46920
	2	28	17136	24	31688	23	36576
	3	27	16524	24	31688	23	36576
	4	30	18360	27	33524	25	40800
	5	27	16524	23	31076	22	38964
	6	28	17136	21	29852	17	35904
Faro	1	25	15300	0	17000	0	25500
	2	26	15912	11	23732	2	26724
	3	25	15300	1	17612	0	25500
	4	34	20808	9	22508	0	25500
	5	25	15300	1	17612	0	25500
	6	33	20196	7	21284	0	25500
Funchal	1	31	18972	1	17612	0	25500
	2	32	19584	11	23732	1	26112
	3	27	16524	10	23120	1	26112
	4	31	18972	17	27404	11	32232
	5	37	22644	20	29240	17	35904
	6	29	17748	18	28016	13	33456
Ponta Delgada	1	42	25704	19	28628	8	30396
	2	41	25092	8	21896	0	25500
	3	44	26928	19	28628	8	30396
	4	46	28152	23	31076	14	34068
	5	49	29988	18	28016	3	27336
	6	34	20808	10	23120	0	25500

Viana do Castelo

Rugosidade: Alta. A presença de árvores e floresta diminui o potencial eólico.

Orografia: Elevada variação do terreno. Maioria dos locais com elevação considerável. Presença de vales reduz a velocidade do vento. No fundo das colinas, também há redução do potencial eólico. 3<

Elevação¹ (m)< 1202

O número de painéis fotovoltaicos pode ir até 25, para o caso do mix energético que envolve a turbina de 7,5kW.

Vila Real

Rugosidade: Alta na maior parte das localizações.

Orografia: Elevada variação do terreno. Presença vales reduz a velocidade do vento. No fundo das colinas, também há redução do potencial eólico. 343<Elevação¹ (m)<665

O número de painéis fotovoltaicos máximo é 23, avaliando o mix energético que envolve a turbina de 7,5kW.

Porto

Rugosidade: Menor que em Vila Real, na maioria das localizações. Distrito com edifícios e infraestruturas que diminuem o potencial eólico.

Orografia: Variação do terreno menor que Vila Real e Viana do Castelo.

O número de painéis fotovoltaicos necessário pode ir até 26, para o mix energético que envolve a turbina de 7,5kW. $37 < \text{Elevação}^1 \text{ (m)} < 476$

Coimbra

Rugosidade: Superior na maior parte das localizações relativamente ao Porto, presença de floresta.

Orografia: Variação da elevação do terreno semelhante ao Porto, relativamente ao limite inferior e superior. $1 < \text{Elevação}^1 \text{ (m)} < 262$

O número máximo de painéis fotovoltaicos vai até 24 painéis fotovoltaicos, para o mix com a turbina de 7,5kW.

Lisboa

Rugosidade: Inferior, relativamente aos distritos a norte analisados, na generalidade. Destacam-se as localizações onde serras ou florestas se inserem, e também na presença de edifícios ou infraestruturas, que apresentam valores altos.

Orografia: Alta variabilidade, de acordo com a variação de elevação em Lisboa e características de meio urbano que comprometem o potencial eólico. $20 < \text{Elevação (m)}^1 < 316$

Há localizações que têm capacidade de atingir o limite de 120kWh/m², com uma turbina de 7,5kW unicamente. Outras, com a mesma turbina de 7,5kW podem necessitar de até 22 painéis fotovoltaicos.

Évora

Rugosidade: Menor na maioria das localizações.

Orografia: Variação do terreno baixa. $16 < \text{Elevação}^1 \text{ (m)} < 269$

Para o mix energético que envolve a turbina de 7,5kW o mínimo número de painéis fotovoltaicos é 17 e o máximo 35. O número mínimo de painéis indica o que potencial eólico não é substancial.

Faro

Rugosidade: Ligeiramente superior a Évora, na generalidade. Comprimento de rugosidade de superfície relativamente reduzido. a destacar as localizações perto da costa, onde são mais altos e a Nordeste de Faro.

Orografia: Existência e variação do terreno, maior que em Évora. $19 < \text{Elevação}^1 \text{ (m)} < 141$

Faro reúne condições propícias à geração de energia eólica, sendo que para o mix energético que envolve a turbina de 7,5kW o número máximo de painéis fotovoltaicos são de apenas 2.

Funchal

Rugosidade: Apresenta valores altos. Em meio urbano devido à existência de edifícios, em zonas altas do Funchal, a existência de árvores e vegetação.

Orografia: Alta variabilidade da variação do terreno. A elevação da cidade vai aumentando na direção a norte. $9 < \text{Elevação}^1 \text{ (m)} < 684$

Há localizações capazes de gerar o suficiente para atingir o limite, com uma turbina de 7,5kW. O número máximo de painéis fotovoltaicos é 17, de acordo com a utilização da turbina da mesma potência.

Ponta Delgada

Rugosidade: Valores baixos e altos, sendo que os maiores não são superiores aos do Funchal. Não existem edifícios ou infraestruturas que comprometam a energia eólica, como em Lisboa ou Porto.

Orografia: Apresenta variação da elevação do terreno. $111 < \text{Elevação (m)}^1 < 760$

A turbina de 7,5kW tem capacidade de gerar o suficiente para perfazer os 120 kWh/m²a, em certas localizações. Utilizando a mesma turbina, o número máximo de painéis fotovoltaicos necessário é 14.

Relativamente à **relação complementar entre o sistema e fotovoltaico e a turbina eólica**, para a maior parte das localizações o dimensionamento do sistema fotovoltaico com a turbina de 7,5 kW é um bom princípio, sendo necessário adaptar a cada situação. Na maioria dos casos é preferível aumentar a potência da turbina eólica e a consequente diminuição da potência do sistema fotovoltaico. Nos casos em que o potencial eólico é favorável não é necessário, por vezes a junção da turbina eólica de 5kW já apresenta resultados satisfatórios, exemplo de certas localizações em Faro, Funchal ou Ponta Delgada.

¹Os valores mínimos e máximos de elevação são os retirados da base de dados, para cada localização em estudo.