



**TECNOLOGIA
SETÚBAL**

ESCOLA SUPERIOR
POLITÉCNICO SETÚBAL

RODRIGO DE
CARVALHO
GRAÇA FERREIRA
DA COSTA

**SISTEMA DE APOIO À
MOBILIDADE VERDE EM PALMELA**

Relatório do Projeto do Mestrado em Engenharia em
Gestão de Energia na Indústria e Edifícios

ORIENTADOR

Professor Doutor Nuno Pereira

Dezembro de 2023

RODRIGO DE
CARVALHO
GRAÇA FERREIRA
DA COSTA

**SISTEMA DE APOIO À
MOBILIDADE VERDE EM PALMELA**

JÚRI

Presidente: Professor Doutor, Paulo Fontes,
Instituto Politécnico de Setúbal

Orientador: Professor Doutor, Nuno Pereira,
Instituto Politécnico de Setúbal

Arguente: Professor Doutor, Luís Coelho,
Instituto Politécnico de Setúbal

Dezembro de 2023

*Para os meus eternos tíos-avós Maria Cesarina de
Almeida e Luís Alberto Canas*

Agradecimentos

Em meu nome pessoal gostaria de agradecer ao meu orientador, o professor Nuno Pereira pela paciência, pela disponibilidade, pela gentileza e pela prestação, que teve quando me surgiam dúvidas e nas nossas trocas de opiniões acerca do trabalho.

Aproveito também para agradecer aos professores Paulo Fontes e José Maia pela disponibilidade pelo esclarecimento das questões, que tive acerca da produção de hidrogénio verde e dos sistemas fotovoltaicos. Sem esquecer claro do professor João Francisco Fernandes, pois, se eu não tivesse participado no “1º Living Lab” da E³UDRES² na Bélgica nunca teria ganho inspiração para fazer este projeto e, agradeço também às professoras Helena Caria e Marta Justino pelo apoio.

Quero fazer um agradecimento muito especial ao Sr. Ludo Loyens, proprietário da empresa belga “Wingardium-energy”, pela disponibilidade, pela gentileza que teve por ter cedido toda a documentação que solicitei e também pelas nossas trocas de ideias que tivemos ao longo deste trabalho.

Outra entidade que também quero agradecer é à empresa “Nel hydrogen” pela gentileza que teve por me ceder a documentação, que lhes solicitei.

Finalmente, quero agradecer à minha família, especialmente aos meus pais e irmão por me terem apoiado nesta longa aventura académica, já são 6 anos, aos meus colegas de mestrado, que aprendi muito com eles, ao meu “padrinho” e primo, Rogério Almeida, pelas nossas discussões, aos meus amigos que também me apoiaram e, por fim, quero deixar um agradecimento muito especial a estes senhores: à minha prima Isabel Ferreira, ao meu amigo João Paulo Tavares, à Dra. Fernanda Barros, à Dra. Isabel do Vale e à Teresa Biu.

Para terminar gostaria de partilhar que foi com grande gozo e com grande prazer que tive em escrever este trabalho! Foi super pedagógico e divertido!

Um grande bem-haja para todos!

Resumo

Com este projeto pretende-se estudar e propor a implementação de um sistema de apoio à mobilidade verde de algumas regiões do concelho de Palmela. A mobilidade de pessoas e bens com recurso a veículos com motores de combustão interna é uma das principais fontes de emissão de dióxido de carbono e outros gases nocivos ao meio ambiente, pelo que se identifica a necessidade de minimizar este problema.

Desta forma, um contributo será a promoção do uso sustentável de transportes públicos através da dinamização de uma rede melhorada e alargada de serviços de mobilidade baseada em veículos sem emissões gasosas poluentes.

Como tal, o sistema será concebido para: integrar a geração de energia elétrica de fontes renováveis (eólica e fotovoltaica), a produção de hidrogénio e a sua utilização em veículos de transporte público.

Palavras-chave: Mobilidade Verde; Transportes Públicos; Energia Eólica; Energia Fotovoltaica; Sustentabilidade; Eletrólise da Água; Hidrogénio Verde.

Abstract

The aim of this project is to study and propose the implementation of a system to support green mobility in some areas of the municipality of Palmela. The mobility of people and goods by means of vehicles with internal combustion engines is one of the main sources of carbon dioxide emissions and other gases harmful to the environment, and it is therefore necessary to minimise this problem.

Therefore, one contribution will be to promote the sustainable use of public transport by promoting an improved and extended network of mobility services based on vehicles without polluting gas emissions.

The system will therefore be designed to integrate the production of electricity from renewable sources (wind and photovoltaic), the production of hydrogen and its use in public transport vehicles.

Keywords: Green Mobility; Public Transportation; Wind Energy; Photovoltaic Energy; Sustainability; Water Electrolysis; Green Hydrogen.

Índice

Agradecimentos	ii
Resumo	iii
Abstract.....	iv
Índice	v
Lista de Figuras.....	vi
Lista de Tabelas	viii
Lista de Siglas e Acrónimos	ix
Lista de Símbolos.....	ix
Capítulo 1 Introdução	1
Capítulo 2 Aproveitamento da energia eólica.....	3
2.1. Recurso eólico e principais tipos de turbinas.....	3
2.2. Seleção do tipo de turbinas eólicas	10
2.3. Caracterização das turbinas ICON.....	12
2.4. Estudo dos locais para a implementação das turbinas eólicas	15
2.5. Potência elétrica gerada por fonte eólica	18
Capítulo 3 Aproveitamento da energia solar	25
3.1. Recurso solar fotovoltaico e tipos de painéis fotovoltaicos	25
3.2. Estudo dos locais para a implementação dos painéis fotovoltaicos	29
3.3. Determinação da capacidade de geração de energia elétrica fotovoltaica.....	33
Capítulo 4 Necessidades de hidrogénio.....	38
4.1. Escolha fundamentada do tipo de veículos a usar	38
4.2. Princípio de funcionamento das viaturas a hidrogénio com <i>fuel cell</i>	39
4.3. Trajetos propostos e necessidades da frota	42
Capítulo 5 Central de produção hidrogénio.....	44
5.1. Produção de hidrogénio “verde”	44
5.2. Descrição sumária da instalação de produção de hidrogénio e respetivos componentes.....	47
5.3. Seleção dos equipamentos da central de produção e de abastecimento	48
5.4. Layout da central de hidrogénio	54
Capítulo 6 Necessidades de energia elétrica da central.....	56
6.1. Consumo anual de energia da central de produção e de abastecimento	56
6.2. Determinação da capacidade de geração de energia elétrica renovável	58
Capítulo 7 Conclusões	62
Bibliografia.....	64
Anexo 1	An.I
Anexo 2	An.VI

Lista de Figuras

Figura 1-Esquema do sistema de apoio mobilidade verde para os transportes públicos em Palmela	2
Figura 2-Representação simplificada do vento à escala planetária	3
Figura 3-Densidade de potência disponível no vento.....	4
Figura 4-Pequena turbina de resistência tipo "Savonius"	5
Figura 5-Modelo experimental de turbina de resistência tipo "Savonius".....	6
Figura 6-Turbina de resistência de pás helicoidais tipo "Savonius"	6
Figura 7-Turbina de sustentação tipo "Darrieus" (pás de forma troposkiana).....	7
Figura 8-Turbina de sustentação tipo "Darrieus" (H-rotor).....	7
Figura 9-Turbina de sustentação tipo "Darrieus" (pás helicoidais)	8
Figura 10-Turbina de sustentação tipo "Cross-flow".....	8
Figura 11-Turbina de sustentação de eixo horizontal (moinho português)	9
Figura 12-Turbina de sustentação de eixo horizontal (moinho tipo americano).....	9
Figura 13-Turbinas de sustentação de eixo horizontal de três pás	9
Figura 14-Representação do C_p em função do λ de alguns tipos de turbinas eólicas.....	10
Figura 15-Exemplo de um parque eólico de TEEV offshore	11
Figura 16-Turbinas-poste de iluminação, ICON, da empresa "Wingardium-energy"	13
Figura 17-Geometria do rotor da turbina ICON	14
Figura 18-Curva de potência das turbinas ICON da empresa "Wingardium-energy".....	14
Figura 19-Rosa dos ventos e velocidade média do vento em Palmela nos últimos 30 anos	15
Figura 20-Localização dos pontos de implementação das turbinas "ICON" na vila de Palmela vista através da plataforma "Google Earth"	16
Figura 21-Registos da velocidade do vento em Palmela nos últimos 30 anos	18
Figura 22-Potência da turbina ICON da "Wingardium-energy" e estimativa da energia gerada anualmente.....	19
Figura 23-Evoluções da potência disponível e da potência útil em função da velocidade do vento.....	21
Figura 24-Evolução do CP em função da velocidade do vento da turbina ICON	22
Figura 25-Produção de energia elétrica renovável (eólica) anual num ano típico em Palmela	24
Figura 26-Constituição de um diagrama de um sistema FV para uma moradia	26
Figura 27-Painel FV monocristalino da marca: Jinko Solar, modelo: Tiger Neo N-type 78HL4-(V) 595-615 Watt	27
Figura 28-Painel FV policristalino da marca: Jinko Solar, modelo: JKM265P-60	27
Figura 29- Locais de instalação dos painéis FV na central (ponto "1.") e na vila de Palmela (ponto "6.").....	30
Figura 30-Introdução das coordenadas geográficas no software "PV*SOL" no local "1.	31
Figura 31-Curva de carga e consumo anual no software "PV*SOL"	32
Figura 32-Seleção da curva de carga "Perfil de carga com carga constante" do software	

“PV*SOL”	32
Figura 33-Introdução dos dados dos módulos fotovoltaicos no software "PV*SOL"	34
Figura 34-Especificações técnicas do painel da marca: Jinko Solar, modelo: Tiger Neo N-type 78HL4-(V) 595-615 Watt	35
Figura 35-Demonstração da seleção de um inversor no software "PV*SOL"	35
Figura 36-Seleção, configuração e fator de dimensionamento do inversor da “Delta electronics” no software "PV*SOL”	36
Figura 37-Produção mensal de energia elétrica renovável FV no local “1.”	37
Figura 38- Produção mensal de energia elétrica renovável FV no local “6.”	37
Figura 39-Os objetivos de desenvolvimento sustentável relacionados com as <i>fuel cells</i> de membrana de permuta de prótons	39
Figura 40-Ilustração do princípio de funcionamento das <i>fuel cell</i> - reação eletroquímica.....	40
Figura 41-Funcionamento das viaturas a <i>fuel cell</i> com bateria e travagem regenerativa	40
Figura 42-Miniautocarro a hidrogénio: Renault, modelo: Master City Bus H2-TECH	41
Figura 43-Dados técnicos do miniautocarro: Renault, modelo: Master City Bus H2-TECH..	41
Figura 44-Ilustração esquemática do princípio de funcionamento da eletrólise da água alcalina	45
Figura 45-Vista esquemática do princípio de funcionamento da eletrólise da água com AEM	45
Figura 46-Vista esquemática do princípio de funcionamento da eletrólise da água com PEM	46
Figura 47-Visão esquemática do princípio de funcionamento da eletrólise da água com SOEC	46
Figura 48-Concepção conceptual da unidade de membrana para remoção de CO ₂	47
Figura 49-Eletrolisador: NEL HYDROGEN, modelo: PEM C20	48
Figura 50-Características técnicas do eletrolisador: NEL HYDROGEN, modelo: PEM C20	49
Figura 51-Compressor de dois estágios: Hydro-pac, modelo: C03-10-300/600LX.....	49
Figura 52-Características técnicas do compressor de dois estágios da marca: Hydro-pac, modelo: C06-10-300/600LX	50
Figura 53-Depósito de armazenamento da marca: NEL HYDROGEN	50
Figura 54-Características técnicas do depósito de armazenamento da marca: NEL HYDROGEN.....	51
Figura 55-Módulo de estação da marca: NEL HYDROGEN, modelo: SM004	51
Figura 56-Características técnicas do módulo de estação de módulo da marca: NEL HYDROGEN, modelo: SM004	52
Figura 57-Características técnicas do módulo de estação: NEL HYDROGEN, modelo: SM004 com as opções de dispensadores	52
Figura 58-Dispensador da marca: NEL HYDROGEN, modelo: 35 MPa	53
Figura 59-Características técnicas do dispensador da marca: NEL HYDROGEN, modelo: 35 MPa	53

Figura 60-Sistema de tratamento de água subterrânea: Rodi systems, modelo: PureBox HPW	54
Figura 61-Características técnicas do sistema de tratamento de água: Rodi Systems, modelo: PureBox HPW	54
Figura 62-Layout da central de produção, armazenamento e abastecimento da frota de miniautocarros	55
Figura 63-Configuração dos inversores para os 640 painéis FV da central	59
Figura 64-Configuração dos inversores para os 164 painéis FV distribuídos na vila	59
Figura 65-Consumo da central e geração de energia dos 640 painéis FV da central	60
Figura 66-Consumo da central e geração de energia dos 164 painéis FV distribuídos na vila	60
Figura 67-Energia elétrica gerada anualmente pelas FER: eólica e solar FV	61

Lista de Tabelas

Tabela 1-Características técnicas das turbinas ICON da empresa "Wingardium-energy"	14
Tabela 2-Locais propostos para a implementação das turbinas "ICON" na vila de Palmela	16
Tabela 3-Determinação da potência eólica disponível em função da velocidade do vento ..	20
Tabela 4-Potências disponíveis e úteis em função da velocidade do vento respetivos valores do <i>CP</i> da turbina ICON	21
Tabela 5-Histórico da velocidade do vento em Palmela nos últimos 30 anos.....	23
Tabela 6-Resultados da potência útil.....	23
Tabela 7-Energia produzida por ano por uma turbina ICON	24
Tabela 8-Locais propostos para a implementação de painéis fotovoltaicos na vila de Palmela	29
Tabela 9- Resultados da produção mensal de energia elétrica renovável FV no local "1." ..	36
Tabela 10-Resultados da produção mensal de energia elétrica renovável FV no local "6." .	37
Tabela 11-Distâncias diárias e anuais a percorrer pela frota de veículos a " <i>fuel cell</i> "	42
Tabela 12-Estimativa da potência e consumo energético diário e anual da central	57
Tabela 13-Estimativa da energia elétrica gerada pelos painéis FV e turbinas ICON.....	61

Lista de Siglas e Acrónimos

AEM	Eletrólise com membrana de troca de aniões
AWE	Eletrólise de água alcalina
BFP	Blade-Passing Frequency/Frequência da Passagem da Pá
CFD	Dinâmica de Fluidos Computacional
DC/AC	Corrente Contínua/Corrente Alternada
ETAR	Estações de tratamento de águas residuais
FER	Fontes de Energia Renovável
FV	Fotovoltaico
HER	Reação de evolução do hidrogénio
MPP	Monitorização do ponto de potência máxima
NNO	Norte-noroeste
NO	Noroeste
ONO	Oeste-noroeste
OER	Reação de evolução do oxigénio
PEM	Membrana permutadora de protões
PVGIS	Photovoltaic Geographical Information System
PSD	Densidade Espectral de Potência
SOEC	Eletrólise de óxido sólido
TEEH	Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal
TEEV	Turbinas Eólicas de Eixo Vertical
VEPC	Veículos Elétricos a Pilha de Combustível

Lista de Símbolos

β	Ângulo de matriz
Ω	Indicador de desempenho
λ	Coefficiente de velocidade periférica do rotor
C_p	Coefficiente de Potência
e^-	Eletrões
GWh	Giga Watt hora
H^+	Protões
H_2	Hidrogénio
H_2O	Água
kWp	Quilo Watt-pico
Nm^3/h	Normal metro cúbico por hora
OH	Hidroxilo
O^{2-}	Óxido
Wp	Watt-pico

Capítulo 1

Introdução

O objetivo deste trabalho é desenvolver um projeto académico, que não considera eventuais restrições impostas pela legislação de proteção do Parque Natural da Serra da Arrábida e de suas zonas limítrofes, onde se insere a vila de Palmela. Contudo, este trabalho poderá ser proposto à Câmara Municipal de Palmela, na tentativa de disponibilizar aos cidadãos do concelho a oportunidade de usufruir de transportes públicos não poluentes: miniautocarros com motores elétricos acionados por pilha de combustível de hidrogénio. Não obstante que não serão considerados os custos que um projeto inovador deste tipo possui, nem feita uma análise de viabilidade económica da solução apresentada.

Uma vez que o objetivo deste trabalho consiste em estudar uma proposta de transição energética nos transportes públicos, pretende-se implementar uma central produtora de hidrogénio “verde” recorrendo às fontes de energia renováveis (FER). Isto é, através da energia solar fotovoltaica, coletada por painéis fotovoltaicos instalados na cobertura da central e em pontos de estacionamento público, funcionamento como palas de sombreamento, e da energia eólica, inserindo um conjunto de turbinas eólicas ICON da empresa belga “Wingardium-Energy” nos pontos mais altos da vila de Palmela.

Os pré-requisitos definidos para este projeto são os seguintes:

- Utilização de miniautocarros, que servirão de apoio às atuais viaturas que circulam na zona urbana de Palmela;
- Identificação dos potenciais locais de instalação de turbinas eólicas e de painéis fotovoltaicos e determinação da quantidade mínima para a produção por fontes renováveis da energia elétrica necessária;
- As turbinas eólicas instaladas em locais públicos com boa exposição ao vento e onde não perturbem a população;
- Os painéis fotovoltaicos instalados na cobertura da central e em locais públicos, permitindo o seu sombreamento;
- Identificação das distâncias diárias a percorrer pelos miniautocarros e da quantidade de hidrogénio “verde” necessário, garantindo uma margem de segurança mínima de 15% de reserva;
- Determinação da quantidade de energia elétrica renovável a gerar para a produção do hidrogénio “verde” necessário;
- Seleção dos equipamentos adequados para a produção de hidrogénio “verde” e definição do layout geral da central;
- Seleção da localização da central produtora de hidrogénio “verde”;
- Assegurar a boa gestão da energia elétrica e das reservas de hidrogénio na central de

produção de hidrogénio “verde”, prevendo o armazenamento em baterias ou a venda à rede do excesso de energia elétrica produzida e a aquisição sempre que for necessário, otimizando a produção de hidrogénio com o armazenamento;

- Considerar a venda do oxigénio, que é um subproduto da eletrólise da água, às indústrias de vidro, cerâmica, polímeros, metalúrgicas e estações de tratamento de águas residuais (ETAR).

A Figura 1 ilustra os vários níveis que constituem o sistema de apoio de mobilidade verde pretendido, que são:

- Painéis FV e Turbinas eólicas (de eixo vertical) ICON, que garante a iluminação mesmo sem vento, dado que é também alimentada por bateria carregada por pequeno coletor FV e podendo ser equipada com câmara de vigilância (opcional);
- A energia elétrica, de auto produção ou adquirida à rede, é usada para preparar o tipo de água que será utilizada na produção de hidrogénio por eletrólise;
- Os terceiro e quarto níveis ilustram a produção de hidrogénio “verde”, seu armazenamento e abastecimento para utilização nas viaturas.

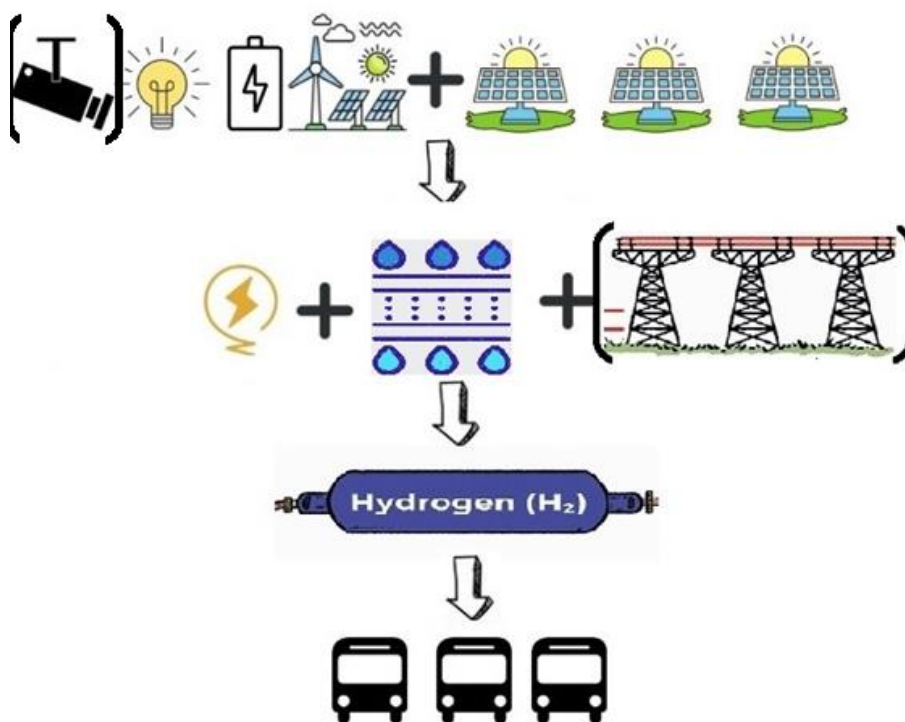


Figura 1-Esquema do sistema de apoio mobilidade verde para os transportes públicos em Palmela

Capítulo 2

Aproveitamento da energia eólica

Neste capítulo serão apresentadas e sucintamente descritas as principais famílias de turbinas utilizadas no aproveitamento da energia eólica. Posteriormente serão apresentados alguns casos de estudo de aplicação de Turbinas de Eólicas de Eixo Vertical (TEEV) para descrever as suas principais características e fundamentar a sua utilização neste projeto.

2.1. Recurso eólico e principais tipos de turbinas

Uma das principais fontes de energia renovável (FER) que é utilizada atualmente na geração de energia elétrica é a energia eólica. No entanto, desde a antiguidade que este recurso energético é utilizado para impulsionar barcos e acionar moinhos.

Os ventos são causados por diferenças de pressão atmosférica ao longo da superfície terrestre, que se devem aos gradientes térmicos gerados pelo diferente aquecimento do ar pela radiação solar recebida pelo planeta. A radiação solar é mais intensa nas zonas equatoriais do que nas zonas polares e aquece mais a superfície terrestre do que a oceânica, conduzindo a gradientes térmicos que induzem o movimento das massas de ar. Ou seja, de forma simplificada, a origem do vento é a radiação solar que o planeta recebe.

É de realçar que os ventos mais fortes, mais constantes e mais persistentes ocorrem em bandas situadas a cerca de 10 km da superfície da Terra [1], embora a essa altura não seja possível o seu aproveitamento para converter em energia elétrica. Na Figura 2 pode-se observar a representação simplificada do vento à escala planetária.

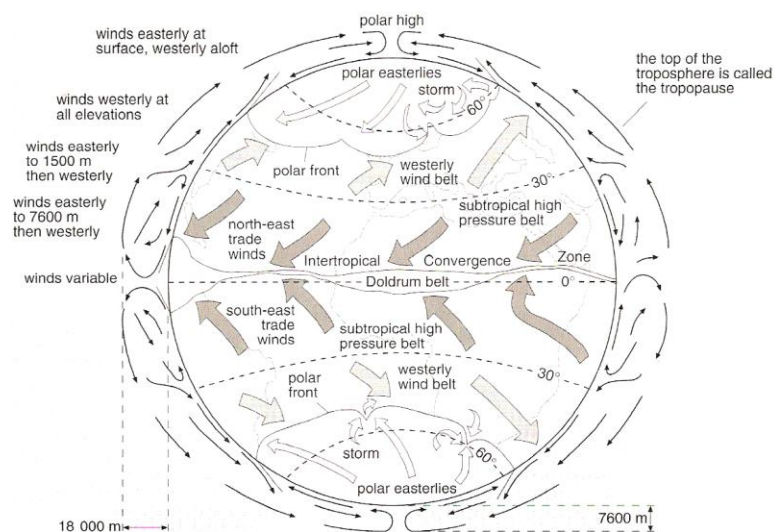


Figura 2-Representação simplificada do vento à escala planetária (extraído de [2])

Uma condição necessária para o aproveitamento da energia cinética contida no vento é a existência de um fluxo permanente e com velocidade razoavelmente elevada. Os aerogeradores modernos são projetados para atingirem a potência máxima ou potência “nominal”, para velocidades do vento da ordem de 13 a 16 m/s e, tipicamente, são desativados para velocidades superiores a 25 m/s.

De salientar que a informação sobre o recurso eólico de um local, independentemente das características das turbinas a instalar, pode ser apresentada em termos de densidade de potência disponível no vento (W/m^2), isto é, a potência por unidade de área varrida pela turbina (ver Figura 3), retirada de [1].

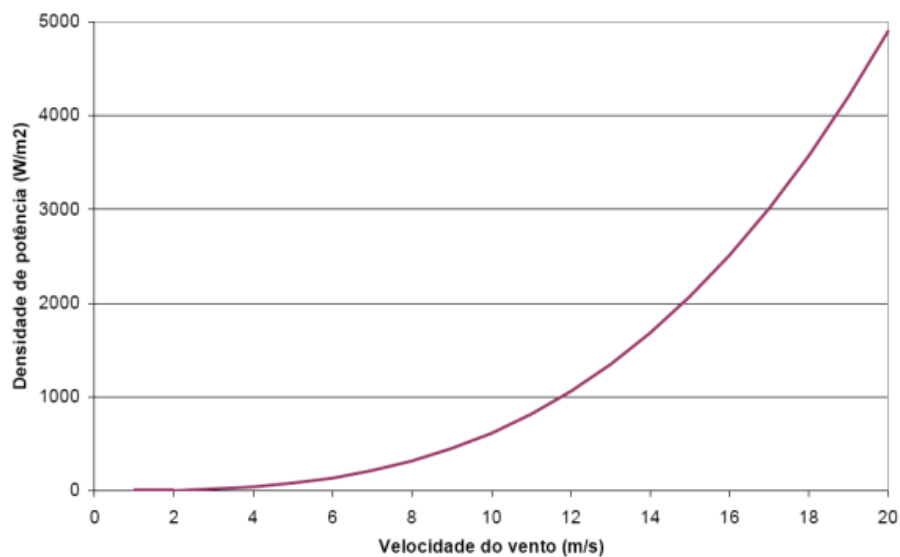


Figura 3-Densidade de potência disponível no vento (extraído de [1])

Como a potência disponível no vento não pode ser integralmente convertida em potência mecânica no veio da turbina, visto que, depois de atravessar o plano das pás tem de sair com velocidade não nula, tem-se um limite máximo teórico, conhecido por limite de Betz e também como coeficiente de potência máximo, C_p , para o rendimento da conversão, cujo valor é aproximadamente 59,3%. Todavia, este é o limite máximo teórico, que não é atingido devido às diversas perdas mecânicas existentes nas pás do rotor das turbinas. Apesar de todas as perdas mecânicas e elétricas existentes nas turbinas eólicas, as mais modernas de maior dimensão conseguem converter em energia elétrica cerca de 48% a 50% da potência disponível no vento. O que representa mais de 80% do valor máximo teórico que é 59,3% [1].

De acordo com o princípio básico de funcionamento, são duas as famílias de turbinas eólicas que existem:

- **Turbinas de resistência (*Drag-type*):** o princípio de funcionamento baseia-se na variação da força de resistência aerodinâmica das pás do rotor consoante a orientação ao vento. Este tipo de turbina tem as seguintes características:
 - Velocidade de rotação baixa e binário elevado;
 - Baixa eficiência (coeficiente de potência reduzido);

- Construção simples e baixo custo de fabrico;
 - Vulgarmente com eixo vertical, pode em alguns casos ser horizontal, dependente do local onde se pretende instalar a turbina.
- **Turbinas de sustentação (*Lift-type*):** o princípio de funcionamento baseia-se na força de sustentação criada pela passagem do ar pelas pás do rotor, que possuem a forma de perfil alar (corpo sustentador). O binário motor resulta da soma da componente útil da força de sustentação dos perfis alares que formam as pás do rotor da turbina. Este tipo de turbina tem as seguintes características:
 - Velocidade de rotação elevada e binário reduzido;
 - Média a elevada eficiência (coeficiente de potência elevado);
 - Construção complexa devido à forma das pás, que aumenta o custo de fabrico;
 - Em relação ao eixo de rotação, o escoamento de ar pode ser axial ou radial;
 - Pode ter eixo vertical (escoamento radial) ou horizontal (escoamento axial), sendo diferente a sua construção. As principais características são:
 - **Turbinas Eólicas de Eixo Vertical (TEEV):** as pás do rotor da turbina estão posicionadas em lados opostos do eixo de rotação. Possuem binário de arranque nulo ou baixo, sendo necessário um sistema de arranque. O escoamento é radial em relação ao eixo de rotação;
 - **Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal (TEEH):** as pás do rotor da turbina ficam posicionadas radialmente em torno do eixo de rotação. Têm capacidade de arrancar autonomamente, pois possuem binário de arranque. O escoamento de ar é axial, atravessando as pás do rotor paralelamente ao eixo de rotação. O número de pás do rotor condiciona a sua velocidade de rotação, a eficiência e o binário, pois quando maior o número de pás menor é a velocidade de rotação e a eficiência máxima e maior será o binário. O número ótimo de pás ronda as três.

Na Figura 4, Figura 5 e Figura 6 apresentam-se imagens de várias configurações da turbina de resistência do tipo "Savonius".



Figura 4-Pequena turbina de resistência tipo "Savonius" (extraído de [3])

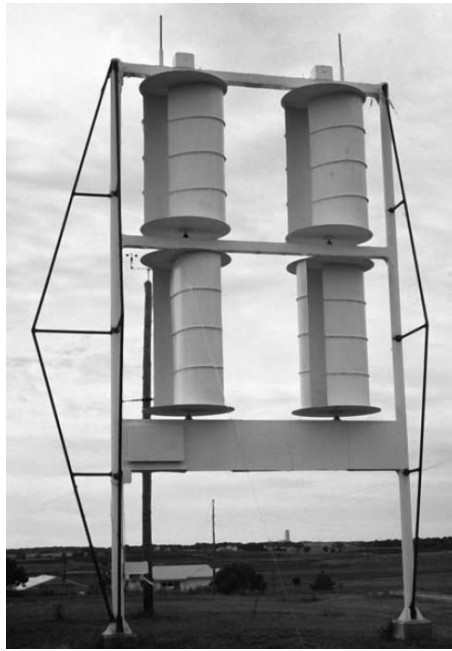


Figura 5-Modelo experimental de turbina de resistência tipo "Savonius"
(extraído de [4])



Figura 6-Turbina de resistência de pás helicoidais tipo "Savonius"
(extraído de [5])

Na Figura 7, Figura 8 e Figura 9 apresentam-se imagens de várias configurações das turbinas eólicas de sustentação de eixo vertical do tipo "Darrieus". Nas configurações mais comuns os rotores podem ter duas ou três pás com forma troposkiana, retilíneas ou helicoidais.



Figura 7-Turbina de sustentação tipo “Darrieus” (pás de forma troposkiana)
(extraído de [2])

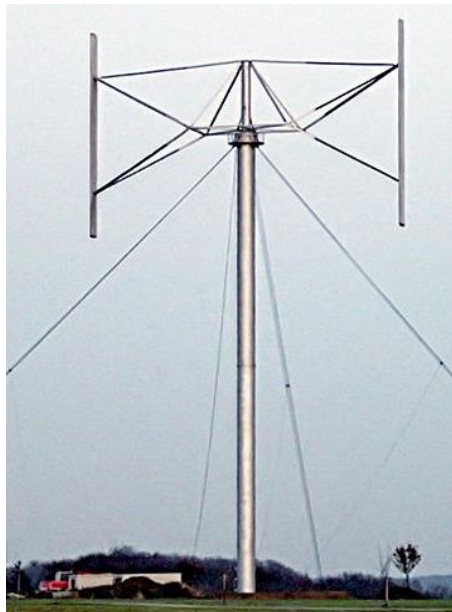


Figura 8-Turbina de sustentação tipo “Darrieus” (H-rotor)
(extraído de [2])



Figura 9-Turbina de sustentação tipo “Darrieus” (pás helicoidais)
(extraído de [5])

Na Figura 10 apresenta-se uma imagem da turbina eólica de sustentação de eixo vertical do tipo “Cross-flow”. O rotor possui as pás retilíneas na sua periferia e o escoamento de ar atravessa as pás duas vezes, uma de fora para dentro e outra de dentro para fora.



Figura 10-Turbina de sustentação tipo “Cross-flow”
(extraído de [6])

Na Figura 11, Figura 12 e Figura 13 apresentam-se imagens de várias configurações das turbinas eólicas de sustentação de eixo horizontal. Este tipo de turbinas tem sido utilizadas desde a antiguidade, como provam as geometrias usadas no moinho português ou no holandês. Mais recentemente, há exemplos da utilização deste tipo de turbinas para acionar bombas para extrair água de poços ou furos em regiões remotas, como é o caso do moinho tipo americano. Nas geometrias atuais as turbinas axiais de elevada potência possuem pás esbeltas sendo três o número de pás mais usual.



Figura 11-Turbina de sustentação de eixo horizontal (moinho português)
(extraído de [7])



Figura 12-Turbina de sustentação de eixo horizontal (moinho tipo americano)
(extraído de [8])



Figura 13-Turbinas de sustentação de eixo horizontal de três pás
(extraído de [9])

A Figura 14 ilustra os coeficientes de potência, C_p , das diversas turbinas eólicas em função dos coeficientes de velocidade periférica dos rotores λ , definido como o quociente entre a velocidade periférica da extremidade da pá do rotor e a velocidade de aproximação do vento.

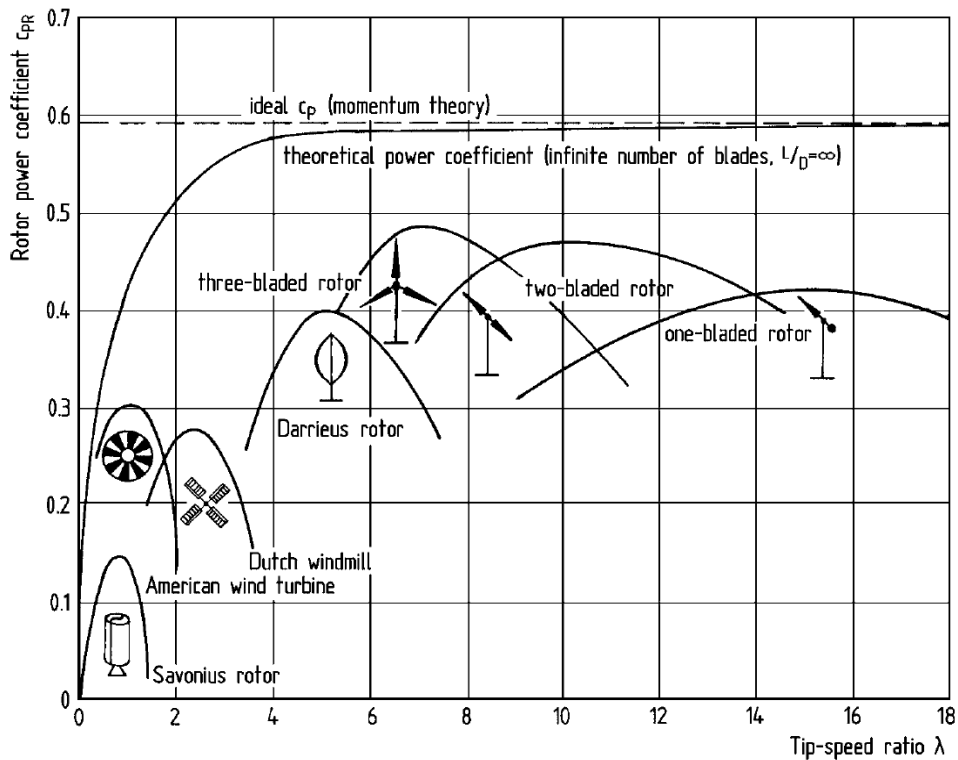


Figura 14-Representação do C_p em função do λ de alguns tipos de turbinas eólicas (extraído de [2])

2.2. Seleção do tipo de turbinas eólicas

De acordo com Hansen [10], no Reino Unido todos os parques eólicos de grande escala, mais que 40 turbinas, são constituídos por turbinas eólicas de eixo horizontal (TEEH), que são cada vez de maior dimensão e mais eficientes. Este tipo de turbinas, que é o mais utilizado e com unidades de maior potência, tem impactos negativos e a sua instalação nas proximidades de aglomerados populacionais nem sempre é bem aceite. O elevado impacto visual, o ruído de baixa frequência, a variação da luz solar devido à passagem das pás, a colisão de aves com as pás, entre outros, são aspetos que as populações contestam.

Para se manter o objetivo de instalar turbinas eólicas em zonas urbanas ou próximas, o tipo de turbinas não deve ser de elevada potência nem ter muitos impactos negativos que a população possa contestar. Sendo as turbinas eólicas axiais de eixo horizontal turbinas com as pás radiais sem proteção, o seu movimento de rotação, a elevada velocidade periférica, causa ruídos aerodinâmicos e possui riscos de segurança em caso de quebra das pás. Apesar de serem as turbinas que potencialmente possuem melhor eficiência, os aspetos referidos levam a que a opção das turbinas eólicas de eixo horizontal não seja considerada uma opção adequada para este projeto.

Segundo Hansen [10], as turbinas eólicas de eixo horizontal inseridas em parques eólicos sofrem o efeito da perturbação do escoamento causado pela primeira fila de turbinas que pode

reduzir cerca de 40% a potência das filas seguintes. Segundo os autores, as turbinas eólicas de eixo vertical não sofrem este efeito, uma vez que concluíram que:

- Este tipo de turbinas demonstram ter um desempenho oposto às TEEH quando são implementadas em parques eólicos (ver Figura 15);
- Os custos de instalação e manutenção são mais baixos devido aos componentes de maior peso ficarem instalados ao nível do solo e possuírem menos peças móveis, tornando-se mais fáceis de instalar e manter;
- Ao contrário das TEEH, poderão ser instaladas em locais com condições de vento mais variáveis [10].



Figura 15-Exemplo de um parque eólico de TEEV offshore
(extraído de [10])

A principal desvantagem das TEEV são a menor eficiência, atingindo valores do coeficiente de potência (C_p) entre 35%-40%, quando as TEEH se encontram próximo de 50%. Adicionalmente, possuem baixo binário de arranque que, para algumas configurações, obriga a fornecer energia externa para acelerar a turbina desde as baixas velocidades angulares até à relação ideal de velocidade (λ) [10].

Assim, com base nos resultados obtidos, Hansen [10] e a sua equipa retiraram as seguintes conclusões:

- As simulações bidimensionais de CFD produziram resultados precisos quando comparadas aos testes de túnel de vento, uma vez que se averiguou, que os valores estavam dentro de 6,5% dos dados experimentais para os layouts considerados;
- O maior desempenho dos pares resultou predominantemente de um campo de escoamento distorcido que se estabeleceu nas proximidades dos TEEV e, nessas regiões, o fluido viajou com uma velocidade maior do que a velocidade de fluxo livre;
- Finalmente os autores afirmam que as aplicações potenciais para as TEEV são ilimitadas, porque as turbinas são mais baratas e fáceis de fabricar e de manter. Não obstante que existe o fator comum, que o parque de TEEV provavelmente não será limitado pela eficiência das turbinas, mas pela energia eólica disponível no local em questão [10].

O caso de estudo liderado por Li [11] consiste numa investigação experimental sobre características de ruído das TEEV de pequena escala em ambientes urbanos.

De acordo com os autores, o ruído de baixa frequência afeta cada vez mais os seres humanos quando a velocidade do vento aumenta. Como tal, a frequência de passagem das pás do rotor foi considerada como um parâmetro importante na geração de ruído de baixa frequência. O que significa que Li [11] e a sua equipa analisaram a poluição sonora de vários desenhos com base nas normas nacionais de diferentes países, validando a conceção ótima para o ambiente urbano de uma turbina eólica de eixo vertical com o mínimo impacto sonoro.

Desta forma os cientistas realizaram ensaios laboratoriais a diferentes velocidades de vento num túnel de vento de investigação acústica e ao analisarem a densidade do espectro de potência (PSD) através de diversas velocidades de vento, os autores retiraram as seguintes conclusões:

- A frequência de passagem da pá (BPF) das TEEV está correlacionado com a principal fonte de ruído de baixa frequência;
- Geralmente, o lado do barlavento das TEEV é uma importante região fonte de ruído. Com um aumento da velocidade do vento, o nível de ruído aumenta na gama de baixas frequências (<1000 Hz);
- A relação entre o diâmetro do eixo e o diâmetro do rotor das TEEV é um fator importante, que afeta as suas características sonoras. Além disso, o efeito da turbulência autoinduzida sobre as características do ruído varia com a condição de funcionamento das TEEV;
- De acordo com os resultados obtidos nos países europeus, como o Reino Unido e a Alemanha, os padrões de controlo do ruído são relativamente elevados, sob uma condição de velocidade do vento de 10 m/s durante a noite, o ruído emitido pelas TEEV atinge o padrão de controlo do ruído destes países a distâncias superiores a 260 m. Todavia, o ruído está em conformidade com a norma de controlo de ruído a distâncias de 160 m em alguns países, como os EUA por exemplo. Portanto, a disposição dos TEEV deve ter em conta as normas de controlo do ruído de cada país [11].

Uma vez que o caso de estudo liderado por Li [11] realça a importância do baixo ruído que as TEEV de pequena escala podem emitir em ambientes urbanos, pelo que, as turbinas ICON cumprem os requisitos dado que têm baixa emissão de ruído (abaixo de 38 dB) (ver 2.3).

2.3. Caracterização das turbinas ICON

Nesta secção pretende-se fazer uma breve descrição das TEEV que serão propostas e respetivas características e fazer um estudo dos pontos mais aconselháveis para a implementação destas turbinas eólicas.

Como foi referido anteriormente pretende-se implementar TEEV nos pontos mais vantajosos na vila de Palmela, desta forma são propostas as turbinas ICON da empresa “Wingardium-energy”, com o objetivo de gerar energia elétrica para auxiliar o funcionamento da

central de produção de hidrogénio (ver Figura 16 e Figura 17).

Optou-se pelas turbinas ICON pelas seguintes razões:

- Segurança de não haver pás expostas;
- Baixo ruído gerado, que é um fator muito relevante, nomeadamente se as turbinas forem instaladas em ambientes urbanos;
- Baixo impacto visual (turbina posicionada a pouca altura e com um visual discreto);
- Simplicidade de construção e de manutenção.

Na Tabela 1 apresentam-se as características técnicas e respetivas dimensões das turbinas, enquanto a Figura 18 ilustra a curva de potência das TEEV propostas.

É de notar que:

- Em relação à iluminação (ver Figura 16), o sistema está implementado sob a turbina e é acionado quando as condições de luz natural é insuficiente, período noturno, ou quando a zona estiver sombreada [12];
- No parâmetro “sistema de travagem-carga dinâmica” (ver Tabela 1): significa que quando a velocidade do vento é demasiado elevada o sistema aplicará carga adicional de potência/resistência ao gerador, para abrandar o rotor da turbina [13].



Figura 16-Turbinas-poste de iluminação, ICON, da empresa “Wingardium-energy” (gentilmente cedida pela própria entidade [12])

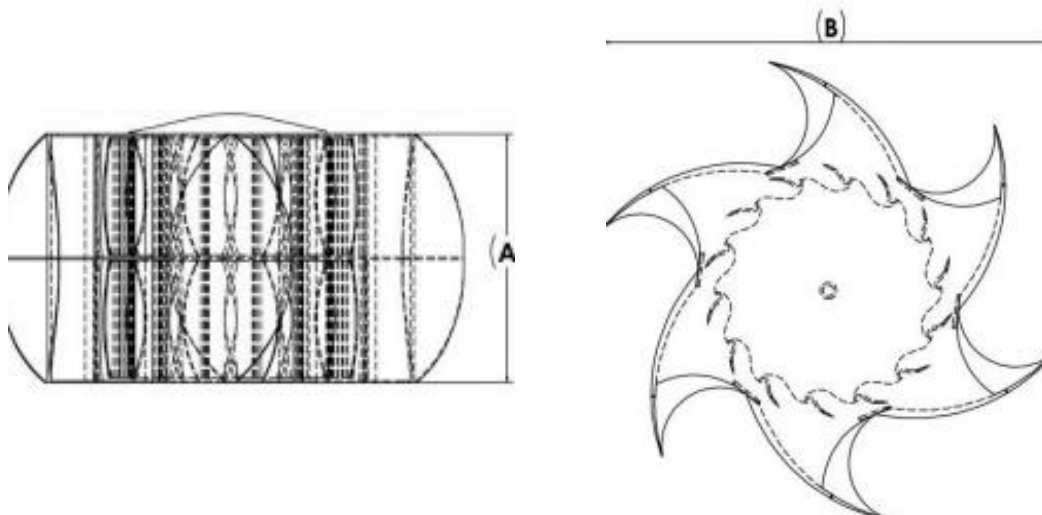


Figura 17-Geometria do rotor da turbina ICON

Cordialmente cedido pela organização “Wingardium-energy” (extraído de [13])

Tabela 1-Características técnicas das turbinas ICON da empresa “Wingardium-energy” (cedidas cordialmente pela própria empresa [13])

Características técnicas	Especificações
Amplitude de vento	1,3 – 56 m/s
Potência nominal a 12 m/s	750 W
Potência máxima de saída	1,1 kW
Velocidade do vento de arranque	1,3 m/s
Dimensões totais do rotor	1,2 m (altura-A) × 2,1 m (diâmetro-B)
Peso	25 kg
Altura do poste de fixação	8 m
Gerador	Fluxo axial multifase/expansível
Ruído	< 38db
Recomendação de altura de instalação	3 m acima dos obstáculos
Sistema de travagem	Carga Dinâmica

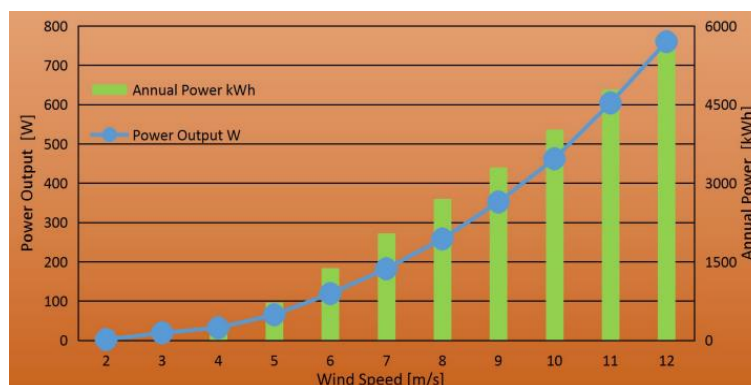


Figura 18-Curva de potência das turbinas ICON da empresa “Wingardium-energy” (cedido cordialmente pela própria empresa [13])

2.4. Estudo dos locais para a implementação das turbinas eólicas

Como se pretende implementar as turbinas ICON da empresa “Wingardium-energy” na vila de Palmela, neste subcapítulo serão estudados e revelados os locais propostos para a instalação das referidas turbinas.

Desta forma, foi efetuado um estudo em redor da vila recolhendo informações sobre o histórico da velocidade do vento nos últimos 30 anos e considerando a rosa dos ventos, visto que permite verificar se os locais pretendidos são os mais recomendáveis.

Com base na Figura 19 verifica-se que o vento é predominante oriundo de Noroeste (NO), Norte-noroeste (NNO) e Oeste-noroeste (ONO).

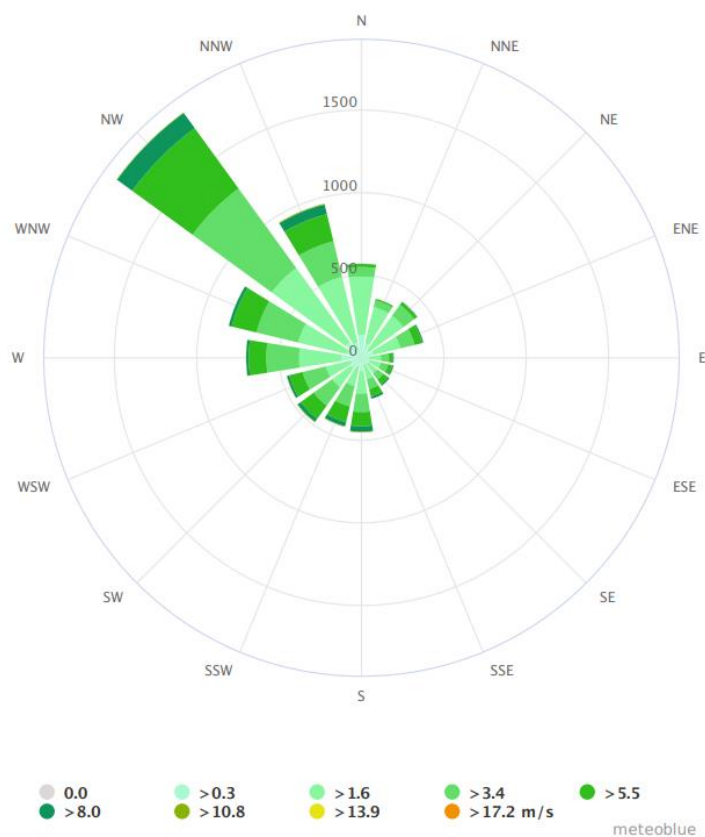


Figura 19-Rosa dos ventos e velocidade média do vento em Palmela nos últimos 30 anos (extraído de [14])

A seleção dos locais foi efetuada realizando uma pesquisa através da plataforma “Google Earth”, considerando os pontos colaterais e subcolaterais da rosa dos ventos (ver Figura 19) e posteriormente realizando simulações aos locais pretendidos através da plataforma “Global Wind Atlas”, com o objetivo de obter, as coordenadas geográficas e a densidade de potência disponível para as turbinas.

A Figura 20 ilustra genericamente as respetivas localizações, enquanto na Tabela 2 se apresenta a localização exata dos locais propostos para a implementação das turbinas eólicas e respetivos dados técnicos.



Figura 20-Localização dos pontos de implementação das turbinas "ICON" na vila de Palmela vista através da plataforma "Google Earth" (extraído de [15])

Tabela 2-Locais propostos para a implementação das turbinas "ICON" na vila de Palmela

Legenda	Pontos propostos na vila de Palmela	Coordenadas		Predominância do vento com base na rosa dos ventos	Densidade de potência disponível [W/m ²]
		Latitude [°]	Longitude [°]		
1	Jardim da Alameda	38,57083	-8,905666	ONO	214
2	Miradouro do moinho	38,567038	-8,902997	NO	241
3	Miradouro Tejo, Sado e Atlântico	38,565703	-8,902811	NO	244
4	Caminho dos Moinhos	38,560587	-8,926091	NO	291
5	Terraço do castelo de Palmela	38,565916	-8,899339	NO	234
6	Traseiras da pousada de Palmela	38,56572	-8,902555	ONO	244
7	Estrada da cobra	38,561583	-8,900666	NO/NNO/ONO	256
8	Estrada romana	38,560862	-8,89837	NO/NNO/ONO	258
9	Miradouro de Palmela	38,565315	-8,898917	NO/NNO	252
10	Miradouro Dom Nuno Álvares Pereira	38,566898	-8,898569	NO/NNO/ONO	229
11	Largo de São João Baptista	38,57097	-8,903067	NO	196

Legenda	Pontos propostos na vila de Palmela	Coordenadas		Predominância do vento com base na rosa dos ventos	Densidade de potência disponível [W/m ²]
		Latitude [°]	Longitude [°]		
12	Jardim Joaquim José Carvalho	38,570611	-8,9027	NO/NNO/ONO	196
13	Biblioteca Municipal de Palmela (traseiras)	38,571386	-8,903527	NO	193
14	Traseiras do fontanário do largo de São João Baptista	38,571626	-8,903058	NO/ONO	193
15	Parque de estacionamento da escola Básica Joaquim José de Carvalho	38,572218	-8,902627	ONO	193
16	Rua Vítor Borrego	38,572286	-8,900451	NO	182
17	Avenida dos Bombeiros Voluntários de Palmela	38,571867	-8,899002	NNO/NO/ONO	175
18	Miradouro do Largo da Boavista	38,568074	-8,902579	ONO/NO/NNO	224
19	Rua José Luís da Silva Camolas	38,574957	-8,909431	NO/NNO	211
20	Rua Helena Cardoso	38,566592	-8,914612	NNO/NO/ONO	271
21	Rua Dr. Bernardo Teixeira Botelho	38,569739	-8,910249	NNO/NO	253
22	Rua Afonso de Albuquerque	38,56698	-8,903795	ONO/O	241
23	Av. dos Cavaleiros de Santiago e Espada	38,566425	-8,900504	NNO/NO	234
24	Rua Francisco Carvalho da Silva	38,573291	-8,902193	ONO	179
25	Adega da SIVIPA (traseiras)	38,578876	-8,896591	NNO/NO	159
26	Av. da Liberdade	38,574154	-8,902859	NNO/NO/ONO	184
27	Rua Manuel Augusto Mares	38,576132	-8,89629	NNO/NO/ONO	159
28	Rua da Serrinha	38,572527	-8,913935	NO	237
29	Rua Manuel Lucas Pereira-parque de estacionamento	38,571554	-8,912378	NO	236
30	Av. do Palmelense Futebol Clube	38,573278	-8,91134	NO	230
31	Largo do arrabalde	38,567401	-8,900216	NNO/NO/ONO	234
32	Av. Dr. Juíz José C.A. de Matos	38,570621	-8,900385	NO/ONO	186
33	Rua Portela	38,567318	-8,902887	NNO/NO	241
34	Descampado Avenida dos Bombeiros Voluntários de Palmela	38,572193	-8,898858	NNO	175
35	Fontanário do Largo de São João Baptista	38,571526	-8,902954	NO	193
36	Terraço do mercado municipal	38,568561	-8,901519	NO	211
37	Rua Augusto Cardoso	38,569975	-8,902481	NO/ONO	219

Legenda	Pontos propostos na vila de Palmela	Coordenadas		Predominância do vento com base na rosa dos ventos	Densidade de potência disponível [W/m ²]
		Latitude [°]	Longitude [°]		
38	Rua de Olivença	38,570405	-8,902244	NO	215
39	Rua Gago Coutinho e Sacadura Cabral	38,570007	-8,900685	NO	211
40	Rua do Arrabalde	38,568022	-8,900632	NNO/NO	215
41	Rua Mousinho d'Albuquerque	38,568358	-8,901781	NO	215
42	Rua da Ladeira	38,568381	-8,901947	NNO/NO	220
43	Rua Fernando Pésinho	38,570668	-8,910064	NO	236
44	Rua Escola Preparatória Hermenegildo Capelo	38,574561	-8,901204	NO	171
45	Rua Lúcio Borges da Costa-parque de estacionamento	38,572602	-8,900675	NO	182

A seleção dos locais teve em consideração a orientação predominante do vento, a orografia do terreno e a existência de obstáculos, naturais ou artificiais, que pudessem perturbar o escoamento de aproximação às turbinas. A densidade de potência eólica disponível nos locais é um dado necessário para determinar a potência elétrica disponibilizada pelas turbinas.

2.5. Potência elétrica gerada por fonte eólica

Após a seleção dos locais mais recomendáveis para implementação das turbinas ICON foi possível, através do recurso eólico disponível em redor da vila, apresentado na Figura 21, estimar a quantidade de energia elétrica que será gerada pelas turbinas eólicas.

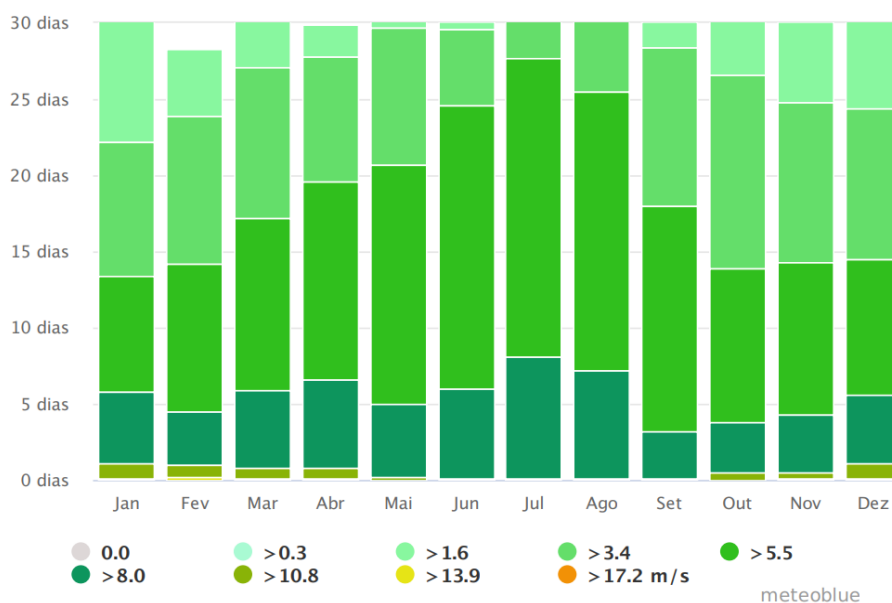


Figura 21-Registos da velocidade do vento em Palmela nos últimos 30 anos (extraído de [14])

A sequência a metodologia de cálculo foi a seguinte:

- Determinação do coeficiente de potência (C_p) da turbina ICON, com base nos dados disponibilizados pelo fabricante;
- Estimativa da potência eólica disponível para a turbina ICON, considerando os dados recolhidos através da plataforma “meteoblue” [14] (ver Figura 21);
- Estimativa da potência elétrica disponibilizada mensalmente por uma turbina ICON para as condições de vento existentes no local;
- Determinação da quantidade média de energia elétrica gerada anualmente por uma turbina ICON, num ano típico em Palmela.

É de notar que os cálculos foram efetuados considerando apenas uma turbina ICON, localizada num ponto com recurso eólico representativo do local. Os detalhes dos cálculos realizados são apresentados no Anexo 1.

Nas especificações técnicas da turbina ICON que a empresa “Wingardium-energy” disponibilizou, consta a informação apresentada na Figura 22, que permite determinar o coeficiente de potência da turbina em função da velocidade do vento que lhe incide. É também apresentada a estimativa da produção anual de energia elétrica.

Wind speed	Power Output	Annual Power
m/S	W	kWh
2	2	18
3	19	98
4	32	312
5	65	728
6	119	1382
7	182	2045
8	258	2701
9	352	3306
10	462	4023
11	604	4788
12	760	5832

Figura 22-Potência da turbina ICON da “Wingardium-energy” e estimativa da energia gerada anualmente (extraído de [13])

A potência disponível no vento, em função da velocidade, é calculada através da equação 2.1:

$$P_{disp} = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times u^3 \quad 2.1$$

Onde:

- P_{disp} - Potência disponível no vento [W];
- ρ - Massa volúmica do ar [kg/m³];
- A - Secção plana transversal da turbina [m²];
- u - Velocidade do vento de aproximação [m/s].

Na Tabela 3 apresentam-se os valores calculados para a potência disponível no vento até à velocidade de 12 m/s.

Tabela 3-Determinação da potência eólica disponível em função da velocidade do vento

Constante	ρ [kg/m ³]	A [m ²]	u [m/s]	P_{disp} [W]
0,5	1,225	2,52	2	12,35
			3	41,67
			4	98,78
			5	192,94
			6	333,40
			7	529,42
			8	790,27
			9	1125,21
			10	1543,50
			11	2054,40
			12	2667,17

Com os valores da potência útil disponibilizada pela turbina e da potência disponível no vento é possível determinar o coeficiente de potência da turbina através da equação 2.2, que é entendido como o rendimento efetivo da conversão numa turbina eólica, que é dado pelo quociente entre essas duas potências:

$$C_p = \frac{P_{\acute{u}til}}{P_{disp}} \quad 2.2$$

Em que:

- C_p - Coeficiente de potência da turbina;
- $P_{\acute{u}til}$ - Potência útil da turbina [W];
- P_{disp} - Potência disponível no vento [W].

Na Figura 23 apresentam-se as evoluções da potência disponível no vento e da potência útil da turbina ICON em função da velocidade do vento. Os valores dos coeficientes de potência da turbina em função da velocidade do vento são apresentados na Tabela 4.

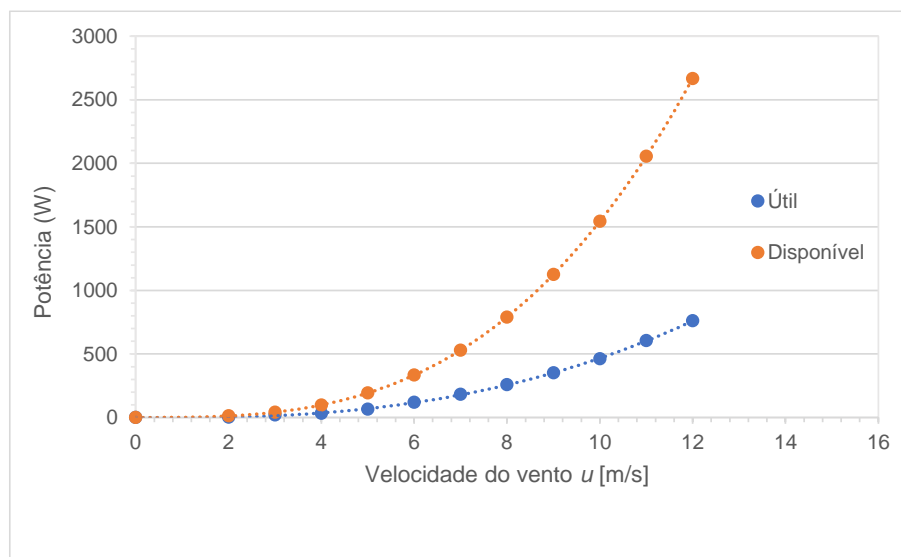


Figura 23-Evoluções da potência disponível e da potência útil em função da velocidade do vento

Tabela 4-Potências disponíveis e úteis em função da velocidade do vento respectivos valores do C_p da turbina ICON

P_{disp} [W]	P_{util} [W]	C_p
0	0	0
12,35	2	0,16
41,67	19	0,46
98,78	32	0,32
192,94	65	0,34
333,40	119	0,36
529,42	182	0,34
790,27	258	0,33
1125,21	352	0,31
1543,50	462	0,30
2054,40	604	0,29
2667,17	760	0,28

Com os resultados obtidos do C_p , ver Tabela 4, representaram-se na Figura 24 os pontos para as velocidades do vento consideradas, cujos valores foram aproximados por uma curva polinomial de grau três, com boa correlação. Em virtude de se considerar que os dados disponibilizados pela empresa “Wingardium-energy” apresentam uma irregularidade para a velocidade de 3 m/s, optou-se por não se considerar esse ponto na aproximação polinomial realizada, tendo sido assinalado com uma cor diferente.

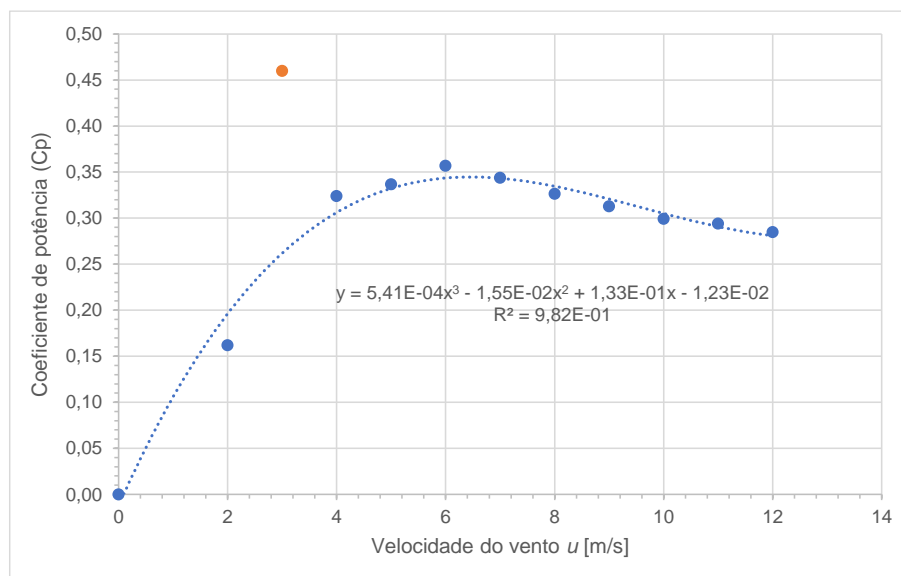


Figura 24-Evolução do C_p em função da velocidade do vento da turbina ICON

A equação 2.3 é a equação polinomial de terceiro grau que aproxima a evolução do coeficiente de potência da turbina ICON apresentada na Figura 24.

$$C_p = 5,41 \times 10^{-4} \cdot u^3 - 1,55 \times 10^{-2} \cdot u^2 + 1,33 \times 10^{-1} \cdot u - 1,23 \times 10^{-2} \quad 2.3$$

Onde:

- C_p - Coeficiente de potência;
- u - Velocidade do vento [m/s].

A equação 2.3 irá ser utilizada para o cálculo da potência disponibilizada pela turbina em função da velocidade do vento. Usando os dados da velocidade média mensal do vento num ano típico em Palmela, será estimada a energia elétrica produzida anualmente por uma das turbinas a instalar.

Considerando os dados apresentados da Tabela 5 que foram retirados da Figura 21 e aplicando a equação 2.3, da qual é possível retirar os valores do C_p em função das velocidades de vento, poder-se-á determinar a potência útil da turbina através da equação 2.4.

$$P_{\text{útil}} = C_p \times P_{\text{disp}} \quad 2.4$$

Em que:

- $P_{\text{útil}}$ - Potência útil fornecida nos terminais do gerador [W].

Tabela 5-Histórico da velocidade do vento em Palmela nos últimos 30 anos
(extraído de [14])

u [m/s]	Jan. (dias)	Fev. (dias)	Mar. (dias)	Abr. (dias)	Mai. (dias)	Jun. (dias)	Jul. (dias)	Ago. (dias)	Set. (dias)	Out. (dias)	Nov. (dias)	Dez. (dias)
>1,6	8,8	4,4	3,9	2,1	1,3	0,4	0,3	0,1	1,6	4,4	5,3	6,6
>3,4	8,8	9,7	9,9	8,2	9	5	3	5,4	10,4	12,7	10,5	9,9
>5,5	7,6	9,7	11,3	13	15,7	18,6	19,6	18,3	14,8	10,1	10	8,9
>8,0	4,7	3,5	5,1	5,8	4,8	5,9	8	7,1	3,1	3,3	3,8	4,5
>10,8	1	0,8	0,7	0,7	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,5	0,4	1
>13,9	0,1	0,2	0,1	0,1	0	0	0	0	0	0	0,1	0,1
>17,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total (dias)	31	28,3	31	30	31	30	31	31	30	31	30,1	31

A Tabela 6 representa os resultados previstos para o C_p a potência útil que será fornecida nos terminais do aerogerador de uma turbina ICON, aplicando as equações 2.3 e 2.4, respetivamente.

De salientar de que foi efetuada uma média entre os intervalos de registo de velocidade do vento, isto é, efetuou-se uma média entre os valores que foram registados na Tabela 5. Por exemplo, na Tabela 6 a velocidade do vento de 2,5 m/s resultou da média entre 1,6 e 3,4 m/s, que foram retirados da Tabela 5.

Tabela 6-Resultados da potência útil

Constante	ρ [kg/m ³]	A [m ²]	u [m/s]	P_{disp} [W]	C_p	$P_{útil}$ [W]
0,5	1,225	2,52	2,5	24,12	0,23	5,59
			4,45	136,01	0,32	43,51
			6,75	474,70	0,34	163,41
			9,4	1282,01	0,31	403,23
			12,35	2907,42	0,28	812,02
			14	4235,36	0,29	1221,30

Assim, é possível determinar a produção de energia elétrica renovável anual durante um ano típico em Palmela através da equação 2.5:

$$E_{ren} = P_{útil} \times h \quad 2.5$$

Onde:

- E_{ren} - Produção de energia elétrica renovável (eólica) anual durante um ano típico em Palmela [Wh];
- h - Número de horas.

A Tabela 7 e a Figura 25 representa e ilustra os resultados obtidos acerca das produções mensais e anual por uma turbina ICON em Palmela, através dos quais se averiguou uma produção anual cerca de 1,44 MWh.

Tabela 7-Energia produzida por ano por uma turbina ICON

Meses	Energia [kWh]
Janeiro	108,08
Fevereiro	104,09
Março	121,11
Abril	132,53
Maio	121,50
Junho	137,27
Julho	159,41
Agosto	148,08
Setembro	101,07
Outubro	95,14
Novembro	98,39
Dezembro	112,10
Total	1438,8

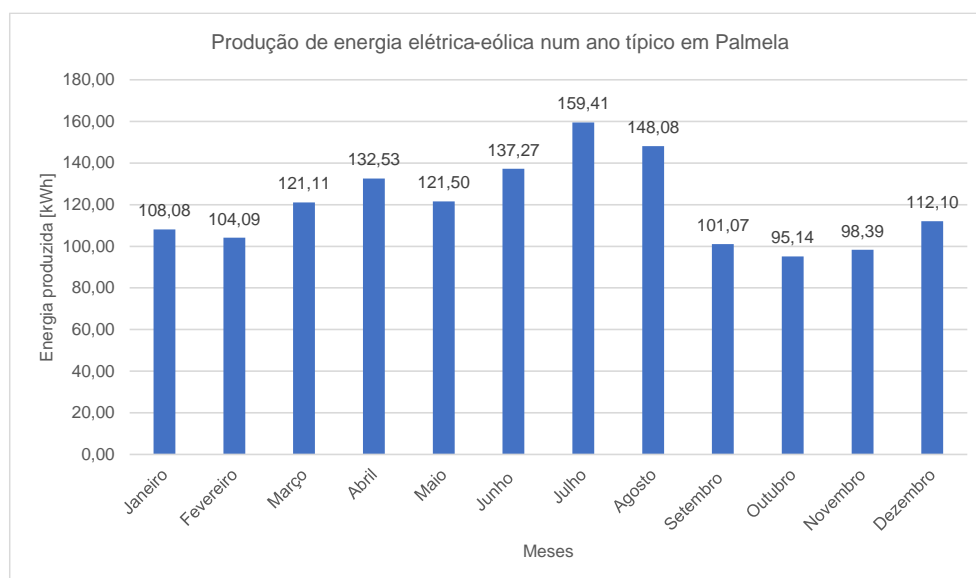


Figura 25-Produção de energia elétrica renovável (eólica) anual num ano típico em Palmela

Desta forma certifica-se que:

- O C_p mais elevado da turbina ICON é cerca de 0,36 correspondendo a uma velocidade de cerca de 6 m/s (ver Tabela 4 e Figura 24);
- O C_p mais elevado da turbina ICON na vila de Palmela é cerca 0,34 com uma velocidade de cerca 6,75 m/s (ver Tabela 6);
- O mês em que se averiguou maior produção de energia na vila foi em julho (ver Figura 25);
- A produção anual de energia eólica por cada turbina ICON na vila de Palmela é cerca de 1,44 MWh (ver Tabela 7)

Capítulo 3

Aproveitamento da energia solar

O presente capítulo será dedicado à energia solar fotovoltaica em que serão abordados os seguintes tópicos:

- Recurso solar fotovoltaico e tipos de painéis fotovoltaicos;
- Estudo dos locais para a implementação dos painéis fotovoltaicos.

3.1. Recurso solar fotovoltaico e tipos de painéis fotovoltaicos

A quantidade de radiação solar que chega à Terra é muito elevada. Em termos de ordem de grandeza pode-se referir que:

- O terremoto de São Francisco em 1906 atingiu uma magnitude 7,8 e estima-se que terá libertado a energia de 10^{17} J, que é igual à energia entregue pelo Sol num segundo.
- As reservas mundiais de petróleo estão avaliadas em $1,7 \times 10^{22}$ J, que é o valor da energia que a Terra recebe do Sol em 1,5 dias.
- O Sol entrega, em cada hora, à Terra a mesma energia que é usada nas atividades humanas num ano, cerca de $4,6 \times 10^{20}$ J.

A luz solar pode dar origem a combustíveis químicos através da fotossíntese natural ou artificial, a calor, para uso direto ou para conversão em eletricidade e diretamente a eletricidade, excitando elétrons numa célula fotovoltaica.

Tradicionalmente o desenvolvimento dos sistemas conversores de energia fotovoltaica (FV) processou-se com base no silício cristalino. As células FV mais comuns são constituídas por um material semicondutor, o referido silício, ao qual são adicionadas substâncias estranhas, ditas dopantes, de modo a criar um meio adequado ao estabelecimento do efeito FV, isto é, conversão direta da potência associada à radiação solar em potência elétrica em corrente contínua (DC).

A célula é o elemento mais pequeno do sistema FV, gerando tipicamente potências elétricas DC da ordem de 1,5 W (correspondentes a uma tensão de 0,5 V e uma corrente de 3 A). Para se obter potências maiores com a tensão pretendida, as células são ligadas em série e/ou em paralelo, formando módulos (tipicamente com potências DC da ordem de 100 a 200 W), cuja agregação dá origem ao que se denomina painéis fotovoltaicos. Para ligar os painéis à rede elétrica AC (corrente alternada) é necessário um equipamento de interface, isto é, um inversor DC/AC.

O efeito fotovoltaico é um fenómeno experimentado por certos materiais que têm capacidade de produzir uma corrente elétrica, quando são expostos à luz. Como tal, os sistemas de produção FV convertem diretamente energia solar em energia elétrica. Os sistemas são

constituídos por um conjunto de módulos de material semicondutor e um sistema de suporte, que inclui a cablagem, o inversor DC/AC, obrigatório em sistemas ligados à rede, ou a bateria e o regulador de carga, que são essenciais nos sistemas autônomos (ver Figura 26) [1].

Desta forma as tecnologias FV mais usuais são as de células de silício cristalino tais como:

- Silício monocristalino: obtido através do corte de um lingote (barra) de um monocristal de silício puro (ver Figura 27);
- Silício multicristalino ou policristalino: proveniente de um lingote de silício com múltiplos cristais (ver Figura 28).

De salientar que a uniformidade da estrutura molecular resultante da utilização de um cristal único é ideal para potenciar o efeito fotovoltaico; já as descontinuidades da estrutura molecular do silício policristalino dificultam o movimento de elétrons, o que reduz a potência de saída, ou seja, atingem valores de rendimento elétrico mais baixos do que as células monocristalinas. Todavia, as células multicristalinas apresentam custos de produção mais baixos (cerca de 20%) [1].

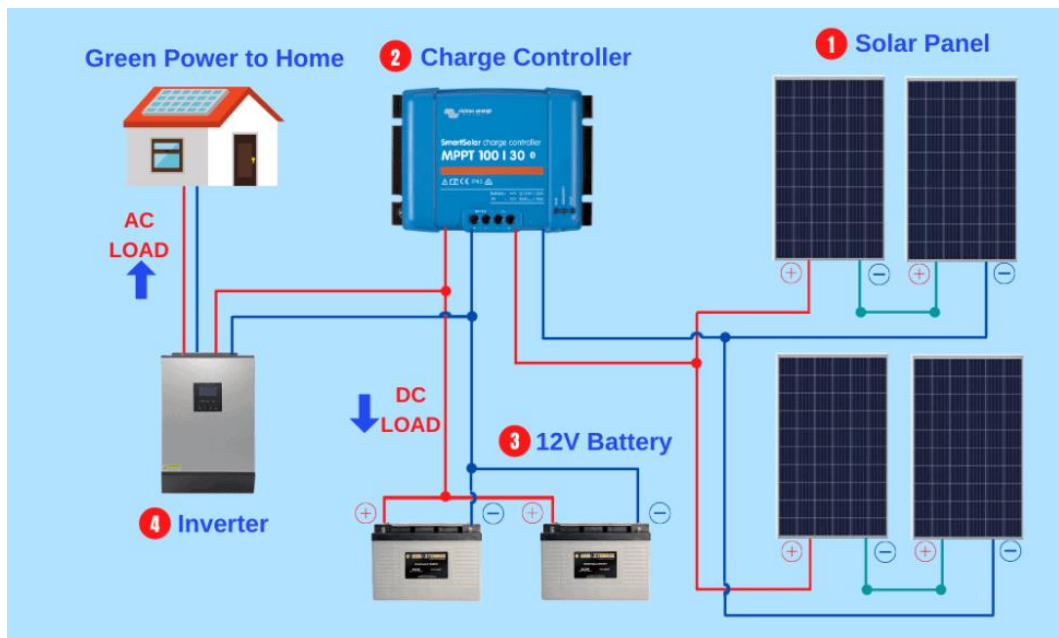


Figura 26-Constituição de um diagrama de um sistema FV para uma moradia (extraído de [18])



Figura 27-Painel FV monocristalino da marca: Jinko Solar, modelo: Tiger Neo N-type 78HL4-(V)
595-615 Watt
(extraído de [18])



Figura 28-Painel FV policristalino da marca: Jinko Solar, modelo: JKM265P-60
(extraído de [19])

Presentemente os sistemas FV são usados num conjunto vasto de aplicações das quais destacam-se:

- Aplicações de grande potência (unidades ou dezenas de megawatts), isto é, produção centralizada ligada à rede;
- Aplicações de média potência (dezenas ou centenas de quilowatts) como: eletrificação rural, por exemplo, abastecimento de cargas domésticas em locais remotos sem rede, bombagem de água e irrigação, complemento de abastecimento de locais remotos com ou sem rede; sistemas domésticos ligados à rede, designadamente em telhados de habitações localizadas em áreas urbanas ou rurais (microgeração);

- Aplicações de pequena potência (watts ou poucos quilowatts) tais como: acessórios de veículos automóveis, por exemplo, carregamento de baterias em veículos de campismo, sinais rodoviários e entre outros equipamentos.

Neste caso o tipo de aplicação mais adequada a este projeto são as de grande e média potência na qual os painéis FV poderão ser operados de três formas:

- Ligados à rede de energia elétrica preexistente à qual entregam toda a energia que a radiação solar lhes permite produzir. Para este efeito, é necessário um inversor que lhes serve de elemento de interface entre o painel e a rede, de modo a adequar as formas de onda das grandezas elétricas DC do painel às formas da onda AC exigidas pela rede;
- Em sistema isolado alimentando diretamente cargas, neste modo de funcionamento, o sistema terá de ser dimensionado para assegurar o abastecimento durante todo o ano. Em associação com coletores FV é ainda necessário dispor de: baterias de acumuladores, a fim de assegurar o abastecimento nos períodos em que o recurso é insuficiente ou não está disponível (as baterias são carregadas quando o recurso disponível permite obter uma potência superior à potência consumida); regulador de carga que efetua a gestão da carga de modo a obter perfis compatíveis com a radiação disponível e com a capacidade das baterias; inversor requerido, se houver cargas alimentadas em AC;
- Em sistema híbrido, alimentando diretamente cargas isoladas, em conjunto com outros conversores de energias renováveis, nesta situação, a energia eólica. Neste modo de operação, os dispositivos requisitados são os mencionados para o funcionamento em sistema isolado, podendo existir também um meio de produção convencional, geralmente o gerador diesel, para apoio e reserva [1].

Em relação aos ângulos de inclinação e de azimute (orientação), existem diversos estudos que calcularam os valores de inclinação que maximizaram a energia elétrica produzida por sistema FV fixos ligados à rede e verifica-se que o ângulo ótimo é cerca de 33° em quase todo o território português. No caso do azimute os painéis devem estar orientados para sul, ou seja, devem ter uma orientação de cerca de 180°. Todavia, o software “PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM” [19] permite que o utilizador possa obter os ângulos ótimos de inclinação e de azimute [1]. Como tal, os ângulos ótimos dos painéis FV serão determinados através do software.

Deste modo, o sistema FV será operado num sistema híbrido, o qual pretende-se incluir um banco de baterias, de modo a evitar, ou reduzir substancialmente, a aquisição de energia elétrica à rede nas horas de ponta e cheias, sempre que não se verifique produção de energia solar FV, tentando também assegurar que a energia final resulta de energia primária de origem renovável. Portanto, o pretendido é garantir que a energia elétrica seja, na quase totalidade, completamente “verde”.

3.2. Estudo dos locais para a implementação dos painéis fotovoltaicos

Na Figura 1 apresentou-se esquematicamente o sistema de apoio à mobilidade verde, em que a central de produção de combustível “verde”, que ficará situada no local 1 (ver Tabela 8 e Figura 29), será suportada pelas FER: eólica e solar fotovoltaica.

A primeira etapa do estudo da utilização da energia solar consistiu em determinar os ângulos ótimos de inclinação e de azimute dos painéis através do portal “PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM” [19] cujos resultados foram:

- 34° e 5/185° (SSO) para o ângulo de inclinação e azimute para o local 1, respetivamente;
- 33° e 8/188° (SSO) para o ângulo de inclinação e azimute para o local 6, respetivamente (ver Figura An 6 à Figura An 8 do Anexo 2). De realçar que, os azimutes ótimos de 5 e 8° foram retirados do software “PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM”, enquanto a introdução dos azimutes de 185 e 188° serão introduzidos no software “PV*SOL” [20]. Ou seja, cada ferramenta de simulação tem a sua própria definição do parâmetro em questão.

Note-se que para os locais que foram considerados de “parque de estacionamento” considerou-se um ângulo de inclinação de 10° (ver Tabela 8 e Figura An 8), dado que se pretende garantir uma maior eficácia no sombreamento do espaço e um reduzido impacto visual.

Na Tabela 8 e Figura 29 apresentam-se os locais selecionados para a implementação dos painéis fotovoltaicos, que tratar-se-ão apenas de parques de estacionamento públicos, onde se pretende injetar toda a energia produzida diretamente na rede pública, e da zona da central de produção de hidrogénio, armazenamento e abastecimento das viaturas, onde a energia produzida será predominantemente consumida na central.

Tabela 8-Locais propostos para a implementação de painéis fotovoltaicos na vila de Palmela

Legenda	Pontos propostos na vila de Palmela	Coordenadas		Inclinação dos painéis [°]	Azimute dos painéis [°]
		Latitude [°]	Longitude [°]		
1	Central de produção e de abastecimento de hidrogénio	38,583338	-8,920358	34	5/185
2	Parque de estacionamento da escola básica de Hermenegildo Capelo	38,574636	-8,901545	10	7/187
3	Parque de estacionamento da escola primária de Joaquim José de Carvalho	38,572235	-8,902581	10	5/185
4	Rua Vítor Borrego	38,5722862	-8,9004518	10	4/184
5	Parque de estacionamento do miradouro de Palmela	38,565399	-8,898781	10	4/184
6	Parque de estacionamento do jardim da alameda	38,570283	-8,905927	10	8/188
7	Estacionamento da ferroviária de palmela	38,570535	-8,873199	10	4/184
8	Estacionamento dos autocarros na ferroviária de Palmela	38,571937	-8,873154	10	4/184

Legenda	Pontos propostos na vila de Palmela	Coordenadas		Inclinação dos painéis [°]	Azimute dos painéis [°]
		Latitude [°]	Longitude [°]		
9	Estacionamento da Santa casa da misericórdia de Palmela	38,573075	-8,899994	10	4/184
10	Parque de estacionamento da bomba de gasolina da Prio	38,570022	-8,898871	10	4/184
11	Parque de estacionamento do descampado da igreja de São Pedro	38,568108	-8,898528	10	3/183
12	Parque de estacionamento entre a CMP e a igreja de São Pedro	38,567482	-8,898735	10	3/183
13	Parque de estacionamento do Arrabalde	38,567455	-8,900131	10	5/185
14	Parque de estacionamento no descampado do castelo	38,566327	-8,900435	10	5/185
15	Parque de estacionamento no castelo de Palmela	38,565868	-8,901197	10	4/184

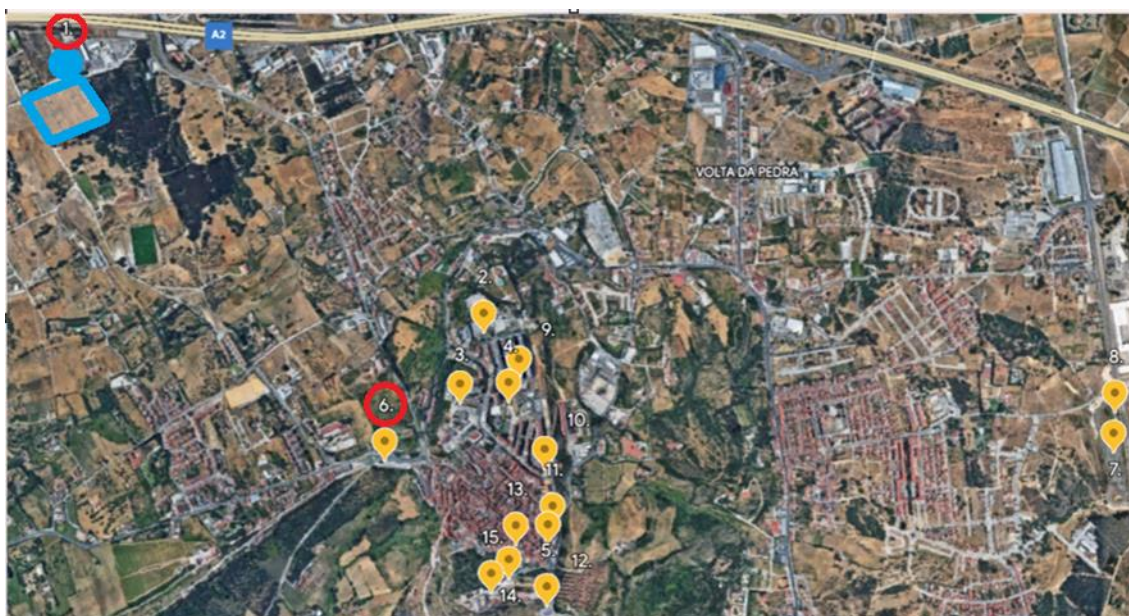


Figura 29- Locais de instalação dos painéis FV na central (ponto “1.”) e na vila de Palmela (ponto “6.”)
(vista através da plataforma "Google earth")

O sistema fotovoltaico será a principal fonte do fornecimento de energia elétrica durante o período diurno e tanto os painéis como os respetivos inversores foram dimensionados através do software “PV*SOL” [20]. Como tal, para efeitos da estimativa das necessidades de produção de energia fotovoltaica, isto é, para se efetuar as simulações de consumo de energia FV através do software “PV*SOL” [20], consideraram-se os locais assinalados com “1.” e “6.”, nos quais se introduziram os seguintes dados (ver Tabela 8):

- Ângulos de inclinação;
- Ângulos de azimute;
- Coordenadas geográficas.

E ainda:

- Valor do consumo de energia anual;
- Seleção da curva de carga típica (ver Figura 30 e Figura 31).

Seleção da curva de carga típica (diagrama de carga) é uma exigência do software, de modo a realizar o balanço da energia FV produzida usada em autoconsumo e injetada na rede pública. Analisando os diagramas de carga dos perfis disponibilizados, optou-se pelo diagrama de carga constante, visto ser o que mais se assemelha ao diagrama previsto para a central de produção de hidrogénio e do sistema de abastecimento. O software, na versão usada, não permite criar um diagrama de carga mais ajustado à realidade, pois cerca de 5 a 6 horas por dia o consumo de energia da central será significativamente inferior devido à interrupção diária da produção de hidrogénio.

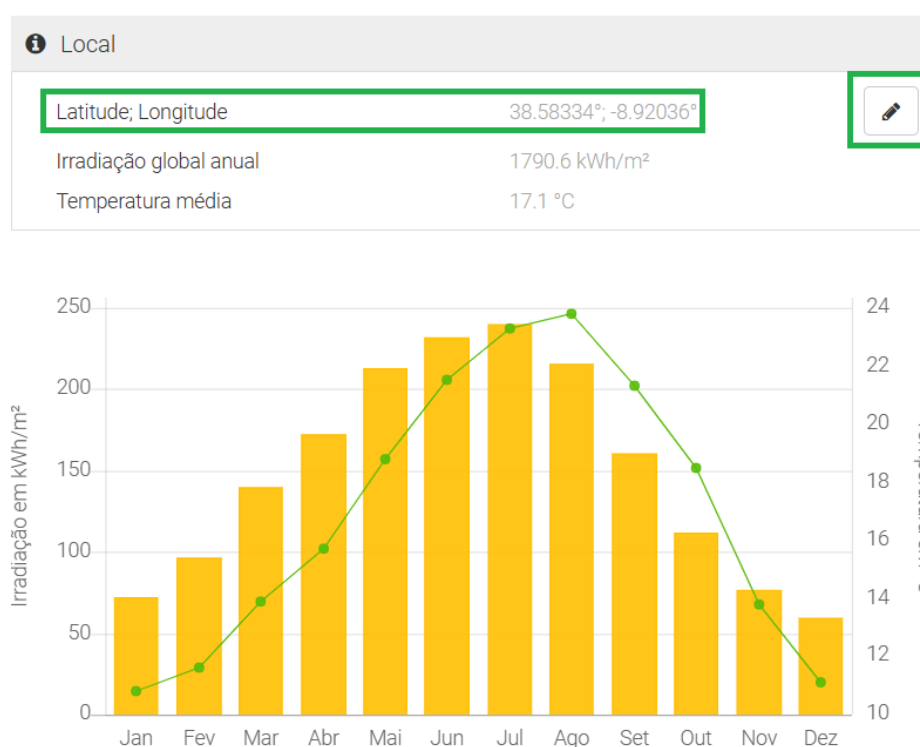


Figura 30-Introdução das coordenadas geográficas no software "PV*SOL" no local "1.

(extraído de [20])

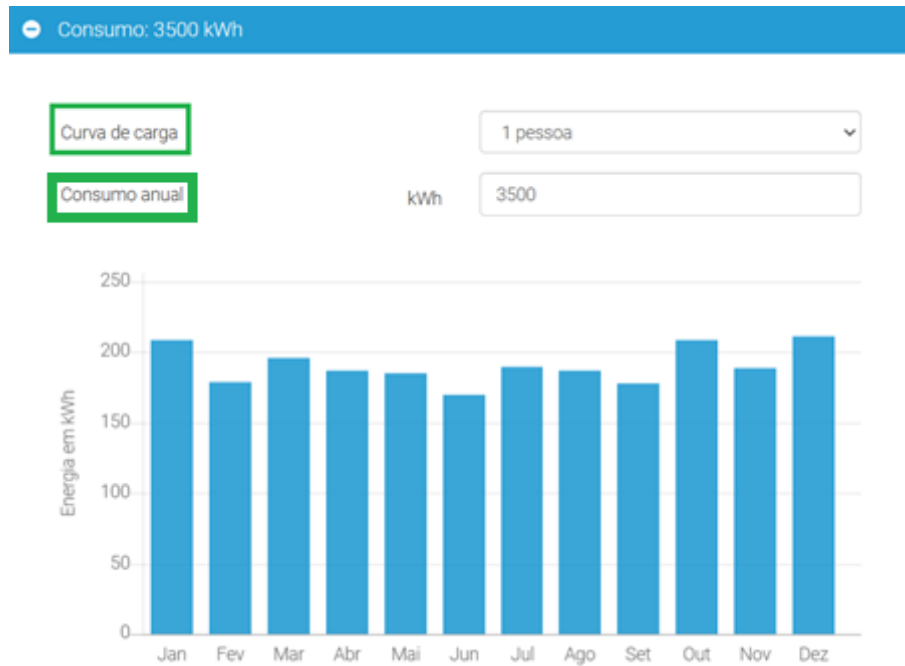


Figura 31-Curva de carga e consumo anual no software "PV*SOL" (extraído de [20])

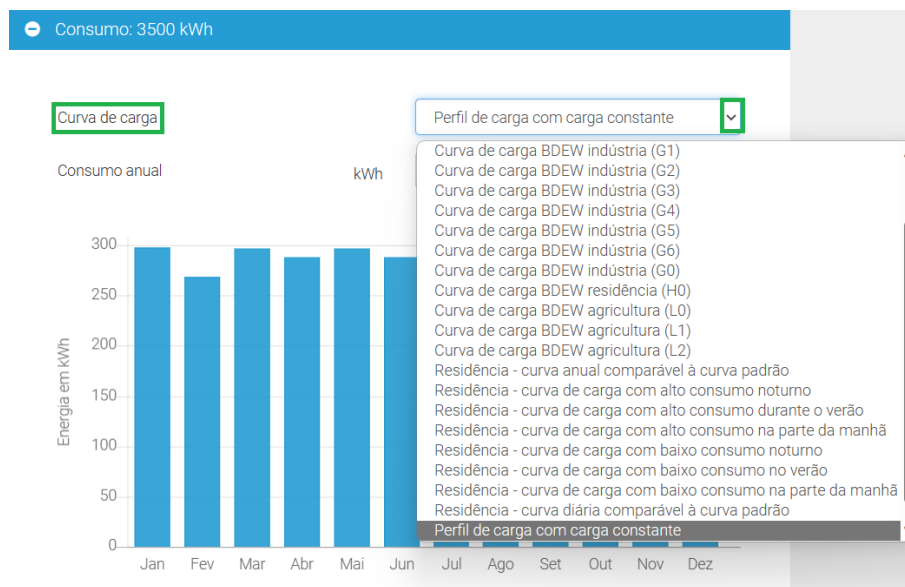


Figura 32-Seleção da curva de carga "Perfil de carga com carga constante" do software "PV*SOL" (extraído de [20])

Com os dados fornecidos, o software "PV*SOL" permite determinar a produção de energia elétrica FV, que somada à energia eólica produzida alimentará a central de produção, armazenamento e abastecimento de hidrogênio.

3.3. Determinação da capacidade de geração de energia elétrica fotovoltaica

Após a identificação dos locais mais recomendáveis para a implantação dos painéis fotovoltaicos é possível efetuar uma estimativa da capacidade de geração de energia elétrica fotovoltaica.

Para a estimativa da geração de energia elétrica fotovoltaica considerou-se um módulo de 20 painéis, número definido pelo programa, com 2 inversores da marca “Delta electronics”, visto que, foi o equipamento que obteve melhor fator de dimensionamento com base no software “PV*SOL” [20].

A Figura 33 ilustra a demonstração da introdução dos dados dos módulos fotovoltaicos, através do qual é possível: selecionar o fabricante dos módulos, a introdução a inclinação e a orientação (azimute) dos mesmos, escolher uma “situação de montagem” e a introdução dos valores do albedo, do sombreamento e das poeiras e outras sujidades acumuladas nos painéis FV.

É de referir que na Figura 33 a designação “Módulos fotovoltaicos: 12,3 kWp” corresponde à potência total dos 20 painéis FV. O que significa que cada equipamento tem uma potência de 615 Wp.

A anterior Figura 27 mostra o painel FV da marca “Jinko Solar”, que foi selecionado no software “PV*SOL”, enquanto na Figura 34 se apresentam as suas especificações técnicas.

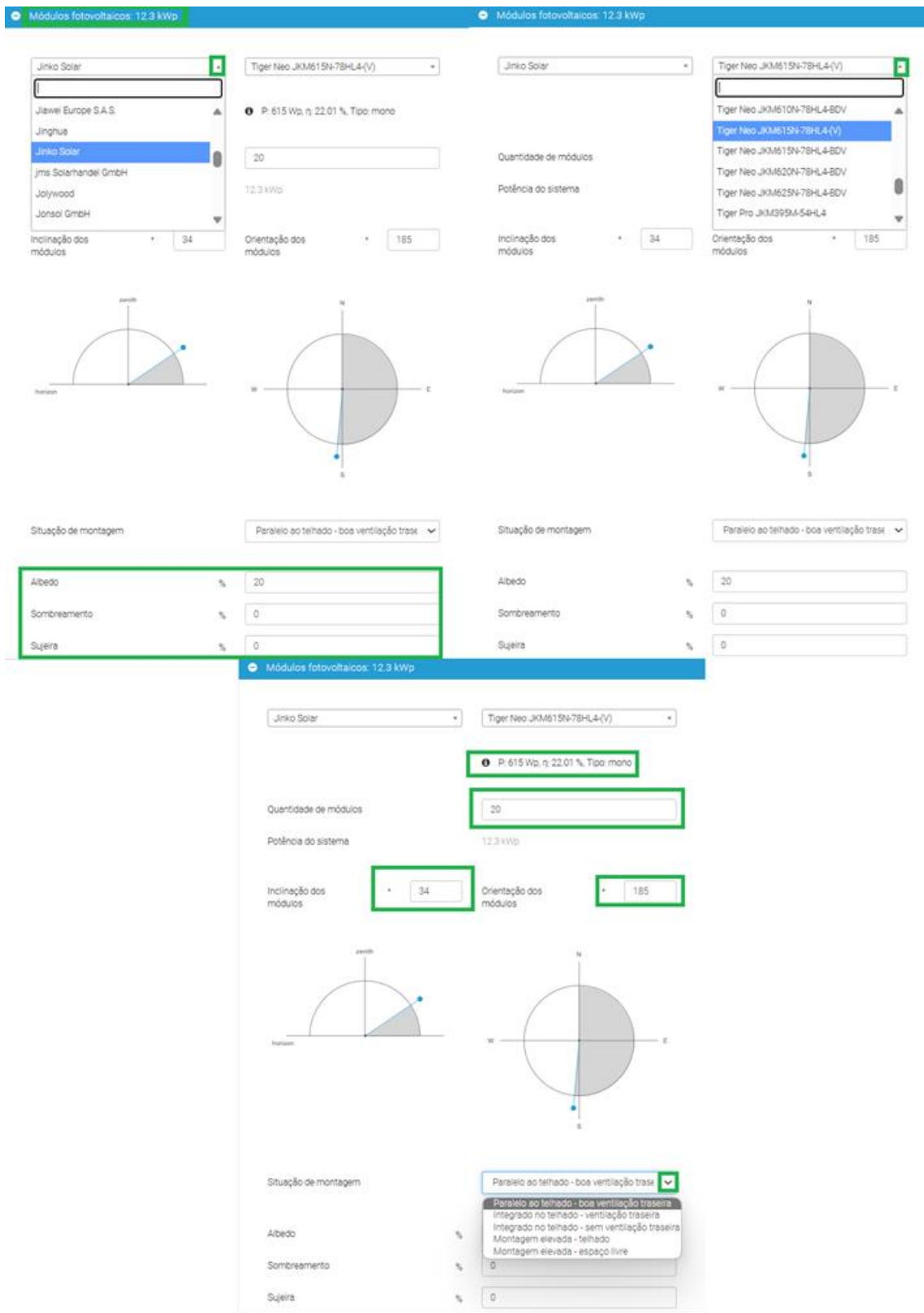


Figura 33-Introdução dos dados dos módulos fotovoltaicos no software "PV*SOL"
(extraído de [20])

ESPECIFICAÇÕES										
Tipo de Módulo	JKM595N-78HL4 JKM595N-78HL4-V		JKM600N-78HL4 JKM600N-78HL4-V		JKM605N-78HL4 JKM605N-78HL4-V		JKM610N-78HL4 JKM610N-78HL4-V		JKM615N-78HL4 JKM615N-78HL4-V	
	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT
Potência máxima (Pmax)	595Wp	447Wp	600Wp	451Wp	605Wp	455Wp	610Wp	459Wp	615Wp	462Wp
Tensão máxima de energia (Vmp)	45.29V	41.93V	45.39V	42.05V	45.49V	42.16V	45.59V	42.28V	45.69V	42.39V
Corrente de potência máxima (Imp)	13.14A	10.67A	13.22A	10.73A	13.30A	10.79A	13.38A	10.85A	13.46A	10.91A
Tensão de circuito aberto (Voc)	54.80V	52.05V	54.95V	52.20V	55.10V	52.34V	55.25V	52.48V	55.40V	52.62V
Corrente de curto-circuito (Isc)	13.90A	11.22A	13.97A	11.28A	14.04A	11.34A	14.11A	11.39A	14.18A	11.45A
Eficiência do Módulo STC (%)	21.29%		21.46%		21.64%		21.82%		22.00%	
Temperatura de operação (°C)	-40°C~+85°C									
Tensão máxima do sistema	1000/1500VDC (IEC)									
Classificação máxima do fusível em série	30A									
Tolerância de potência	0~+3%									
Coefficientes de temperatura de Pmax	-0.30%/°C									
Coefficientes de temperatura de Voc	-0.25%/°C									
Coefficientes de temperatura de Isc	0.046%/°C									
Temperatura nominal da célula operacional (NOCT)	45±2°C									

*STC: ☀ Irradiance 1000W/m² 📖 Temperatura da célula 25 °C ☁ AM=1.5
 NOCT: ☀ Irradiance 800W/m² 📖 Temperatura ambiente 20 °C ☁ AM=1.5 🌀 Velocidade do vento 1m/s

Figura 34-Especificações técnicas do painel da marca: Jinko Solar, modelo: Tiger Neo N-type 78HL4-(V) 595-615 Watt (extraído de [16])

Na Figura 35 apresenta-se a demonstração da seleção dos inversores no software "PV*SOL".

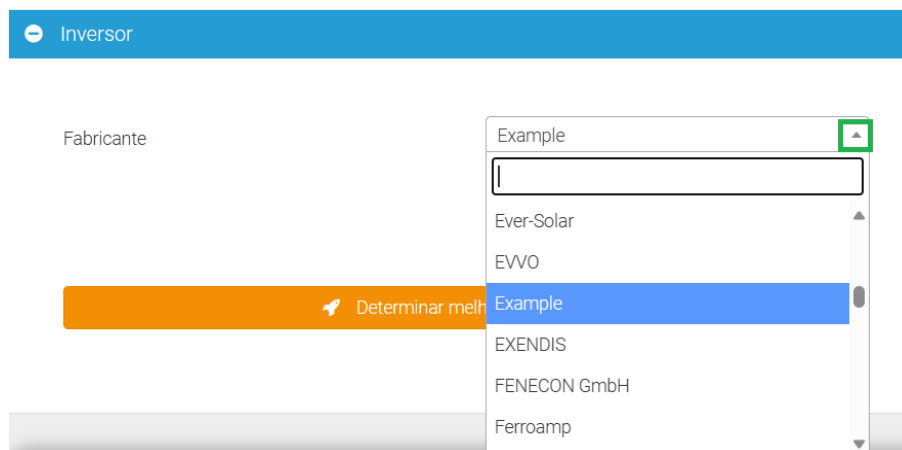


Figura 35-Demonstração da seleção de um inversor no software "PV*SOL" (extraído de [20])

Na Figura 36 mostra-se a confirmação pelo software "PV*SOL" da adequabilidade da configuração e do fator de dimensionamento dos inversores.

Note-se que a conformidade do fator de dimensionamento dos inversores verifica-se numa de intervalo entre os 100 e os 120% e nesta situação averiguou-se que se obteve um fator de cerca de 111,8% (ver Figura 36).

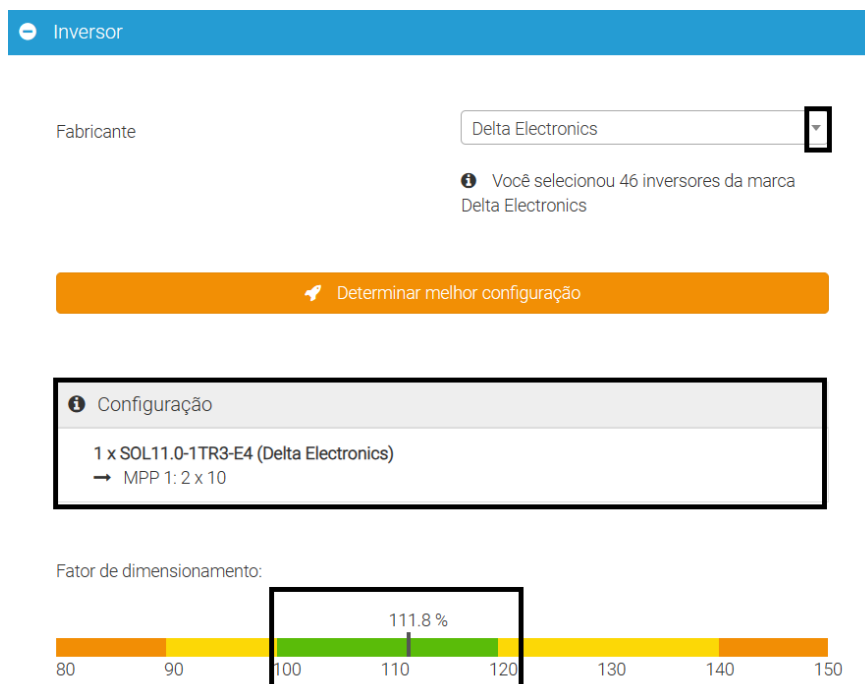


Figura 36-Seleção, configuração e fator de dimensionamento do inversor da “Delta electronics” no software "PV*SOL” (extraído de [20])

Após a finalização das simulações de produção de energia FV efetuadas aos locais “1.” e “6.”, considerando vinte módulos FV e 2 inversores, determinaram-se as produções mensais de energia elétrica, obtida através desta fonte renovável.

As Tabela 9 e Tabela 10 representam os resultados das produções mensais da energia solar fotovoltaica e as Figura 37 e Figura 38 apresentam os gráficos das mesmas, respetivamente, para os locais “1.” e “6.”, considerando vinte módulos FV.

Tabela 9- Resultados da produção mensal de energia elétrica renovável FV no local “1.”

Meses	Produção FV [kWh]
Janeiro	1380
Fevereiro	1504
Março	1859
Abril	1984
Maiο	2176
Junho	2206
Julho	2347
Agosto	2322
Setembro	2020
Outubro	1676
Novembro	1282
Dezembro	1240
Total	21996

Tabela 10-Resultados da produção mensal de energia elétrica renovável FV no local “6.”

Meses	Produção FV [kWh]
Janeiro	1036
Fevereiro	1230
Março	1689
Abril	1970
Maió	2335
Junho	2438
Julho	2558
Agosto	2376
Setembro	1893
Outubro	1441
Novembro	1015
Dezembro	907
Total	20888

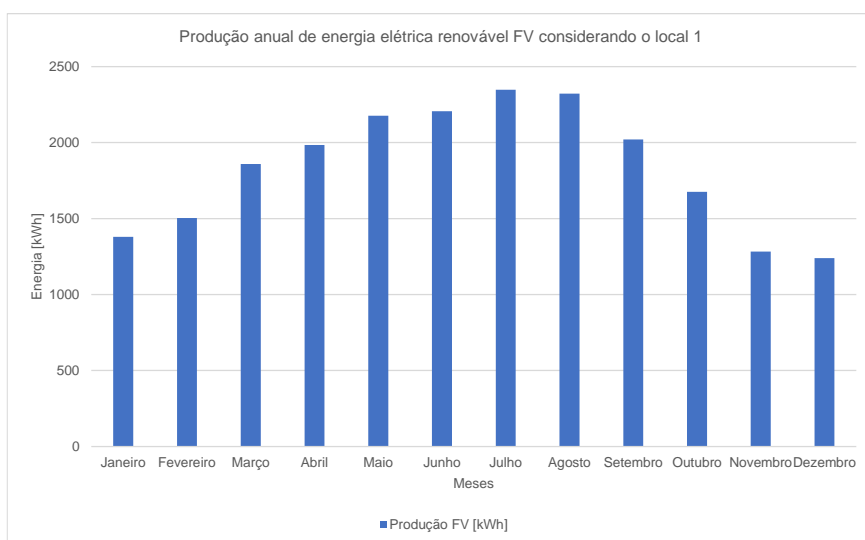


Figura 37-Produção mensal de energia elétrica renovável FV no local “1.”

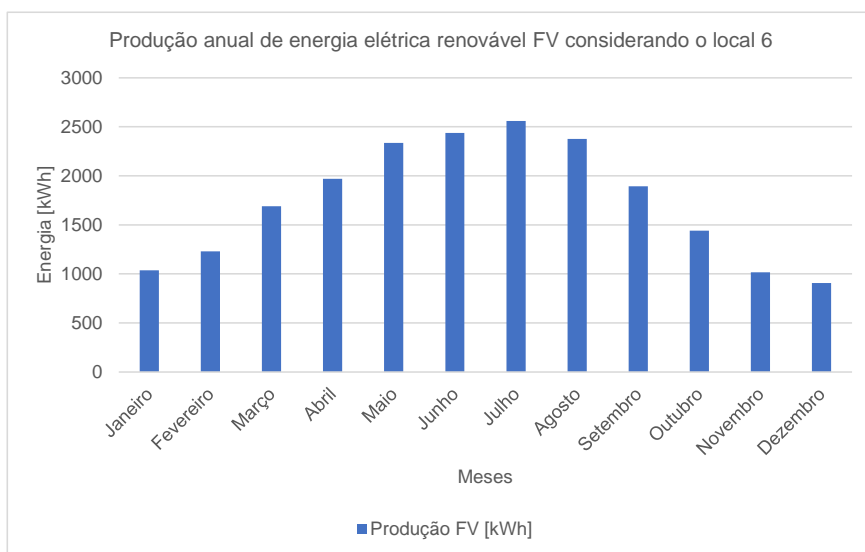


Figura 38- Produção mensal de energia elétrica renovável FV no local “6.”

Capítulo 4

Necessidades de hidrogénio

Os principais objetivos deste capítulo são a escolha do tipo de veículo a utilizar, face às distâncias percorridas, e a determinação das necessidades de combustível “verde” para que a frota cumpra as distâncias dos percursos definidos.

Os tópicos abordados neste capítulo serão:

- Escolha fundamentada do tipo de veículos a usar;
- Princípio de funcionamento das viaturas a hidrogénio com *fuel cell*;
- Determinação da distância diária e anual percorrida pela frota;
- Determinação da quantidade diária de “combustível verde” necessária.

4.1. Escolha fundamentada do tipo de veículos a usar

Neste subcapítulo pretende-se fundamentar a escolha de veículos elétricos a hidrogénio com *fuel cell* e não de veículos elétricos com baterias.

Segundo Pramuanjaroenkij [22], os veículos elétricos alimentados apenas por baterias têm de ser recarregados a partir de postos de carregamento e se esses postos estiverem alimentados por centrais elétricas convencionais, que usam combustíveis fósseis, estes veículos elétricos possuem uma pegada carbónica relevante, pois só deslocam para fora das cidades a emissão de gases com efeito de estufa. Na produção de veículos elétricos a baterias deve-se ter em consideração que todo o processo de obtenção das matérias-primas e fabrico das baterias tem, neste momento, um elevado impacto ambiental. Na utilização deste tipo de veículos também há que considerar a necessidade de um elevado tempo de carregamento das baterias, ou, em caso de carregamentos rápidos, da necessidade de uma elevada potência elétrica disponível nos postos.

De acordo com o caso de estudo referido, os veículos elétricos a pilhas de combustível (VEPCs) foram considerados como um grupo de veículos com emissões zero e as pilhas de combustível têm sido utilizadas em aplicações como: veículos aéreos não tripulados, veículos submarinos não tripulados, automóveis, camiões e autocarros. A rapidez de abastecimento de hidrogénio ao veículo, a maior autonomia com um abastecimento e a capacidade de descentralizar a produção de hidrogénio para períodos do dia com menor consumo de energia elétrica são vantagens a considerar. Não obstante que ainda seja uma tecnologia dispendiosa e que tem impactos ambientais na produção.

Desta forma, após uma análise das vantagens e desvantagens, concluiu-se que os veículos a pilhas de combustível, utilizando hidrogénio verde, deverão ser uma das apostas futuras para

a mobilidade, sendo o tipo de veículo que poderá tornar-se dominante a nível mundial, devido a irem ao encontro dos objetivos do desenvolvimento sustentável [22].

A Figura 39 ilustra em que aspetos os veículos elétricos a hidrogénio com *fuel cell* cumprem os objetivos de desenvolvimento sustentável tais como:

- Adaptação e mitigação das mudanças climáticas (ação climática);
- Acesso urbano e cidades sustentáveis (cidades e comunidades sustentáveis);
- Eficiência energética (energias renováveis e limpas);
- Redução da poluição no ar e segurança rodoviária (saúde de qualidade)

Com base nestas conclusões, os miniautocarros selecionados para a mobilidade verde no concelho de Palmela serão abastecidos por hidrogénio verde.

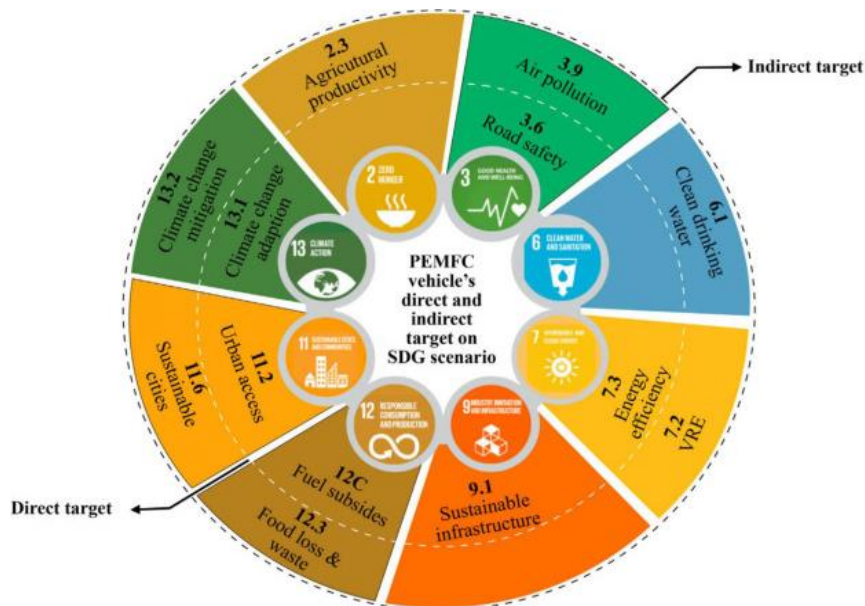


Figura 39-Os objetivos de desenvolvimento sustentável relacionados com as *fuel cells* de membrana de permuta de protões (extraído de [22])

Como as viaturas serão a hidrogénio com *fuel cell*, o próximo subcapítulo é dedicado ao princípio de funcionamento desta tecnologia.

4.2. Princípio de funcionamento das viaturas a hidrogénio com *fuel cell*

Segundo Gupta [23], o hidrogénio armazenado no tanque entra por um canal da *fuel cell* e o ar entra por outro, que entram em contacto gerando uma reação eletroquímica entre iões, que produz uma grande quantidade de calor e de eletricidade.

Os iões de hidrogénio deslocam-se para a placa anódica e os iões de oxigénio são introduzidos na placa catódica. Desta forma o hidrogénio divide-se em protões e em eletrões devido à reação eletroquímica no catalisador da *fuel cell*. No final da reação o vapor de água

emitido e o ar quente são libertados, sendo expelidos para a atmosfera (ver Figura 40).

Estes tipos de veículos não prescindem das baterias elétricas, pois continuam a ser necessárias para garantir os picos de potência exigidos nos arranques, acelerações ou subidas, assim como para a travagem regenerativa e para acumular os excessos de produção de energia elétrica da *fuel cell*, nos períodos de menor consumo.

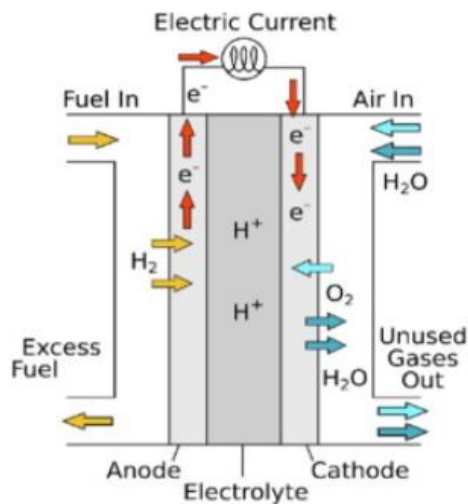


Figura 40-Ilustração do princípio de funcionamento das *fuel cell* - reação eletroquímica (extraído de [23])

A energia elétrica gerada na pilha de células de combustível aciona o motor elétrico que transmite o movimento de rotação às rodas do veículo e, havendo excesso de geração de energia elétrica, as baterias do veículo poderão ser carregadas.

Quando é necessária uma grande quantidade de eletricidade para o motor, a bateria fornece energia elétrica acumulada, para fazer acionar o motor, bem como torna possível utilizar o sistema de travagem regenerativa quando é necessário reduzir a velocidade do veículo, atuando previamente ao acionamento dos travões mecânicos. Nessa situação de travagem regenerativa o motor, passa a gerador, gerando energia elétrica que será armazenada nas baterias, permitindo aumentar a autonomia do veículo. Na Figura 41 apresenta-se o diagrama de blocos de um veículo a *fuel cell* com bateria e travagem regenerativa.

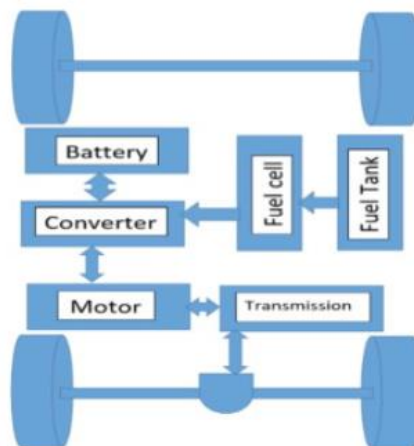


Figura 41-Funcionamento das viaturas a *fuel cell* com bateria e travagem regenerativa (extraído de [23])

Foi realizada uma pesquisa à oferta deste tipo de veículos pelos principais fabricantes, que atualmente ainda não são muitos, tendo a escolha recaído pelo miniautocarro da marca Renault, modelo “Master City Bus H2-TECH” com as seguintes características técnicas:

- Capacidade de transporte de 15 passageiros, com 10 lugares sentados;
- Autonomia média combinada de 300 km (hidrogénio e baterias);
- Consumo de 2 kg de hidrogénio por cada 100 km percorridos;
- Depósito de hidrogénio com pressão de 350 bar e capacidade de 4,5 kg;
- Abastecimento do depósito de hidrogénio em cerca de 5 minutos.

Na Figura 42 pode-se observar o veículo proposto e na Figura 43 as suas principais especificações técnicas, retiradas de [25].



Figura 42-Miniautocarro a hidrogénio: Renault, modelo: Master City Bus H2-TECH (extraído de [24])

Powertrain & H2 system & Weight & Performances

Type	Traction
Electric motor	Renault
Power / Torque	57 kW/225 Nm
Lithium-Ion battery capacity	33 kWh
Battery voltage	400 V
Onboard charger	7 kW
Fuel Cell power	30 kW
Embedded hydrogen	4,5 kg
H2 tank pressure	350 bar
GVW	4 500 kg
Front axle capacity (min / max)	1 650 kg / 1 850 kg
Rear axle capacity (min / max)	1 500 kg / 2 800 kg
Payload	1 050 kg
Vehicle range	up to 300 km
H2 refuelling time	5 min
Max battery charging time	5 hours
Max speed	70 km/h
H2 consumption (without A/C & Heating system)	2 kg H2/ 100 km
Max slope starting capacity (Empty/GVW)	20% / 15%

Figura 43-Dados técnicos do miniautocarro: Renault, modelo: Master City Bus H2-TECH (extraído de [25])

Após a seleção do veículo a *fuel cell* e da identificação das características técnicas, torna-se necessário definir a distância diária percorrida pela frota para se estimar as necessidades de hidrogénio.

4.3. Trajetos propostos e necessidades da frota

No presente subcapítulo serão apresentados os trajetos propostos, as estimativas das distâncias diárias e anuais a percorrer pelas viaturas nesses trajetos e estimadas as necessidades de hidrogénio consumido pela frota de miniautocarros.

Com objetivo de complementar ou aumentar os trajetos cobertos pela rede pública de transportes, definiu-se que as viaturas irão percorrer quatro trajetos diferentes (ida e volta em cada um deles), de elevada procura pelos utentes nas suas deslocações diárias, para se tentar reduzir a utilização do veículo próprio nesses percursos. Na Tabela 11 são definidos os quatro trajetos selecionados, a distância a percorrer (ida e volta), o tempo total para realizar o percurso, o número de viagens diárias e a frequência mínima de saída dos miniautocarros, que são os parâmetros base para a determinação das distâncias a percorrer diariamente e o número mínimo de veículos necessários.

O trajeto a que se atribuiu maior número de viagens é “Palmela-Palmela (estação ferroviária)”, dada a elevada procura do comboio como meio de transporte, prevendo-se a realização de trinta e duas viagens distribuídas ao longo do dia consoante as horas de maior procura, com um intervalo mínimo de saída de autocarros de vinte minutos, totalizando diariamente uma distância aproximada de 320 km.

No caso do trajeto “Palmela-Setúbal (estação ferroviária)”, em que a distância é maior, cerca de 580,8 km, atribuiu-se três miniautocarros para garantir uma frequência mínima de trinta minutos, fazendo-se vinte e duas viagens diárias.

Nos restantes dois trajetos, onde o número de passageiros é menor, atribuiu-se um miniautocarro a cada um deles, garantindo uma frequência mínima de aproximadamente sessenta minutos, prevendo-se realizar, para cada destino, sete e oito viagens diárias.

Tabela 11-Distâncias diárias e anuais a percorrer pela frota de veículos a "fuel cell"

Trajeto	Distância (ida e volta) [km]	Tempo do percurso [minutos]	Número viagens diárias	Distância diária total [km]	Distância anual total [km]	Intervalo mínimo [minutos]	Número de viaturas
Palmela-Setúbal (est. ferroviária)	26,4	70	22	580,8	211 992	30	3
Palmela-Vila Nogueira Azeitão	26,2	50	8	209,6	76 504	60	1
Palmela-Pinhal Novo (est. ferrov.)	29,6	62	7	207,2	75 628	60	1
Palmela-Palmela (est. ferroviária)	10	32	32	320	116 800	20	2
Totais	92,2	214	69	1 317,6	480 924	--	7

A Tabela 11 permite observar que a distância média diária percorrida pela frota de miniautocarros será cerca de 1317,6 km (ida e volta), possibilitando estimar a quantidade diária de “combustível verde” necessária para os veículos.

De salientar que o número de autocarros identificados é o mínimo necessário, sendo interessante proceder-se a aquisição de mais uma ou duas viaturas para acautelar situações de manutenção, avaria e eventual reforço de algum trajeto em período de ponta ou em situações excepcionais.

Os dados obtidos da anteriormente permitem determinar a massa de hidrogénio que os miniautocarros necessitam para cumprir os percursos previstos. Segundo as especificações técnicas, a capacidade do depósito das viaturas é cerca de 4,5 kg de hidrogénio, tendo um consumo de 2 kg de hidrogénio por cada 100 km, ver Figura 43, pelo que a autonomia é de aproximadamente 225 km, sem considerar a utilização da energia das suas baterias.

Com um consumo de 4,5 kg de hidrogénio a cada 225 km, sabendo que a frota irá percorrer uma distância diária cerca de 1317,6 km (ver Tabela 11), estima-se um consumo diário de hidrogénio de 26,4 kg. Apesar deste consumo, irá ser assumido a necessidade de abastecer cada miniautocarro uma vez por dia, ou seja, deverão estar disponíveis 31,5 kg de hidrogénio por dia, correspondendo a um coeficiente de segurança no abastecimento de aproximadamente 19,3%.

Capítulo 5

Central de produção hidrogénio

Neste capítulo pretende-se dimensionar um sistema para a produção de hidrogénio “verde” para abastecer a frota de miniautocarros. Este capítulo será composto por três secções:

- Produção de hidrogénio “verde”;
- Utilização do hidrogénio “verde” para abastecimento da frota;
- Seleção dos equipamentos da central de produção, armazenamento e abastecimento.

5.1. Produção de hidrogénio “verde”

Este subcapítulo é dedicado à apresentação das tecnologias e a seleção dos equipamentos a utilizar na central, incluindo os equipamentos de preparação da água, de eletrólise da água, de compressão do hidrogénio, do armazenamento do hidrogénio e oxigénio (subproduto) e de abastecimento da frota. Todos os equipamentos deverão ser acionados pela energia elétrica gerada pelas FER, para garantir a produção de hidrogénio “verde”.

No caso de estudo desenvolvido por Kumar [26], os autores apresentam as diversas tecnologias de produção de hidrogénio “verde” através de eletrólise da água. Como são apresentadas na perspetiva técnico-comercial, incluem-se os custos de produção do hidrogénio.

De realçar que os autores também apresentam possíveis soluções para que a produção de hidrogénio “verde” seja rentável em aplicações comerciais.

De acordo com o artigo científico referido existem quatro tecnologias para eletrólise da água:

- Eletrolisador alcalino: a eletrólise da água alcalina (AWE) é uma técnica de divisão eletroquímica da água na presença de eletricidade. A divisão eletroquímica da água consiste em duas reações individuais de meia célula, tais como a reação de evolução do hidrogénio (HER) no cátodo e a reação de evolução do oxigénio (OER) no ânodo. Durante o processo de eletrólise alcalina, inicialmente no lado catódico, duas moles de solução alcalina são reduzidas para produzir uma mole de hidrogénio (H_2) e duas moles de iões hidroxilo (OH^-), o H_2 produzido pode ser eliminado da superfície catódica e os iões hidroxilo restantes (OH^-) são transferidos sob a influência do circuito elétrico, entre o ânodo e o cátodo através do separador poroso para o lado do ânodo. No ânodo, os iões hidroxilo (OH^-) são descarregados, para produzir a molécula de oxigénio (O_2) e uma molécula de água (H_2O) (ver Figura 44);

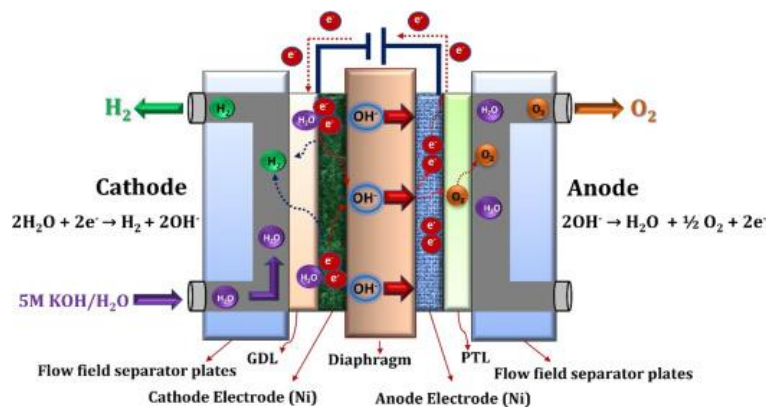


Figura 44-Illustração esquemática do princípio de funcionamento da eletrólise da água alcalina (extraído de [26])

- Eletrólise com membrana de troca de aniões (AEM): a eletrólise da água com AEM é uma das técnicas de divisão eletroquímica da água, que é executada com o auxílio de uma membrana de troca de aniões e eletricidade. A reação eletroquímica consiste em duas reações de meia célula, que são reação de evolução de hidrogénio (HER) e reação de evolução de oxigénio (OER). Inicialmente, no lado catódico, a molécula da água é reduzida para gerar hidrogénio (H₂) e iões hidroxilo (OH⁻) através da adição de dois eletrões. O hidrogénio é libertado da superfície do cátodo e dos iões hidroxilo (OH⁻) são difundidos através da membrana de troca iónica, para o lado do ânodo pela atração positiva do ânodo, enquanto os eletrões são transportados através do circuito externo para o ânodo. No lado do ânodo, os iões hidroxilo recombina-se como moléculas de água e oxigénio, perdendo eletrões. O oxigénio produzido é libertado a partir do ânodo (ver Figura 45);

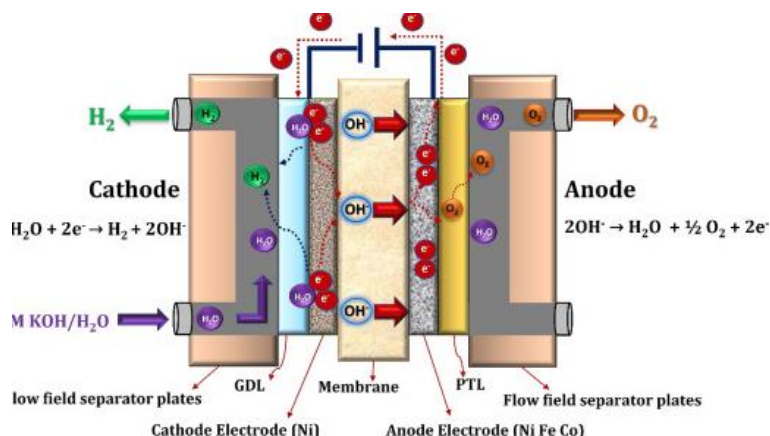


Figura 45-Vista esquemática do princípio de funcionamento da eletrólise da água com AEM (extraído de [26])

- Eletrólise com membrana de troca de protões (PEM): durante o processo de eletrólise da água com PEM, a água é dividida electroquimicamente em hidrogénio e oxigénio. Neste processo, inicialmente no lado do ânodo, a molécula da água é decomposta para gerar oxigénio (O₂) e protões (H⁺), e eletrões (e⁻). O oxigénio gerado é eliminado da superfície anódica e os restantes protões são transportados, através da membrana

condutora de prótons, para o lado catódico e os elétrons são transportados, através do circuito externo para o lado catódico. No lado do cátodo, os prótons e elétrons são recombinados para produzir o gás H_2 (ver Figura 46);

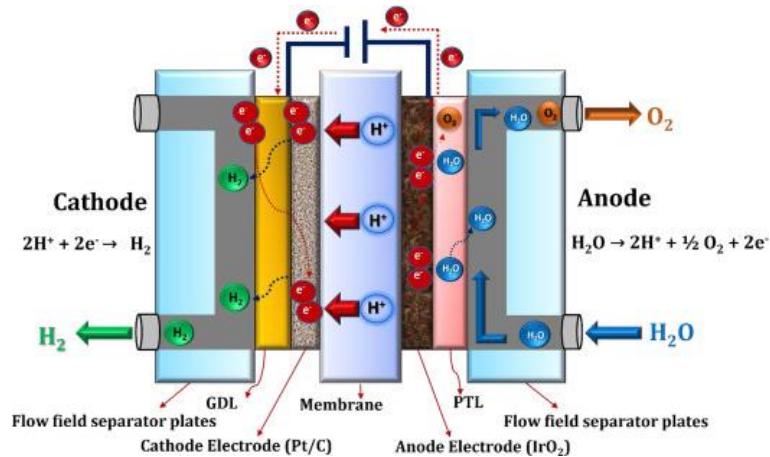


Figura 46-Vista esquemática do princípio de funcionamento da eletrólise da água com PEM (extraído de [26])

- Eletrólise de óxido sólido (SOEC): a eletrólise da água de óxido sólido funciona a temperaturas mais elevadas com o consumo de água sob a forma de vapor e gera hidrogênio e oxigênio. Durante o processo de eletrólise de água de óxido sólido, inicialmente no lado catódico, a molécula da água é reduzida em hidrogênio (H_2) e íon de óxido (O^{2-}) através da adição de dois elétrons. O hidrogênio libertado da superfície catódica e o íon de óxido excedente (O^{2-}) são transportados, através da membrana de troca iônica até ao lado do ânodo. No lado do ânodo, os íons de óxido (O^{2-}) são ainda mais reduzidos para gerar oxigênio e elétrons. Posteriormente o oxigênio produzido é libertado da superfície anódica e os elétrons são transportados através do circuito externo até ao lado do cátodo pela atração positiva do cátodo (ver Figura 47).

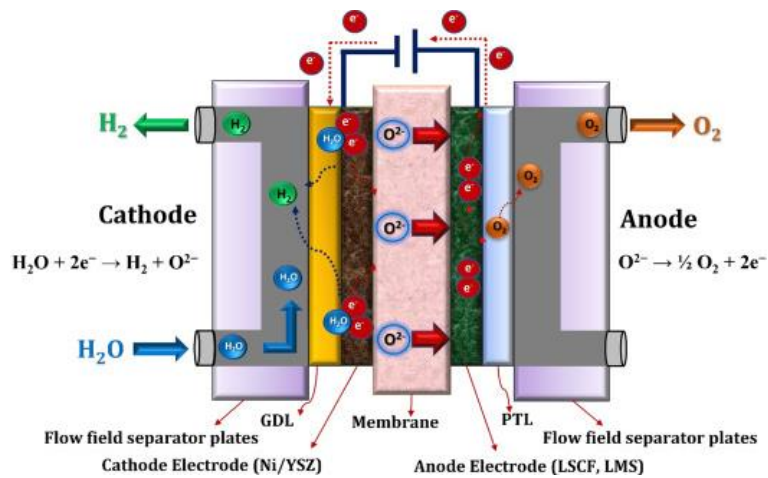


Figura 47-Visão esquemática do princípio de funcionamento da eletrólise da água com SOEC (extraído de [26])

Da autoria de Cormos [27] o caso de estudo propõe como tecnologia alternativa, para fins de produção de hidrogénio “verde”: a gaseificação de biomassa.

Segundo o autor, a gaseificação da biomassa representa uma tecnologia de conversão eficaz e promissora para diversos vetores químicos de energia. Pois, a gaseificação da biomassa com captura de CO₂ dará origem a um sistema de conversão de energia com emissões negativas de CO₂.

Com base nos resultados obtidos Cormos [27] destaca que a tecnologia mais aconselhável para a remoção de CO₂ é a tecnologia de instalação de gaseificação de biomassa descarbonizada por tecnologia de membrana (ver Figura 48).

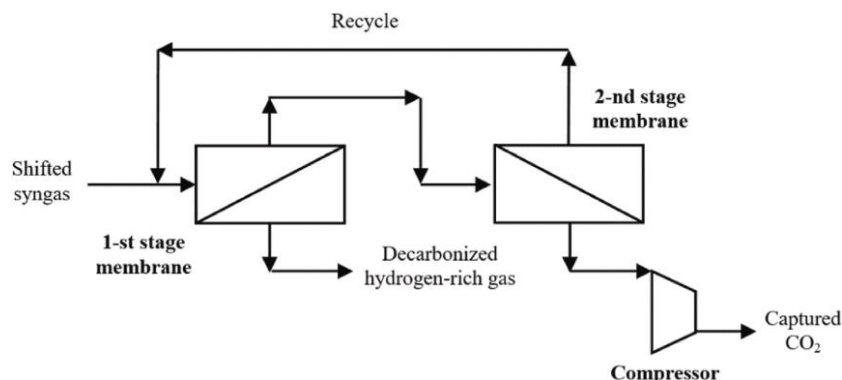


Figura 48-Concepção conceptual da unidade de membrana para remoção de CO₂ (extraído de [27])

Assim considerando os dois casos de estudo apresentados conclui-se que a produção de hidrogénio verde poderá ser efetuada através do eletrólise de água ou a partir da gaseificação de biomassa descarbonizada.

Contudo, devido à escassa quantidade de resíduos florestais disponíveis na região para serem recolhidos para a produção de hidrogénio verde através desta tecnologia, a gaseificação de biomassa descarbonizada não pode ser considerada uma solução exequível.

Como tal, a solução mais recomendável para a produção do combustível será a eletrólise de água, recorrendo a aquíferos, para a execução do processo (eletrólise).

No entanto, o tipo de tecnologia que se vai considerar será a eletrólise PEM, visto que, demonstra ser a tecnologia dominante no mercado, pois, a tecnologia eletrólise da água com SOEC, apesar do seu potencial, ainda se encontra em desenvolvimento.

5.2. Descrição sumária da instalação de produção de hidrogénio e respetivos componentes

No presente subcapítulo pretende-se efetuar uma descrição sumária da instalação de produção de hidrogénio e dos respetivos componentes.

A instalação será constituída pelos seguintes equipamentos:

- Um sistema de tratamento de água que irá fornecer água ao eletrólizador de água PEM;

- Um eletrolisador PEM, que será o equipamento produtor de hidrogénio, que estará conectado ao sistema de tratamento de água e ao compressor de hidrogénio (a ligação das tubagens com este último será subterrânea);
- Um compressor de hidrogénio que irá comprimir o combustível “verde” produzido e estará conectado subterraneamente entre o eletrolisador e o depósito de armazenamento;
- Depósito de armazenamento estará situado entre o compressor e a estação de módulo;
- E por uma estação de módulo que será o equipamento intermediário que fará a conexão entre o depósito e o dispensador de abastecimento.

Note-se que as tubagens subterrâneas serão efetuadas a partir do eletrolisador PEM e que todos os equipamentos têm uma distância de cerca de 3 metros entre si.

5.3. Seleção dos equipamentos da central de produção e de abastecimento

Após a determinação da quantidade de hidrogénio “verde” que é necessária diariamente em função das características do veículo proposto, do número de veículos e das distâncias percorridas, serão apresentados os equipamentos selecionados para a central de produção e de abastecimento, assim como o “layout” geral de implantação na central.

Desta forma a central de produção e de abastecimento será constituída pelos seguintes componentes:

- Eletrolisador PEM com um caudal de 20 Nm³/h, uma pressão de entrega de 30 bar, uma produção diária de cerca 43,3 kg/24h e um consumo energético de cerca 66,7 kWh/kg (ver Figura 49 e Figura 50);



Figura 49-Eletrolisador: NEL HYDROGEN, modelo: PEM C20
(extraído de [28])

MODEL	C10	C20	C30
Description	On-site hydrogen generator in two integrated, automated, site-ready enclosures Dual-mode operation (Selectable): <ul style="list-style-type: none"> • Load following mode automatically adjusts output 0 to 100% to match demand • Tank filling mode operates with power-conservation mode during standby Full differential pressure, H ₂ over O ₂		
Electrolyte	Proton Exchange Membrane (PEM) – caustic-free		
HYDROGEN PRODUCTION			
Nominal Production Rate Nm ³ /h @ 0°C, 1 bar SCF/h @ 70°F, 1 atm kg/24 h	10 Nm ³ /h 380 SCF/h 21.6 kg/24 h	20 Nm ³ /h 710 SCF/h 43.3 kg/24 h	30 Nm ³ /h 1,140 SCF/h 65.0 kg/24 h
Delivery Pressure – Nominal	30 barg (435 psig)		
Power Consumption by System per Volume of H ₂ Gas Produced ¹	6.2 kWh/Nm ³ (16.3 kWh/100 ft ³)	6.0 kWh/Nm ³ (15.8 kWh/100 ft ³)	5.8 kWh/Nm ³ (15.2 kWh/100 ft ³)
Power Consumed per Mass of H ₂ Gas Produced ¹	68.9 kWh/kg	66.7 kWh/kg	64.5 kWh/kg
Purity (Concentration of Impurities)	ISO 14687-1 Type 1 grade C ISO 14687-2 Type 1 grade D 99.9998% [H ₂ O < 2 ppm, -72°C (-98°F) Dew Point, N ₂ < 2 ppm, O ₂ < 1 ppm, all others undetectable]		
Turndown Range	0 to 100% net product delivery (automatic)		
Upgradeability	Field upgradeable to a maximum of 30 Nm ³ /h (1,140 SCF/h)	N/A	
DI WATER REQUIREMENTS			
Consumption Rate at Maximum Production	9 L/h (2.4 gal/h)	17.9 L/h (4.7 gal/h)	26.9 L/h (7.1 gal/h)
Temperature	5 to 40°C (41 to 104°F)		

Figura 50-Características técnicas do eletrolisador: NEL HYDROGEN, modelo: PEM C20 (extraído de [28])

- Compressor de dois estágios com uma amplitude de pressão de entrada 2 – 4 MPa, uma pressão de descarga de 40 MPa e um caudal de entrada máximo de hidrogénio entre 14,2 – 28 Nm³/h consoante a pressão (ver Figura 51 e Figura 52);



Figura 51-Compressor de dois estágios: Hydro-pac, modelo: C03-10-300/600LX (extraído de [29])

Compressor Specifications, Two-Stage Units continued

Model Number	Discharge Pressure		Range of Inlet Pressure		Capacity with H ₂ at min inlet		Capacity with H ₂ at max inlet		Motor Power	
	psig	MPa	psig	MPa	scfm	Nm ³ /hr	scfm	Nm ³ /hr	HP	KW
C06-03-70/140LX	6000	40	70-140	0.5-1.0	1.1	1.7	2.2	3.4	3	2.3
C06-05-70/140LX	6000	40	70-140	0.5-1.0	1.8	2.8	3.7	5.8	5	3.8
C06-10-70/140LX	6000	40	70-140	0.5-1.0	3.4	5.3	7.0	10.9	10	7.5
C06-15-70/140LX	6000	40	70-140	0.5-1.0	5.6	8.7	11.4	17.7	15	11
C06-20-70/140LX	6000	40	70-140	0.5-1.0	7.4	11.5	15	23	20	15
C06-40-70/140LX	6000	40	70-140	0.5-1.0	18	28	35	54	40	30
C06-60-70/140LX	6000	40	70-140	0.5-1.0	26	40	52	81	60	45
C06-03-140/300LX	6000	40	140-300	1.0-2.0	1.7	2.6	3.5	5.4	3	2.3
C06-05-140/300LX	6000	40	140-300	1.0-2.0	2.8	4.4	5.8	9.0	5	3.8
C06-10-140/300LX	6000	40	140-300	1.0-2.0	5.4	8.4	11.1	17.3	10	7.5
C06-15-140/300LX	6000	40	140-300	1.0-2.0	9.4	14.6	19.2	30	15	11
C06-20-140/300LX	6000	40	140-300	1.0-2.0	12.3	19.1	25	39	20	15
C06-40-140/300LX	6000	40	140-300	1.0-2.0	29	45	58	90	40	30
C06-60-140/300LX	6000	40	140-300	1.0-2.0	42	65	86	134	60	45
C06-03-300/600LX	6000	40	300-600	2.0-4.0	2.9	4.5	5.8	9.0	3	2.3
C06-05-300/600LX	6000	40	300-600	2.0-4.0	4.8	7.5	9.4	14.6	5	3.8
C06-10-300/600LX	6000	40	300-600	2.0-4.0	9.1	14.2	17.7	28	10	7.5

Figura 52- Características técnicas do compressor de dois estágios da marca: Hydro-pac, modelo: C06-10-300/600LX (extraído de [29])

- Depósito com uma capacidade de armazenamento de 100 kg e uma gama de pressão de armazenamento de 20 – 98 MPa (ver Figura 53 e Figura 54);



Figura 53- Depósito de armazenamento da marca: NEL HYDROGEN (extraído de [30])

Storage



Storage types	Storage
Storage pressure	Nominal 20-93 MPa Maximum 24-100 MPa
Storage capacity	100 kg to several tons if required
Valves and safety	Leak detection, jet fire protection, double block and bleed
Dimensions	Vessel lengths up to 12 m for any pressure range
Placement	Depending on site specification requirements, up to 50 m from Station Module
Design	Available in galvanized steel for resistance to corrosion, with white tubes

Figura 54- Características técnicas do depósito de armazenamento da marca: NEL HYDROGEN (extraído de [30])

- Módulo de estação de abastecimento de hidrogénio com um caudal máximo de cerca de 50 kg/h, com uma pressão de admissão de 2 – 20 MPa e que faz a conexão entre o depósito de armazenamento e o dispensador, que poderá ter uma pressão de abastecimento de 35 ou 70 MPa (ver Figura 55, Figura 56 e Figura 57);



Figura 55- Módulo de estação da marca: NEL HYDROGEN, modelo: SM004 (extraído de [31])

	HS004 2-stage	HS-ABB LP Duplex	HS-AAA HP Duplex
Region	Europe	Europe	US
COMPRESSOR PERFORMANCE AND ENERGY CONSUMPTION			
*Energy consumption for compression of Hydrogen			
Inlet Pressure @20 MPa	50 kg/h & 1.1 kWh/kg	102 kg/h & 1.2 kWh/kg	
Inlet Pressure @45 MPa			121 kg/hr & 1.3 kWh/kg
COOLING PERFORMANCE			
Ambient Temperature @15°C	T20 - 109 kg/h T40 - 73 kg/h	T20 - 231 kg/h	T40 - 141 kg/h
FUELING INFORMATION			
Ambient temperature	-20 to 40°C		
Storage pressure level	22.5, 45 and 93 MPa	45 MPa	45 and 93 MPa
Fueling pressure	70 MPa 35 MPa	35 MPa	70 MPa 35 MPa
Inlet pressure range	3 - 20* MPa *can be increased by using a pressure regulator	3 - 45 MPa	6 - 50 MPa
Flowmeter / accuracy	Coriolis mass flow meter		
Fueling protocols	SAE J2601-1 (SAE J2601 -2)*	SAE J2601-2 - Optifill	SAE J2601-1 SAE J2601-2 - Optifill

*SAE J2601-2 is used for for H35 fuelings

Figura 56- Características técnicas do módulo de estação de módulo da marca: NEL HYDROGEN, modelo: SM004 (extraído de [31])




Station Modules			
			
Station types	Cascade fill 70 MPa	Direct fill 70 MPa	Direct fill 35 MPa
Module names	SM004, SM005	SM-AAA	SM-ABB
Maximum capacity	50 kg/h	120 kg/h	220 kg/h
Dispenser options	70 MPa 35 MPa	70 MPa 35 MPa	35 MPa
Inlet pressure range	2-50 MPa	10-50 MPa	3-45 MPa
Dimensions	3.3 m W x 2.2 m D x 3.6 m H		
Weight	Approximately 11 tons		
approvals	CE marked or UL listed (comply to all modules)		
design	Available in galvanized steel		

Figura 57- Características técnicas do módulo de estação: NEL HYDROGEN, modelo: SM004 com as opções de dispensadores (extraído de [32])

- Dispensador de abastecimento com uma pressão de descarga de 35 MPa e que pode ficar até 50 m afastado do módulo de estação (ver Figura 58 e Figura 59);



Figura 58-Dispensador da marca: NEL HYDROGEN, modelo: 35 MPa (extraído de [33])

Dispensers

	70 MPa	35 MPa
Dispenser types	70 MPa	35 MPa
Fueling protocol	SAE J2601-1	SAE J2601-2 Optifill™
Nozzle design	In accordance with SAE J2600 and SAE J2799 (IR)	
Payment	Compatible with POS using IFSF communication	
Dimensions	0.52m W x 0.52m D x 2.5m H (integration on existing gas-station)	
Placement	Up to 50 m from Station Module	
Design	Available in galvanized steel or customer trade dress by quote	

Figura 59-Características técnicas do dispensador da marca: NEL HYDROGEN, modelo: 35 MPa (extraído de [33])

- Sistema de tratamento de água com uma potência de cerca de 3,5 kW e uma produção diária de cerca de 24605,18 L/dia, ou seja, com um caudal diário de cerca 1025,22 L/h (ver Figura 60 e Figura 61).

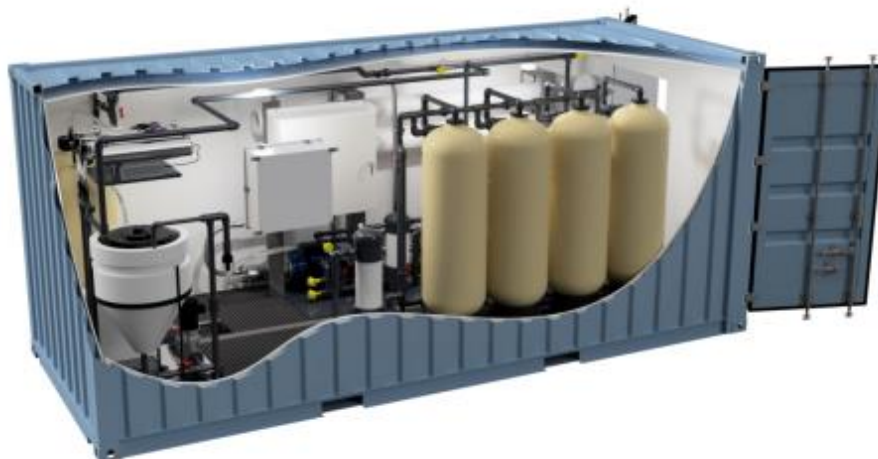


Figura 60-Sistema de tratamento de água subterrânea: Rodi systems, modelo: PureBox HPW (extraído de [34])

PureBox™ HPW General Specifications					
Production (Gal/Day) ¹	6,500	13,000	26,000	52,000	130,000
Container Dimensions (L x W x H) (ft)	10 x 8 x 8.5	20 x 8 x 8.5	20 x 8 x 9.5	40 x 8 x 9.5	40 x 8 x 9.5 (x 2 containers)
Approximate Dry Weight (lbs)	7,000	11,000	13,000	20,000	42,000
Approximate Power Consumption (kW) ²	3.5	5	8	13	25
Product Water Quality	As necessary for specific application, up to and including ASTM Type I (18 Meg Ohm).				
¹ Assuming a system availability of 90%.					
² When treating typical potable quality feed water at 25°C.					

Figura 61-Características técnicas do sistema de tratamento de água: Rodi Systems, modelo: PureBox HPW (extraído de [34])

Desta forma selecionaram-se os equipamentos ilustrados da Figura 49 à Figura 61 devido às respetivas características técnicas, pois adaptam-se às especificações pretendidas para a central, nomeadamente, a correspondência de caudais e pressões do hidrogénio entre os vários equipamentos, por exemplo, selecionou-se o compressor de dois estágios da marca Hydro-pac, inc., devido ao facto do equipamento se adequar ao caudal e pressão do hidrogénio que é entregue pelo eletrolisador.

5.4. Layout da central de hidrogénio

A Figura 62 ilustra a sequência de equipamentos, que constitui o “layout”, previsto para a central de produção, armazenamento e abastecimento das viaturas “fuel cell” e onde se indicam as distâncias previstas entre os vários equipamentos.

A situação de paragem da produção de hidrogénio deverá ser acautelada, pois poderá ser motivada por diversas situações, previstas ou imprevistas e de duração desconhecida, tais como:

- Avarias de equipamentos;
- Interrupção de energia elétrica;
- Falta de matéria-prima para a eletrólise (água tratada);
- Intervenções de manutenção preventiva;
- Fins de semana;
- Gestão de custos da energia;
- O armazenamento na capacidade máxima;
- As viaturas não necessitam de combustível.

Como medida de segurança do abastecimento de hidrogénio à frota, assumiu-se que o armazenamento deveria garantir o abastecimento durante três dias, sem que a central produza hidrogénio.

O depósito da Figura 53 tem uma capacidade máxima de armazenamento de cerca de 100 kg de hidrogénio a 98 MPa. Sabendo que a pressão de descarga do compressor de hidrogénio de duplo estágio é de 40 MPa e que o consumo diário ronda dos 31,5 kg, para armazenar os 94,5 kg de hidrogénio necessários para os três dias de abastecimento da frota serão necessários dois módulos de depósito de armazenamento, ficando a central com maior capacidade de armazenamento do que a prevista.

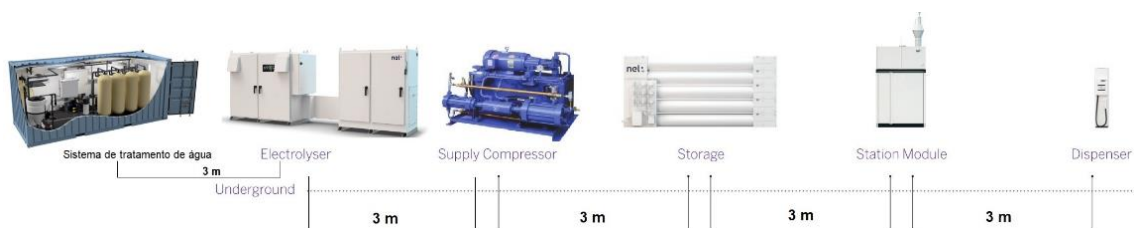


Figura 62-Layout da central de produção, armazenamento e abastecimento da frota de miniautocarros

Desta forma, com a seleção dos equipamentos pretendidos para a central de produção, armazenamento e abastecimento de hidrogénio, será possível estimar o consumo de energia elétrica anual da central.

Capítulo 6

Necessidades de energia elétrica da central

Neste capítulo irão ser estimadas as necessidades de energia elétrica da central e a forma de as suprir através das fontes renováveis consideradas anteriormente, assim como será abordada genericamente a gestão do funcionamento da central para maximizar a utilização da autoprodução de energia elétrica. Para suprir as necessidades energéticas anuais da central, será realizada a estimativa o número de painéis FV e de turbinas eólicas a instalar em Palmela de modo que, no balanço anual da central, o fornecimento externo de energia elétrica seja aproximadamente nulo. Como tal, os tópicos a desenvolver serão:

- Determinação do consumo anual da central de produção, armazenamento e abastecimento de hidrogénio;
- Determinação da capacidade de geração de energia elétrica renovável.

6.1. Consumo anual de energia da central de produção e de abastecimento

Após a estimativa das necessidades de hidrogénio e da seleção dos equipamentos da central torna-se possível efetuar a estimativa do consumo energético anual, considerando as especificações técnicas disponibilizadas pelos fabricantes dos equipamentos.

Recorrendo às características dos equipamentos selecionados, com base nas potências elétricas necessárias e do tempo de funcionamento, é possível determinar a energia necessária ao seu funcionamento.

A sequência de cálculo foi efetuada pela seguinte ordem:

- Consumo energético do eletrolisador;
- Consumo energético do compressor;
- Consumo energético do módulo de estação;
- Consumo energético do sistema de tratamento de água;
- Outros consumos da central.

Para uma melhor gestão do autoconsumo de energia elétrica da central e garantir uma maior independência da rede pública de abastecimento, será considerado a utilização um banco de baterias para armazenar a energia elétrica gerada durante o período do dia em que a autoprodução é excessiva, para que esta seja utilizada nas “horas de ponta” e algumas “horas cheias” (ver Figura An 31 com os períodos do tarifário). O banco de baterias deverá garantir a potência necessária aos equipamentos fundamentais da central durante o período de “horas de

ponta”. Os equipamentos não fundamentais para o funcionamento da central só deverão ser ativados nos períodos do dia em que a autoprodução conseguir garantir o seu funcionamento.

Na Tabela 12 são apresentados os valores das potências dos equipamentos, as horas previstas de funcionamento e a energia elétrica que se prevê que consumam. Ao valor da potência estimada adicionou-se 5% para os outros consumos não considerados. As somas dos valores da potência e da energia elétrica consumida são apresentadas no final da tabela.

Tabela 12-Estimativa da potência e consumo energético diário e anual da central

Equipamentos	Potência [kW]	Tempo diário de funcionamento [h]	Consumo energético diário [kWh]
Eletrolisador	120,3	17,5	2105,3
Compressor de hidrogénio de dois estágios	7,5	17,5	131,3
Estação de módulo	49,6	0,7	34,7
Sistema de tratamento de água	3,5	0,5	1,75
Banco de baterias (20%)	37,5	8,0	60,0
Outros consumos (5% das anteriores)	10,9	24	262,0
Valores totais diários da central	229,3	--	2595,1

Os valores apresentados na Tabela 12 basearam-se nos pressupostos que seguidamente se apresentam, em que se consideraram os dados técnicos dos equipamentos para obter os respetivos valores de consumo energético:

- Para a produção dos 31,5 kg de hidrogénio o eletrolisador terá de funcionar durante um período de aproximadamente 17,5 horas diárias, estimando-se um consumo energético de cerca de 2105,1 kWh, com produção média de hidrogénio de cerca de 1,8 kg/h;
- O consumo do compressor de hidrogénio de duplo estágio que recebe o hidrogénio à pressão de 3 MPa do eletrolisador e a eleva para 40 MPa, será cerca de 131,3 kWh;
- O módulo de estação de abastecimento tem uma capacidade máxima de 50 kg/h com uma pressão de entrada de 20 MPa, consumindo 1,1 kWh/kg. Considerando que o abastecimento diário máximo é de 31,5 kg, o consumo diário estimado é cerca de 34,7 kWh;
- Com base no artigo da autoria de Saulnier [35], para produção de hidrogénio através do eletrólise, teoricamente, são necessários cerca de 9 litros de água, para se produzir 1 kg de hidrogénio. No entanto, com base nos dados dos fabricantes de eletrolisadores observa-se que esse valor é cerca de 10 a 15% superior. Como tal, considerar-se-á uma margem de 15%, ou seja cerca de 10,4 L/kg_{H2O}, no cálculo da quantidade de água diária necessária;
- Sabendo que a quantidade de hidrogénio diária, é cerca de 31,5 kg, estima-se um

volume diário de 327,6 litros de água tratada para a produção de hidrogénio. A capacidade de tratamento de água do equipamento selecionado é bastante elevada, cerca de 24600 litros por dia, pelo que só necessitará de trabalhar cerca de 20 minutos por dia. Dado o volume de água tratada requerido diariamente pelo eletrolisador, o sistema de tratamento não necessita funcionar todos os dias se houver capacidade de armazenamento. Contudo, para efeitos de cálculo da necessidade energética será considerado um funcionamento diário de 30 minutos, a que corresponde um consumo energético diário do sistema de tratamento de cerca de 1,75 kWh;

- O banco de baterias irá consumir energia no período de autoprodução excessiva para a disponibilizar quando for necessária. No balanço global ao banco de baterias, será considerada a potência elétrica tomada durante o carregamento, mas o consumo de energia considerado será somente o relacionado com o rendimento global do banco, que se assumiu ser de 80%.

Somando todos os valores estimados para o consumo energético diário da central chegou-se ao valor de 2595,1 kWh, em que se inclui um acréscimo de 5% da potência tomada para os outros consumos, que se assumem durante as 24 horas do dia, como se apresenta na Tabela 12. Admitindo que a central poderá trabalhar os 365 dias do ano comum, o valor da energia elétrica consumida anualmente será de 947,21 MWh.

O banco de baterias, estando completamente carregado, deverá permitir assegurar a potência de 138,7 kW, dos equipamentos considerados fundamentais, durante os 90 minutos do período da “hora de ponta” da manhã, evitando a aquisição de energia à rede pública de distribuição.

Considerando os dados da Tabela 12 é possível determinar a capacidade de geração de energia elétrica renovável que a central necessita.

6.2. Determinação da capacidade de geração de energia elétrica renovável

Os locais identificados para a colocação de turbinas eólicas na zona da vila de Palmela foram 50, pelo que será esse o número de turbinas eólicas a instalar em redor da vila. Com uma produção anual unitária estimada de 1,44 MWh, a energia elétrica que será injetada na rede pública pelas turbinas será cerca de 71,94 MWh, correspondendo a cerca de 7,6% da energia necessária. A dispersão dos locais de instalação das turbinas eólicas e a distância a que ficam da central, não é viável a criação de uma rede elétrica própria, pelo que a melhor opção é fornecer toda a energia elétrica gerada à rede elétrica pública. A mesma opção será tomada para a energia elétrica produzida pelos sistemas fotovoltaicos distribuídos pela vila de Palmela, referenciado como local “6.”.

Considerando que as necessidades energéticas anuais da central são 947,21 MWh e que

somente 71,94 MWh são fornecidos pelas turbinas eólicas, os restantes 875,27 MWh (92,4%) terão de ser fornecidos pelo sistema fotovoltaico. Considerando que a produção anual estimada dos 20 módulos FV foi cerca de 22 MWh para o local "1." e de 20,9 MWh para o local "6.", pode-se calcular a quantidade de painéis a instalar em cada um dos locais para garantir a geração da energia elétrica necessária anualmente. Considerando que a energia elétrica gerada no local "6.", que é disperso por vários locais da vila, será fornecida à rede pública, torna-se importante privilegiar a instalação de sistemas fotovoltaico na cobertura da central, ou em área contígua.

Para satisfazer as necessidades energéticas de 875,27 MWh da central será necessário instalar 796 painéis fotovoltaicos no local "1." ou 839 painéis no local "6.". Como o número de painéis necessários não é muito elevado, a sua instalação pode ser realizada somente na central, sendo a instalação de painéis em locais dispersos na vila uma decisão com objetivo de melhorar o bem-estar das populações durante o Verão, através do sombreamento, e de divulgar o serviço prestado pela frota de miniautocarros amigos do ambiente. Assumindo a instalação de aproximadamente 80% dos painéis no local "1." e os restantes dispersos pela vila, obtém-se um total de 640 painéis no local "1." e de 164 painéis no local "6.", correspondendo a uma área de painéis de, respetivamente, 1792 m² e de 460 m².

As Figura 63 e Figura 64 mostram a configuração dos inversores (cuja fotografia se encontra na Figura An 9), que significa o seguinte: os 5 inversores estão conectados em paralelo, em que cada inversor está conectado a 8 cadeias de 16 módulos, totalizando 128 módulos por inversor. Por exemplo, a informação "MPP 1+2+3+4+5+6" indica que os inversores estão conectados aos seguintes pontos MPP (pontos de máxima potência): 1, 2, 3, 4, 5 e 6, (ver Figura 63).

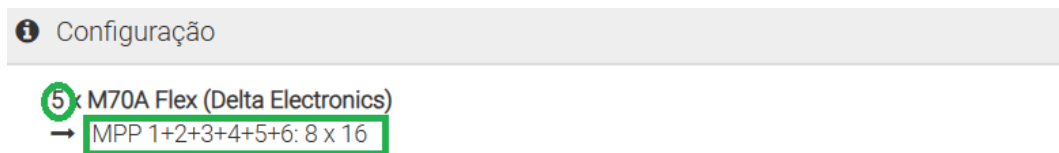


Figura 63-Configuração dos inversores para os 640 painéis FV da central
(extraído de [20])

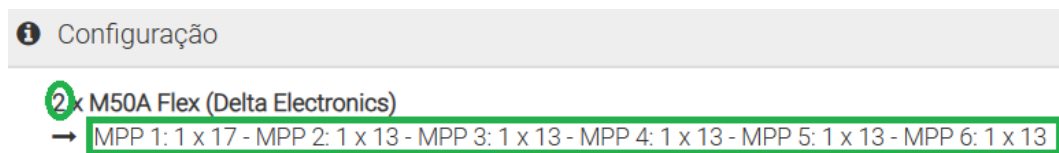


Figura 64-Configuração dos inversores para os 164 painéis FV distribuídos na vila
(extraído de [20])

As Figura 65 e Figura 66 ilustram as evoluções da produção mensal de energia elétrica dos 640 e 164 painéis FV instalados, respetivamente, na central e na vila, assim como as estimativas das parcelas da energia elétrica consumida mensalmente pela central.

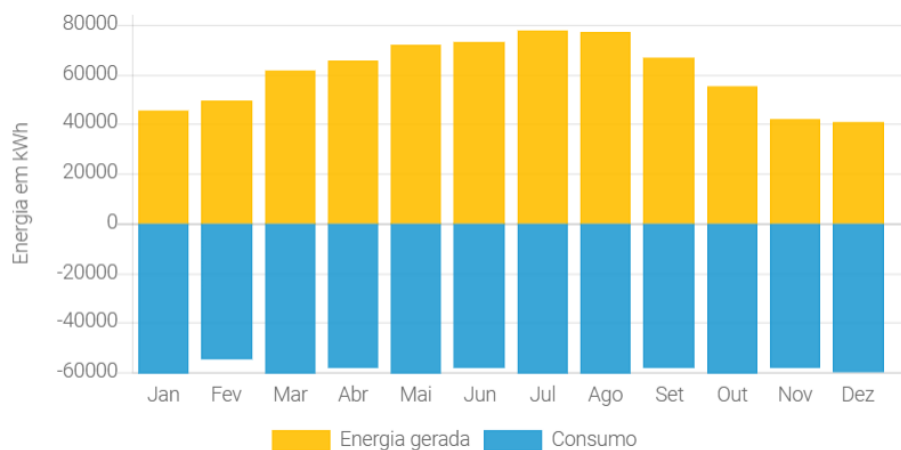


Figura 65-Consumo da central e geração de energia dos 640 painéis FV da central (extraído de [20])

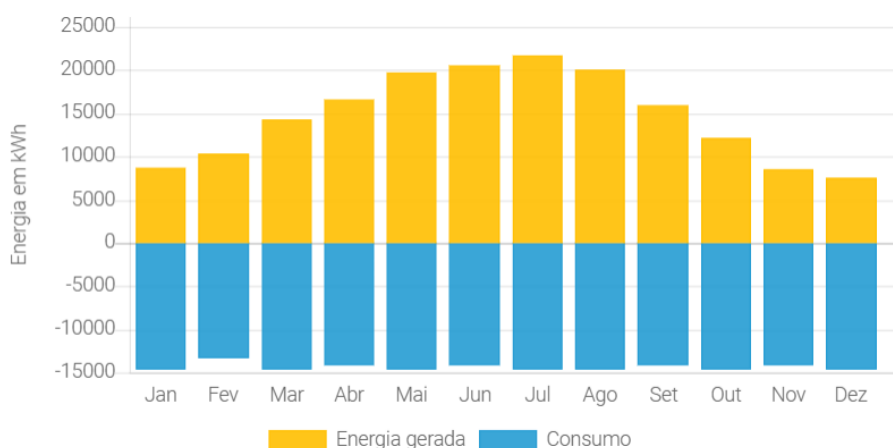


Figura 66-Consumo da central e geração de energia dos 164 painéis FV distribuídos na vila (extraído de [20])

Com base nos resultados obtidos da simulação e considerando a produção de energia anual das 50 turbinas ICON na vila, estimou-se um total anual de produção energia elétrica renovável de cerca de 974,7 MWh pelas duas FER. Isto é, a energia eólica com uma produção de 71,94 MWh e a energia FV com uma produção de 902,76 MWh.

Embora grande parte da energia fotovoltaica seja injetada na rede, cerca de 60%, estima-se que a quantidade de energia gerada por fontes renováveis seja ligeiramente superior à energia consumida pela central, ou seja, 974,7 MWh e 947,23 MWh, respetivamente, (ver Tabela 13 e Figura 67), o que cumpre com os objetivos estabelecidos da central ser autossuficiente em termos energéticos no balanço global anual, apesar de ser necessário a interação com a rede elétrica pública para a adequada gestão do seu funcionamento.

Tabela 13-Estimativa da energia elétrica gerada pelos painéis FV e turbinas ICON

Meses	Produção FV [kWh]	Produção eólica [kWh]
Janeiro	54159	5404
Fevereiro	59932	5204,5
Março	75591	6055,5
Abril	82081	6626,5
Mai	91675	6075
Junho	93608	6863,5
Julho	99315	7970,5
Agosto	96964	7404
Setembro	82693	5053,5
Outubro	67487	4757
Novembro	50755	4919,5
Dezembro	48498	5605
Totais parciais	902758	71938,5
Total [MWh]	974,7	

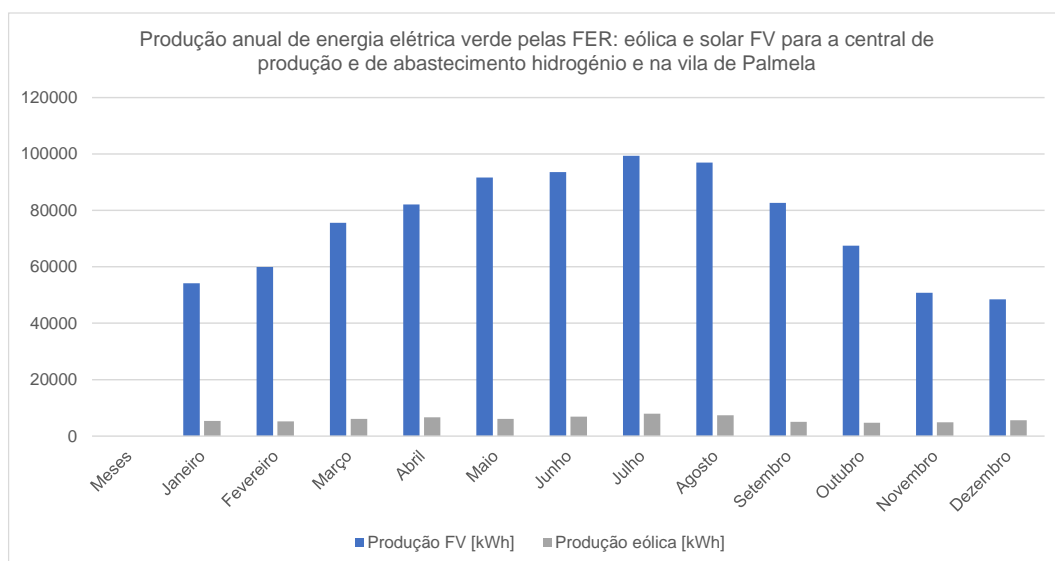


Figura 67-Energia elétrica gerada anualmente pelas FER: eólica e solar FV

Capítulo 7

Conclusões

Com este trabalho pretendeu-se estudar e propor a implementação de um sistema de apoio à mobilidade verde de algumas localidades do concelho de Palmela, de modo a promover o uso de transportes públicos, através da dinamização de uma rede melhorada e alargada de serviços de mobilidade baseada em veículos a hidrogénio com *fuel cell*. Desta forma, concebeu-se um sistema que integra: a geração de energia elétrica de fontes renováveis (eólica e fotovoltaica), a produção e armazenamento de hidrogénio e a sua utilização em veículos de transporte público.

Como tal, retira-se as seguintes conclusões:

- A partir da revisão bibliográfica às TEEVs concluiu-se que: as turbinas ICON poderão ser instaladas em ambientes urbanos, visto que: emitem um ruído abaixo de 38 dB, uma vez que as ICON são consideradas TEEVs, logo, também se afirma que: o aumento da sua eficiência total é diretamente proporcional em relação ao aumento do espaçamento entre as mesmas, não necessitam de qualquer dispositivo de orientação do vento e apresentam um visual discreto em relação às atuais TEEVs modernas de 3 pás;
- Com base no histórico do vento na vila de Palmela nos últimos 30 anos, verificou-se que o vento predomina a NO e seguidamente a NNO e a ONO, sendo um dado importante para a decisão sobre os locais de instalação das turbinas;
- Atendendo aos dados da Tabela 7 estimou-se que a produção de energia eólica anual de uma turbina ICON será cerca de 1,44 MWh;
- O sistema FV será operado num sistema híbrido, o qual pretende-se incluir um banco de baterias, de modo a evitar a aquisição de energia elétrica à rede nas horas de ponta e cheias nos períodos em que não há produção de energia solar FV, bem como assegurar que a energia utilizada resulta de origem renovável. Os ângulos ótimos de inclinação e de azimute dos módulos FV para cada local foram obtidos utilizando o software “Photovoltaic geographical information system”;
- Durante a seleção do painel FV e respetivo inversor com base no software de simulação “PV*SOL”, foi necessário fazer a seleção dos equipamentos considerando o fator de dimensionamento da configuração dos inversores, cuja gama de conformidade se encontra entre os 100 e os 120 %, obtendo um valor de cerca de 111,8%. Outro fator que também se considerou neste estudo foi a seleção da curva de carga, cujo parâmetro que mais se assemelhou ao diagrama da central de produção e de abastecimento do sistema foi a curva “Perfil de carga constante”;
- A partir dos estudos efetuados para as energias eólica e FV efetuou-se uma estimativa da produção de energia no local da central e num ponto de estacionamento, considerando-se 20 painéis, número definido pelo programa, e uma

turbina para ambos locais. Como tal, somando os dois sistemas, obtiveram-se produções anuais de cerca 23,44 MWh, para a central (local “1.”) e 22,32 MWh para o estacionamento (local “6.”);

- Em relação à escolha fundamentada de tipo veículos optou-se pela escolha de viaturas a hidrogénio com *fuel cell* devido aos seguintes aspetos: rapidez de abastecimento de hidrogénio ao veículo, maior autonomia com um abastecimento, capacidade de descentralizar a produção de hidrogénio para períodos do dia com menor consumo de energia elétrica e devido ao facto de irem ao encontro dos objetivos do desenvolvimento sustentável;
- Apesar de se ter verificado que a produção de hidrogénio verde pode ser efetuada por gaseificação de biomassa descarbonizada, nomeadamente através de uma unidade de membrana para a remoção de CO₂, a escassez de biomassa na região orientou a escolha da tecnologia a aplicar para a eletrólise da água com PEM, recorrendo a aquíferos, para a execução do processo (eletrólise);
- A quantidade diária de “combustível verde” que é necessária é cerca de 31,5 kg para uma frota de 7 miniautocarros, que irão percorrer diariamente uma distância de cerca de 1317,6 km;
- A central de produção e de abastecimento de hidrogénio será constituída pelos seguintes equipamentos: um sistema de tratamento de água, um eletrolisador PEM, um compressor de hidrogénio, um depósito de armazenamento de hidrogénio, uma estação de módulo com dispensador de hidrogénio e três bancos de baterias com uma capacidade de 240 kWh, cujos consumos energéticos diário e anual dos equipamentos serão cerca de 2595,1 kWh/dia e 947,21 MWh/ano;
- Por fim, considerando que as 50 turbinas ICON possuem uma produção anual de cerca de 71,94 MWh, terá de se basear na energia FV a produção anual dos cerca de 902,8 MWh necessários, que será produzida por 804 painéis, que irão ocupar uma área de cerca de 2252 m² resultando numa produção anual total de cerca de 974,7 MWh;
- O sistema proposto irá contribuir para um desenvolvimento sustentável da região, através da transição energética dos transportes públicos, em que através da geração de energia elétrica por fontes renováveis se garante o funcionamento diário dos 7 miniautocarros sem emissões de gases poluentes.

Neste trabalho não foram considerados os custos que um projeto inovador deste tipo possui, nem feita uma análise de viabilidade económica da solução apresentada, porque estando muitas das tecnologias envolvidas ainda em desenvolvimento, terão de ser consideradas estratégicas e por isso suportadas por financiamentos públicos ou privados, sem visar o lucro imediato, mas com o objetivo a longo prazo de garantir a sustentabilidade ambiental do planeta.

Bibliografia

- [1] CASTRO, RUI. (2018). *Uma introdução às energias renováveis: eólica, fotovoltaica e mini-hídrica*. 3ª edição, IST Press.
- [2] HAU, ERICH. (2006). *Wind turbines-Fundamentals, Technologies, Application Economics*. 2ª edição, Springer.
- [3] Net zero guide. *Savonius Wind Turbine*. Acedido no dia 24 de setembro, em: <https://netzeroguide.com/savonius-wind-turbine/>
- [4] NELSON, V. (2009) *Wind Energy Renewable Energy and the Environment*. CRC Press.
- [5] KUMNAR, PALANISAMY MOHAN; SIVALINGAM, KRISHNAMOORTHY; NARASIMALU, SRIKANTH; LIM, TEIK-CHENG; RAMAKRISHNA, SEERAM; WEI, HE. (2019). A Review on the Evolution of Darrieus Vertical Axis Wind Turbine: Small Wind Turbines. [Versão eletrónica]. *Journal of power and energy engineering*, Vol.7, abril de 2019. Acedido no dia 24 de setembro de 2023, em: https://www.scirp.org/pdf/JPEE_2019042615031517.pdf
- [6] FARRELL, STEPHEN. (2017). Wind turbine project enters commercialisation phase. [Versão eletrónica]. *Insider media*, 7 de abril de 2017. Acedido no dia 27 de setembro de 2023, em: <https://www.insidermedia.com/news/wales/wind-turbine-project-enters-commercialisation-phase>
- [7] Município de Castro Verde. *Moinho de Vento do Largo da Feira*. Acedido no dia 27 de setembro de 2023, em: <https://www.cm-castroverde.pt/pt/232/moinho-de-vento.aspx#prettyPhoto>
- [8] Stockio. *American Mill*. Acedido no dia 27 de setembro de 2023, em: <https://www.stockio.com/free-photo/american-mill>
- [9] Iberdrola. *Aerogeradores: O que é uma turbina eólica e como funciona*. Acedido no dia 27 de setembro de 2023, em: <https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/pas-aerogeradores>
- [10] HANSEN, JOACHIM TOFTEGAARD; MAHAK, MAHAK; TZANAKIS, IAKOVOS. (2021). Numerical modelling and optimization of vertical axis wind turbine pairs: A scale up approach. [Versão eletrónica]. *Renewable Energy*, Vol. 171, junho de 2021. Acedido no dia 3 de março de 2023, em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096014812100344X?via%3Dihub>
- [11] LI, SHOUTU; CHEN, QIN; LI, YE; PRÖBSTING, STEFAN; YANG, CONGXIN; ZHENG, XIAOBO; YANG, YANNIAN; ZHY, WEIJUN; SHEN, WENZHONG; WU, FAMING; LI, DESHUN; WANG, TONGGUANG; KE, SHITANG. (2022). Experimental investigation on noise characteristics of small scale vertical axis wind turbines in urban environments. [Versão eletrónica]. *Renewable Energy*, Vol. 200, novembro de 2022. Acedido no dia 8 de março de 2023, em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148122014598>

- [12] Wingardium-Energy & Kohilo Wind. (2023). Hybrid Turbine - Lighting Pole. [Versão eletrónica].
- [13] Wingardium-Energy & Kohilo Wind. (2023). Kohilo ICON Specifications. [Versão eletrónica].
- [14] Meteoblue. *Dados históricos simulados de clima e tempo para Palmela*. Acedido entre os dias 10 e 12 de maio de 2023, em: https://www.meteoblue.com/pt/tempo/historyclimate/climatemodelled/palmela_portugal_2265223
- [15] Google Earth. Acedido no dia 11 de abril de 2023, em: <https://earth.google.com/web/@38.56734348,-8.88068089,57.00943043a,8727.18201045d,35y,346.69875281h,0t,0r/data=MikKJwoICiExRkxBWThZQzBfTktSdG9MZ2g0NmdUallUMWdBRTVvMmQgAQ>
- [16] JINKO SOLAR. Tiger Neo N-type 78HL4-(V) 595-615 Watt. Acedido no dia 13 de junho de 2023, em: [https://jinkosolarcdn.shwebspace.com/uploads/62f9be26/JKM595-615N-78HL4-\(V\)-F1.1-PT.pdf](https://jinkosolarcdn.shwebspace.com/uploads/62f9be26/JKM595-615N-78HL4-(V)-F1.1-PT.pdf)
- [17] ARCHI EXPO. Painel fotovoltaico policristalino JKM265P-60. Acedido no dia 19 de outubro de 2023, em: <https://www.archiexpo.com/pt/prod/jinko-solar/product-68245-1501159.html>
- [18] LITER OF LIGHT USA. *Solar Panel Diagrams – How Does Solar Power Work?*. Acedido no dia 25 de outubro de 2023, em: <https://www.literoflightusa.org/solar-panel-diagrams/>
- [19] PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM. Acedido entre os dias 13 e 15 de maio de 2023, em: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/
- [20] PV*SOL. Acedido entre os dias 16 e 18 de junho de 2023, em: <https://pvsol-online.valentin-software.com/#/>
- [21] FÜNFELD, CHRISTIAN; TIEDEMANN, REMO. (2000). *Aplicação dos Perfis de carga VDEW representativos passo a passo*. [Versão eletrónica]. Acedido no dia 30 de Julho de 2023, em: https://www.bdew.de/media/documents/2000131_Anwendung-repraesentativen_Lastprofile-Step-by-step.pdf
- [22] PRAMUANJAROENKIJ, ANCHASA; KAKAÇ, SADIK. (2023). The fuel cell electric vehicles: the highlight review. [Versão eletrónica]. *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 48, março. Acedido no dia 5 de julho de 2023, em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319922053368#sec6>
- [23] GUPTA, SANJAY; PERVEEN, REHANA. (2023). Fuel cell in electric vehicle. [Versão eletrónica]. *Materials Today: Proceedings*, fevereiro de 2023. Acedido no dia 29 de julho de 2023, em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785323005588>
- [24] SUSTAINABLE BUS. Renault Master City Bus. Acedido no dia 5 de julho de 2023, em: <https://www.sustainable-bus.com/news/renault-master-city-bus-h2-tech-pvi-minibus-fuel-cell/>

- [25] RENAULT GROUP. HYVIA presents Master City Bus H2-TECH at the Salon des Maires, France: first hydrogen-powered urban minibus in Europe. Acedido no dia 5 de julho de 2023, em: <https://media.renaultgroup.com/hyvia-presents-master-city-bus-h2-tech-at-the-salon-des-maires-france-first-hydrogen-powered-urban-minibus-in-europe/>
- [26] KUMAR, S. SHIVA; LIM, HANKWON. (2022). An overview of water electrolysis technologies for green hydrogen production. [Versão eletrónica]. *Energy Reports*, Vol. 8, novembro de 2022. Acedido no dia 17 de março de 2023, em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484722020625>
- [27] CORMOS, CALIN-CRISTIAN. (2023). Green hydrogen production from decarbonized biomass gasification: An integrated techno-economic and environmental analysis. [Versão eletrónica]. *Energy*, fevereiro de 2023. Acedido no dia 23 de março, em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544223003201>
- [28] NEL HYDROGEN. (2021). C Series Proton Exchange Membrane (PEM) Hydrogen Generation Systems. Acedido no dia 10 de julho de 2023, em: <https://nelhydrogen.com/wp-content/uploads/2020/03/C-Series-Spec-Sheet-Rev-H.pdf>
- [29] HYDRO-PAC, Inc. LX-SERIES™ Hydrogen Gas Compressors 1500 to 12000 PSI. Acedido no dia 15 de Julho de 2023, em: http://www.hydropac.com/literature/LX-SERIES%20Hydrogen%20Brochure%2001_2011-%20reduced.pdf
- [30] NEL HYDROGEN. Hydrogen Fueling Storage. Acedido no 25 de julho de 2023, em: <https://nelhydrogen.com/product/hydrogen-fueling-storage/>
- [31] NEL HYDROGEN. (2022). H2Station-Hydrogen Refueling Station. Acedido no 25 de julho de 2023, em: <https://nelhydrogen.com/wp-content/uploads/2023/01/PM-TER-0030-EN.pdf>
- [32] NEL HYDROGEN. (2022). Hydrogen Fueling Station. Acedido no 25 de julho de 2023, em: https://nelhydrogen.com/wp-content/uploads/2020/03/H2Station-Brochure_20221208.pdf
- [33] NEL HYDROGEN. (2022). Hydrogen Dispenser Hydrogen Refueling Station. Acedido no 25 de julho de 2023, em: <https://nelhydrogen.com/product/hydrogen-dispenser/>
- [34] RODI SYSTEMS. PureBox HPW. Acedido no dia 28 de julho de 2023, em: https://www.rodisystems.com/uploads/1/0/8/3/108367751/rodi_systems_purebox_high_purity_brochure.pdf
- [35] SAULNIER, RAIN; MINNICH, KEITH; STURGESS, P. KIM. (2020). Water For The Hydrogen Economy. *Water Smart*, novembro de 2020. Acedido no dia 1 de agosto, em: https://watersmartsolutions.ca/wp-content/uploads/2020/12/Water-for-the-Hydrogen-Economy_WaterSMART-Whitepaper_November-2020.pdf
- [36] ERSE. Tarifas e preços-eletricidade. Acedido no dia 27 de outubro, em: <https://www.erse.pt/atividade/regulacao/tarifas-e-precos-eletricidade/#tarifas-e-precos-regulados>

- [37] DELTA ELECTRONICS, INC. Solar solutions / M70A Flex. Acedido no dia 18 novembro de 2023, em: <https://solarsolutions.delta-emea.com/en/M70A-1569.htm>
- [38] DELTA ELECTRONICS, INC. Solar solutions / M50A Flex. Acedido no dia 21 novembro de 2023, em: <https://solarsolutions.delta-emea.com/en/M50A-260-2031.htm>
- [39] Wingardium Energy. *Concept of a Green Hydrogen Fuelling Station*. Acedido no dia 17 de janeiro de 2023, em: Web site da: Wingardium Energy: <https://wingardium-energy.com/concepts/hydrogen-fueling-station>

Anexo 1

Este anexo é dedicado à apresentação dos cálculos que foram efetuados ao longo do trabalho, ou seja, a estimativa da produção de energia eólica, a quantidade de hidrogénio “verde” necessária, o consumo anual da central de produção e de abastecimento e, da capacidade de geração de energia elétrica renovável.

Cálculos da Energia Eólica

Nesta secção dos anexos serão revelados os cálculos efetuados à potência disponível, coeficiente de potência, potência útil e a produção anual de energia de uma turbina ICON.

$$P_{disp} = \frac{1}{2} \times 1,225 \times 2,52 \times 6,186^3 \Rightarrow P_{disp} = 365,3 \text{ W} \quad \text{A. I}$$

$$C_p = 0,0005490941 \times 6,186^3 - 0,15547666 \times 6,186^2 + 0,133116110 \times 6,186 - 0,012267615 \rightarrow C_p = 0,34 \quad \text{A. II}$$

$$P_{\acute{u}til} = 0,344 \times 365,3 \Rightarrow P_{\acute{u}til} = 125,77 \text{ W} \quad \text{A. III}$$

$$E = 125,77 \times 8760 \times 10^{-6} \Rightarrow E = 1,102 \text{ MWh} \quad \text{A. IV}$$

Cálculos da quantidade hidrogénio “verde” necessária

Neste anexo determinou-se as quantidades de hidrogénio diária definitiva e de reserva durante três dias.

$$\text{Quantidade de hidrogénio diária} = \left(\frac{1317,6 \times 4,5}{225}\right) \times 1,193 = 31,5 \text{ kg} \quad \text{A. V}$$

$$\text{Quantidade de hidrogénio para 3 dias} = 31,5 \text{ [kg]} \times 3 = 94,5 \text{ kg} \quad \text{A. VI}$$

Cálculos do consumo anual da central de produção e de abastecimento

Divisão dedicada aos cálculos dos consumos dos equipamentos da central para fins de se obter os consumos energéticos diário e anual e a potência mínima da central.

$$\begin{aligned} \text{Consumo energético diário do eletrolisador} &= 120,3 \text{ [kW]} \times 17,5 \text{ [h]} && \text{A. VII} \\ &= 2105,3 \text{ kWh} \end{aligned}$$

$$\text{Tempo de funcionamento} = \frac{31,5 \text{ [kg]} \times 24 \text{ [h]}}{43,3 \text{ [kg]}} = 17,5 \text{ h} \quad \text{A. VIII}$$

$$\text{Quantidade horária de hidrogénio produzida} = \frac{43,3 \text{ [kg]}}{24 \text{ [h]}} = 1,8 \text{ kg/h} \quad \text{A. IX}$$

$$\dot{Q}_{\text{eletrolisador}} = \frac{2105,3}{17,5} = 120,3 \text{ kW} \quad \text{A. X}$$

$$\text{Consumo energético do compressor} = 7,5 \text{ [kW]} \times 17,5 \text{ [h]} = 131,3 \text{ kWh} \quad \text{A. XI}$$

$$\text{Consumo energético do compressor da estação} = 1,1 \times 31,5 = 34,7 \text{ kWh} \quad \text{A. XII}$$

$$\dot{Q}_{\text{compressor da estação}} = \frac{34,7}{0,7} = 49,6 \text{ kW} \quad \text{A. XIII}$$

$$m = \rho \times v = 998 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \times (10,35 \times 10^{-3}) \text{ [m}^3] = 10,33 \text{ kg} \quad \text{A. XIV}$$

$$\text{Consumo de água} = 31,5 \times 10,33 = 325,37 \text{ kg} \quad \text{A. XV}$$

$$\text{Consumo de água} = \left(\frac{325,37}{998} \right) \times 1000 = 326,025 \text{ L} \quad \text{A. XVI}$$

$$\begin{aligned} \text{Consumo energético do sistema de tratamento de água} &= \dot{Q}_{\text{sistema}} \times \Delta t && \text{A. XVII} \\ &= 3,5 \times 0,5 = 1,75 \text{ kWh} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Capacidade diária de tratamento de produção do sistema} &= \frac{6500}{0,264172} & \text{A. XVIII} \\ &= 24605,18 \text{ L/dia} \end{aligned}$$

$$\dot{Q}_{\text{necessária}} = 120,3 + 7,5 + 49,6 + 37,5 + 10,9 = 229,3 \text{ kW} \quad \text{A. XIX}$$

$$\begin{aligned} \text{Consumo energético da central} & & \text{A. XX} \\ &= 2105,3 + 131,3 + 34,7 + 1,75 + 37,5 \times 0,2 \times 8 + 262 \\ &= 2595,1 \text{ kWh/dia} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Consumo energético anual da central} &= \frac{2595,1 \times 365}{1000} & \text{A. XXI} \\ &= 947,21 \text{ MWh/ano} \end{aligned}$$

Cálculos da capacidade de geração de energia elétrica renovável

Secção dedicada aos cálculos das produções de energia diária FV, ao número de painéis para a central e respetiva área de ocupação.

$$N^{\circ} \text{ de painéis para a central} = \frac{704 \left[\frac{MWh}{\text{ano}} \right] \times 20 [\text{painéis}]}{22 \left[\frac{MWh}{\text{ano}} \right]} = 640 \text{ painéis} \quad \text{A. XXII}$$

$$N^{\circ} \text{ de painéis para em redor da vila} = \frac{171,29 \left[\frac{MWh}{\text{ano}} \right] \times 20 [\text{painéis}]}{20,9 \left[\frac{MWh}{\text{ano}} \right]} \quad \text{A. XXIII}$$
$$= 164 \text{ painéis}$$

$$\text{Área de ocupação pelos painéis a instalar na central} = 640 \times 2,8 [m^2] \quad \text{A. XXIV}$$
$$= 1792 m^2$$

$$\text{Área de ocupação pelos painéis em redor da vila} = 164 \times 2,8 [m^2] \quad \text{A. XXV}$$
$$= 460 m^2$$

Anexo 2

Este anexo será dedicado a todos os componentes que complementarão o projeto pretendido como a representação de outros exemplos em relação aos fins das turbinas ICON, resultados das simulações efetuadas aos locais pretendidos para a implementação das turbinas, complementos de informação acerca da energia eólica, bem como à determinação dos ângulos ótimos de inclinação e de azimute e os históricos das irradiações globais (entre 2005 e 2020) horizontal, ângulo ótimo, direta, difusa e total e, ainda do rácio solar difuso das temperaturas médias mensais.

Neste anexo também serão reveladas as turbinas ciclone da empresa belga, que são estações de abastecimento de hidrogénio “verde”. Serão também apresentados os períodos horários das tarifas de eletricidade definido pela ERSE e os inversores propostos da marca “Delta electronics”.



Figura An 1-Visão das estações de abastecimento de hidrogénio “verde” para frotas (1)
(extraído de [39])



Figura An 2-Visão das estações de abastecimento de hidrogénio “verde” para frotas (2)
(extraído de [39])

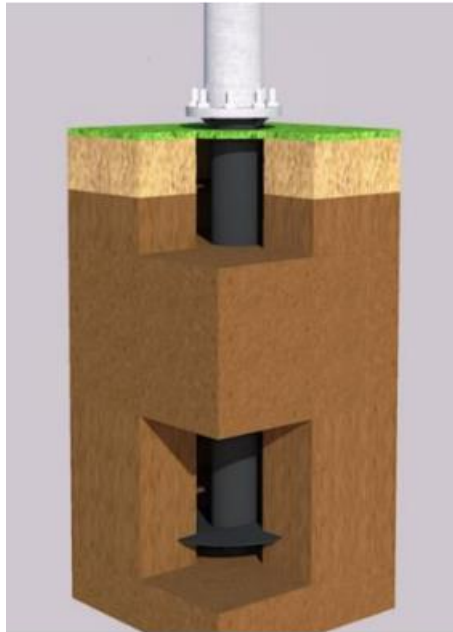


Figura An 3- Corte vertical da fundação da turbina ICON
Cordialmente cedido pela organização “Wingardium-energy” (extraído de [12])



Figura An 4-Turbina ICON como posto de carregamento
Cedido cordialmente pela empresa “Wingardium-energy” [12]

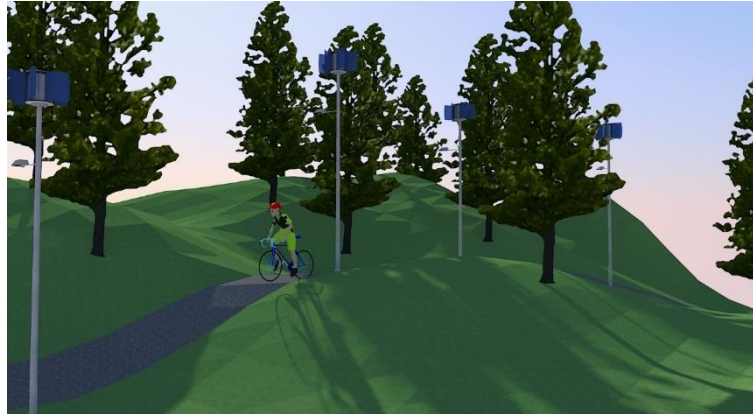


Figura An 5-Exemplo de implementação num trajeto para bicicletas com iluminação verde através das turbinas ICON
Cedido cordialmente pela empresa “Wingardium-energy” [12]

PVGIS-5 estimates of solar electricity generation:

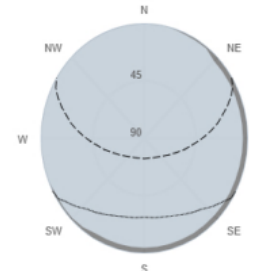
Provided inputs:

Latitude/Longitude: 38.583,-8.920
 Horizon: Calculated
 Database used: PVGIS-SARAH2
 PV technology: Crystalline silicon
 PV installed: 0.615 kWp
 System loss: 14 %

Simulation outputs

Slope angle: 34 (opt) °
 Azimuth angle: 5 (opt) °
 Yearly PV energy production: 987.04 kWh
 Yearly in-plane irradiation: 2028.3 kWh/m²
 Year-to-year variability: 32.33 kWh
 Changes in output due to:
 Angle of incidence: -2.68 %
 Spectral effects: 0.57 %
 Temperature and low irradiance: -5.99 %
 Total loss: -20.87 %

Outline of horizon at chosen location:



■ Horizon height
 - - Sun height, June
 ··· Sun height, December

Figura An 6 -Determinação dos ângulos ótimos de inclinação e de azimute para o local da central através do portal “PVGIS” (1)
(extraído de[19])

PVGIS-5 estimates of solar electricity generation:

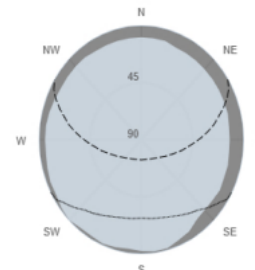
Provided inputs:

Latitude/Longitude: 38.570,-8.906
 Horizon: Calculated
 Database used: PVGIS-SARAH2
 PV technology: Crystalline silicon
 PV installed: 0.615 kWp
 System loss: 14 %

Simulation outputs

Slope angle: 33 (opt) °
 Azimuth angle: 8 (opt) °
 Yearly PV energy production: 980.21 kWh
 Yearly in-plane irradiation: 2014.64 kWh/m²
 Year-to-year variability: 32.02 kWh
 Changes in output due to:
 Angle of incidence: -2.58 %
 Spectral effects: 0.57 %
 Temperature and low irradiance: -6.1 %
 Total loss: -20.89 %

Outline of horizon at chosen location:



■ Horizon height
 - - Sun height, June
 ··· Sun height, December

Figura An 7-Determinação dos ângulos ótimos de inclinação e de azimute para o local 6 através do portal “PVGIS” (2)
(extraído de [19])

PVGIS-5 estimates of solar electricity generation:

Provided inputs:

Latitude/Longitude: 38.570,-8.906
Horizon: Calculated
Database used: PVGIS-SARAH2
PV technology: Crystalline silicon
PV installed: 0.615 kWp
System loss: 14 %

Simulation outputs

Slope angle: 10 °
Azimuth angle: 8 °
Yearly PV energy production: 914.24 kWh
Yearly in-plane irradiation: 1884.94 kWh/m²
Year-to-year variability: 23.56 kWh
Changes in output due to:
Angle of incidence: -2.93 %
Spectral effects: 0.46 %
Temperature and low irradiance: -5.96 %
Total loss: -21.13 %

Outline of horizon at chosen location:

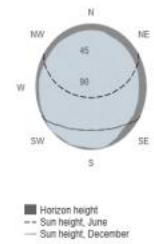


Figura An 8-Determinação do ângulo ótimo de inclinação e de azimute para o local 6 através do portal “PVGIS” (3)
(extraído de [19])



Figura An 9-Inversor da marca: Delta eletronic, modelo: M70A Flex
(extraído de [37])



Figura An 10- Inversor da marca: Delta eletronic, modelo: M50A Flex (extraído de [38])

Energia gerada anualmente	22001 kWh
Rendimento anual especifico	1788.67 kWh/kWp
Desempenho do sistema (PR)	89.05 %

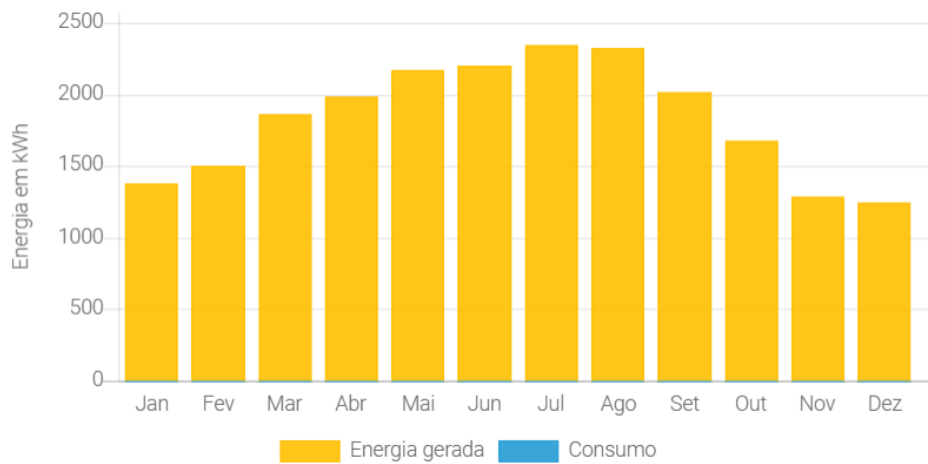


Figura An 11-Simulação da produção anual de energia fotovoltaica considerando a curva de carga Perfil de carga com carga constante ao local "1." (sem consumos) usando o software "PV*SOL online" (extraído de [20])

Energia gerada anualmente	21168 kWh
Rendimento anual específico	1720.96 kWh/kWp
Desempenho do sistema (PR)	90.67 %

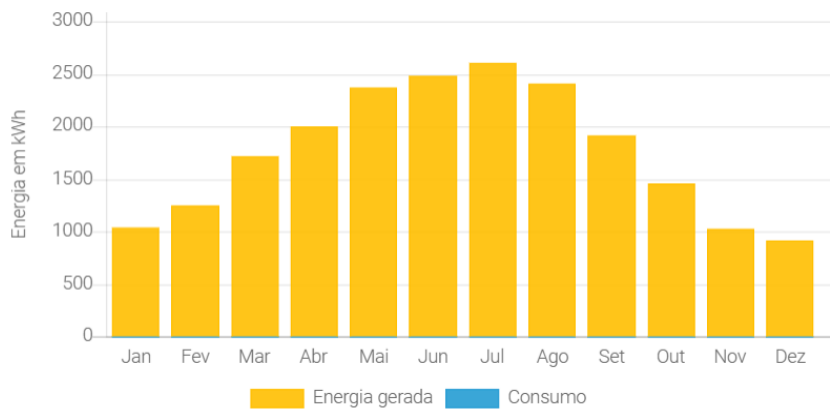


Figura An 12-Simulação da produção anual de energia fotovoltaica considerando a curva de carga Perfil de carga com carga constante ao local "6." (sem consumos) usando o software "PV*SOL online" (extraído de [20])

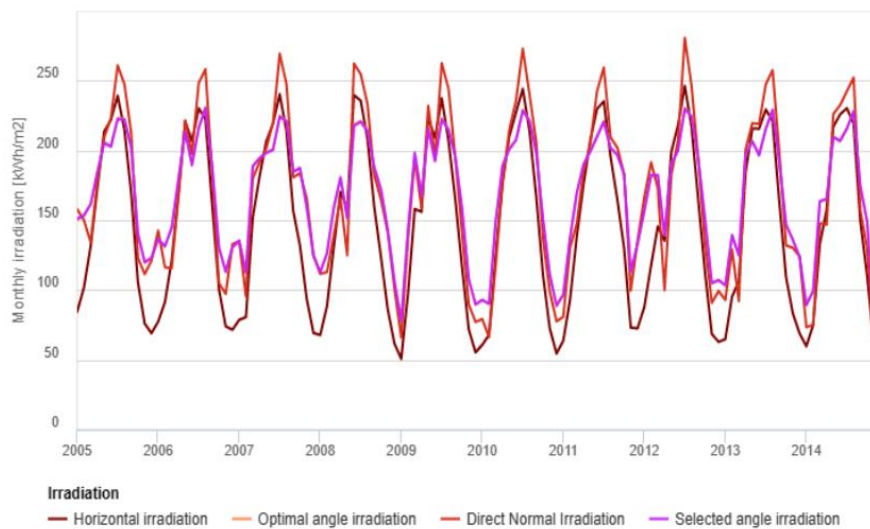


Figura An 13-Histórico das irradiações solares entre 2005 e 2014 do local "1." (extraído de [19])

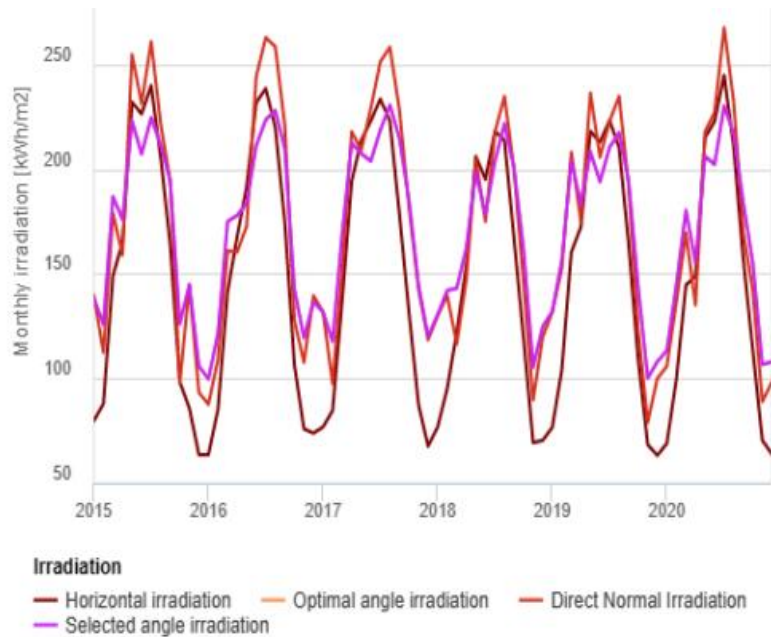


Figura An 14-Histórico das irradiações solares entre 2015 e 2020 do local “1.”
(extraído de [19])

Global horizontal irradiation

Month	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
January	84.53	77.4	78.63	67.77	50.78	60.76	63.73	87.79	64.81	59.71
February	101.73	91.36	80.62	88.47	97.22	67.88	93.03	117.47	95.32	74.77
March	131.44	121.36	151.67	130.51	158.07	125.5	138.47	145.55	106.36	132.98
April	173.5	169.41	181.02	170.22	156.07	176.48	175.82	135.43	184.22	157.39
May	213.63	220.88	206.42	158.64	223.41	210.05	207.35	198.99	215.75	217
June	221.94	206.91	219.18	239.67	208.88	227.28	229.83	218.21	215.58	225.85
July	239.19	230.23	240.31	235.66	237.37	244.13	235.17	246.21	229.32	230.31
August	214.92	222.32	213.84	208.15	207.01	213.98	195.63	216.84	220.86	219.44
September	169.58	161.09	156.78	159.64	165.22	166.83	165.13	164.16	163.07	149.26
October	105.59	100.67	131.84	123.56	116.69	110.66	130.16	112.24	109.09	110.39
November	76	74	93.63	86.14	71.75	72.5	73.09	68.54	83.3	62.35
December	69.08	71.56	69.24	61.53	55.41	54.53	72.57	62.87	68.93	71.05

Figura An 15-Histórico da irradiação global horizontal do local 1 entre 2005 e 2014
(extraído de [19])

Global horizontal irradiation

Month	2015	2016	2017	2018	2019	2020
January	79.85	63.61	76.84	76.82	76.6	68.99
February	87.86	85.35	84.66	95.17	103.97	99.63
March	149.04	141.22	137.31	121.88	160.36	144.65
April	165.05	167.68	194.23	154.11	172.35	148.8
May	231.96	191.57	213.67	206.01	218	214.99
June	226.35	231.71	223.03	195.12	212.89	222.79
July	239.81	238.46	233.41	217.98	223.19	244.79
August	205.62	219.92	222.99	213.73	210.27	210.56
September	163.81	174.6	178.42	166.83	164.29	157.3
October	98.36	106.53	131.58	119.16	109.15	113.69
November	85.83	75.93	87.47	69.37	68.45	70.52
December	63.63	73.91	67.72	70.48	63.26	63.93

Figura An 16-Histórico da irradiação global horizontal do local 1 entre 2015 e 2020
(extraído de [19])

Direct Normal Irradiation

Month	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
January	157.87	142.61	134.98	111.58	65.9	79.18	80.8	166.41	92.94	73.39
February	150.16	116.35	95.47	112.89	136.76	66.26	130.18	191.46	128.95	75.08
March	134.16	115.6	179.7	138.95	194.43	118.3	147.48	173.01	92.06	147.69
April	178.05	167	191.53	165.44	158.81	177.12	184.48	99.97	200.7	146.86
May	209.42	221.47	201.35	124.93	231.97	214.55	204.94	182.65	219.56	226.06
June	223.13	197.7	219.86	262.31	195.2	235.72	242.41	207.21	219.05	232.44
July	260.95	248.4	269.3	254.68	262.49	272.86	259.35	280.62	247.44	242.34
August	247.5	258.15	247.69	233.18	244.24	240.25	209.42	246.09	257.58	252.18
September	212.61	183.2	180.74	182.35	195.06	205.61	202.09	193.39	198.36	157.04
October	123.1	104.96	183.67	164.75	141.93	136.9	183.32	133.16	131.97	129.77
November	111.43	97.29	165.75	141.64	89.66	98.85	99.7	90.77	130.26	67.85
December	120.97	132.9	124.86	100.83	77.19	77.58	135.26	99.3	124.16	134.28

Figura An 17-Histórico da irradiação direta do local 1 entre 2005 e 2014
(extraído de [19])

Direct Normal Irradiation

Month	2015	2016	2017	2018	2019	2020
January	139.79	87.68	131.76	129.92	131.66	105.92
February	112.53	109.11	97.71	139.67	152.51	136.57
March	178.85	160.99	151.03	116.52	208.05	169.49
April	159.01	160.33	217.92	147.19	174.96	135.09
May	254.68	172.74	209.06	204.67	236.32	217.79
June	231.22	244.06	229.01	175.01	205.71	227.12
July	260.79	262.76	251.27	217.65	222.72	267.5
August	221.59	258.43	258.22	234.73	234.77	232.08
September	194.05	220.61	228.21	199.84	191.99	169.67
October	97.63	127.69	181.99	145.31	122.8	141.97
November	144.77	107.7	142.44	89.72	79.05	88.94
December	93.3	139.52	118.54	119.83	99.97	98.27

Figura An 18-Histórico da irradiação direta do local 1 entre 2015 e 2020
(extraído de [19])

Global irradiation optimum angle

Month	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
January	150.52	136.03	134.8	112.43	77.59	92.65	96.46	156.06	103.21	89.13
February	153.1	131.07	112.32	126.14	142.38	90.04	137.01	181.81	138.98	99.09
March	161.42	144.62	188.49	158.84	198.05	149.57	169.41	182.28	124.9	163.48
April	184.72	179.46	194.53	180.74	167.42	189.14	190.13	139.18	197.53	165.31
May	205.83	213.9	198.66	151.79	215.65	201.3	199.65	190.55	206.9	209.91
June	203.34	190.03	200.94	218.41	192.93	208.01	210.46	200.6	197.17	207.4
July	223.12	216.55	224.82	221.09	222.8	229.17	221.08	230.43	216.04	216.09
August	222.56	230.78	221.2	214.39	215.24	221.5	201.99	224.59	229.32	228.33
September	202.13	188.34	184.64	187.99	195.77	198.47	196.82	193.46	191.79	174.34
October	140.18	130.23	187.12	171.72	158.32	150.33	182.68	150.25	146.72	148.9
November	119.65	112.91	159.02	142.76	107.53	110.73	113.07	104.72	135.59	88.73
December	122.58	130.3	124.18	105.75	89.53	88.61	132.53	106.73	123.4	130.17

Figura An 19-Histórico da irradiação global com o ângulo ótimo do local 1 entre 2005 e 2014
(extraído de [19])

Global irradiation optimum angle

Month	2015	2016	2017	2018	2019	2020
January	138.15	99.72	131.71	130.43	131.84	113.29
February	125.87	121.52	117.72	141.93	156.1	144.6
March	186.83	174.93	168.92	143.09	203.77	180.3
April	175.92	177.89	212.5	162.21	183.34	155.44
May	223.05	183.63	207.47	198.73	208.25	206.19
June	207.34	211.26	203.94	178.43	194.06	202.34
July	224.61	223.66	218.73	203.95	210.48	230.28
August	211.73	228	230.6	221.75	217.42	217.14
September	194.26	209.62	214.64	200.34	194.23	183.97
October	126.08	142.74	185.02	161.56	143.62	155.32
November	144.56	119.34	144.49	105.32	100.13	106.62
December	105.86	136.41	119.82	124.69	107.95	107.97

Figura An 20-Histórico da irradiação global com o ângulo ótimo do local 1 entre 2015 e 2020 (extraído de [19])

Global irradiation at angle

Month	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
January	151.22	136.65	135.38	112.89	77.86	92.97	96.78	156.78	103.6	89.41
February	153.57	131.42	112.59	126.47	142.78	90.22	137.41	182.41	139.37	99.28
March	161.57	144.71	188.68	158.97	198.25	149.67	169.56	182.48	124.96	163.63
April	184.53	179.26	194.34	180.56	167.27	188.97	189.97	139.01	197.34	165.12
May	205.33	213.39	198.17	151.43	215.11	200.79	199.15	190.07	206.37	209.4
June	202.69	189.43	200.29	217.67	192.34	207.33	209.76	199.97	196.53	206.72
July	222.45	215.91	224.15	220.44	222.14	228.49	220.43	229.73	215.41	215.45
August	222.21	230.43	220.85	214.05	214.91	221.15	201.68	224.24	228.97	227.99
September	202.21	188.38	184.69	188.04	195.83	198.54	196.9	193.51	191.83	174.38
October	140.43	130.44	187.58	172.11	158.64	150.64	183.11	150.54	147.01	149.2
November	120.08	113.29	159.68	143.34	107.87	111.1	113.47	105.07	136.11	88.98
December	123.15	130.93	124.77	106.21	89.88	88.96	133.17	107.19	123.98	130.81

Figura An 21-Histórico da irradiação global com o ângulo de 34° do local 1 entre 2005 e 2014 (extraído de [19])

Global irradiation at angle

Month	2015	2016	2017	2018	2019	2020
January	138.29	99.8	131.85	130.57	131.98	113.4
February	125.95	121.6	117.78	142.04	156.22	144.7
March	186.88	174.97	168.95	143.1	203.83	180.35
April	175.88	177.84	212.46	162.17	183.29	155.4
May	222.91	183.52	207.35	198.62	208.12	206.06
June	207.18	211.09	203.78	178.3	193.91	202.17
July	224.45	223.49	218.57	203.81	210.33	230.12
August	211.65	227.91	230.51	221.67	217.34	217.05
September	194.27	209.64	214.66	200.36	194.25	183.98
October	126.13	142.8	185.12	161.64	143.68	155.39
November	144.71	119.45	144.63	105.4	100.2	106.7
December	105.97	136.57	119.95	124.83	108.06	108.08

Figura An 22-Histórico da irradiação global com o ângulo de 34° do local 1 entre 2015 e 2020 (extraído de [19])

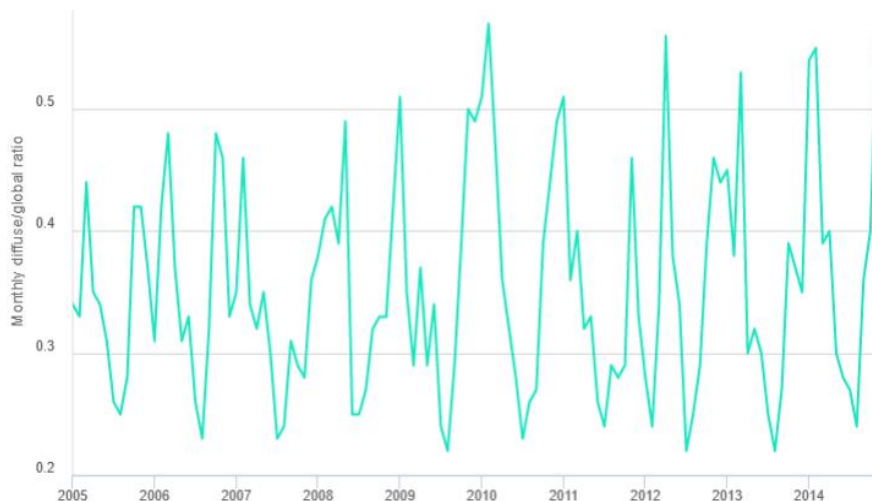


Figura An 23-Histórico da média mensal do rácio solar difuso entre 2005 e 2014 do local “1.”
(extraído de [19])



Figura An 24-Histórico da média mensal do rácio solar difuso entre 2015 e 2020 do local “1.”
(extraído de [19])

Month	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
January	0.34	0.31	0.35	0.38	0.51	0.51	0.51	0.28	0.45	0.54
February	0.33	0.42	0.46	0.41	0.35	0.57	0.36	0.24	0.38	0.55
March	0.44	0.48	0.34	0.42	0.29	0.47	0.4	0.34	0.53	0.39
April	0.35	0.37	0.32	0.39	0.37	0.36	0.32	0.56	0.3	0.4
May	0.34	0.31	0.35	0.49	0.29	0.32	0.33	0.38	0.32	0.3
June	0.31	0.33	0.3	0.25	0.34	0.28	0.26	0.34	0.3	0.28
July	0.26	0.26	0.23	0.25	0.24	0.23	0.24	0.22	0.25	0.27
August	0.25	0.23	0.24	0.27	0.22	0.26	0.29	0.25	0.22	0.24
September	0.28	0.32	0.31	0.32	0.29	0.27	0.28	0.29	0.27	0.36
October	0.42	0.48	0.29	0.33	0.39	0.39	0.29	0.39	0.39	0.4
November	0.42	0.46	0.28	0.33	0.5	0.44	0.46	0.46	0.37	0.55
December	0.37	0.33	0.36	0.42	0.49	0.49	0.33	0.44	0.35	0.33

Figura An 25-Histórico do rácio solar difuso do local 1 entre 2005 e 2014
(extraído de [19])

Month	2015	2016	2017	2018	2019	2020
January	0.34	0.47	0.35	0.36	0.35	0.43
February	0.42	0.41	0.47	0.34	0.32	0.37
March	0.33	0.38	0.37	0.47	0.26	0.35
April	0.39	0.39	0.27	0.4	0.35	0.44
May	0.24	0.39	0.31	0.33	0.27	0.31
June	0.28	0.27	0.28	0.38	0.35	0.31
July	0.25	0.23	0.25	0.32	0.3	0.23
August	0.29	0.22	0.23	0.26	0.26	0.27
September	0.3	0.25	0.23	0.28	0.3	0.34
October	0.5	0.39	0.3	0.38	0.43	0.38
November	0.32	0.42	0.33	0.48	0.53	0.49
December	0.46	0.32	0.37	0.37	0.43	0.44

Figura An 26-Histórico do rácio solar difuso do local 1 entre 2015 e 2020 (extraído de [19])

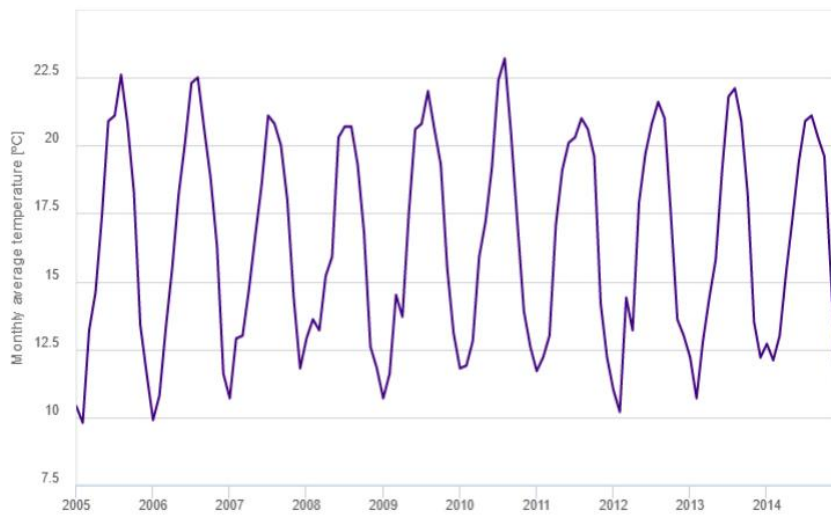


Figura An 27-Histórico da temperatura média mensal entre 2005 e 2014 do local "1." (extraído de [19])

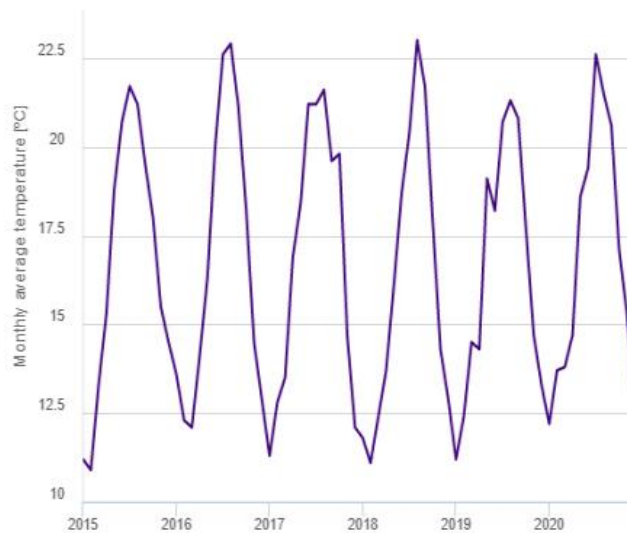


Figura An 28-Histórico da temperatura média mensal entre 2015 e 2020 do local "1." (extraído de [19])

Month	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
January	10.4	9.9	10.7	12.9	10.7	11.8	11.7	11	12.2	12.7
February	9.8	10.8	12.9	13.6	11.6	11.9	12.2	10.2	10.7	12.1
March	13.2	13.3	13	13.2	14.5	12.8	13	14.4	12.8	13
April	14.6	15.5	14.7	15.2	13.7	15.9	17.1	13.2	14.4	15.3
May	17.4	18.2	16.7	15.9	17.5	17.2	19.1	17.9	15.8	17.3
June	20.9	20.1	18.6	20.3	20.6	19.2	20.1	19.7	19.1	19.4
July	21.1	22.3	21.1	20.7	20.8	22.4	20.3	20.8	21.8	20.9
August	22.6	22.5	20.8	20.7	22	23.2	21	21.6	22.1	21.1
September	20.8	20.6	20	19.3	20.6	20.4	20.6	21	20.9	20.3
October	18.3	18.8	18	16.8	19.3	17.1	19.6	17.4	18.2	19.6
November	13.4	16.3	14.4	12.6	15.5	13.9	14.2	13.6	13.5	15.3
December	11.6	11.6	11.8	11.8	13.1	12.6	12.2	13	12.2	11.1

Figura An 29-Histórico da temperatura média mensal do local 1 entre 2005 e 2014 (extraído de [19])

Month	2015	2016	2017	2018	2019	2020
January	11.2	13.6	11.3	11.8	11.2	12.2
February	10.9	12.3	12.8	11.1	12.4	13.7
March	13.3	12.1	13.5	12.4	14.5	13.8
April	15.3	14.1	16.9	13.7	14.3	14.7
May	18.8	16.3	18.4	16.1	19.1	18.6
June	20.7	20	21.2	18.7	18.2	19.4
July	21.7	22.6	21.2	20.4	20.7	22.6
August	21.2	22.9	21.6	23	21.3	21.5
September	19.5	21.1	19.6	21.7	20.8	20.6
October	18	18.2	19.8	17.9	17.7	17.1
November	15.5	14.5	14.7	14.3	14.7	15.3
December	14.5	12.9	12.1	12.9	13.3	12.6

Figura An 30-Histórico da temperatura média mensal do local 1 entre 2015 e 2020 (extraído de [19])

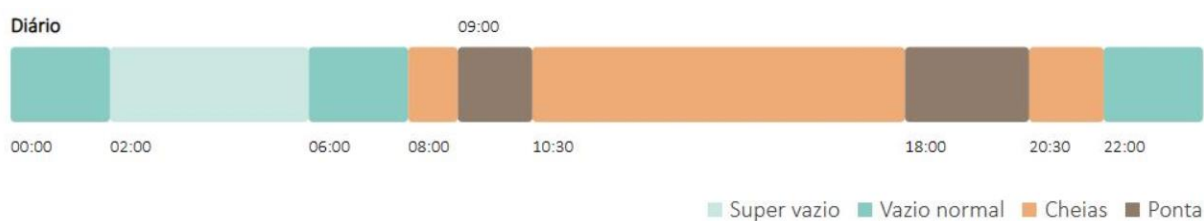


Figura An 31-Período horário de Inverno com ciclo diário da tarifa de eletricidade definido pela ERSE