



## **Produção de energia eólica residencial com armazenamento em baterias aplicada a sistemas isolados da rede elétrica**

**YURIY KALASHNYK**

(Licenciado em Engenharia de Automação, Controlo e Instrumentação)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Eletrotécnica no Ramo de Energia

**Orientadores:**

Doutora Rita Marcos Fontes Murta Pereira  
Doutor Pedro Miguel Neves da Fonte

**Júri:**

Presidente: Doutor João Hermínio Ninitas Lagarto

Vogais:

Doutora Cristina Inês Camus  
Doutora Rita Marcos Fontes Murta Pereira

**Novembro 2025**



# **Produção de energia eólica residencial com armazenamento em baterias aplicada a sistemas isolados da rede elétrica**

**YURIY KALASHNYK**

**(Licenciado em Engenharia de Automação, Controlo e Instrumentação)**

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Eletrotécnica no Ramo de  
Energia

**Orientadores:**

Doutora Rita Marcos Fontes Murta Pereira, ISEL  
Doutor Pedro Miguel Neves da Fonte, ISEL

**Júri:**

Presidente: Doutor João Hermínio Ninitas Lagarto, ISEL

Vogais:

Doutora Cristina Inês Camus, ISEL  
Doutora Rita Marcos Fontes Murta Pereira, ISEL

**Novembro 2025**



## **Agradecimentos**

A realização deste trabalho de fim de mestrado só foi possível graças ao apoio de várias pessoas e instituições, às quais expresso a minha sincera gratidão.

À minha família, incluindo a minha namorada, pelo incentivo constante, pela paciência e pela compreensão demonstrada ao longo deste percurso. O vosso apoio incondicional foi essencial para que pudesse ultrapassar os desafios encontrados e manter a motivação até ao fim.

Aos meus orientadores, professora doutora Rita Marcos Fontes Murta Pereira e professor doutor Pedro Miguel Neves da Fonte pela orientação científica, pela disponibilidade e pelas sugestões valiosas que contribuíram de forma decisiva para a concretização deste trabalho.

À Tecnoprojeto Internacional, empresa onde desempenho funções, pelo apoio concedido e, em particular, pela oportunidade de conciliar a atividade profissional com a realização deste mestrado, criando as condições necessárias para alcançar este objetivo académico.

A todos, deixo o meu profundo reconhecimento e gratidão.



## Declaração de integridade

Declaro que esta(e) dissertação / trabalho de projeto / relatório de estágio é o resultado da minha investigação pessoal e independente. O seu conteúdo é original e todas as fontes listadas nas referências bibliográficas foram consultadas e estão devidamente mencionadas no texto. Mais declaro que todas as referências científicas e técnicas relevantes para o desenvolvimento do trabalho estão devidamente citadas e constam das referências bibliográficas.

O autor

---

Lisboa, ..... de ..... de .....



## Resumo

O presente trabalho desenvolve-se no âmbito da conceção de um sistema autónomo de produção e armazenamento de energia elétrica destinado a uma habitação unifamiliar. O estudo teve início com a análise de diferentes tecnologias de geração e de armazenamento, identificando os componentes mais adequados para aplicações residenciais. Após uma revisão detalhada da literatura e da oferta comercial, concluiu-se que as turbinas eólicas de eixo vertical (VAWT) e as baterias de íões de lítio representavam a solução mais eficiente e robusta para o contexto em análise, atendendo às características técnicas, desempenho e requisitos de fiabilidade.

Com base nessa escolha inicial, procedeu-se ao dimensionamento do sistema, que incluiu a avaliação do potencial eólico através da distribuição de *Weibull*, a definição da capacidade de armazenamento necessário considerando a profundidade máxima de descarga (DoD) e a eficiência das baterias, bem como o cálculo da cablagem e das proteções elétricas em conformidade com o regulamento técnico de instalações elétricas de baixa tensão (RTIEB). O sistema foi posteriormente integrado no software HOMER Pro, que permitiu simular o seu desempenho anual e analisar a resposta em diferentes cenários de consumo e disponibilidade do recurso eólico.

Os resultados obtidos demonstraram que, para um perfil de consumo residencial de 3 kWh/dia, o sistema dimensionado é capaz de assegurar o fornecimento energético de forma estável e autónoma, garantindo resiliência em situações de ausência de rede elétrica. A análise destacou ainda a importância da correta escolha inicial dos componentes, uma vez que estes condicionam a eficiência global do sistema, os custos de implementação e a sua viabilidade prática.

A conjugação de turbinas VAWT com baterias de lítio constitui uma solução tecnicamente viável e eficiente para a produção e armazenamento de energia em pequena escala, promovendo a autonomia energética residencial e contribuindo para a transição energética através da integração de fontes renováveis.

Palavras-chave: Aerogerador, baterias, portabilidade.

# Abstract

This dissertation focuses on the design of an autonomous energy production and storage system for residential applications. The study began with the analysis of different generation and storage technologies, aiming to identify the most suitable components for small-scale residential use. Following an in-depth literature review and evaluation of commercially available options, it was concluded that vertical axis wind turbines (VAWT) and lithium-ion batteries represent the most efficient and reliable solution, considering their technical characteristics, performance, and operational robustness.

Based on this initial choice, the system was dimensioned through the assessment of the wind potential using the Weibull distribution, the definition of the required storage capacity considering the maximum depth of discharge (DoD) and battery efficiency, and the calculation of cabling and electrical protections in compliance with the technical regulations for low voltage electrical installations (RTIEBT). The system was subsequently modelled and integrated into the HOMER Pro software, which enabled the simulation of its annual performance and the analysis of its response under different consumption patterns and wind availability scenarios. The results demonstrated that, for a residential load profile of 3 kWh/day, the designed system is capable of ensuring a stable and autonomous energy supply, providing resilience in the absence of a public grid. The analysis also highlighted the importance of the correct initial selection of components, as this strongly influences the overall efficiency, implementation costs, and practical feasibility of the system.

In conclusion, the integration of VAWTs with lithium-ion batteries proves to be a technically feasible and efficient solution for small-scale energy production and storage, promoting residential energy autonomy and contributing to the energy transition through the adoption of renewable sources.

Keywords: Wind turbine, batteries, portability.

# Lista de Símbolos e de siglas

## Alfabeto romano

c - Parâmetro de escala

$C_p$  - Coeficiente de potência

k - Parâmetro de forma

$v$  - Velocidade do vento

## Alfabeto grego

$\rho$  - Densidade do ar ( $\text{kg/m}^3$ )

$\Gamma$  - Função gama

## Siglas

- BMS – *Battery management system*
- COE - *Cost of Energy*
- DoD - Depth of discharge
- DTU - *Technical University of Denmark*
- GA - *Genetic Algorithm*
- GWA - *Global Wind Atlas*
- HAWT - Horizontal Axis Wind Turbines
- LED - Diodo emissor de luz ( *light-emitting diode*)
- LCOE - *Levelized cost of electricity*
- LPSP – Loss of Power Supply Probability
- MCDA – *Multi-Criteria decision analysis*
- MPPT - *Maximum Power Point Tracking*
- NPC - *Net Present Cost*
- O&M - Operação/Manutenção
- PNEC – Plano Nacional de Energia e Clima
- PSO *Particle Swarm Optimization*
- PV – Painéis fotovoltaicos
- PVGIS - *Photovoltaic Geographical Information System*
- RTIEBT - Regulamento Técnico de Instalações Elétricas de Baixa Tensão
- SARES – Sistema de Atendimento e Resposta Ágil
- TAC – Total Annual Cost
- VAWT - Vertical Axis Wind Turbines
- WT – Wind Turbine

# Índice

Capítulo 1 - Introdução.....	1
1.1.    Enquadramento e motivação .....	1
1.2.    Objetivos .....	2
1.2.1.    Objetivos específicos .....	2
1.3.    Estrutura da dissertação.....	2
Capítulo 2 - Estado da arte .....	4
2.1.    Turbinas eólicas .....	4
2.1.1.    Modelos de turbinas eólicas .....	4
2.1.2.    Estrutura mecânica.....	5
2.1.3.    Aerodinâmica e eficiência .....	6
2.1.4.    Aplicações no meio urbano .....	6
2.1.5.    Vantagens e desvantagens .....	7
2.2.    Armazenamento de energia em baterias .....	8
2.2.1.    Baterias de chumbo-ácido .....	8
2.2.2.    Baterias de íões de lítio (Li-ion).....	9
2.3.    Sistemas de produção e armazenamento.....	11
2.4.    Ferramentas de simulação.....	14
2.5.    Mercado das turbinas eólicas de eixo vertical .....	15
Capítulo 3 - Dimensionamento do sistema.....	18
3.1.    Potência eólica com VAWT .....	18
3.2.    Capacidade das baterias.....	26
3.2.1.    Capacidade nominal .....	27
3.3.    Sistema eletrónico.....	28
3.3.1.    Controlador de carga eólica.....	28
3.3.2.    Inversor <i>off-grid</i> .....	29
3.3.3.    Dimensionamento dos cabos e das proteções elétricas .....	29
Capítulo 4 - Resultados e discussão .....	32
4.1.    Implementação no <i>HOMER®Pro</i> .....	32
4.1.1.    Inicialização do projeto no <i>HOMER® pro</i> .....	32
4.1.2.    Escolha dos componentes do sistema .....	35
4.2.    Desempenho do sistema nos cenários simulados .....	44
4.3.    Portabilidade e implementação rápida.....	55
Capítulo 5 - Conclusões e Trabalhos Futuros .....	57
5.1.    Conclusões Principais .....	57

<b>5.2. Trabalhos Futuros .....</b>	<b>58</b>
Capítulo 6 - Referências Bibliográficas .....	60
Capítulo 7 - Anexos.....	63

# Índice de figuras

FIGURA 2.1- HAWT 500W TURBINA EÓLICA (HAWT TURBINA EOLICA 2025).....	4
FIGURA 2.2-INSTALAÇÃO DOMÉSTICA DE TURBINAS VAWT (EN-5KW-H VERTICAL AXIS WIND TURBINE GENERATOR VAWT, 2025).....	5
FIGURA 2.3 - TURBINAS VAWT (A) DARRIEUS, (B) SAVONIUS (TRAUERNICHT, MIGUDA, AND MARTINETTI 2024) .....	6
FIGURA 2.4- ESQUEMÁTICA DA REAÇÃO QUÍMICA DA BATERIA DE CHUMBO-ÁCIDO (HUANG, KUO, AND HUANG 2016) .....	9
FIGURA 2.5- BATERIA DE IÃO-LÍTIO (BRAGA 2020) .....	10
FIGURA 2.6 - TURBINA KLIUX .....	16
FIGURA 3.1 LOCALIZAÇÃO DO ESTUDO .....	20
FIGURA 3.2 - VELOCIDADE MÉDIA DO VENTO .....	21
FIGURA 4.1 – SELEÇÃO DA REGIÃO DE ESTUDO.....	33
FIGURA 4.2 - ABA DOS RESOURCES .....	33
FIGURA 4.3 – WIND RESCURCE .....	34
FIGURA 4.4 - TEMPERATURE RESOURCE .....	35
FIGURA 4.5 - ABA DOS COMPONENTES .....	35
FIGURA 4.6 - TURBINAS EÓLICAS DE HOMER.....	36
FIGURA 4.7 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA NO HOMER PRO.....	36
FIGURA 4.8 - PARÂMETROS DA TURBINA EÓLICA ESCOLHIDA.....	37
FIGURA 4.9 - CURVA DA POTÊNCIA DA TURBINA.....	38
FIGURA 4.10 - PARÂMETROS DE MANUTENÇÃO .....	38
FIGURA 4.11 - BATERIAS DO HOMER PRO .....	39
FIGURA 4.12 - CONFIGURAÇÃO DA BATERIA .....	40
FIGURA 4.13 - CONVERTOR DC/AC .....	41
FIGURA 4.14 - CONFIGURAÇÃO DA CARGA .....	42
FIGURA 4.15 – GRÁFICOS GERADOS PELO HOMER.....	42
FIGURA 4.16 - SELEÇÃO DO TIPO DE CONTROLO .....	43
FIGURA 4.17 - PAINEL DE CARACTERÍSTICAS DO CONTROLADOR .....	44
FIGURA 4.18 - RESULTADOS OTIMIZADOS DO HOMER .....	45
FIGURA 4.19 - SIMULAÇÃO PARA 3KWH/DIA .....	46
FIGURA 4.20 - PRODUÇÃO MENSAL DO AEOLOS-V1KW .....	46

FIGURA 4.21 - PRODUÇÃO HORARIA DO AEOLOS-V1kW .....	47
FIGURA 4.22 - PRODUÇÃO HORARIA DO AEOLOS-V1kW .....	48
FIGURA 4.23 - PERFIL DE VELOCIDADE DO VENTO DIÁRIO.....	49
FIGURA 4.24 - POTENCIA DE SAÍDA DIÁRIA DO GERADOR.....	50
FIGURA 4.25 - FUNCIONAMENTO DAS BATERIAS .....	51
FIGURA 4.26 - CONFIGURAÇÃO DE MAIOR CARGA EM JANEIRO .....	52
FIGURA 4.27 - COMPORTAMENTO ELÉTRICO DA CARGA AO LONGO DO ANO .....	53
FIGURA 4.28 -OTIMIZAÇÃO DO CENÁRIO 2 .....	53
FIGURA 4.29 - COMPORTAMENTO DA BATERIA NO SEGUNDO CENÁRIO.....	54

## Índice de quadros

TABELA 2.1-TABELA BASEADA EM MULTI-CRITERIA DECISION ANALYSIS (MCDA) (ICAZA-ALVAREZ ET AL. 2022) .....	7
TABELA 2.2 - COMPARATIVO DE TURBINAS .....	8
TABELA 2.3 -TABELA COMPARATIVA DE BATERIAS.....	11
TABELA 2.4 - ESPECIFICAÇÕES RESUMIDAS DAS TURBINAS EÓLICAS ESTUDADAS .....	12
TABELA 2.5 - ESPECIFICAÇÕES RESUMIDAS DAS BATERIAS AVALIADAS .....	12
TABELA 2.6 – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DA TURBINAS EÓLICAS DE EIXO VERTICAL UTILIZADA EM (LARYEA AND SCHIFFAUEROVA 2024).....	13
TABELA 2.7 - COMPARAÇÃO DE TURBINAS AEOLOS DE DIFERENTES POTÊNCIAS .....	16
TABELA 2.8-TURBINA KLIUX.....	17
TABELA 3.1 - O COMPRIMENTO DE RUGOSIDADE DO TERRENO .....	23
TABELA 3.2 - HORAS ANUAIS EM QUE CADA VELOCIDADE OCORRE .....	23
TABELA 3.3 – COMPARAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DE BATERIAS NO MERCADO .....	27
TABELA 3.4 - TABELA RESUMO DO DIMENSIONAMENTO DAS SECÇÕES.....	31

# Capítulo 1 - Introdução

## 1.1. Enquadramento e motivação

A transição energética é um dos pilares fundamentais para o cumprimento das metas climáticas estabelecidas por Portugal, alinhadas com o Acordo de Paris e o Pacto Ecológico Europeu. O país, reconhecido pelo seu elevado potencial para energias renováveis, tem apostado na diversificação da sua matriz energética, onde a energia eólica ocupa um papel de destaque. Contudo, a maioria dessa capacidade é voltada para grandes parques eólicos conectados à rede elétrica, enquanto aplicações de pequena escala, especialmente em contextos residenciais ou isolados, permanecem subexploradas.

Portugal possui características geográficas e climáticas que favorecem a produção de energia eólica, mesmo considerando sistemas de pequena dimensão. Áreas remotas, como ilhas ou regiões do interior com baixa densidade populacional, enfrentam dificuldades de acesso à rede elétrica e custos de eletrificação elevados. Para essas regiões, os sistemas eólicos residenciais com armazenamento em baterias podem oferecer uma solução sustentável e economicamente viável, garantindo autossuficiência energética e reduzindo a dependência de combustíveis fósseis.

Além disso, o Plano Nacional de Energia e Clima 2030 (PNEC 2030) estabelece objetivos ambiciosos para a descarbonização do setor energético, incluindo a promoção de microprodução descentralizada. Soluções como sistemas eólicos residenciais estão alinhados com essas metas, contribuindo para a descentralização da geração elétrica, para a redução de perdas na transmissão e para a democratização do acesso à energia limpa.

Outro fator que reforça a relevância deste estudo é a necessidade de resiliência energética em cenários de instabilidade global, como crises energéticas ou situações de guerra. Em contextos de conflito, a dependência de infraestruturas centrais, como a rede elétrica, pode expor comunidades a vulnerabilidades críticas, seja por interrupções no fornecimento ou por pressões geopolíticas relacionadas com o acesso a recursos energéticos. Um sistema de geração e armazenamento independente permite que famílias e comunidades mantenham um nível essencial de autonomia energética, assegurando o funcionamento de equipamentos básicos e preservando a qualidade de vida, mesmo em momentos de incerteza.

A motivação para este trabalho também reflete a necessidade de adaptar os sistemas de geração renovável aos desafios impostos pela intermitência da energia eólica. O armazenamento em baterias, desempenha um papel crucial para garantir um fornecimento constante e confiável de energia. A combinação de geração eólica de pequeno porte com armazenamento local pode, assim, oferecer independência energética a famílias e comunidades, fortalecendo a resiliência energética de qualquer país.

Este estudo surge como oportunidade para integrar uma solução tecnológica de geração eólica em pequena escala para aplicação em contexto residencial.

O trabalho procura incentivar soluções adequadas para o mercado residencial, atendendo às necessidades atuais.

Ao abordar a produção de energia em sistemas isolados, este trabalho também promove o fortalecimento de comunidades e a valorização de regiões menos urbanizadas, alinhando-se às políticas de união territorial e sustentabilidade.

## **1.2. Objetivos**

Objetivo geral do trabalho passa por dimensionar e simular um sistema de produção de energia eólica residencial combinado com armazenamento em baterias, avaliando a sua fiabilidade e resiliência energética em diferentes cenários de consumo e condições de disponibilidade de vento.

### **1.2.1. Objetivos específicos**

- **Analisar tecnologias existentes:**

Estudar as tecnologias de turbinas eólicas residenciais de pequena dimensão disponíveis no mercado.

Avaliar as tecnologias atuais de armazenamento de energia em baterias, considerando eficiência e portabilidade.

- **Dimensionar e simular o sistema:**

Determinar as dimensões e capacidades dos aerogeradores e baterias para satisfazer os requisitos mínimos de consumo residencial, considerando condições ambientais como a intermitência do vento.

Simular a integração dos componentes num sistema completo, ajustado a diferentes perfis de consumo residencial e padrões de produção eólica.

Simular o comportamento do sistema em diferentes condições de disponibilidade de vento.

- **Estudar a portabilidade e implementação rápida:**

Examinar a viabilidade de transporte e instalação do sistema em cenários que exijam soluções de emergência.

- **Propor requisitos para implementação prática:**

Definir critérios técnicos e práticos para a aplicação do sistema em diferentes áreas geográficas e condições ambientais.

## **1.3. Estrutura da dissertação**

A dissertação será dividida em cinco capítulos. No primeiro capítulo é introduzido o tema, explicando a motivação para a pesquisa e os objetivos, além de apresentar a organização do trabalho. No segundo capítulo é apresentado o estado da arte, onde serão revistas as

tecnologias de turbinas eólicas residenciais, baterias e sistemas híbridos de energia, focando nas soluções atuais e nas ferramentas de simulação usadas no estudo.

No terceiro capítulo é descrita a metodologia adotada, incluindo o dimensionamento, modelação e integração dos componentes do sistema, e a análise de diferentes cenários de consumo. No quarto capítulo, são apresentados e discutidos os resultados das simulações, analisando o desempenho do sistema em diversos cenários.

Por fim, no quinto capítulo serão apresentadas as conclusões, destacando os resultados obtidos e recomendações práticas para a aplicação do sistema, além das sugestões de direções para pesquisas futuras.

# Capítulo 2 - Estado da arte

## 2.1. Turbinas eólicas

### 2.1.1. Modelos de turbinas eólicas

As turbinas de eixo horizontal *Horizontal Axis Wind Turbines* (HAWT) capturam o vento que se desloca perpendicularmente ao eixo de rotação. Para garantir o máximo aproveitamento do vento, essas turbinas precisam estar sempre alinhadas com a direção predominante do vento, o que é realizado por meio de um sistema de orientação chamado *Yaw Control*. As pás utilizam o conceito de aerofólios para gerar o efeito de sustentação, convertendo a energia cinética do vento em energia mecânica de rotação do eixo. O controle da velocidade do rotor é frequentemente realizado por sistemas de passo variável (*pitch control*), que ajustam o ângulo das pás para otimizar a extração de energia (Wang et al. 2023). Expressões matemáticas associadas ao coeficiente de potência  $C_p$  e à extração de energia estão diretamente relacionadas com o Teorema de *Betz*, que estabelece o limite teórico de 59,3%, analisado ao pormenor em (Normandajc Lecanu, Breard, and Mouazé 2025), para a conversão de energia cinética do vento em energia mecânica. Na Figura 2.1 está representada uma possibilidade de instalação de uma turbina HAWT.



Figura 2.1- HAWT 500W Turbina Eólica (HAWT turbina eolica 2025)

As turbinas de eixo vertical *Vertical Axis Wind Turbines* (VAWT) descritas em (Wang et al. 2023), operam de forma independente da direção do vento, o que elimina a necessidade de sistemas de orientação. As pás são dispostas em torno de um eixo vertical, o que permite captar o vento em qualquer direção. O funcionamento depende do efeito de arrasto e de sustentação. Nas turbinas *Savonius*, o arrasto é a principal força de operação, enquanto nas turbinas *Darrieus*, o efeito de sustentação é predominante. Devido à capacidade de capturar ventos multidirecionais, as VAWTs são ideais para ambientes urbanos, onde o vento é turbulento e menos previsível em termos de direção e intensidade. Na Figura 2.2 está

representada uma possibilidade de instalação de uma turbina VAWT (EN-5KW-H Vertical Axis Wind Turbine Generator VAWT, 2025).



Figura 2.2-Instalação doméstica de turbinas VAWT (EN-5KW-H Vertical Axis Wind Turbine Generator VAWT, 2025)

### 2.1.2. Estrutura mecânica

#### **Descrição da estrutura mecânica das turbinas HAWT:**

O rotor é normalmente composto por duas ou três pás fabricadas em materiais leves e de alta resistência, é fabricado em fibra de carbono ou vidro e é responsável pela captação da energia do vento. A torre é construída em aço ou betão e serve de suporte para todos os componentes superiores. O sistema de orientação (*Yaw Control*) gira a nacela (suporte do motor fixado na asa dos aerogeradores) para manter as pás alinhadas à direção predominante do vento, enquanto o sistema de passo (*Pitch Control*) ajusta o ângulo das pás de modo a otimizar a extração de energia conforme a variação da velocidade do vento. O gerador converte a energia mecânica resultante da rotação do eixo em energia elétrica, e a caixa de engrenagens eleva a velocidade desse eixo para corresponder à rotação exigida pelo gerador.

#### **Descrição da estrutura mecânica das turbinas VAWT:**

O rotor das turbinas VAWTs podem ser constituídos por pás do tipo *Darrieus*, em formato de “C” ou “H”, ou *Savonius*, em formato de “meia-lua”. Ao contrário das HAWTs, o eixo de rotação das VAWTs é vertical e costuma ser acoplado diretamente ao gerador. Como estas turbinas não necessitam de torres elevadas podem ser instaladas no solo, em telhados ou em outras estruturas de edifícios. Uma das vantagens destas turbinas é que em muitos casos, o gerador fica próximo ao solo, o que facilita o acesso para manutenção, por outro lado intervenção no gerador elétrico poderão exigir a desmontagem da turbina.

### 2.1.3. Aerodinâmica e eficiência

As turbinas HAWT necessitam de um fluxo de vento contínuo e alinhado para otimizar a eficiência. O design aerodinâmico das pás permite uma maior velocidade de ponta e uma maior eficiência de conversão de energia. Devido à operação em ventos mais estáveis, em regiões com maior altitude ou com torres mais altas, as turbinas HAWTs alcançam coeficientes de potência ( $C_p$ ) mais elevados. No estudo de um sistema independente de geração e armazenamento de energia (Icaza-Alvarez et al. 2022), foi feito o teste com torres instaladas em duas altitudes diferentes. Com isso, verificou-se que a torre que estava instalada num ponto mais alto, tem um rendimento superior com uma menor velocidade do vento. Este fato poderá ser descrito pela lei de *Prandtl* que permite determinar a velocidade do vento em função da altura da instalação e do meio envolvente.

As turbinas VAWT têm uma aerodinâmica mais simples e podem operar com ventos de várias direções. No entanto, o efeito de arrasto presente nas turbinas *Savonius* reduz o coeficiente de potência. Já as turbinas *Darrieus*, têm maior eficiência devido ao uso de princípios de sustentação, mas necessitam de ventos com velocidade mais elevada para iniciar a rotação. Em relação ao coeficiente de potência ( $C_p$ ) das VAWTs, geralmente varia entre 0.28 e 0.40, sendo mais baixo do que as HAWTs, que pode atingir os 0.48 como pode-se analisar em (Wang et al. 2023). Na Figura 2.3 é possível observar a diferença entre os dois tipos de turbinas VAWT.

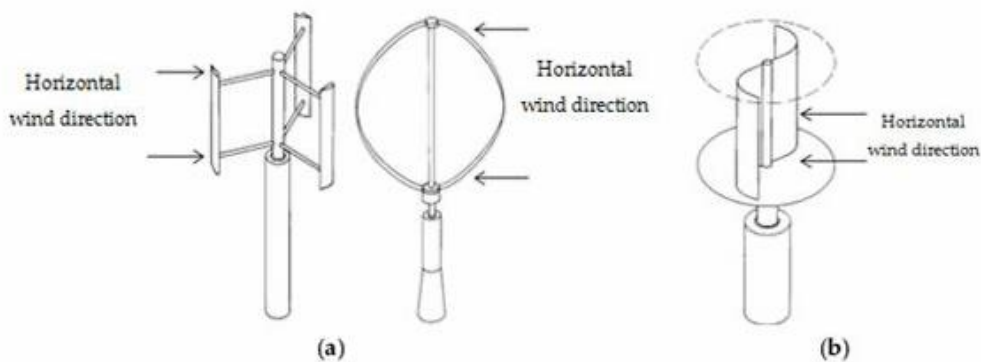


Figura 2.3 - Turbinas VAWT (a) Darrieus, (b) Savonius (Trauernicht, Miguda, and Martinetti 2024)

### 2.1.4. Aplicações no meio urbano

Em (Trauernicht et al. 2024), é feita uma comparação entre as turbinas HAWT e VAWT, para instalação em Eldoret no Quênia, percebendo assim quais são os mais indicados para o meio urbano.

Pode-se verificar que as turbinas HAWT têm aplicações limitadas em ambientes urbanos devido ao ruído e ao impacto visual. Requer também um maior espaçamento entre edifícios para minimizar o efeito de turbulência e evitar a "sombra do vento". No entanto, poderá ser

uma boa opção para instalar em zonas periféricas, em áreas mais abertas, onde pode ficar mais afastado de obstáculos.

Em relação as turbinas VAWT pode-se verificar que existem vários aspetos que favorecem a instalação em ambientes urbanos, nomeadamente a capacidade de operar com ventos multidirecionais e turbulentos. É necessária uma menor altura de instalação, o que facilita a instalação em telhados de edifícios, permitindo assim uma instalação com menos recursos. No meio urbano estas turbinas tem um impacto visual menor e baixo ruído, o que possibilita uma maior aceitação social.

### 2.1.5. Vantagens e desvantagens

Ainda em (Trauernicht et al. 2024), foram analisadas as vantagens e desvantagens das turbinas para aplicação no meio residencial. Foi atribuída uma pontuação de relevância para cada ponto analisado.

Na Tabela 2.1 é possível observar essa análise, permitindo concluir que as turbinas VAWT são mais vantajosas para implementação em meio urbano.

Tabela 2.1-Tabela baseada em multi-criteria decision analysis (MCDA) (Icaza-Alvarez et al. 2022)

Critério	Relevância	HAWT		VAWT	
		Avaliação	Resultado	Avaliação	Resultado
<b>Eficiência</b>	0,25	5	1,25	4	1,00
<b>Manutenção</b>	0,20	4	0,80	7	1,40
<b>Custo inicial</b>	0,25	3	0,75	6	1,50
<b>Poluição sonora</b>	0,02	6±1	0,15±0,02	3±1	0,07±0,02
<b>Impacto Visual</b>	0,02	5±1	0,12±0,02	7±1	0,17±0,02
<b>Direção do vento</b>	0,20	6±1	1,20±0,20	10±1	2,0±0,20
<b>Instalação</b>	0,05	4	0,20	8,00	0,40
<b>Total</b>	<b>100%</b>		<b>4,47±0,24</b>		<b>6,55±0,24</b>

A Tabela 2.2, apresenta o resumo dos aspetos principais que foram considerados para a análise efetuada.

Tabela 2.2 - Comparativo de turbinas

Critério	HAWT	VAWT
<b>Eficiência</b>	Maior ( $C_p$ máximo 0,48)	Menor ( $C_p$ máximo 0,40)
<b>Manutenção</b>	Complexa (acesso à torre)	Simples (acesso no solo)
<b>Custo inicial</b>	Alto	Baixo
<b>Poluição sonora</b>	Médio a Alto	Baixo
<b>Impacto Visual</b>	Alto (grandes torres e pás)	Baixo (design compacto)
<b>Direção do Vento</b>	Requer orientação ( <i>Yaw Control</i> )	Captura o vento de qualquer direção
<b>Instalação</b>	Requer altura e espaço	Compacta, ideal para telhados

Mais uma vez, com a análise de vantagens e desvantagens consegue-se avaliar que as turbinas VAWT são as mais vantajosas para o meio residencial, mesmo apresentando um rendimento máximo mais baixo que as turbinas HAWT.

Concluindo assim que as turbinas VAWT serão as mais indicadas para instalação em meios urbanos, tendo também a capacidade de operação com uma velocidade do vento mais baixa.

## 2.2. Armazenamento de energia em baterias

De acordo com (Importância de Baterias Em Fontes Renováveis, n.d.) e (Utilidade de baterias num sistema eólico 2025) o armazenamento de energia para sistemas eólicos é fundamental para lidar com a intermitência do vento. A definição do tipo de bateria mais adequado para cada aplicação depende de diversos fatores, incluindo o custo, a densidade energética, a profundidade de descarga e a durabilidade.

Em (Ibrahim, Ilinca, and Perron 2008) foi realizado um estudo entre diversos métodos de armazenamento de energia com intuito de compará-los entre si. No final consegue-se concluir que se pode agrupar os métodos de armazenamento consoante as necessidades de armazenamento. Com isso, para os sistemas de pequena dimensão, como o caso de armazenamento de energia em contexto doméstico, destacam-se as baterias de chumbo-ácido e as baterias de íões de lítio.

### 2.2.1. Baterias de chumbo-ácido

Historicamente, as baterias de chumbo-ácido sempre foram a principal escolha para instalações *off-grid* em função do custo inicial mais baixo e da simplicidade de integração. Essa tecnologia é bastante consolidada, fácil de encontrar em todo o mundo e, por muitos anos, foi praticamente a única opção acessível para projetos de pequena escala como é referido em (Electricity storage and renewables : costs and markets to 2030 2017). Ainda são

utilizadas em diversos projetos especialmente em países em desenvolvimento, como por exemplo, Bangladesh e Marrocos.

Estas baterias utilizam reações eletroquímicas envolvendo placas de chumbo e chumbo-dióxido imersas em uma solução de ácido sulfúrico, como é explicado em (Electricity storage and renewables : costs and markets to 2030 2017). Durante a descarga o chumbo (Pb) no ânodo e o chumbo-dióxido (PbO<sub>2</sub>) no cátodo reagem com o ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), formando sulfato de chumbo (PbSO<sub>4</sub>) e água (H<sub>2</sub>O), liberando elétrons que geram corrente elétrica. No decorrer da carga, reação consiste em que o sulfato de chumbo é convertido de volta em chumbo e chumbo-dióxido, e o ácido sulfúrico é regenerado.

Embora sejam uma tecnologia já conhecida e confiável, oferece menor densidade de energia em comparação a baterias mais modernas, ocupando mais espaço para armazenar a mesma quantidade de energia. Além disso, sua eficiência de carga e descarga costuma variar entre 70% e 85%, o que significa que parte da energia fornecida não é efetivamente aproveitada. Quando utilizadas em projetos domésticos de maior demanda, pode-se precisar de ter uma maior capacidade para evitar ciclos diários profundos que reduzem sua vida útil. Quando dimensionadas corretamente e acompanhadas por um sistema de monitorização adequado, podem atender satisfatoriamente as necessidades. Entretanto, para aplicações que requeiram maior eficiência energética, menor manutenção e vida útil mais prolongada, outras tecnologias, como as baterias de íon-lítio, tendem a ser mais indicadas.

Na Figura 2.4 é possível observar o princípio de funcionamento de uma bateria de chumbo-ácido, apresentando uma tensão nominal de cerca de 2 V por célula, o que geralmente resulta em versões de 12 V (seis células).

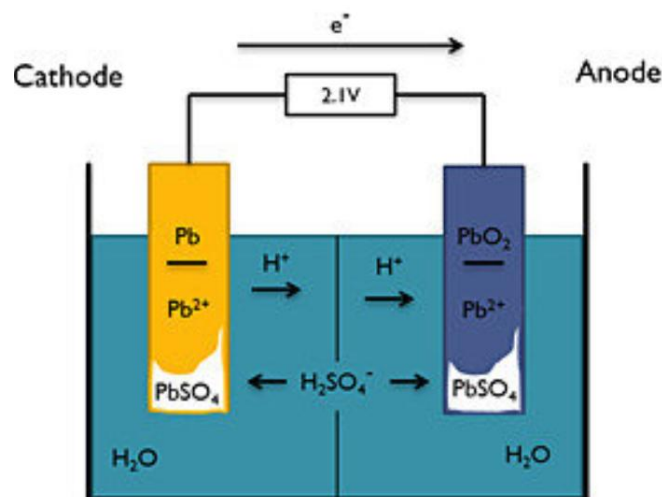


Figura 2.4- Esquemática da reação química da bateria de chumbo-ácido (Huang, Kuo, and Huang 2016)

### 2.2.2. Baterias de íões de lítio (Li-ion)

As baterias de íões de lítio operam com base no movimento dos íões de lítio entre os elétrodos durante os processos de carga e descarga. Durante a carga os íões de lítio são extraídos do

cátodo (normalmente constituído por um óxido metálico de lítio) e deslocam-se através do eletrólito até ao ânodo, onde intercalam-se num material, normalmente grafite. Durante a descarga o processo inverte-se, os iões movem-se do ânodo para o cátodo, libertando eletrões que percorrem o circuito externo e fornecem energia elétrica ao dispositivo. Na Figura 2.5 pode-se observar a constituição de uma bateria de lítio assim como a forma como a mesma gera tensão.

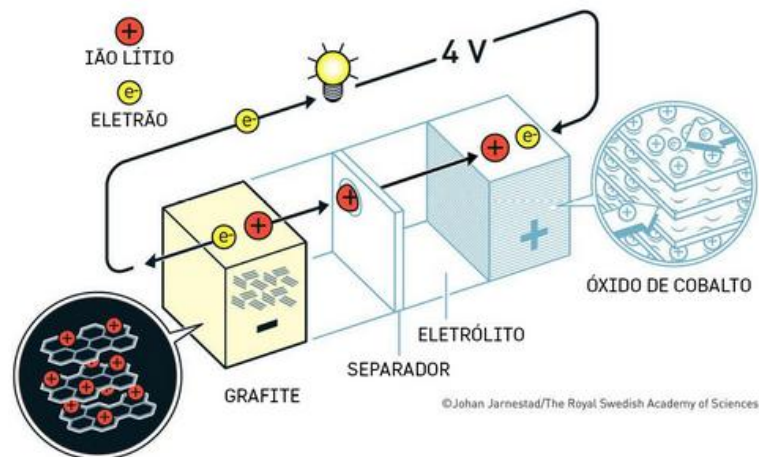


Figura 2.5- Bateria de íão-Lítio (Braga 2020)

A introdução das baterias de íões de lítio em sistemas de microgeração eólica para uso doméstico tem sido cada vez mais estudada devido às vantagens técnicas e económicas que essa tecnologia oferece. As baterias de íões de lítio apresentam uma alta densidade de energia, permitindo que uma quantidade significativa de energia seja armazenada num espaço relativamente pequeno, o que é fundamental em instalações residenciais onde o espaço é limitado (Goodenough and Park 2013). Além disso, elas demonstram uma elevada eficiência de ciclo, geralmente na faixa de 90% a 95%, o que significa que a energia armazenada tem perdas mínimas durante o processo de carga e descarga. Essa característica é essencial para compensar a intermitência inerente à produção de energia das microturbinas eólicas (Electricity storage and renewables : costs and markets to 2030 2017). Para otimizar o desempenho desses sistemas, é imprescindível o uso de controladores de carga e de um sistema de gestão de bateria, *battery management System* (BMS) robusto, que monitoriza algumas grandezas como tensão, corrente e temperatura, protegendo assim as células contra sobrecargas e descargas profundas. Essa integração tecnológica permite que as baterias operem dentro dos parâmetros ideais, maximizando assim a eficiência e a vida útil do sistema (Goodenough and Park 2013).

Com base nos artigos analisados ao longo da pesquisa bibliográfica e mencionados anteriormente, nomeadamente em (Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030, 2017), apresenta-se a Tabela 2.3 com um resumo dos principais os critérios que influenciam a escolha da bateria a implementar.

Tabela 2.3 -Tabela Comparativa de Baterias

<b>Critério</b>	<b>Baterias de chumbo-ácido</b>	<b>Baterias de íões de lítio</b>
<b>Densidade energética (Wh/kg)</b>	Baixa (45-100)	Alta (200 - 600)
<b>Vida útil (Ciclos de carga)</b>	300-2000 ciclos	5000-20000 ciclos
<b>Profundidade de descarga</b>	50-60%	80-100%
<b>Eficiência de carga/descarga</b>	75-85%	90-95%
<b>Tempo de recarga</b>	Lento (6-12 horas)	Rápido (1-3 horas)
<b>Custo inicial</b>	Baixo	Alto
<b>Manutenção</b>	Alta	Baixa
<b>Impacto ambiental</b>	Alto (uso de chumbo e ácido sulfúrico)	Baixo (depende da extração de lítio)
<b>Aplicação ideal no contexto residencial</b>	Média (requer espaço e ventilação)	Alta (ideal para aplicações domésticas)
<b>Tensão nominal por célula</b>	Aproximadamente 2,0 V	Entre 3,6 e 3,7 V
<b>Configuração típica</b>	Normalmente 12 V, 24 V ou 48 V (várias células em série)	Utilizados em sistemas de 24 V, 48 V ou 96 V

### 2.3. Sistemas de produção e armazenamento

O estudo (Ghanbari, Maleki, and Rezaei Ochbelagh 2025) aborda cenário de sistemas que integram energia solar e eólica, assim como módulos de armazenamento através de baterias. O estudo é aplicado a regiões onde a rede elétrica é inexistente ou instável. Embora esta abordagem seja reconhecida como uma solução promissora para alimentar cargas residenciais, os autores salientam que cada componente do sistema (painéis fotovoltaicos, turbinas eólicas e baterias) podem ser fabricados em tecnologias ou modelos distintos. Isto totaliza numa enorme diversidade de opções e de possíveis configurações. Segundo a investigação, o mesmo avalia o desempenho de vinte e sete combinações (três tecnologias de painéis × três tecnologias de baterias × três turbinas) para identificar a configuração que minimize o custo total anual, mas que permita um rendimento que corresponde as necessidades.

Ao nível das turbinas eólicas, o estudo considera duas turbinas de eixo horizontal e uma de eixo vertical. Na Tabela 2.4, pode-se observar a variação dos parâmetros, tais como, potência nominal, velocidades de arranque e paragem (*cut-in* e *cut-out*), assim como custos de capital e de O&M (operação/manutenção). As turbinas horizontais (WT1 e WT2) apresentam maior

potência nominal (5400 W e 3300 W, respectivamente), embora exijam um investimento total e custos de manutenção relativamente superiores (sobretudo no caso da WT1). A turbina vertical (WT3), embora possua potência nominal de 2400 W, mostra custos de manutenção muito mais reduzidos e uma velocidade nominal (9 m/s) adequada para condições de vento moderados.

*Tabela 2.4 - Especificações resumidas das turbinas eólicas estudadas*

WT	WT1(horizontal)	WT2(horizontal)	WT3(vertical)
Potência Nominal (W)	5400	3300	2400
Vel. Nominal (m/s)	12	11	9
Vel. Cut-in (m/s)	3	2,5	3
Vel. Cut-out (m/s)	25	30	30
Custo de capital (US\$)	11000	6900	7400
O&M (US\$/ano)	300	200	120

Relativamente ao armazenamento de energia, o artigo utiliza três tipos de baterias: íões de lítio, chumbo-carbono e chumbo-ácido. Na Tabela 2.5, estão destacadas as principais diferenças entre estas baterias ao nível de capacidade, eficiências de carga e descarga, taxas de autodescarga, profundidade máxima de descarga e custos de aquisição e manutenção.

*Tabela 2.5 - Especificações resumidas das baterias avaliadas*

Bateria	B1 (íões de lítio)	B2 (Pb-C)	B3 (Pb-ácido)
Capacidade (Wh)	13800	10800	4900
Eficiência carga (%)	95	90	85
Eficiência descarga (%)	100	100	95
Autodescarga (%)	0,02	0,01	0,04
DoD (%)	90	80	80
Custo de capital (US\$)	3200	2000	800
O&M (US\$/ano)	270	180	95

As baterias de íões de lítio (B1) apresentam maior densidade de energia (13,8 kWh por unidade) e elevado desempenho (eficiências de carga e descarga próximas de 95 e 100%), no entanto, são as mais caras. As baterias de chumbo-carbono (B2) surgem como tecnologia

intermédia, tendo um custo inicial inferior ao das de iões de lítio e uma capacidade moderada. Por fim, as baterias de chumbo-ácido (B3) são bastante mais acessíveis, mas têm menor capacidade (4,9 kWh), uma menor eficiência e tem uma necessidade de serem substituídas com maior frequência, o que pode conduzir a custos anuais mais elevados ao longo da vida útil do projeto.

O estudo revela que a melhor conjugação de tecnologias, no contexto específico do local de estudo (com ventos moderados e radiação solar significativa), corresponde à união de painéis policristalinos, turbina vertical e baterias de iões de lítio (PV3/WT3/B1).

O artigo (Laryea and Schiffauerova 2024) opta também pelas turbinas eólicas de eixo vertical em vez de turbinas de eixo horizontal, apontando como principais razões a operação mais silenciosa, a manutenção mais simples, a capacidade de produzir energia a partir de velocidades de vento relativamente baixas (graças ao menor *cut-in*) e a maior facilidade de instalação em espaços mais limitados (caso de um rebocador). É também referido que as VAWT podem ser “agrupadas” com maior proximidade, aproveitando melhor áreas reduzidas na cobertura de um navio ou nos mastros. Na tabela 2.6 estão algumas das características da turbina utilizada em (Laryea and Schiffauerova 2024).

Tabela 2.6 – Especificações técnicas da Turbinas Eólicas de Eixo Vertical utilizada em (Laryea and Schiffauerova 2024)

WT	VAWT
Potência nominal (W)	5000
Velocidade nominal (m/s)	11
Velocidade de arranque - <i>cut-in</i> (m/s)	1,5
Velocidade de paragem - <i>cut-out</i> (m/s)	15

Foram também utilizadas as baterias de iões de lítio como forma de armazenar o excedente produzido pelas turbinas eólicas, painéis solares e geradores diesel durante momentos de menor consumo ou condições atmosféricas favoráveis.

Em (Sanda et al. 2025) é analisada a viabilidade técnica, ambiental e económica de um sistema híbrido de energias renováveis que combina turbinas VAWT, painéis fotovoltaicos e baterias em aplicações de iluminação pública na cidade de Borg El-Arab, no Egito.

Ao estudar turbinas eólicas de eixo vertical, os autores escolheram o modelo Aeolos-V de 5000W (tipo *Darrieus*) com base no menor ruído, menor necessidade de manutenção em áreas urbanas e na possibilidade de instalar várias turbinas próximas umas das outras, já que a configuração de eixo vertical costuma exigir menos espaço horizontal quando comparada às turbinas de eixo horizontal. Os resultados indicaram a necessidade de um espaçamento

de cerca de 10 diâmetros entre as turbinas, de forma a reduzir as perdas de rendimento provocadas pelo efeito de esteira.

Para o armazenamento de energia, o artigo recorre a baterias do tipo lítio-fosfato de ferro (LiFePO<sub>4</sub>). A opção justifica-se pela elevada profundidade de descarga (pelo menos 80%), boa densidade de energia e eficiência de carga/descarga superior à de outras tecnologias convencionais (como chumbo-ácido).

Nos cenários *off-grid*, ou seja, as baterias exercem papel central na fiabilidade do sistema. Um dos resultados destacados é que, se o sistema depender apenas de uma fonte de energia renovável (100% eólico ou 100% solar), será necessária uma quantidade de baterias significativamente grande, resultando num custo total muito maior. Quando o sistema combina PV e VAWT, a junção das duas fontes de energia reduzem a dimensão ótima das baterias e, conseqüentemente, minimiza o custo global. A análise das duas modalidades, *grid-connected* e *off-grid*, mostra que, no caso de se ter acesso à rede elétrica, as necessidades de armazenamento podem ser muito menores, o que implica que o investimento em bateria seja reduzido drasticamente.

Em (Ali et al. 2025) os autores apresentam uma análise de um sistema híbrido de energia, composto por painéis fotovoltaicos, turbinas eólicas e baterias, ligado à rede elétrica, para completar de forma sustentável as necessidades energéticas de uma escola primária localizada em uma região rural em Bangladesh. A motivação principal é a frequência de cortes de energia que prejudicam o funcionamento das instituições de ensino.

A solução considerada mais eficaz (chamada “*Scenario-A*”) recorre especificamente a seis turbinas eólicas do tipo VAWT de 1 kW e duas baterias de íões de lítio, cada uma com 12,8 V e 100 Ah de capacidade. O conjunto de turbinas totaliza 6 kW de potência instalada, fornecendo em torno de 15% de todo o consumo energético no melhor cenário de simulação, o restante provém dos painéis fotovoltaicos (cerca de 68%) e da própria rede (17%).

Em (Ali et al. 2025) (no *Scenario-C*), não são utilizados os painéis fotovoltaicos, de modo que toda a geração renovável se baseia exclusivamente em turbinas eólicas de 1 kW, complementadas por baterias e pela rede. Essa configuração resulta, em custos mais elevados e menor participação de energia limpa face a cenários que incluem energia solar (como o *Scenario-A* ou B). Isso acontece sobretudo porque a disponibilidade de vento no local não é suficientemente estável para garantir boa percentagem de energia renovável de maneira isolada, levando o sistema a depender com maior frequência da rede, conseqüentemente, haverá uma maior probabilidade de existência de cargas não atendidas.

#### **2.4. Ferramentas de simulação**

A utilização de ferramentas de simulação é essencial, pois permite modelizar o comportamento do sistema (turbina e baterias), testar vários cenários (velocidade do vento,

disponibilidade da rede), selecionando assim a opção otimizada, conforme a área geográfica da instalação e a necessidade de energia. Cada artigo analisado utiliza diferentes tipos de *software*, seja para avaliar desempenho aerodinâmico das turbinas ou para dimensionar o conjunto de turbinas e baterias.

Em (Ghanbari et al. 2025), o estudo consiste na otimização de sistemas com painéis fotovoltaicos, turbinas eólicas e baterias, analisando diferentes tecnologias para cada componente, identificando assim a melhor combinação. A análise e a otimização foi realizada em MATLAB, utilizando os algoritmos como *Particle Swarm Optimization* (PSO) e *Genetic Algorithm* (GA), comparando desempenho e robustez dos dois métodos.

Em (Laryea and Schiffauerova 2024), verificou-se que os autores queriam projetar um sistema híbrido para rebocadores, combinando painéis fotovoltaicos, turbinas eólicas de eixo vertical, baterias e geradores a diesel. Foram utilizadas principalmente duas ferramentas: *HOMER*<sup>®</sup> Pro, para análise de viabilidade (por exemplo, calculando *Net Present Cost* (NPC) e *Levelized cost of electricity* (LCOE) e MATLAB, onde programaram e executaram métodos de otimização (PSO, GA e também *Artificial Bee Colony* (ABC)). O *HOMER*<sup>®</sup> Pro serve como base de comparação econômica, enquanto a implementação dos algoritmos e a busca de configurações ótimas é realizada com mais liberdade no MATLAB.

Em (Sanda et al. 2025) é destaca a distribuição de turbinas eólicos (VAWT) e painéis fotovoltaicos num projeto para alimentar iluminação de ruas. Além de MATLAB *Simulink* para a modelação elétrica do PV e do fluxo energético, há a aplicação de *ANSYS Fluent* para modelar o escoamento do vento em torno das turbinas de eixo vertical.

Na abordagem apresentada em (Ali et al. 2025), o estudo concentrou-se em desenvolver e otimizar uma microrrede conectada à rede (com falhas frequentes), envolvendo turbinas eólicas, painéis fotovoltaicos e baterias para instalar em uma escola rural. A ferramenta central foi o *HOMER*<sup>®</sup> Pro, escolhida por sua capacidade de simular custos de longo prazo, confiabilidade e cenários variados de intermitência da rede. Com o *HOMER*<sup>®</sup> Pro foi possível analisar opções de compra e venda de energia à rede, calculando o NPC, *Cost of Energy* (COE) e níveis de emissões. Também realizaram uma análise de sensibilidade para parâmetros como velocidade de vento, radiação solar e custo de combustível.

## **2.5. Mercado das turbinas eólicas de eixo vertical**

No mercado existem diferentes marcas e modelos de turbinas VAWT, estas oferecem uma diversidade de potências, dimensões e configurações, desde equipamentos de 1 kW, voltados a residências ou instalações comerciais, até projetos um pouco mais robustos, próximos de 10 kW. Assim, com intuito de analisar a possibilidade de portabilidade deste

sistema, segue uma análise comparativa envolvendo modelos de VAWT disponíveis no mercado, evidenciando características como potência e as suas dimensões.

A empresa *Aeolos Wind Energy* (Turbinas Aeolos 2025) comercializa diversas turbinas, foram selecionadas três das suas turbinas para analisar as suas características, algumas destas características estão na Tabela 2.7.

Tabela 2.7 - Comparação de turbinas Aeolos de diferentes potências

Turbina	Aeolos-V 1kW	Aeolos-V 3kW	Aeolos-V 10kW
Tipo de Gerador	Trifásico	Trifásico	Trifásico
Peso	78 kg	106 kg	385 kg
Altura do rotor	2,8 m	3,6 m	5,3 m
Largura do rotor	2,0 m	2,4 m	4,2 m
Vida Útil	20 anos	20 anos	20 anos
Potência nominal	1000 W	3000 W	10000 W
Potência máxima	1500 W	3600 W	12000 W
Velocidade nominal do vento	10 m/s	12 m/s	12 m/s
Nível de ruído	<45 dBA	<45 dBA	<45 dBA
Tensão de saída <i>off grid</i>	48 V	48 ou 120 V	96 ou 240 V
Tensão de saída <i>grid tie</i>	220 V	300 V	380 V

Existem outros fabricantes deste tipo de turbina, entre os quais estão *KLiUX*, *ENESSERE* e *Windspire*. Onde a *KLiUX* destaca-se na medida que em vez de ter apenas três lâminas as suas turbinas contem nove lâminas, representado na Figura 2.6, e as suas características na Tabela 2.8.



Figura 2.6 - Turbina KLiUX

Tabela 2.8-Turbina KLiUX

Turbina	<i>Kliux Zebra</i>
Tipo de Gerador	Trifásico
Peso	375 kg
Altura do rotor	3 m
Largura do rotor	2,36 m
Vida Útil	25 anos
Potência nominal	2000 W
Nível de ruído	32,6 dBA a uma distância de 10m
Tensão de saída	230 Vac

Ao analisar a literatura (Enessere 2025), a *ENESSERE* estima um tempo de instalação das turbinas em 27 horas, no qual o processo mais demorado é a colocação da base, que poderia ser substituído por maciços pré feitos.

## Capítulo 3 - Dimensionamento do sistema

Este capítulo apresenta a metodologia utilizada para dimensionar um sistema autónomo de energia elétrica, baseado exclusivamente na utilização de turbinas VAWT e baterias de íões de lítio, com o objetivo de garantir fornecimento contínuo de energia elétrica numa habitação isolada.

### 3.1. Potência eólica com VAWT

A primeira etapa no dimensionamento do sistema consiste na determinação da potência nominal necessária para as turbinas VAWT, com base nas necessidades energéticas da habitação.

#### a) Caracterização das necessidades energéticas:

Em campos de refugiados tal como, Azraq, Jordânia, cada abrigo consome, em média, entre 2,2 e 2,4 kWh por dia, suficiente para operar luzes, um frigorífico, televisão, ventilador e carregar telemóveis (Azraq Refugee Camp Jordan 2018). Em Domiz e Darashakran, Iraque, O consumo diário *per capita* é estimado em 2,2 kWh em Domiz e 3,5 kWh em Darashakran. Estes valores refletem um nível básico de acesso à eletricidade, adequado para necessidades essenciais (Renewable Energy Agency 2019).

Relativamente ao consumo energético em comunidades rurais remotas, os programas de eletrificação visam fornecer energia suficiente para necessidades domésticas básicas. No Sarawak, Malásia, o programa SARES fornece, em média, 3 kWh por dia por habitação, permitindo o uso de iluminação LED, ventoinhas, televisão, fogão elétrico e um pequeno frigorífico (International Renewable Energy Agency 2023).

Em contextos urbanos de países desenvolvidos, o consumo energético residencial é significativamente maior. Nos Estados Unidos, a média de consumo residencial é de aproximadamente 30 kWh por dia (Clean Power 2025). Em Portugal varia em média entre 3,6kWh e 9,16kWh por dia (Fatores que influenciam o consumo de kWh numa casa 2025).

Para promover o desenvolvimento socioeconómico, algumas organizações propõem metas mínimas de consumo energético. Em *Modern Energy Minimum (Bazilian et al. 2020)*, a Fundação Rockefeller propõe um consumo mínimo de 1000 kWh por pessoa por ano (aproximadamente 2,74 kWh por dia), incluindo tanto o consumo doméstico quanto o uso em atividades económicas (Bazilian et al. 2020).

Concluindo, no cenário básico, o consumo pode-se considerar de 3 kWh por dia, respondendo as comunidades rurais remotas ou cenários de conflito. Num cenário intermedio, o consumo será por volta dos 6 kWh por dia, o sistema atenderia a uma habitação com maior número de aparelhos elétricos ou maior número de ocupantes. E por fim, o cenário avançado, será de 9

kWh por dia, em que o sistema suportaria uma habitação com uso intensivo de energia, incluindo aquecimento ou ar condicionado.

#### b) Avaliação do potencial eólico local

A avaliação do potencial eólico local é uma etapa fundamental no dimensionamento dos sistemas baseados em turbinas eólicas, permitindo determinar com precisão a viabilidade técnica e económica da instalação projetada. Para sistemas de pequena escala, como no caso que se está a ser estudado, utilizando turbinas VAWT, é essencial uma análise detalhada das condições de vento no local escolhido, garantindo assim um dimensionamento realista e eficiente.

Nesta etapa, o potencial eólico do local previsto para instalação das turbinas pode ser avaliado através da análise e cruzamento de informações obtidas em bases de dados reconhecidas internacionalmente. Especificamente, é utilizada a plataforma *Global Wind Atlas* (GWA), desenvolvida com o apoio do Banco Mundial e da *Technical University of Denmark* (DTU). O GWA fornece dados rigorosos e detalhados sobre o recurso eólico, incluindo valores médios anuais das velocidades do vento, variabilidade sazonal e distribuição estatística de velocidades. Ainda existe a possibilidade de utilizar as informações complementares disponibilizadas no *Photovoltaic Geographical Information System* (PVGIS) que oferece também dados sobre a variabilidade sazonal e mensal dos ventos, úteis na simulação anual.

Para descrever matematicamente a variação estatística da velocidade do vento ao longo do ano, utiliza-se a distribuição estatística de *Weibull*.

A distribuição de *Weibull* é dada pela expressão matemática (3.1).

$$f(u) = \frac{k}{c} \cdot \left(\frac{u}{c}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{u}{c}\right)^k} \quad (3.1)$$

Onde  $f(u)$  é a frequência relativa da velocidade do vento  $u$ ,  $k$  é parâmetro de forma (indica a variação dos ventos) e  $c$  é o parâmetro de escala (indica a média da velocidade). Valores típicos do fator de forma  $k$  para zonas urbanas e semiurbanas variam normalmente entre 1,5 e 2,5.

Com base em valores típicos recomendados para zonas semiurbanas, considerou-se neste exemplo um valor intermédio para o parâmetro de forma, sendo  $k=2,0$ . Este valor representa um cenário moderadamente turbulento, característico da maioria das áreas urbanas e semiurbanas portuguesas, com edificações baixas ou médias e alguns obstáculos à circulação do vento.

Após determinar o parâmetro de forma  $k$ , o próximo passo será calcular o parâmetro de escala  $c$ . Este parâmetro está diretamente relacionado com a velocidade média anual do vento  $u_{med}$  através da relação matemática (3.2).

$$c = \frac{u_{med}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (3.2)$$

em que  $\Gamma$  representa a função gama (uma função matemática utilizada para resolver integrais relacionadas a distribuições estatísticas).

Considerando a região de Montemor-o-Novo, Évora, zona afastada de grande cidade e devido a existência de terrenos amplos a sua volta. Na Figura 3.1 está representada a zona seleccionada e é obtida através do *Global Wind Atlas*, com as coordenadas de latitude  $38.643691^\circ$ , e longitude  $-8.216743^\circ$ , verificou-se uma velocidade média anual estimada para o local. Para uma altura de 10 m do solo, a velocidade média anual é de 4,26 m/s para 10% da área mais ventosa da região como está demonstrado na Figura 3.2.

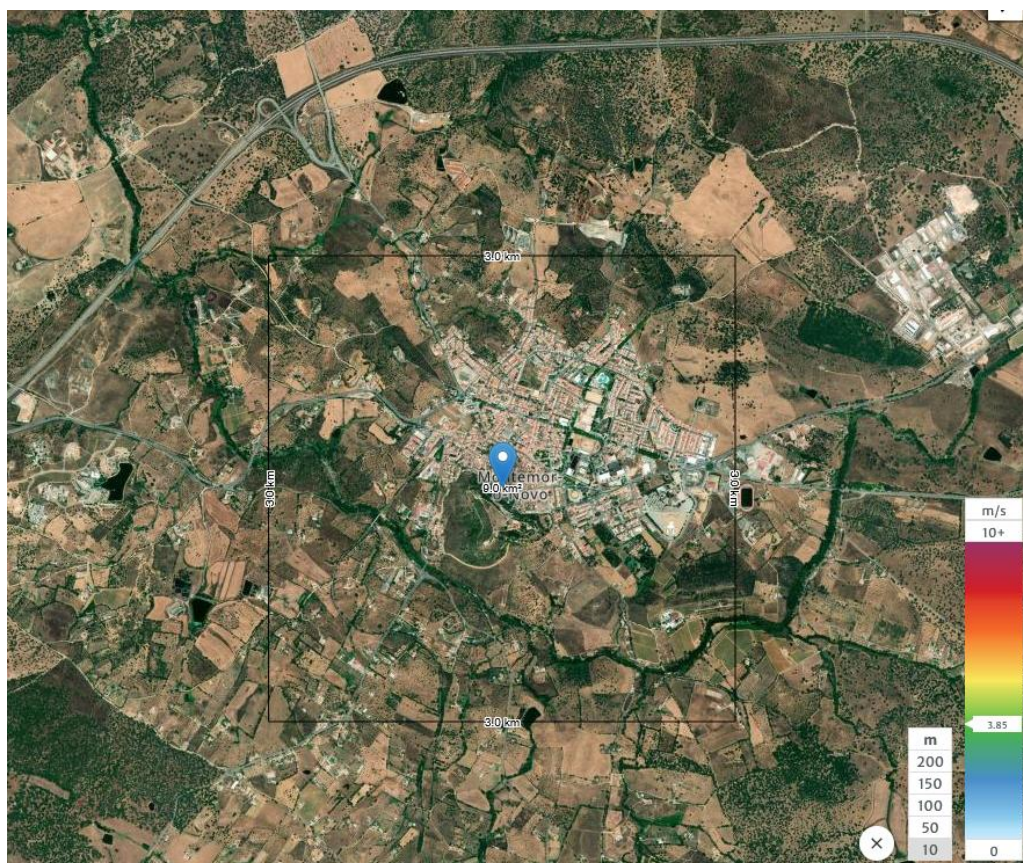


Figura 3.1 Localização do estudo

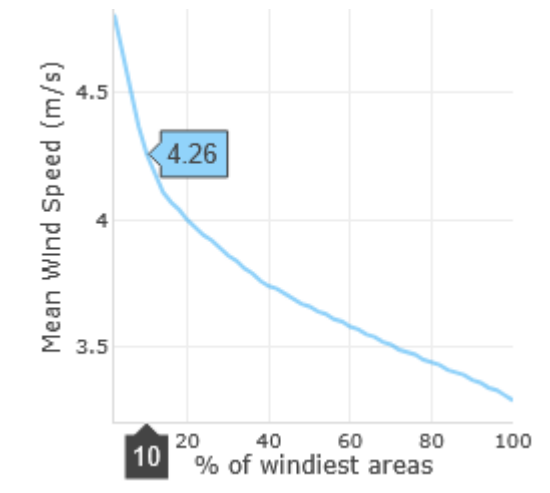


Figura 3.2 - Velocidade média do vento

Considerando o valor retirado anteriormente para a velocidade média anual do vento  $u_{med} = 4,26 \text{ m/s}$  e o parâmetro  $k=2,0$ , o cálculo do parâmetro  $c$  é calculado em (3.3).

$$c = \frac{u_{med}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} = \frac{4,26}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{2}\right)} = \frac{4,26}{0,8862} = 4,81 \text{ m/s} \quad (3.3)$$

Este resultado indica que, para a distribuição de *Weibull* deste estudo ( $k=2$ ), o parâmetro de escala é de aproximadamente 4,81 m/s, o que é coerente com a velocidade média anual verificada no GWA de 4,26 m/s.

Com a informação obtida em (3.3), podem-se realizar as substituições na expressão da função densidade de probabilidade de Weibull, dada em (3.1). Para a velocidade  $v = 4,26 \text{ m/s}$ , obtém-se:

$$f(4,26) = \frac{2,0}{4,81} \left(\frac{4,26}{4,81}\right)^{2,0-1} \cdot e^{-\left(\frac{4,26}{4,81}\right)^{2,0}} \approx 0,168 \quad (3.4)$$

O valor  $f(4,26) \approx 0,168(1/\text{m/s})$  não representa diretamente uma probabilidade, mas sim a densidade de probabilidade associada à velocidade de 4,26 m/s.

Em distribuições contínuas, como a de Weibull, a probabilidade de ocorrência de uma velocidade exatamente igual a 4,26 m/s é nula, o que se determina são probabilidades em intervalos de velocidades.

A probabilidade de a velocidade do vento ser inferior ou igual a um determinado valor  $u$  é obtida através da função de distribuição acumulada de Weibull (3.5)(DOKUR and KURBAN 2015).

$$F(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (3.5)$$

Aplicando (3.5) para  $u = 4,26$  m/s, com  $k = 2,0$  e  $c = 4,81$  m/s, resulta em (3.6)

$$F(4,26) = 1 - e^{-\left(\frac{4,26}{4,81}\right)^2} \approx 0,54 \quad (3.6)$$

ou seja, cerca de 54 % de probabilidade de a velocidade do vento ser menor ou igual a 4,26 m/s ao longo do ano, no local estudado.

Para determinar valores mais precisos e quantificar quantas horas não existe vento suficiente para gerar energia elétrica, recorreu-se ao PVGIS, onde é possível obter os valores do vento para cada hora durante o ano, para as mesmas coordenadas que foram utilizadas no GWA. Assim foram analisados os valores do vento para o ano 2022.

Como os dados analisados no PVGIS são para uma altura de referência de dez metros, foi necessário utilizar a lei logarítmica de *Prandtl*, representada em (3.7), para ajustar para a altura onde a turbina será instalada.

$$\frac{u(z)}{u(z_R)} = \frac{\ln(z/z_0)}{\ln(z_R/z_0)} \quad (3.7)$$

Na equação apresentada,  $u(z)$  representa a velocidade do vento estimada na altura desejada em metros por segundo (m/s), enquanto  $u(z_R)$  corresponde à velocidade do vento conhecida à altura de referência, também em metros por segundo (m/s). Por sua vez,  $z$  é a altura em metros (m) onde será instalada a turbina e para a qual se pretende determinar a velocidade do vento, sendo  $z_R$  a altura de referência, que no caso dos dados retirados do PVGIS corresponde a 10 metros (m), como referido anteriormente. Por último,  $z_0$  representa o comprimento de rugosidade do terreno, em metros (m), valor que depende das características específicas do local onde a turbina será instalada, que podem ser consultados na Tabela 3.1 (Manwell, McGowan, and Rogers 2010).

Tabela 3.1 - O comprimento de rugosidade do terreno

Tipo de terreno	$Z_0$ (mm)
Lama/gelo	0,01
Mar calmo	0,20
Neve	3,00
Relva baixa	8,00
Descampados	10,00
Relva alta	100,00
Terreno com árvores	250,00
Floresta	500,00
Povoado	1500,00
Centro da cidade	3000,00

Em (3.8) pode-se verificar o exemplo com os dados que foram utilizados para corrigir os dados do vento que se retirou do PVGIS.

$$u(z) = u(z_R) \cdot \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_R}{z_0}\right)} = PVGIS \cdot \frac{\ln\left(\frac{3}{4^{-4}}\right)}{\ln\left(\frac{10}{4^{-4}}\right)} \quad (3.8)$$

Após corrigir os valores das velocidades do vento para a altura pretendida, foi identificado o valor máximo anual. Com base nesse valor, elaborou-se uma tabela que agrupa todas as velocidades registadas ao longo do ano, parâmetro  $u$ (m/s), permitindo determinar o número de horas anuais em que cada velocidade ocorre,  $F(u)$ . Os resultados desta análise encontram-se na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Horas anuais em que cada velocidade ocorre

$v$ (m/s)	$F(v)$ - Horas	$f(u)$ - Teórico	$fw(u)$ - Weibull
0,00	164,00	0,02	0,00
1,00	2119,00	0,24	0,26
2,00	3762,00	0,43	0,42
3,00	1855,00	0,21	0,25
4,00	718,00	0,08	0,06
5,00	126,00	0,01	0,01
6,00	14,00	0,00	0,00
7,00	2,00	0,00	0,00
8,00	0,00	0,00	0,00
9,00	0,00	0,00	0,00
10,00	0,00	0,00	0,00
	8760,00	1,00	0,99

Na Tabela 3.2, é apresentada a análise da distribuição das velocidades do vento, onde  $f(u)$  corresponde à probabilidade de ocorrência de cada velocidade específica ao longo do ano, enquanto  $f_w(u)$  representa a distribuição estatística obtida através da função de distribuição de *Weibull*.

De modo a determinar os parâmetros de forma  $k$  e de escala  $c$  mais próximos da realidade, procedeu-se a um **ajuste por mínimos quadrados** da distribuição de Weibull à distribuição teórica da velocidade do vento. Para um conjunto de valores representativos da velocidade  $u_i$ , foi calculada a distribuição teórica  $f(u)$  e, para valores genéricos de  $k$  e  $c$ , a correspondente distribuição de Weibull  $f_w(u; k, c)$ .

O método dos mínimos quadrados consiste em encontrar o par de parâmetros  $(k, c)$  que minimiza a **soma dos quadrados dos resíduos** entre o modelo teórico e o modelo ajustado. Para aplicar o método dos mínimos quadrados, considera-se a seguinte função a minimizar (3.9).

$$S(k, c) = \sum_i [f(u_i) - f_w(u_i; k; c)]^2 \quad (3.9)$$

sendo  $f(u_i)$  a distribuição teórica e  $f_w(u_i; k, c)$  a distribuição de Weibull para cada combinação de  $k$  e  $c$ .

Esta função foi implementada numa folha de cálculo do *Microsoft Excel*, utilizando-se a ferramenta *Solver* para minimizar  $S(k, c)$ , impondo a restrição de que o parâmetro de forma satisfaz  $k \geq 1$ . Como resultado deste processo de ajuste por mínimos quadrados, obtiveram-se os valores  $k = 2,46$  (valor corrigido para o parâmetro de forma) e  $c = 2,37$  m/s para o parâmetro de escala. Com estes valores corrigidos foi traçado o Gráfico 3.1, onde se apresenta a distribuição de velocidade do vento e se observa a boa concordância entre a distribuição teórica  $f(u)$  e a distribuição de Weibull ajustada  $f_w(u)$ .

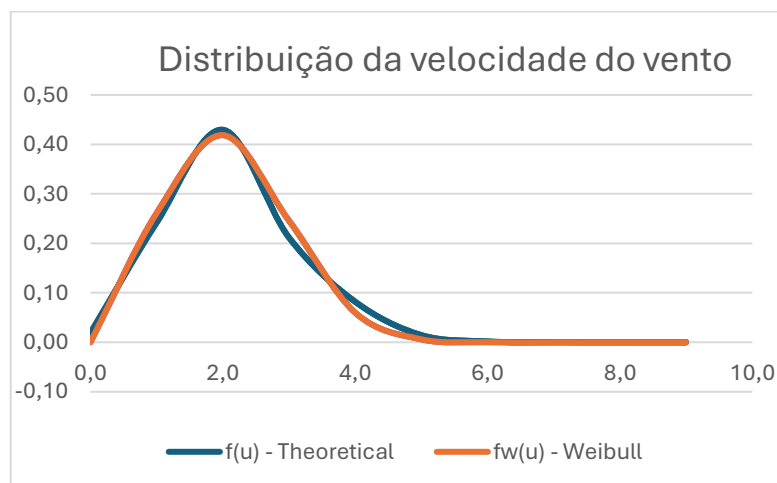


Gráfico 3.1 - Distribuição de velocidade do vento

c) Cálculo da produção de energia

A potência instantânea disponível no vento é determinada pela seguinte equação física fundamental (3.10):

$$P_{vento} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (3.10)$$

A potência disponível no vento, representada por  $P_{vento}$  em Watt (W), é calculada tendo em conta a densidade do ar ( $\rho$ ), considerada como 1,225 kg/m<sup>3</sup>, a área varrida pela turbina do tipo VAWT ( $A$ , em metros quadrados), e a velocidade média do vento  $v$ , em metros por segundo).

No entanto, como referido anteriormente, apenas uma fração da potência do vento pode ser convertida em energia elétrica útil pela turbina. Essa fração é descrita pelo coeficiente de potência ( $C_p$ ), que, para turbinas eólicas de eixo vertical de pequeno porte comerciais, situa-se geralmente entre 0,25 e 0,40. Considerando uma turbina VAWT da Aeolos analisada anteriormente, adota-se um valor conservador de  $C_p = 0,30$ .

Assim, a potência elétrica útil que pode ser extraída pela turbina é:

$$P_{turbina} = C_p \cdot P_{vento} = C_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (3.11)$$

Com exemplo prático para o desenvolver o estudo, será analisada a turbina do tipo VAWT do fabricante Aeolos-V de 1kW. Esta turbina tem rotor instalado a uma altura de 2,8m e diâmetro de 2,0m a determinação da área varrida ( $A$ ) é dada por (3.12).

$$A = D \cdot H = 2,0 \cdot 2,8 = 5,6m^2 \quad (3.12)$$

Considerando a velocidade média de 4,26m/s obtida anteriormente consegue-se determinar a  $P_{turbina}$  em (3.13).

$$P_{turbina} = C_p \cdot P_{vento} = C_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 = 0,30 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot 5,6 \cdot (4,26)^3 \quad (3.13)$$

$$P_{turbina} \approx 79,55 W$$

A energia anual produzida por uma turbina eólica é calculada pela expressão (3.14).

$$E_{anual} = P_{turbina} \cdot H_{ano} \cdot \eta_{disp} \quad (3.14)$$

Em que  $E_{anual}$  é a energia produzida anualmente pela turbina (Wh),  $P_{turbina}$  é a potência média útil produzida pela turbina (W),  $H_{ano}$  é o número total de horas no ano (8760 horas/ano)

e por fim o  $\eta_{disp}$  fator de disponibilidade operacional da turbina (Aeolos-V indica ser de 96%). Assim é possível obter o valor de  $E_{annual}$  em (3.15).

$$E_{annual} = P_{turbina} \cdot H_{ano} \cdot \eta_{disp} = 79,55 \cdot 8760 \cdot 0,96 = 669 \text{ kWh/ano} \quad (3.15)$$

Tendo em consideração o consumo no cenário básico, o consumo pode-se considerar de 3 kWh por dia, respondendo as comunidades rurais remotas ou cenários de conflito equivalente a cerca de 1095kWh/ano, assim no caso de não haver nenhum banco de baterias, calcula-se o número de turbinas necessárias para suprir a demanda energética anual na equação (3.16).

$$N_{Turbinas} = \frac{E_{necessária}}{E_{annual}} = \frac{1095000}{669000} = 1,636 \quad (3.16)$$

Assim, seriam necessárias 2 turbinas VAWT deste tipo, com altura = 2,8 m; diâmetro = 2,0 m;  $C_p = 0,30$  para satisfazer completamente a necessidade energética da habitação.

### 3.2. Capacidade das baterias

Após uma análise comparativa inicial entre as tecnologias de baterias mais utilizadas em sistemas energéticos autónomos, nomeadamente as baterias de iões de lítio e as de chumbo-ácido, decidiu-se optar pelas baterias iões de lítio. Esta decisão foi tomada devido a um conjunto de vantagens técnicas e operacionais significativas verificadas no capítulo dois.

Adicionalmente, a escolha das baterias iões de lítio é reforçada pela facilidade logística associada ao seu peso e volume reduzidos, fatores cruciais em contextos de difícil acesso ou que requerem uma rápida implementação e portabilidade. A necessidade de manutenção mínima também um ponto a favor desta tecnologia.

Por estas razões, apesar das baterias de chumbo-ácido serem mais económicas inicialmente, as vantagens das baterias iões de lítio em termos de fiabilidade, desempenho energético e durabilidade justificam a sua seleção como solução mais adequada e eficiente para o sistema energético autónomo em análise nesta dissertação.

Para determinar a capacidade total necessária das baterias de lítio, começa-se a calcular a capacidade útil das baterias, através da expressão (3.17).

$$C_{util} = C_{consumoDiário} \cdot Dias_{autonomia} \quad (3.17)$$

Para esta dissertação, considerando uma habitação isolada com o consumo de 3kWh e condições críticas ou emergenciais, adota-se uma autonomia conservadora de 2 dias, garantindo segurança e fiabilidade energética em períodos prolongados sem vento.

Isto significa que as baterias devem ser capazes de fornecer 6 kWh de energia armazenada, mantendo assim o funcionamento essencial da habitação por dois dias consecutivos.

### 3.2.1. Capacidade nominal

As baterias não devem ser descarregadas totalmente, pois descargas profundas podem reduzir significativamente a sua vida útil. Assim, utiliza-se a profundidade de descarga (*Depth of Discharge* – DoD) recomendada para calcular a capacidade nominal total das baterias. Ocorrem também perdas energéticas durante os ciclos de carga e descarga. Por isso, a eficiência energética ( $\eta_{baterias}$ ) das baterias é um fator fundamental no dimensionamento rigoroso. Para baterias íões de lítio, a eficiência energética típica encontra-se entre 90% e 95% como pode ser analisado na Tabela 3.3. Sendo assim, a expressão da capacidade nominal é dada pela expressão (3.18) (Ministério da Economia 2000).

$$C_{nominal} = \frac{C_{util}}{DoD \cdot \eta_{baterias}} \quad (3.18)$$

Substituindo os valores definidos em (3.19):

$$C_{nominal} = \frac{6k}{0,90 \cdot 0,90} = 7,4kWh \quad (3.19)$$

Assim, a capacidade necessária das baterias de lítio para atender ao consumo diário definido em 3 kWh/dia, com uma autonomia de dois dias e considerando profundidade de descarga de 90% e eficiência energética também de 90%, concluiu-se que a capacidade nominal adequada das baterias deve ser aproximadamente 7,5 kWh.

Com base nos requisitos anteriormente mencionados, foram selecionadas baterias comercializadas no mercado europeu e adequadas ao uso residencial, considerando fatores como segurança operacional, fiabilidade técnica e compatibilidade com o sistema eólico escolhido.

Na Tabela 3.3 são apresentadas três opções comerciais que satisfazem os requisitos de capacidade energética definidos neste estudo:

Tabela 3.3 – Comparação das características de baterias no mercado

Marca e modelo	Capacidade nominal	Tensão nominal	DoD	Eficiência	Ciclos de vida útil
<b>Pylontech US3000C</b>	3,55 kWh cada	48 V	90%	95%	≥6000 ciclos
<b>BYD Battery-Box Premium LVS 8.0</b>	8,0 kWh total	48 V	90%	95%	≥6000 ciclos
<b>LG Chem RESU 10H Prime</b>	9,6 kWh total	400 V DC	90%	95%	≥6000 ciclos

Depois da análise das opções acima descritas, opta-se pela bateria *BYD Battery-Box Premium LVS 8.0* por proporcionar uma solução equilibrada em termos de capacidade, simplicidade de instalação (Store 2025), fiabilidade e disponibilidade comercial. Esta solução corresponde aos requisitos energéticos estabelecidos nesta dissertação, assegurando a eficiência e a robustez necessárias ao sistema autónomo proposto. No anexo 1 estão as características técnicas dos vários modelos disponíveis da BYD.

### **3.3. Sistema eletrónico**

Este capítulo detalha os principais componentes eletrónicos necessários para o funcionamento eficiente do sistema energético autónomo baseado em turbinas VAWT com baterias iões de lítio BYD.

#### **3.3.1. Controlador de carga eólica**

O controlador de carga eólico do tipo de rastreamento do ponto de máxima potência, *Maximum Power Point Tracking* (MPPT), é responsável pela gestão eficiente e segura da energia produzida pela turbina eólica.

A turbina VAWT pode gerar energia elétrica em corrente contínua (DC) nas turbinas de baixas potência ou em corrente alternada (AC), tanto nas turbinas de baixa potência como nas turbinas de potências mais elevadas, tendo a possibilidade de realizar esta configuração junto ao fornecedor. A tensão de saída como é variável, consoante a velocidade do vento, com isso, não é diretamente adequada para carregar as baterias ou alimentar diretamente a carga doméstica, já que é necessário garantir uma carga constante e estável. Por isso, o controlador MPPT é utilizado para otimizar continuamente a operação da turbina, extraindo o máximo possível da potência disponível.

A interligação do controlador de carga MPPT recebe diretamente os cabos DC provenientes da turbina VAWT, realiza os ajustes da energia para carregar as baterias de lítio (neste caso, BYD LVS 8.0 a 48 V DC). Após as baterias estarem carregadas, a energia armazenada é posteriormente utilizada pelo inversor para alimentar as cargas elétricas da habitação.

As características técnicas fundamentais a ter em conta na escolha de um MPPT são, a tensão de operação, que foi mencionado anteriormente, a eficiência e as proteções, tais como, sobretensões, sobrecorrentes e sobrecargas de modo a proteger as baterias e prologar a sua vida útil.

Modelos disponíveis

- Wind & Sun MPPT Wind Controller 3 kW (48 V DC) - Proteção integrada, entrada DC direta, com algoritmo MPPT avançado (Mars Rock 2025).
- Controlador de Carga HY 48V 3000W (Controlador de Carga HY 48V 3000W 2025).

### 3.3.2. Inversor *off-grid*

O inversor é responsável por converter a energia armazenada nas baterias (48 V DC) para energia elétrica utilizável pela instalação elétrica doméstica (230 V AC, 50 Hz). Considerando um consumo médio diário de 3 kWh/dia e potência máxima estimada de até 3 kW. Com isso, foram analisados alguns modelos disponíveis no mercado, dos quais foram selecionados os seguintes:

- Victron MultiPlus-II 48/3000/35-32 (MultiPlus-II 230V Este manual também está disponível em formato HTML5. PORTUGUÊS 2025).
- Epever IP3000-42-PLUS (Model IP1000-Plus, IP1500-Plus IP2000-Plus, IP3000-Plus IP4000-Plus, IP5000-Plus Pure sine wave inverter USER MANUAL Contents 2025).

### 3.3.3. Dimensionamento dos cabos e das proteções elétricas

O dimensionamento dos condutores elétricos é um aspeto essencial para garantir a segurança da instalação. O cálculo da secção dos cabos deve assegurar que a queda de tensão ao longo dos circuitos seja suficientemente baixa para evitar perdas significativas de energia e para manter os dispositivos dentro dos seus limites de operação.

Os cálculos apresentados baseiam-se na expressão matemática utilizada no cálculo da queda de tensão segundo o Regulamento Técnico de Instalações Elétricas de Baixa Tensão (RTIEBT) em Portugal, permitindo assim determinar os valores de secção de cada cabo.

A queda de tensão entre a origem da instalação e qualquer ponto de utilização, expressa em função da tensão nominal da instalação, não deve ser superior a 3% como indicado no quadro 52O, do regulamento RTIEBT.

Considerando a secção do condutor de fase seja igual á do condutor neutro, utiliza-se a fórmula (3.20) e (3.21) de cálculo das quedas de tensão para calcular a secção dos cabos.

$$u = b \cdot \left( \rho \cdot \frac{L}{S} \cdot \cos\varphi + \lambda \cdot L \cdot \sin\varphi \right) \cdot IB \quad (3.20)$$

$$\Delta u = 100 \frac{u}{U_0} \quad (3.21)$$

A expressão (3.19) relaciona a queda de tensão absoluta  $u$ , expressa em volts, com diversos fatores técnicos. Entre estes fatores encontram-se a queda de tensão relativa  $\Delta u$ , expressa em percentagem; a tensão nominal do circuito  $U_0$ , que é a tensão entre fase-neutro para circuitos monofásicos e fase-fase para trifásicos; e o coeficiente  $b$ , que assume valor igual a

1 para circuitos trifásicos equilibrados e valor 2 para circuitos monofásicos ou de corrente contínua (DC).

A resistividade corrigida para temperatura de serviço ( $\rho_1$ ) é também considerada nesta equação, assumindo um valor de  $0,0225 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$  para condutores em cobre, conforme estabelecido no RTIEBT. A fórmula inclui ainda o comprimento simples dos cabos ( $L$ ), medido em metros, e a secção transversal dos condutores ( $S$ ), expressa em milímetros quadrados ( $\text{mm}^2$ ).

Em circuitos que operam em corrente alternada (AC), são igualmente considerados o fator de potência  $\cos\varphi$ , assumido como 0,8 na ausência de dados específicos, e a sua componente reativa  $\sin\varphi$ , que nesse caso é normalmente assumida como 0,6. A reactância linear dos condutores  $\lambda$  é também tida em conta para circuitos AC, assumindo o valor típico de  $0,08 \text{ m}\Omega/\text{m}$ . Finalmente, a corrente de serviço do circuito  $IB$ , expressa em amperes (A), é essencial para determinar a secção final necessária dos cabos elétricos. Em circuitos de corrente contínua, como é o caso de alguns circuitos deste estudo, simplificam-se alguns parâmetros, assumindo-se o fator de potência como igual a 1 e a componente reativa como nula.

Para circuitos DC (como turbina eólica, controlador, baterias), temos:

- $b=2$
- $\cos\varphi = 1$  e  $\sin\varphi = 0$  (não há reactância em DC)

Simplificando a equação (3.20) conseguimos obter a (3.22):

$$u = 2 \cdot \rho_1 \cdot \frac{L}{S} \cdot IB \quad (3.22)$$

Colocar em função de secção:

$$S = \frac{2 \cdot \rho_1 \cdot L \cdot IB}{u}$$

- **Turbina → Controlador MPPT (DC)**

$P=3000\text{W}$ ;  $U=48\text{VDC}$ ;  $IB=?$

$$IB = \frac{P}{U} = \frac{3000}{48} = 62,5 \text{ A} \quad (3.23)$$

$L= 10\text{m}$ ;  $u= 1,44 \text{ V}$  (3% de 48V);  $S=?$

$$S = \frac{2 \cdot \rho_1 \cdot L \cdot IB}{u} = \frac{2 \cdot 0,0225 \cdot 10 \cdot 62,5}{1,44} \approx 19,53 \text{ mm}^2 \quad (3.24)$$

Secção recomendada será de  $25 \text{ mm}^2$  (valor comercial superior).

- **Controlador MPPT → Baterias (DC)**

$L= 2\text{m}$ ;

$$S = \frac{2 \cdot \rho \cdot L \cdot IB}{u} = \frac{2 \cdot 0,0225 \cdot 2 \cdot 62,5}{1,44} \approx 3,91 \text{ mm}^2 \quad (3.25)$$

Secção recomendada será de 4 mm<sup>2</sup> (valor comercial superior).

- **Baterias → Inversor (DC)**

L= 4m;

$$S = \frac{2 \cdot \rho \cdot L \cdot IB}{u} = \frac{2 \cdot 0,0225 \cdot 4 \cdot 62,5}{1,44} \approx 7,81 \text{ mm}^2 \quad (3.26)$$

Secção recomendada será de 10 mm<sup>2</sup> (valor comercial superior).

- **Inversor → Quadro AC (230 V AC)**

Para AC (fase-neutro monofásico): b=2; cosφ = 0,8; senφ =0,6; λ=0,08 mΩ/m; L= 15m; u= 6,9 V (3% de 230V); IB=?

$$IB = \frac{P}{U} = \frac{3000}{230} = 13,04 \text{ A} \quad (3.27)$$

S=?

$$u = b \cdot \left( \rho \cdot \frac{L}{S} \cdot \cos\varphi + \lambda \cdot L \cdot \sin\varphi \right) \cdot IB \quad (3.28)$$

$$\Leftrightarrow 6,9 = 2 \cdot \left( 0,0225 \cdot \frac{15}{S} \cdot 0,8 + 0,00008 \cdot 15 \cdot 0,6 \right) \cdot 13,04 \Leftrightarrow \quad (3.29)$$

$$\Leftrightarrow S = \frac{2 \cdot 0,27 \cdot 13,04}{6,9} = 1,02 \text{ mm}^2$$

Secção recomendada será de 2,5 mm<sup>2</sup> (mínimo por norma para instalações domésticas).

Tabela 3.4 - Tabela resumo do dimensionamento das secções

Troço	Corrente (A)	L (m)	ΔV (V)	Secção calculada	Secção recomendada
Turbina → Controlador MPPT (DC)	62,5	10	1,44	19,53 mm <sup>2</sup>	25 mm <sup>2</sup>
Controlador → Baterias (DC)	62,5	2	1,44	3,91 mm <sup>2</sup>	4 mm <sup>2</sup>
Baterias → Inversor (DC)	62,5	4	1,44	7,81 mm <sup>2</sup>	10 mm <sup>2</sup>
Inversor → Quadro AC	13,04	15	6,9	1,02 mm <sup>2</sup>	2,5 mm <sup>2</sup>

## Capítulo 4 - Resultados e discussão

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir da simulação de diferentes cenários energéticos, com foco na avaliação técnica da integração de aerogeradores analisados anteriormente. As simulações foram realizadas através do software *HOMER*<sup>®</sup>Pro, uma ferramenta amplamente reconhecida para a modelação e otimização de sistemas energéticos híbridos, que tem sido referida ao longo desta dissertação.

As simulações basearam-se em perfis de consumo energético típicos de uma habitação unifamiliar, bem como em dados reais de recursos eólicos obtidos para uma localização específica em Portugal.

Apesar de o *HOMER*<sup>®</sup>Pro permitir análises económico-financeiras detalhadas, este estudo concentra-se exclusivamente na análise técnica, de forma a compreender o desempenho e a viabilidade funcional das soluções propostas em diferentes configurações.

### 4.1. Implementação no *HOMER*<sup>®</sup>Pro

#### 4.1.1. Inicialização do projeto no *HOMER*<sup>®</sup> pro

No início do projeto, o software *HOMER*<sup>®</sup> Pro permite definir a localização geográfica onde será implementado o sistema. Esta funcionalidade é essencial, pois a partir das coordenadas inseridas, o *software* importa automaticamente dados ambientais e climáticos da região, tais como, perfis de radiação solar, temperatura ambiente e velocidade do vento, fator determinante para a modelação do aerogerador.

Para este trabalho, foi selecionado o município de Montemor-o-Novo, localizado na região do Alentejo, Portugal, com coordenadas geográficas aproximadas de 38°38.7'N, 8°12.6'W. A seleção foi efetuada diretamente no mapa interativo da plataforma, permitindo que o ponto geográfico fosse registado com precisão, representado na Figura 4.1.

A escolha por Montemor-o-Novo justifica-se por diversos motivos. Em primeiro lugar, trata-se de uma zona de baixa densidade populacional, com características típicas do meio rural e semiurbano, o que a torna adequada para a instalação de sistemas descentralizados de geração de energia. Em segundo lugar, a região apresenta níveis de vento baixos, mas estáveis ao longo do ano, condição que favorece o aproveitamento da energia eólica em pequena escala.

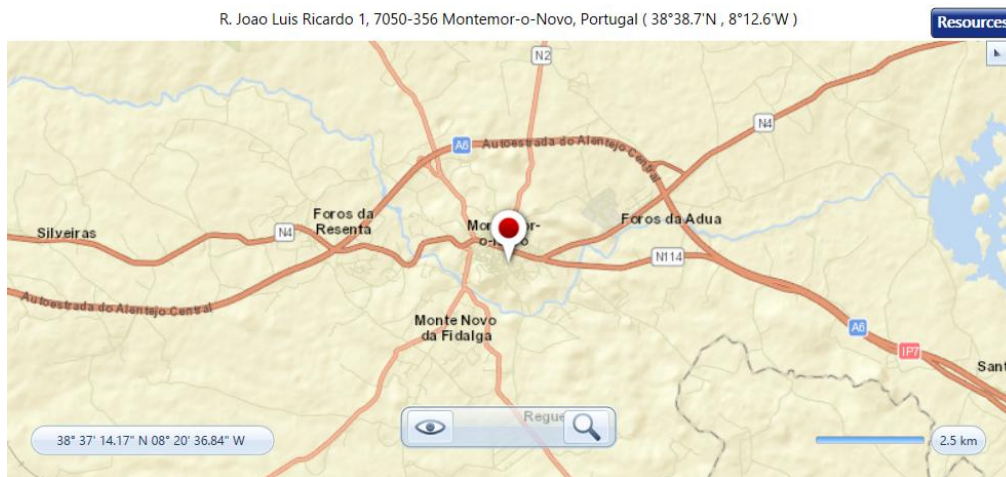


Figura 4.1 – Seleção da região de estudo

Apesar de o software permitir o *download* automático dos dados do vento com base na localização selecionada, optou-se por introduzir valores mensais médios personalizados, obtidos previamente através da plataforma PVGIS, garantindo assim maior fiabilidade dos dados utilizados no estudo teórico e reduzindo as discrepâncias.

Para conseguir inserir os dados relativos aos recursos naturais disponíveis no local, como radiação solar, temperatura ambiente e velocidade do vento é necessário aceder a aba *Resources*, representada na Figura 4.2.



Figura 4.2 - Aba dos Resources

Como pode ser observado na Figura 4.3, os valores foram inseridos manualmente na secção "*Wind Resource*", selecionando a opção "*Enter monthly averages*". A tabela apresenta os valores médios mensais da velocidade do vento (em m/s), com destaque para os meses de maior intensidade eólica (como abril, com 3,151 m/s) e um valor médio anual de 2,73 m/s.

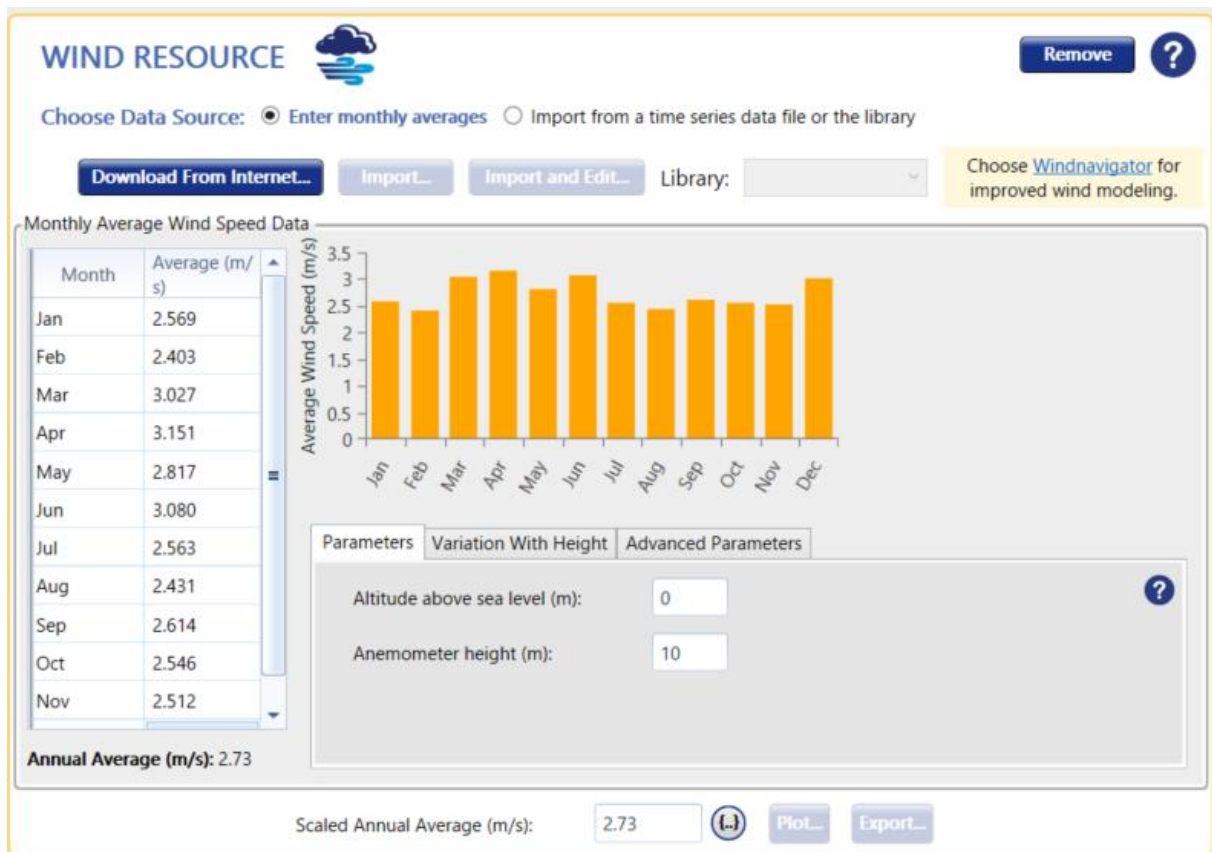


Figura 4.3 – Wind Resource

Adicionalmente, foram mantidos os valores predefinidos para os parâmetros de altitude acima do nível do mar (0 metros) e altura do anemómetro (10 metros). A altitude não foi considerada relevante ao ponto de haver necessidade de correção da densidade do ar, já que o foco principal é a análise técnica do comportamento do sistema de geração eólica em condições médias. Por sua vez, a altura de 10 metros representa um valor comum e adequado para aerogeradores de pequeno porte em ambientes residenciais, e foi mantida por se alinhar com o cenário estudado.

Após a caracterização do recurso eólico, prossegue-se com a análise da variável de temperatura, onde o parâmetro foi automaticamente carregado a partir da base de dados do HOMER<sup>®</sup> Pro, Figura 4.4, com valores médios mensais referentes à localização do projeto. Apesar de estar incluída na simulação, esta variável não tem influência significativa nos resultados técnicos obtidos neste estudo, uma vez que o sistema não depende diretamente da temperatura ambiente para o seu funcionamento.

No entanto, importa referir que em regiões com climas muito frios, onde as temperaturas podem atingir valores negativos extremos, seria necessária uma análise térmica mais detalhada. Nesses casos, o gelo ou a neve podem afetar negativamente o desempenho dos aerogeradores, provocando congelamento de componentes móveis ou alterações na aerodinâmica das pás, o que compromete a geração de energia.

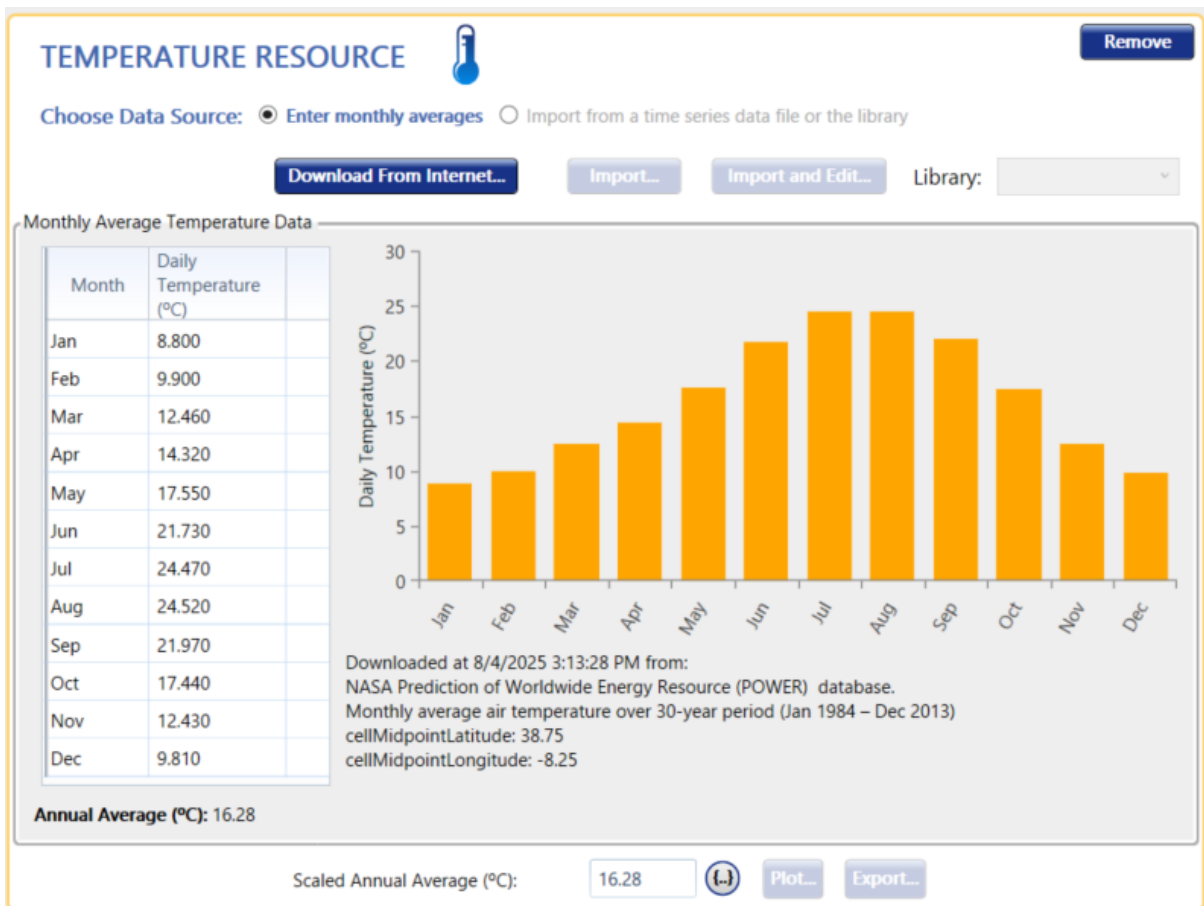


Figura 4.4 - Temperature resource

#### 4.1.2. Escolha dos componentes do sistema

Após estar definida a localização e inseridos os recursos relevantes para a simulação procede-se à seleção dos componentes tecnológicos que compõem o sistema a ser analisado. Esta etapa é realizada na aba “Components” do HOMER<sup>®</sup> Pro, onde estão disponíveis diversas opções para representar os elementos físicos do sistema, conforme ilustrado na Figura 4.5.

Entre as opções disponíveis encontram-se turbinas eólicas, painéis fotovoltaicos, sistemas de armazenamento (baterias), inversores, ligação à rede elétrica, geradores auxiliares, entre outros.

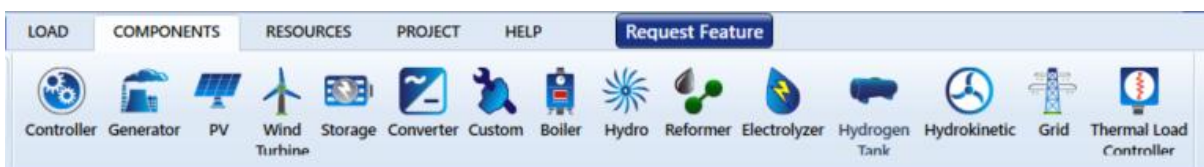


Figura 4.5 - Aba dos componentes

O passo seguinte consiste na seleção da turbina eólica a integrar no sistema. O HOMER<sup>®</sup> Pro disponibiliza uma biblioteca extensa de modelos comerciais de aerogeradores, com diferentes

potências, alturas de instalação, tipos de saída (AC/DC) e tempos de vida útil, como é possível analisar na Figura 4.6. Esta funcionalidade permite escolher equipamentos realistas e adaptados ao tipo de aplicação pretendida.

Entre os modelos disponíveis, encontra-se o Aeolos-V1kW, que já foi analisado previamente no decorrer deste trabalho, no enquadramento teórico da produção de energia eólica em ambiente residencial. Por esse motivo, foi selecionado para integrar a simulação.

Name	Library	Manufacturer	Capacity (kW)	Hub height (m)	Output type	Lifetime (years)	Consider temperature effect	Turbine losses
Aeolos-V1kW	Pro Default	Lotus Energy Techn	1	10	AC	20	no	0
AWS HC 1.5kW Wind Turbine	Pro Default	AWS	2	12	AC	20	no	0
AWS HC 1.8kW Wind Turbine	Pro Default	AWS	2	12	AC	20	no	0
AWS HC 3.3kW Wind Turbine	Pro Default	AWS	3	12	AC	20	no	0
AWS HC 4.2kW Wind Turbine	Pro Default	AWS	4	12	AC	20	no	0
AWS HC 5.1kW Wind Turbine	Pro Default	AWS	5	12	AC	20	no	0
AWS HC 650W Wind Turbine	Pro Default	AWS	1	12	AC	20	no	0
Bergey BWC XL.1	Pro Default	Bergey Windpower	1	10	AC	20	no	0
Bergey Excel 10	Pro Default	Bergey Windpower	10	30	AC	20	no	0
Bergey Excel 10-R	Pro Default	Bergey Windpower	10	30	DC	20	no	0

Figura 4.6 - Turbinas eólicas de HOMER

Após a seleção da turbina eólica desejada, o componente passa a ser representado automaticamente na área de trabalho gráfica do HOMER<sup>®</sup> Pro, designada por “Schematic”. Esta área apresenta um esquema funcional do sistema, onde é possível visualizar de forma clara a ligação entre os diferentes elementos.

Como se pode observar na Figura 4.7, a turbina Aeolos-V1kW aparece conectada ao barramento DC, conforme a configuração previamente definida. A seta no ícone da turbina indica o sentido do fluxo de energia, ou seja, a geração da turbina é direcionada para alimentar os restantes elementos do sistema, como a carga, conversor ou baterias.

Esta representação gráfica facilita a compreensão da topologia do sistema e permite realizar, de forma visual e intuitiva, as conexões entre todos os componentes envolvidos na simulação.

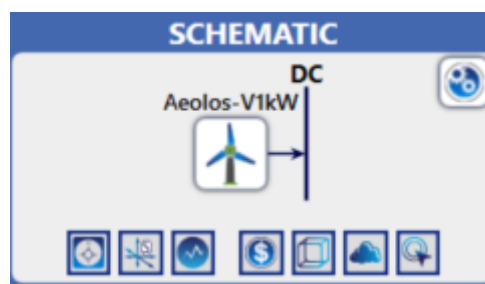


Figura 4.7 - Representação esquemática no HOMER Pro

Apesar de o modelo Aeolos-V1kW já constar na biblioteca do HOMER® Pro com os principais parâmetros técnicos definidos, o software permite realizar ajustes adicionais conforme as especificações do fabricante. Como mostrado na Figura 4.8, foram efetuadas duas alterações. A ligação elétrica foi alterada de AC para DC, uma vez que, de acordo com o fabricante, a versão para sistemas *off-grid* fornece uma saída em 48 V DC. Esta mudança assegura as condições técnicas do modelo à aplicação simulada, que não está ligada à rede elétrica. Foi também realizado um ajuste na altura do cubo (*hub height*) para 2,8 metros, conforme indicado na ficha técnica do equipamento analisada no capítulo anterior. Esta alteração permite simular com maior precisão o desempenho do aerogerador tendo em conta as condições reais de instalação.

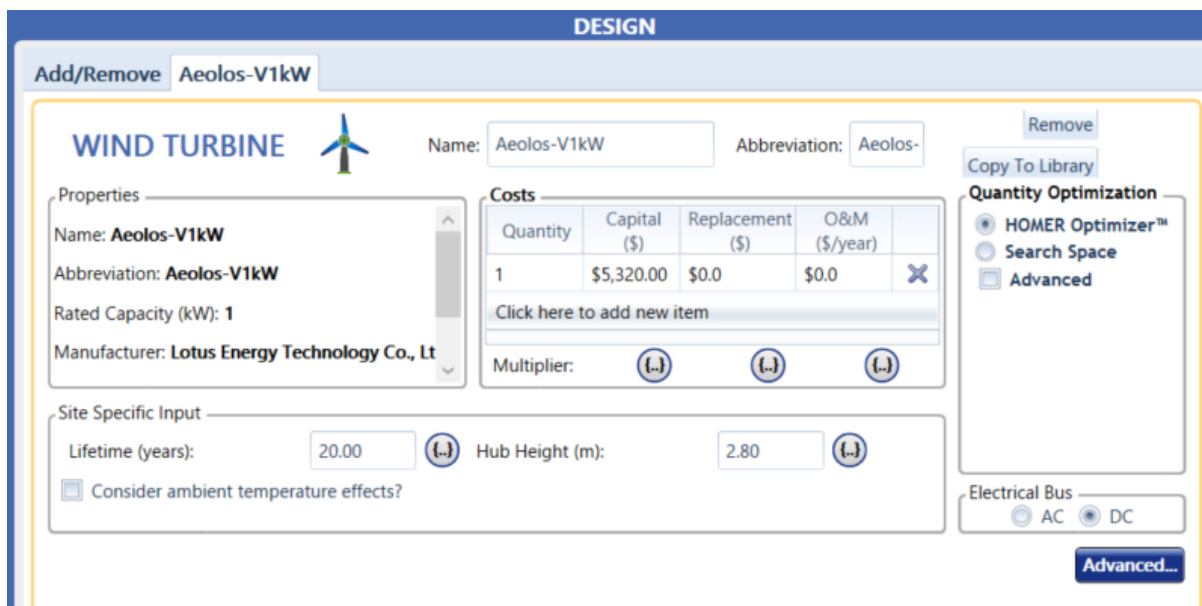


Figura 4.8 - Parâmetros da turbina eólica escolhida

Ainda na interface de configuração da turbina eólica, ao aceder à opção “Advanced”, é possível consultar e editar a curva de potência (*Power Curve*) da turbina, que descreve o comportamento do equipamento em função da velocidade do vento. Esta funcionalidade é fundamental para garantir que o modelo simulado no HOMER Pro represente com precisão o desempenho real do aerogerador.

Como ilustrado na Figura 4.9, a curva mostra a potência elétrica gerada (em kW) para diferentes velocidades de vento (em m/s). Os dados apresentados nesta curva foram verificados com o *datasheet* do fabricante da turbina Aeolos-V1kW, confirmando a sua coerência. Esta verificação garante que a simulação considere corretamente o rendimento esperado em função do recurso eólico disponível na região de estudo.

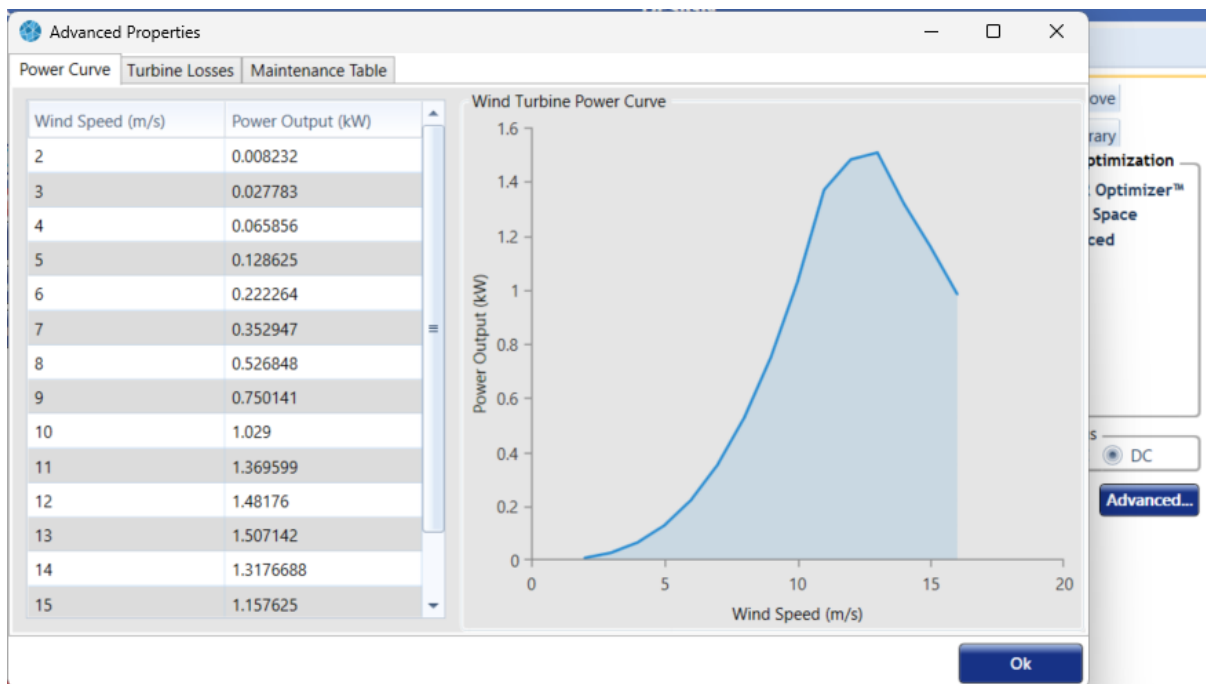


Figura 4.9 - Curva da potência da turbina

Dentro das propriedades avançadas da turbina, encontra-se ainda o separador destinado à programação de manutenção preventiva, onde é possível definir procedimentos regulares como inspeções, substituição de componentes ou ajustes operacionais. No caso da turbina Aeolos-V1kW, o HOMER<sup>®</sup> Pro já apresenta dois procedimentos predefinidos: uma inspeção de rotina a cada 2190 horas (aproximadamente 3,5 meses), e o enchimento do óleo do travão hidráulico a cada 4380 horas (aproximadamente 6 meses). Como não foi possível confirmar esta informação junto ao fabricante, optou-se por manter os parâmetros definidos por defeito pelo próprio *software*. Estes procedimentos podem ser visualizados na Figura 4.10, onde se observa a tabela de manutenção configurada no HOMER Pro para este modelo da turbina.

Procedure	Interval (hrs)	Type	Down Time (hrs)	Cost	Marginal Cost	
Routine inspection every 3-6 months such as repaint the paint, retight the fasteners, etc.	2190	Calendar	12	10	10	✕
Fill the hydraulic brake oil every 6-12 months.	4380	Calendar	0	10	10	✕

Click here to add new item

Figura 4.10 - Parâmetros de manutenção

Com o sistema de geração definido, passou-se à seleção do sistema de armazenamento de energia. Foi aplicado no HOMER<sup>®</sup> Pro um filtro por tensão de 48 V DC, restringindo a lista de opções a baterias adequadas a sistemas *off-grid*. Entre os modelos disponíveis, não se encontrou nenhuma bateria da marca BYD, que foi a solução originalmente estudada na parte teórica do trabalho.

Como alternativa, optou-se por utilizar o modelo *LG Chem RESU10* [9,8 kWh], que também foi analisado durante o enquadramento teórico, sendo uma bateria de íões de lítio amplamente utilizada em aplicações residenciais. Esta apresenta uma capacidade útil de 9,072 kWh, tensão de 48 V e potência máxima de descarga de 5,712 kW. A escolha desta bateria assegura coerência técnica com o sistema modelado, mantendo o alinhamento com os critérios discutidos na fase teórica do estudo.

A seleção e configuração podem ser visualizadas na Figura 4.11, onde é possível ver a bateria *LG Chem* integrada ao sistema no esquema elétrico do *HOMER*<sup>®</sup> Pro.

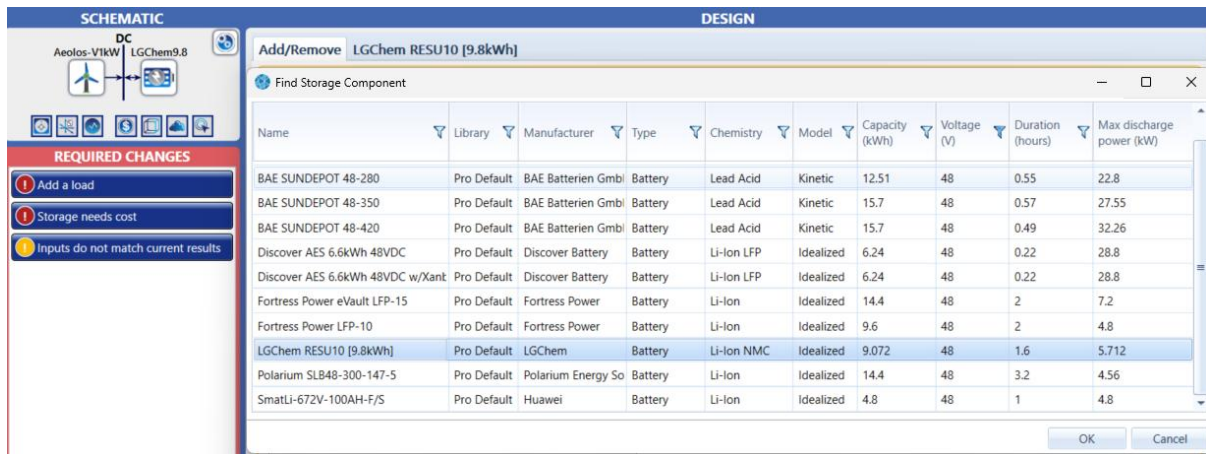


Figura 4.11 - Baterias do HOMER Pro

A configuração da bateria *LG Chem RESU10* [9,8 kWh] dentro do *HOMER*<sup>®</sup> Pro é apresentada na Figura 4.12. Nesta interface, o software exibe os principais parâmetros técnicos do modelo. Embora algumas propriedades possam ser ajustadas manualmente, como o estado inicial de carga e o número de unidades, nesta fase optou-se por manter todos os valores predefinidos, uma vez que refletem as características reais do equipamento conforme a ficha técnica do fabricante.

Após a realização das simulações, o *HOMER*<sup>®</sup> Pro permite ajustar dinamicamente o número de baterias necessárias, com base na otimização técnica do sistema. Assim, eventuais alterações na quantidade de unidades serão feitas de forma justificada posteriormente, tendo em conta os resultados obtidos e o desempenho do sistema em cada cenário simulado.

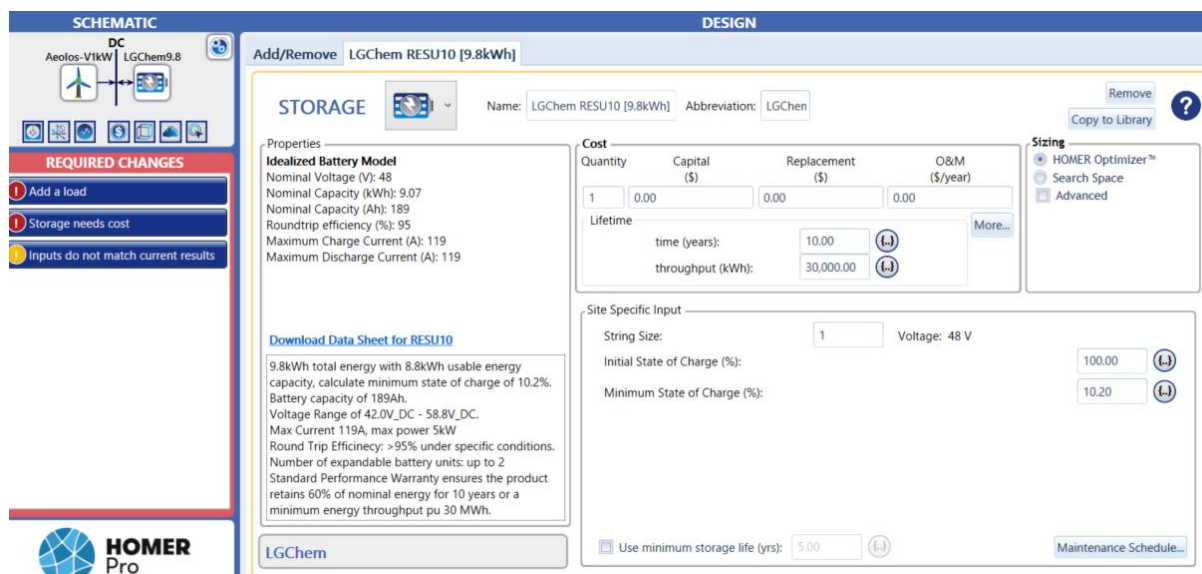


Figura 4.12 - Configuração da bateria

Para converter a energia de corrente contínua (DC), proveniente da turbina e do sistema de armazenamento para a corrente alternada (AC), necessária para alimentar a carga residencial, foi adicionado ao sistema um conversor bidirecional. Como não existia nenhum conversor analisado anteriormente optou-se por um conversor com as características essenciais para o sistema como o *Studer Xtender XTM 4000-48*, disponível na biblioteca do *HOMER® Pro*, como mostrado na Figura 4.13.

Este equipamento possui uma capacidade de 3,5 kW em operação contínua, com possibilidade de suportar picos até 4 kW por 30 minutos e 10,5 kW durante 5 segundos, apresentando ainda uma eficiência de 96%. A sua tensão de entrada e saída é compatível com os restantes elementos do sistema (48 V DC e 230 V AC, respetivamente), e inclui funcionalidades como proteção contra curto-circuito, sobrecarga e sobreaquecimento.

Não foram realizadas alterações aos parâmetros predefinidos, tendo sido mantidas as configurações padrão do equipamento. Optou-se por seleccionar um modelo com capacidade ligeiramente superior à potência da carga simulada, de forma a garantir uma margem de segurança caso, futuramente, se pretenda ampliar o sistema ou aumentar a produção energética.

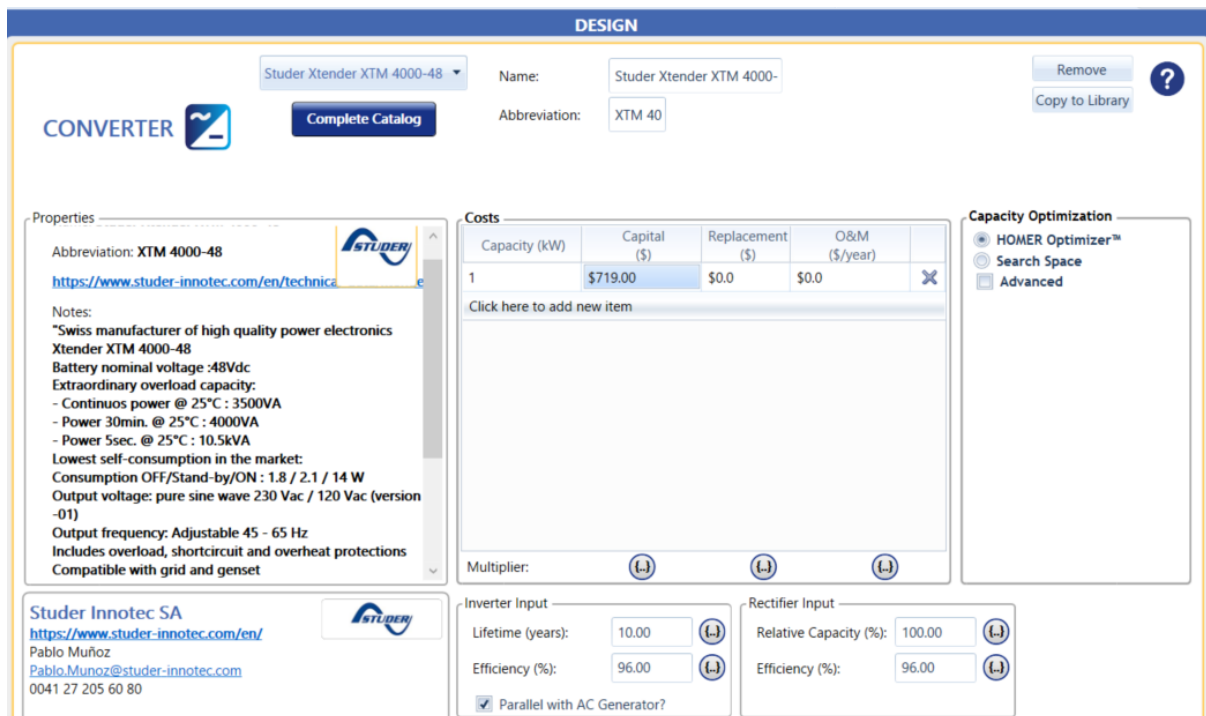


Figura 4.13 - Conversor DC/AC

Com base nas análises realizadas na parte teórica, foi definido previamente um perfil de consumo diário médio de 3kWh/dia, representativo de uma habitação residencial urbana ou em condições de emergência.

No software *HOMER*<sup>®</sup> Pro, o processo de configuração iniciou-se na aba *Electric Load Setup*, onde foi selecionado o perfil “*Residential*” e indicado o mês de maior consumo como sendo julho, de forma a aproximar o perfil gerado automaticamente do comportamento típico de consumo residencial em meses de maior utilização de sistemas de refrigeração. O *HOMER* gera automaticamente um perfil de carga com base em bases de dados de perfis-tipo, definindo a distribuição horária de consumo ao longo do dia e variações sazonais durante o ano.

Comparando os resultados apresentados pelo *HOMER*<sup>®</sup> Pro com o consumo teórico calculado, verificou-se que o valor médio diário gerado pelo software foi de 11,27 kWh/dia, ligeiramente superior ao valor estimado no estudo teórico. Esta diferença deve-se ao facto de o *HOMER*<sup>®</sup> Pro utilizar perfis baseados em dados estatísticos internacionais, que podem não refletir exatamente o padrão de consumo específico considerado no estudo inicial, mas que se mantêm próximos da realidade pretendida para o cenário em análise.

Os dados apresentados pelo *HOMER*<sup>®</sup> Pro incluem ainda valores pré-definidos para variabilidade diária (10%) e por intervalo de tempo (20%), garantindo uma maior aproximação a um perfil real, e que foram mantidos sem alterações. A escolha de manter estes parâmetros originais deve-se ao facto de já representarem uma configuração realista e amplamente

utilizada em simulações energéticas, dispensando a necessidade de ajustes adicionais nesta fase.

A Figura 4.14 e a Figura 4.15 ilustram respetivamente o ecrã de seleção do perfil de carga e os gráficos gerados pelo HOMER<sup>®</sup> Pro, onde se observa o perfil horário, sazonal e anual da carga escolhida para o presente estudo.

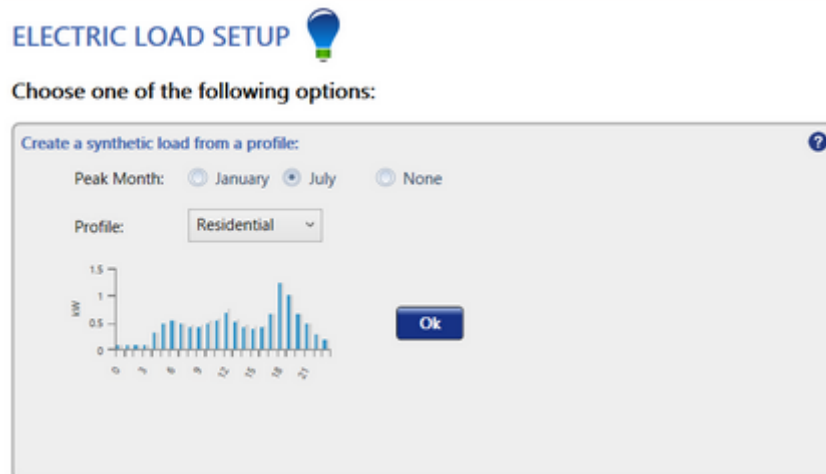


Figura 4.14 - Configuração da carga

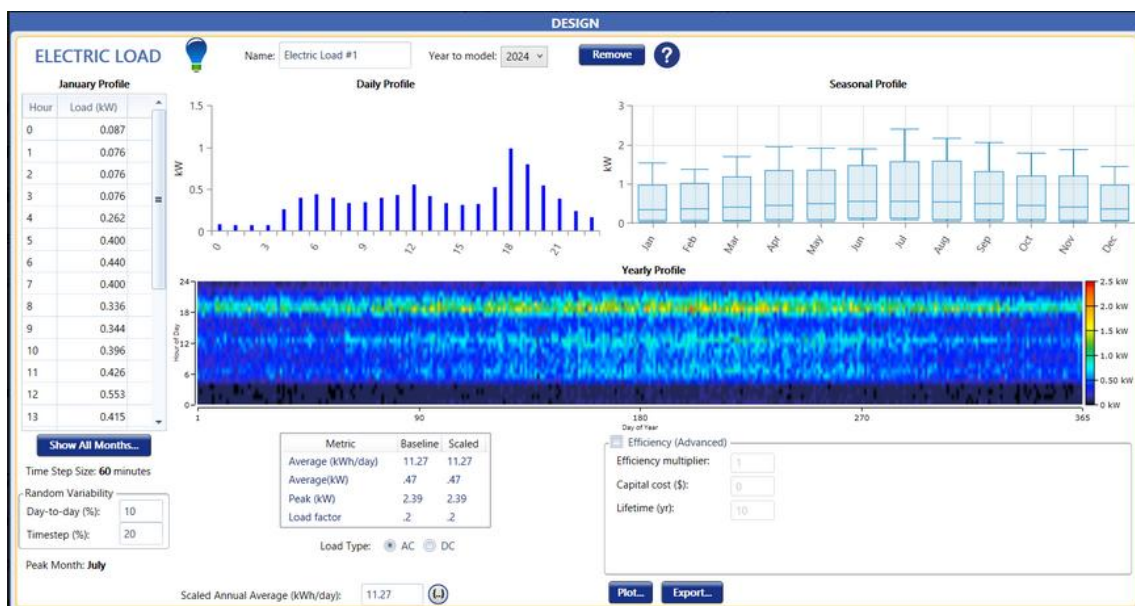


Figura 4.15 – Gráficos gerados pelo HOMER

Para a configuração final do sistema no software HOMER<sup>®</sup> Pro, foi adicionado um controlador para gerir a estratégia de despacho energético. Optou-se pelo modo HOMER Load Following, como ilustrado na Figura 4.16.

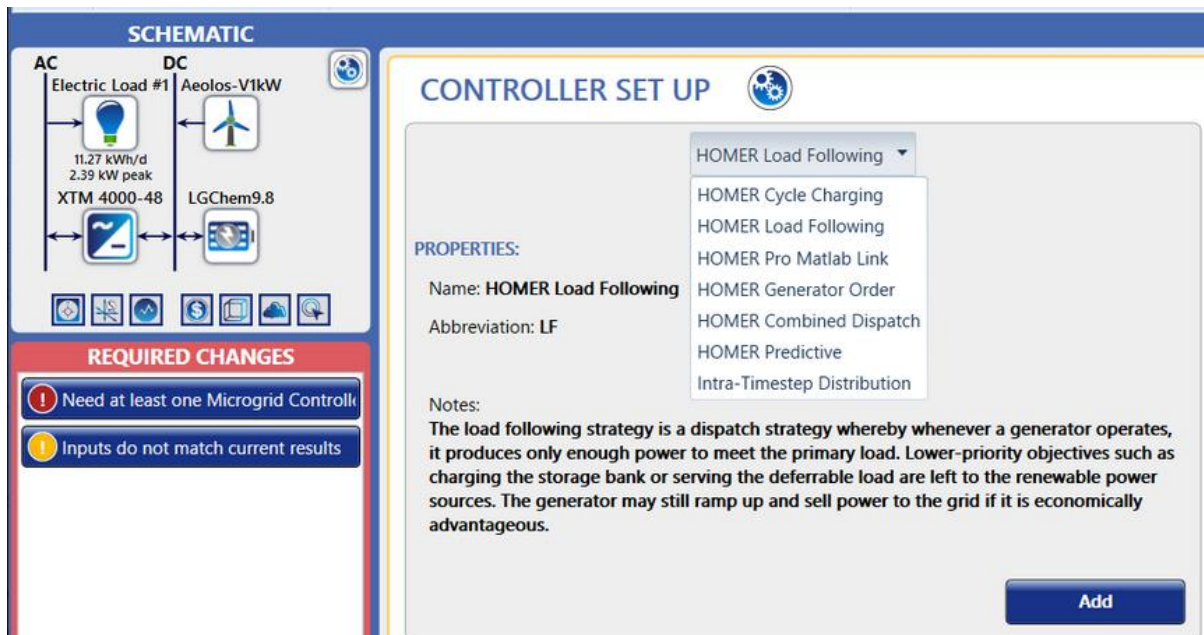


Figura 4.16 - Seleção do tipo de controlo

Nesta configuração, o controlador está parametrizado para que, sempre que o sistema de geração (neste caso, a turbina eólica) esteja em funcionamento, a energia produzida seja direcionada prioritariamente para suprir a carga elétrica. Apenas o excedente de produção é encaminhado para o carregamento do banco de baterias. Esta abordagem permite reduzir o número de ciclos de carga/descarga, aumentando a vida útil das baterias e melhorando a eficiência global do sistema.

No painel de capacidades do controlador (Figura 4.17), observa-se que este é compatível com múltiplos componentes (geradores, sistemas fotovoltaicos, turbinas eólicas, conversores, entre outros), podendo operar tanto em barramentos AC como DC. Para este estudo, foram deixadas ativadas as opções como permitir operação sem diesel (*allow diesel-off operation*), permitir que os geradores funcionem simultaneamente (*allow generators to operate simultaneously*) e permitir sistemas com capacidade do gerador inferior à carga de pico (*allow systems with generator capacity less than peak load*), como estava predefinido.

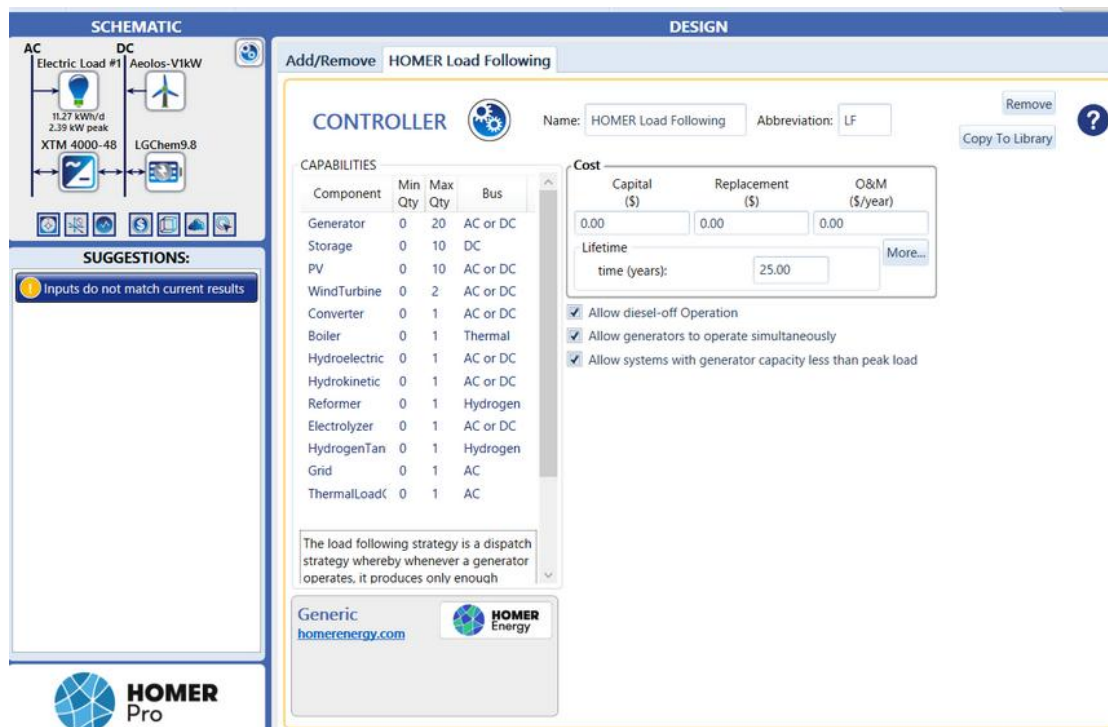


Figura 4.17 - Painel de características do controlador

Concluída a parametrização de todos os elementos tal como, turbina eólica, sistema de armazenamento, conversor, carga elétrica e controlador, o modelo encontra-se pronto para a execução das simulações no *HOMER*<sup>®</sup> Pro, permitindo a análise detalhada do comportamento do sistema ao longo do ano e a verificação do seu desempenho face às condições definidas no estudo teórico.

#### 4.2. Desempenho do sistema nos cenários simulados

Com todos os componentes do sistema devidamente configurados no software HOMER Pro, deu-se início à fase de simulação, com o objetivo de avaliar o desempenho operacional do sistema proposto. Para a primeira simulação, foi considerado o perfil de carga definido no HOMER com consumo médio diário de 11,27 kWh/dia, valor correspondente ao perfil residencial gerado automaticamente pelo software.

O HOMER combina os elementos inseridos e com funcionalidade de cálculo “*Calculate*” simula o funcionamento do sistema ao longo de um ano-tipo, considerando as condições de recurso e as restrições operacionais. O resultado é apresentado na forma de diferentes configurações possíveis, listadas de acordo com os critérios de desempenho definidos.

A Figura 4.18 apresenta a tabela de resultados de otimização fornecida pelo *software*. É possível observar que, para o cenário simulado, foram geradas várias arquiteturas viáveis, todas compostas por trinta e dois aerogeradores Aeolos-V1kW, vinte e uma baterias LG Chem de 9,8 kWh e dois conversores XTM 4000-48.

		Architecture				Cost			System		
		Aeolos-V1kW	LGChem9.8 (#)	XTM 4000-48 (kW)	Dispatch	NPC (\$)	Operating cost (\$/yr)	CAPEX (\$)	Ren Frac (%)	Total Fuel (L/yr)	Clipped Energy (kWh/yr)
	32		21	9.05	LF	\$267,479	\$2,018	\$241,387	100	0	1,679
	32		21	9.07	LF	\$267,494	\$2,018	\$241,402	100	0	1,679
	32		21	9.14	LF	\$267,558	\$2,018	\$241,466	100	0	1,679
	32		21	9.17	LF	\$267,588	\$2,018	\$241,496	100	0	1,679
	32		21	9.23	LF	\$267,642	\$2,018	\$241,549	100	0	1,679
	32		21	9.41	LF	\$267,800	\$2,018	\$241,708	100	0	1,679
	32		22	9.00	LF	\$270,428	\$2,018	\$244,336	100	0	1,679
	32		22	9.08	LF	\$270,502	\$2,018	\$244,410	100	0	1,679
	32		22	9.08	LF	\$270,508	\$2,018	\$244,416	100	0	1,679
	32		22	9.24	LF	\$270,645	\$2,018	\$244,552	100	0	1,679
	32		23	8.78	LF	\$273,233	\$2,018	\$247,141	100	0	1,679
	33		21	8.88	LF	\$273,435	\$2,080	\$246,552	100	0	1,870
	33		21	9.00	LF	\$273,546	\$2,080	\$246,663	100	0	1,870

Figura 4.18 - Resultados otimizados do HOMER

Os resultados obtidos nesta primeira simulação revelaram-se bastante diferentes dos valores calculados no estudo teórico. Enquanto a simulação no HOMER Pro considerou um consumo médio diário de 11,27 kWh/dia (valor automático), no estudo teórico foi analisado um cenário com 3 kWh/dia. Esta discrepância levou à decisão de ajustar os parâmetros de entrada e realizar novas simulações, reduzindo a potência de carga para o valor estudado teoricamente, de forma a obter resultados mais coerentes e comparáveis com a análise inicial.

Após o ajuste do consumo diário para 3 kWh/dia, valor considerado no estudo teórico, foi realizada uma nova simulação no HOMER Pro, representada na Figura 4.19. Nesta configuração, o sistema foi composto por nove aerogeradores Aeolos-V1kW, cinco baterias LG Chem RESU10 e um conversor XTM 4000-48 com capacidade nominal de 0,503 kW.

Nesta simulação, será necessária uma quantidade menor de componentes, mas ainda assim afastada da quantidade calculada teoricamente. Esta situação deve-se ao facto de nos cálculos teóricos ter sido considerada uma velocidade do vento mais elevada que a média mensal do local. A velocidade do vento baixa faz com que as turbinas não cheguem ao seu valor nominal e por isso existe a necessidade de incrementar o número de turbinas.

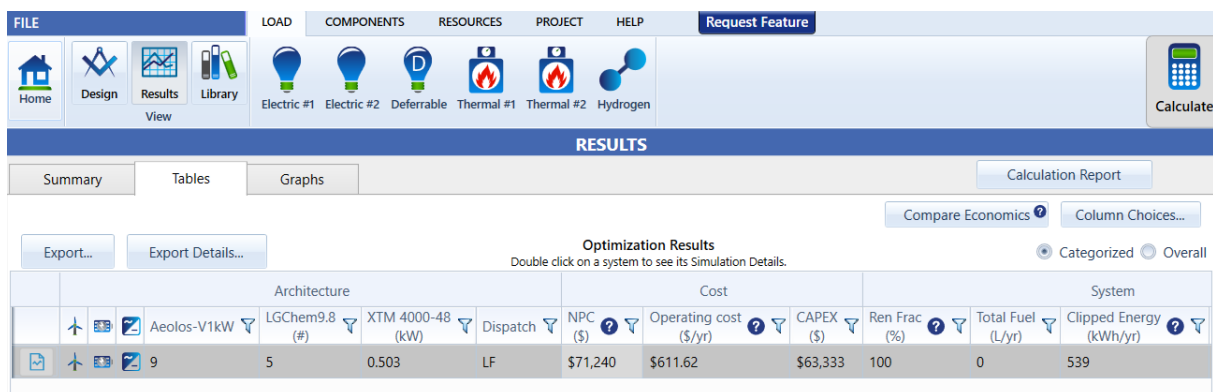


Figura 4.19 - Simulação para 3kWh/dia

Os resultados da simulação para o cenário com consumo diário de 3 kWh/dia encontram-se representados na Figura 4.20. A produção anual total do sistema, proveniente de nove aerogeradores Aeolos-V1kW, atingiu 1,708 kWh/ano.

Observa-se que, apesar da produção exceder a necessidade anual, existe uma variação sazonal, o que não foi considerado no estudo teórico. Os meses de verão apresentam menor produção elétrica, enquanto os meses de primavera evidenciam um aumento ligeiro. Outro ponto relevante é o valor de excedente de energia (31,6% da produção total), indicando que o sistema, com nove geradores, teria uma pequena margem para suportar cargas de maior potência sem comprometer o fornecimento.

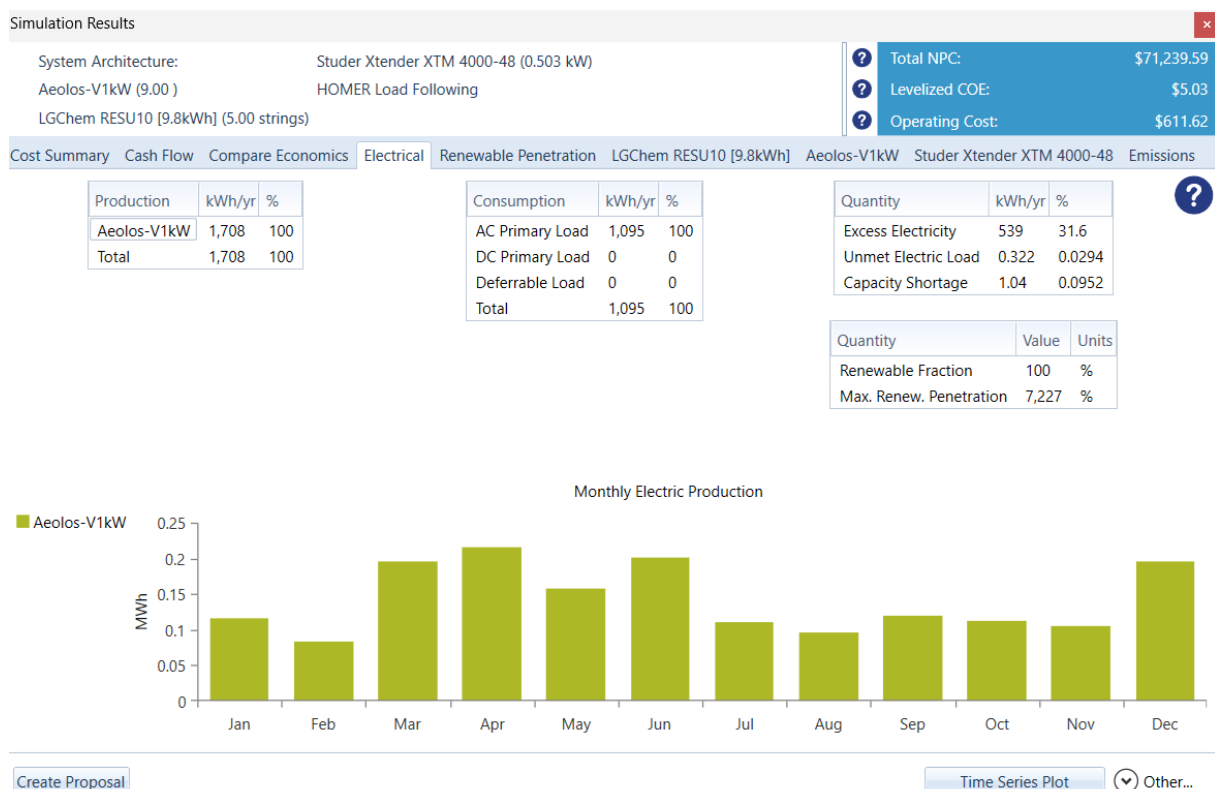


Figura 4.20 - Produção mensal do Aeolos-V1kW

# Na

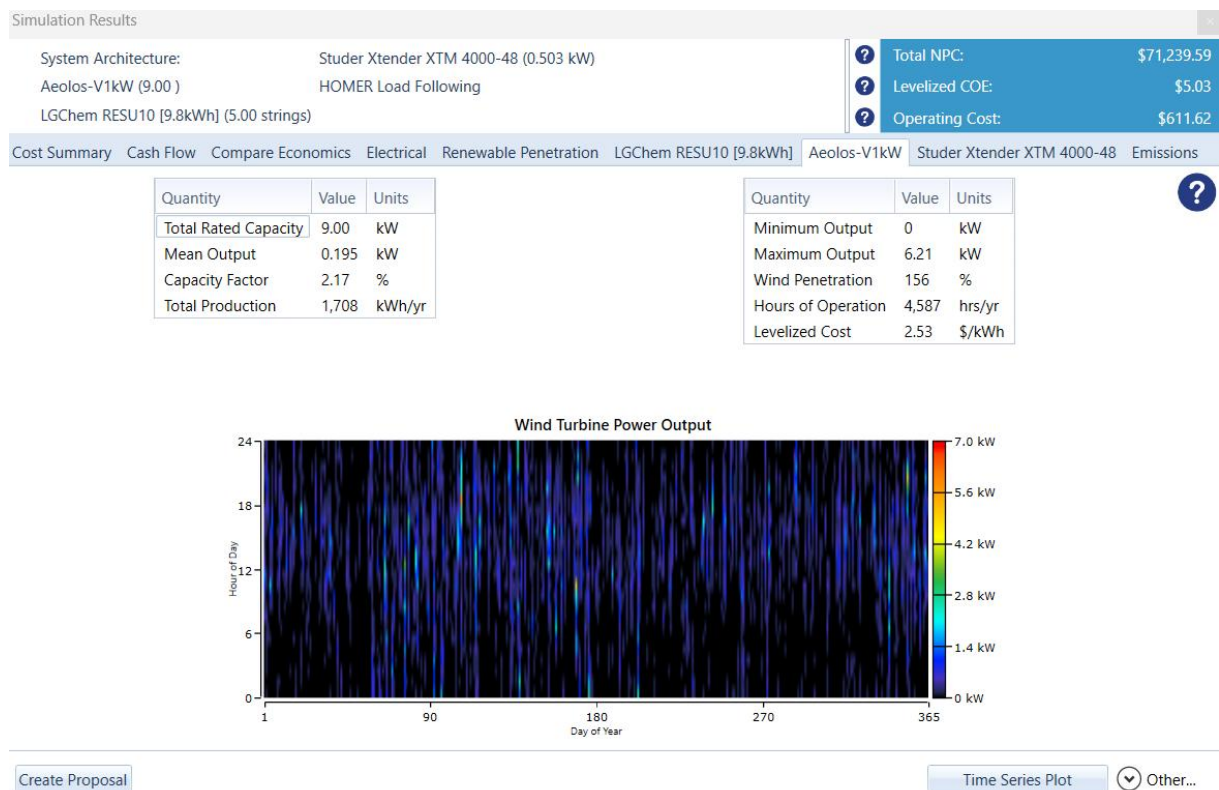


Figura 4.21 - Produção horaria do Aeolos-V1kW

é apresentada a distribuição horária da potência produzida pelos aerogeradores ao longo do ano. O sistema operou durante 4587 horas/ano, com um fator de capacidade de 2,17% e produção total de 1,708 kWh/ano.

O gráfico de intensidade de cor permite identificar os períodos de maior e menor produção. É possível observar que maior parte do tempo não existe produção ou é muito baixa, associados a períodos de vento inadequado para acionar o gerador. Pode-se analisar que as turbinas nunca chegam ao seu valor nominal.

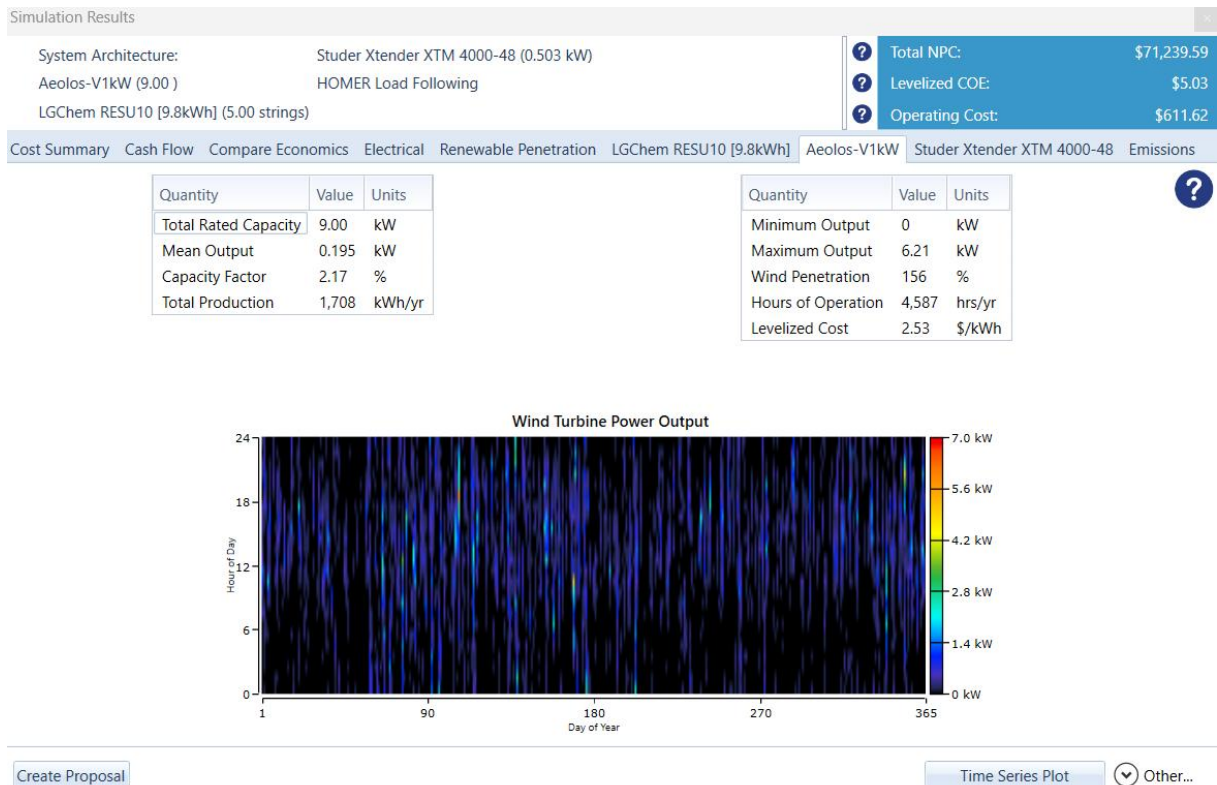


Figura 4.22 - Produção horaria do Aeolos-V1kW

A avaliação do perfil diário das velocidades do vento Figura 4.23 mostra que, ao longo do ano, os valores médios variam entre aproximadamente 2 m/s e 5 m/s, apresentando um comportamento relativamente estável. Observa-se uma tendência de aumento da velocidade durante o período diurno, atingindo os valores máximos entre o final da manhã e o meio da tarde, o que se relaciona com o aquecimento da superfície terrestre e a consequente intensificação das correntes de ar. Nos meses de inverno e início da primavera registam-se, em geral, velocidades ligeiramente superiores, enquanto nos meses de verão os valores médios são um pouco mais baixos. Este comportamento indica uma fraca disponibilidade de recurso eólico ao longo de todo o ano, com variações diárias e sazonais moderadas que favorecem a operação baixa da turbina.

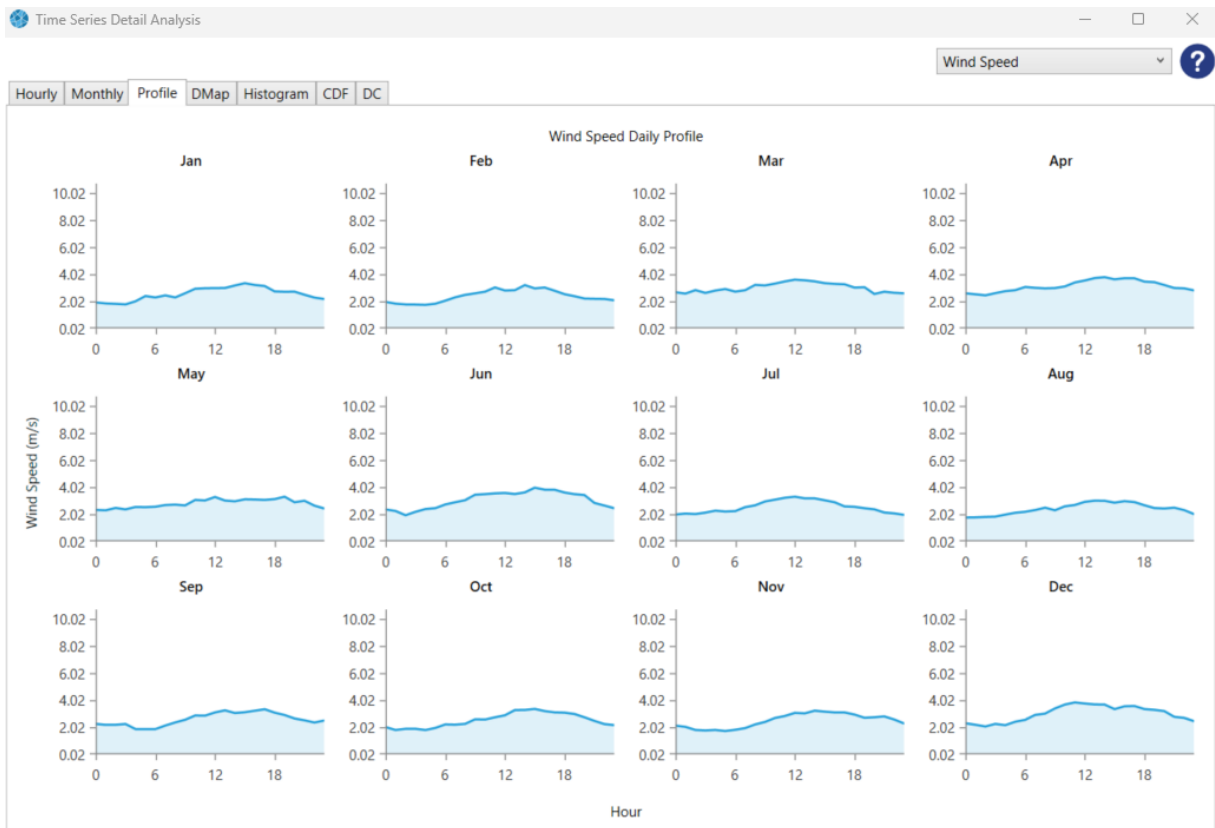


Figura 4.23 - Perfil de velocidade do vento diário

Os dados de potência de saída da turbina apresentados na Figura 4.24 confirmam o comportamento identificado na análise do vento. Nos meses de verão, a produção média é inferior devido aos ventos mais baixos. Por outro lado, nos restantes meses, a turbina poderá operar de forma mais estável, mas nunca na sua capacidade nominal.

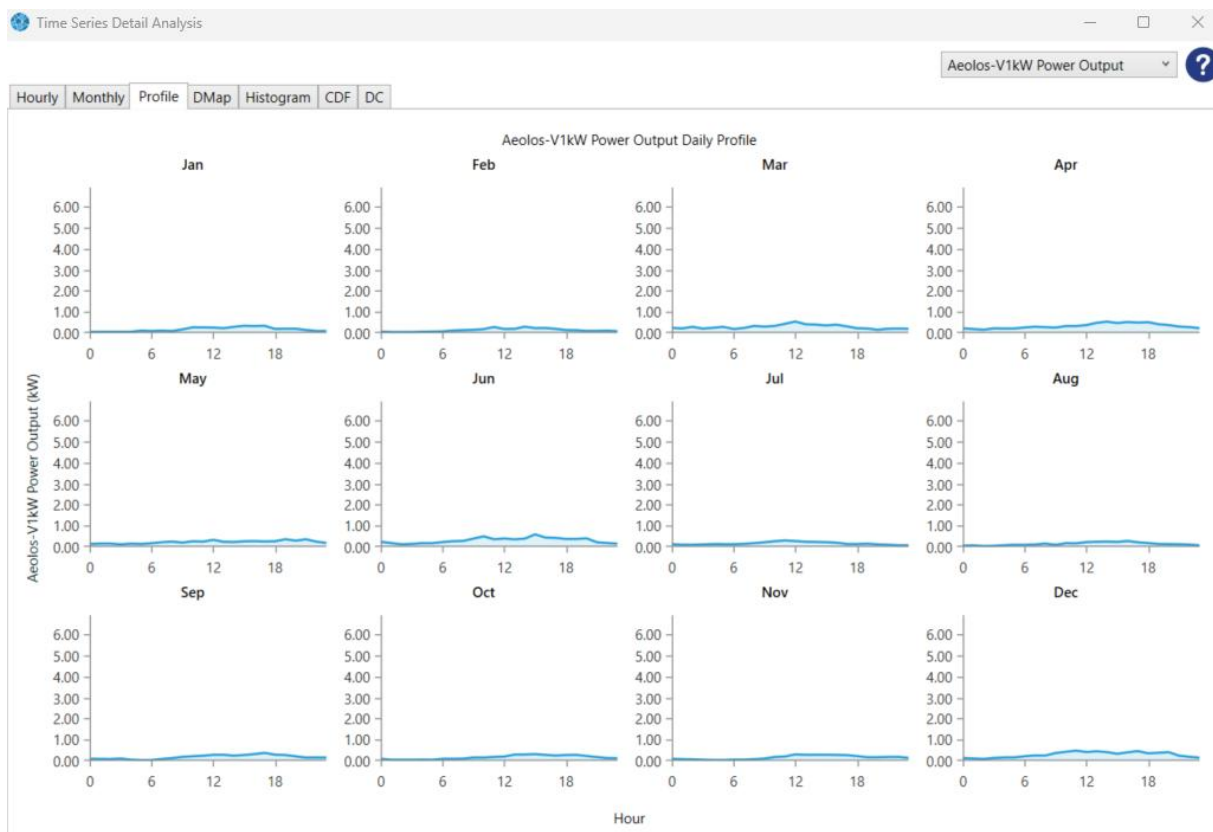


Figura 4.24 - Potencia de saída diária do gerador

Com base nas condições de produção e na fraca produção devido a velocidade do vento baixa, o sistema foi dimensionado de forma a garantir uma autonomia suficiente para suprir períodos sem geração. Para isso, o *software* configurou automaticamente cinco baterias LG Chem RESU10, Figura 4.25, ligadas em paralelo, resultando numa capacidade nominal total de 45,4 kWh e capacidade útil de 40,7 kWh. Esta configuração assegura uma autonomia de aproximadamente 326 horas, mantendo o estado de carga próximo de 100% na maior parte do ano, apenas descarregam por completo nos meses de maior consumo.

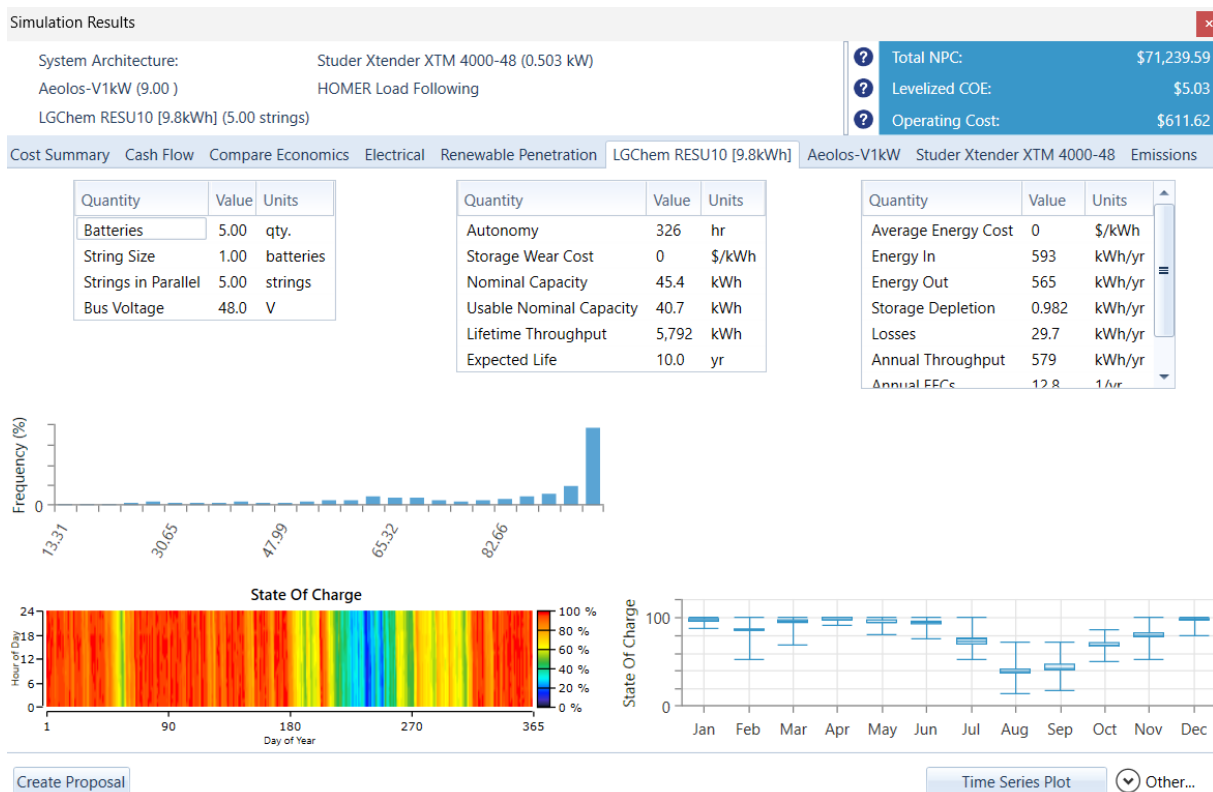


Figura 4.25 - Funcionamento das baterias

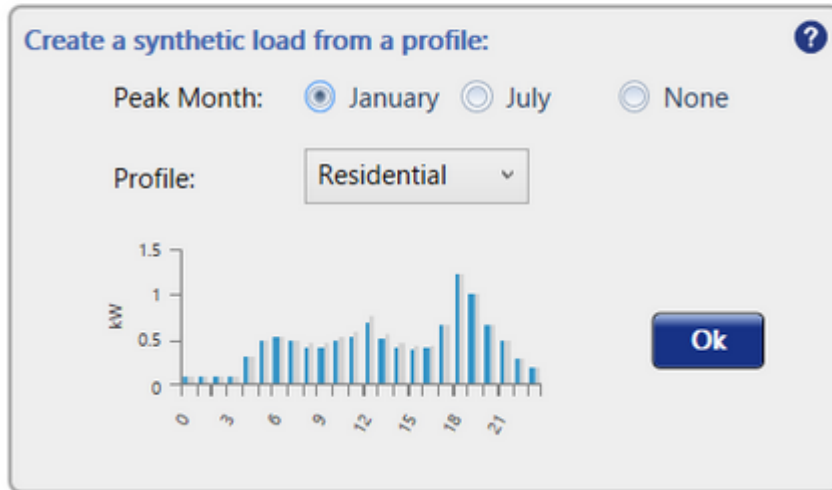
Após a análise inicial, em que foi considerado um cenário com maior consumo energético durante os meses de verão, pretende-se agora avaliar uma nova situação onde o pico de consumo ocorre nos meses de inverno. Esta abordagem tem como objetivo refletir uma realidade mais comum em contextos residenciais, onde a utilização de aquecimento poderá ser maior durante o inverno que podem justificar um aumento significativo da procura energética.

Para isso, foi alterado o parâmetro de configuração do perfil de carga no *software HOMER*<sup>®</sup> Pro, selecionando o mês de janeiro como o mês de pico de consumo, conforme ilustrado na Figura 4.26. Esta mudança permite simular um comportamento mais realista do sistema ao longo do ano, comparando os impactos que diferentes sazonalidades de consumo têm sobre o dimensionamento, operação e desempenho dos componentes da microprodução e armazenamento de energia.

Com esta nova configuração, será possível avaliar se a capacidade instalada, especialmente no que diz respeito à produção e armazenamento, continua adequada para satisfazer a procura energética nos momentos mais críticos do ano, ou se são necessárias alterações no dimensionamento da turbina e das baterias.

## ELECTRIC LOAD SETUP

Choose one of the following options:



Create a synthetic load from a profile: ?

Peak Month:  January  July  None

Profile: Residential ▾

1.5  
1.0  
0.5  
0  
0 3 6 9 12 15 18 21

Ok

Figura 4.26 - Configuração de maior carga em janeiro

Na Figura 4.27, é apresentado o novo perfil de carga configurado no *software HOMER*<sup>®</sup> Pro. Como o mês de pico selecionado foi janeiro, é visível no gráfico "*Seasonal Profile*" um aumento significativo da carga neste período, quando comparado com os restantes meses do ano.

O gráfico "*Daily Profile*" evidencia uma distribuição de carga concentrada nas horas da manhã e final da tarde, correspondendo aos períodos de maior atividade doméstica. Já o gráfico "*Yearly Profile*" permite visualizar a variação horária e sazonal do consumo ao longo do ano, onde se nota uma maior intensidade de cor nos meses iniciais (inverno), confirmando a presença de picos de carga durante este período. O pico máximo de potência atinge 2,32 kW, enquanto a potência média é de 0,13 kW.

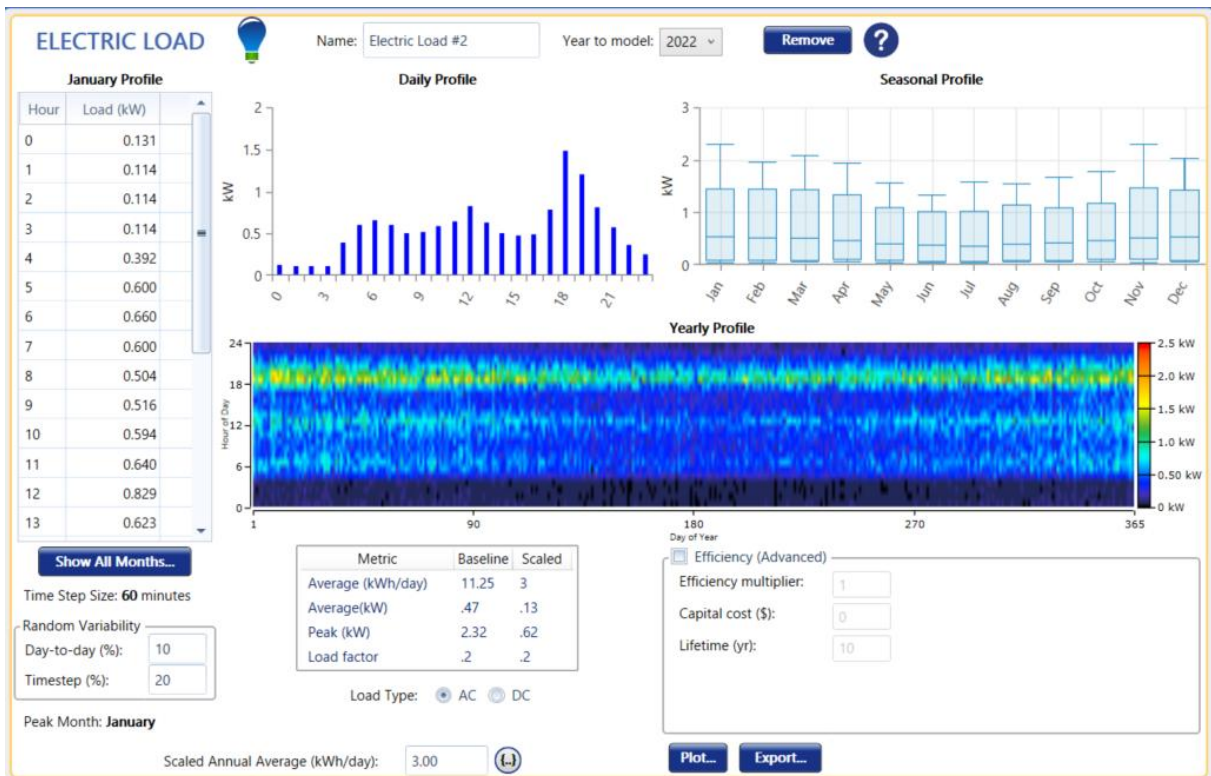


Figura 4.27 - Comportamento elétrico da carga ao longo do ano

Com o perfil de carga ajustado ao pico de consumo de janeiro, foi executada nova simulação no HOMER<sup>®</sup> Pro. Como se observa na Figura 4.28, o HOMER<sup>®</sup> Pro convergiu para uma arquitetura mais simples que contém sete aerogeradores Aeolos-V1kW, dez baterias LG Chem 9,8 kWh (em vez das 5 referidas no caso de estudo anterior) e um conversor XTM 4000-48 de  $\approx 0,517$  kW. O aumento do armazenamento deve-se ao novo padrão de consumo (mais concentrado no inverno) e ao balanço geração-demanda obtido com sete geradores, mantendo a fração renovável em 100% e garantindo o atendimento da carga dentro dos limites operacionais do sistema.

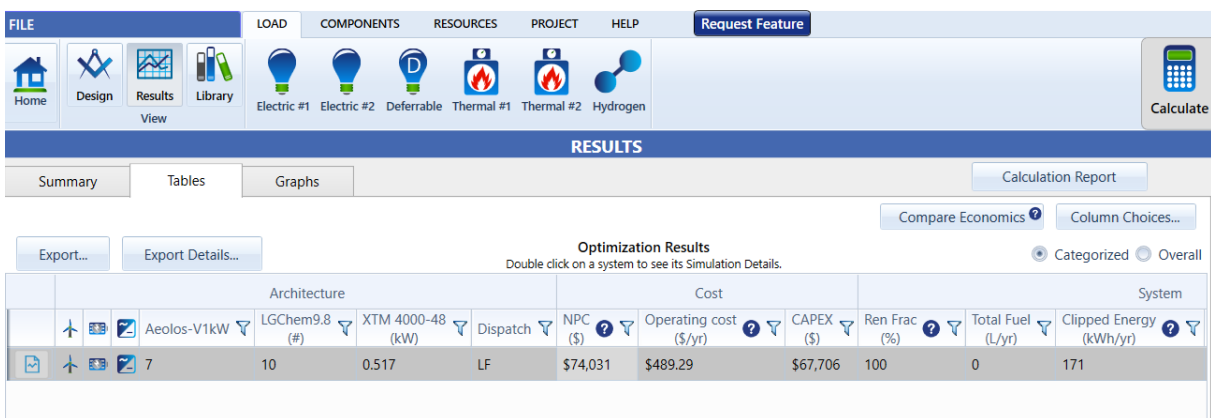


Figura 4.28 -Otimização do cenário 2

Ao comparar os resultados da simulação anterior, Figura 4.25, com a nova simulação, Figura 4.29, nota-se uma alteração significativa no comportamento do sistema de armazenamento. Na primeira configuração, o sistema contava com cinco baterias LG Chem RESU10 ligadas em paralelo, totalizando uma capacidade nominal 45,4 kWh e capacidade útil de 40,7 kWh. A análise do estado de carga ao longo do ano, visível na Figura 4.25, conclui que o sistema operava com um nível de carga elevado na maior parte do tempo, com poucas variações e uma autonomia de até 326 horas. Esta configuração foi eficaz para garantir o fornecimento contínuo de energia, mesmo com flutuações na produção ou aumento temporário da carga. Já na nova simulação, Figura 4.29, com o perfil de carga ajustado para os meses de inverno, o sistema foi automaticamente redimensionado pelo *software*, passando a contar com dez baterias. Isso aumentou a capacidade útil para 81,5kWh e a autonomia para cerca de 652 horas. Apesar do aumento, a análise do estado de carga continua a indicar um comportamento estável, com os níveis de carga mantendo-se elevados durante a maior parte do ano, embora com maior variação nos meses de inverno, onde as baterias descarregam por completo nos meses de fevereiro e março.

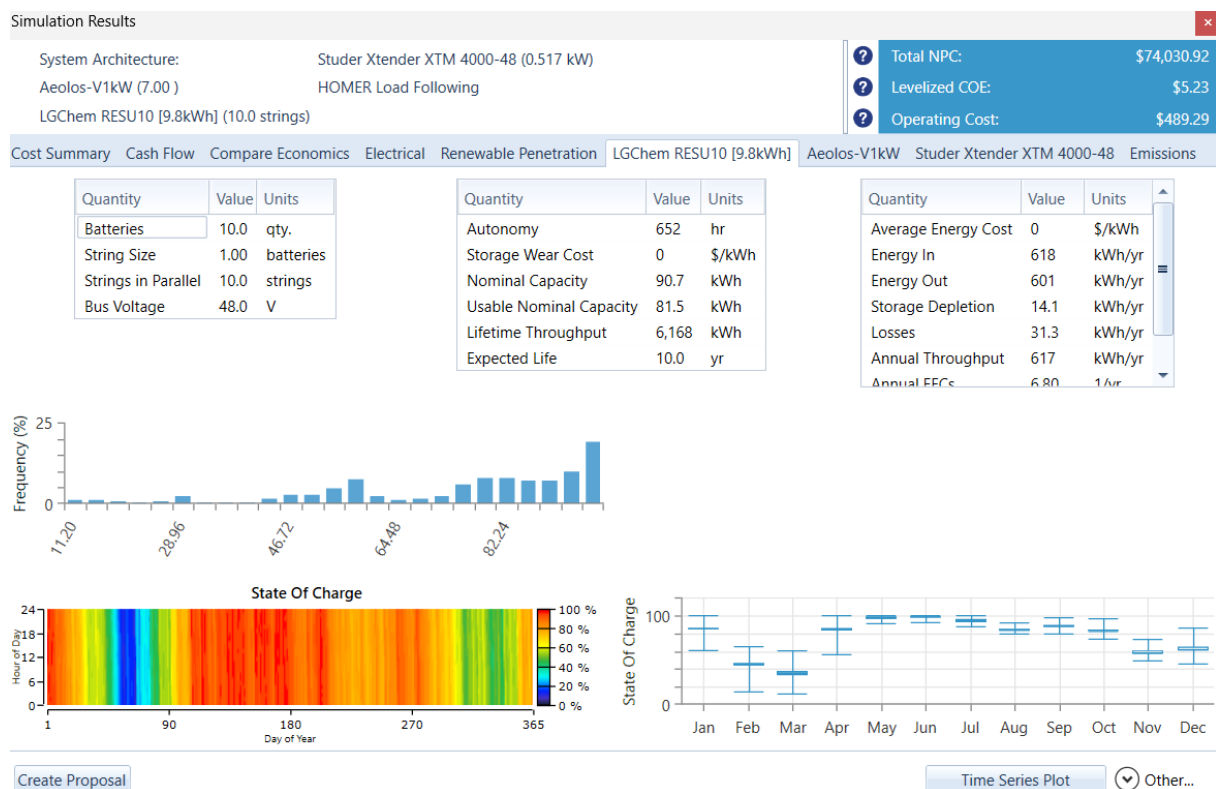


Figura 4.29 - Comportamento da bateria no segundo cenário

### **4.3. Portabilidade e implementação rápida**

Uma das grandes diferenças que distingue os sistemas de geração e armazenamento de energia de pequena escala é a possibilidade de serem facilmente transportados e rapidamente implementados em diferentes locais. Esta característica é especialmente relevante em contextos residenciais isolados, zonas rurais, situações de emergência ou mesmo para aplicações temporárias.

- Estrutura de fixação do aerogerador

A montagem do aerogerador constitui, em regra, a etapa mais exigente do ponto de vista físico. Tradicionalmente, recorre-se a fundação em betão, o que implica trabalhos de escavação, cofragem, betonagem e, sobretudo, tempo de secagem antes da instalação da torre. Este método pode atrasar a entrada em funcionamento do sistema por vários dias.

Como alternativa, pode ser utilizado um maciço pré-fabricado, dimensionado previamente para suportar os esforços do aerogerador. A sua instalação é imediata, bastando posicioná-lo e nivelá-lo no local, o que permite montar a torre e colocar o gerador em funcionamento no mesmo dia. Esta solução elimina totalmente a necessidade de esperar pela cura do betão e facilita também a eventual desmontagem e reinstalação em outro local, aumentando a portabilidade do sistema.

- Preparação prévia dos componentes

A pré-montagem em oficina de componentes como o banco de baterias e o inversor/carregador é uma prática que permite reduzir significativamente o tempo no terreno. Estes conjuntos podem ser transportados já cablados em módulos e testados, assegurando ligações rápidas no local através de conexões simplificadas.

Além da rapidez, estes módulos podem garantir possibilidade de aumentar o número de baterias que podem ser instaladas progressivamente sem necessidade de modificar a instalação elétrica base.

- Ligação Elétrica entre o Gerador e o Sistema

A cablagem entre aerogerador e equipamentos pode ser realizada pela superfície ou enterrada. No caso de ser por superfície, poderão ser utilizadas calhas externas, solução prática e rápida para instalações temporárias. No caso de passagem ser enterrada, ou seja, através de escavação de vala com tubagem de proteção. Neste caso, pode recorrer-se a mini-giratória para acelerar a abertura da vala e posterior enchimento, reduzindo o esforço manual. Embora mais demorada, esta opção oferece maior robustez e integração estética.

- Ferramentas e Equipamentos Auxiliares

Além das ferramentas manuais e elétricas básicas (chaves, berbequim, apertos de torque, multímetro, alicate amperímetro), será necessário o camião-grua, para o transporte e colocação do maciço pré-fabricado e da torre. Poderá ser utilizada também uma mini-giratoria

para abertura de negativo para o maciço e para abertura de vala para instalação dos cabos enterrados.

- Recursos e Tempo de Instalação

Para a instalação do aerogerador o tempo estimado é de 2 a 3 horas com maciço pré-fabricado (com apoio de caminhão-grua) ou até 8 horas com fundação tradicional (sem considerar tempo de secagem). Banco de baterias juntamente com o inversor estima-se para instalação de 1 a 2 horas (menos de 1h se forem cablados em oficina). A instalação do caminho de cabo superficial estima-se de 1 a 2 horas. No caso de infraestrutura enterrada o tempo será entre 4 e 8 horas, este tempo pode variar consoante a distância e a condição do solo.

No total, a instalação pode variar entre 6 e 12 horas, sendo possível concluir num único dia em cenários otimizados. Em condições mais exigentes pode estender-se até 2 dias.

# Capítulo 5 - Conclusões e Trabalhos Futuros

## 5.1. Conclusões Principais

O presente trabalho permitiu demonstrar a viabilidade técnica da implementação de um sistema autónomo de geração e armazenamento de energia elétrica, baseado na utilização de turbinas VAWT e baterias de lítio. A metodologia seguida, desde o dimensionamento dos componentes até à simulação no *software HOMER*<sup>®</sup> Pro, possibilitou uma avaliação rigorosa do desempenho energético do sistema em condições residenciais, mostrando os resultados pouco promissores, na localização que foi escolhida para o estudo.

As turbinas de eixo vertical mostraram-se particularmente adequadas para o contexto residencial, uma vez que conseguem operar com velocidades de vento reduzidas, apresentam baixos níveis de ruído e exigem manutenção simplificada, fatores que tornam a sua instalação compatível com áreas habitacionais. Paralelamente, o dimensionamento do banco de baterias, baseado na profundidade máxima de descarga e na eficiência de carga e descarga, evidenciou que as baterias de lítio oferecem vantagens face a outras tecnologias, tanto ao nível da eficiência energética como da durabilidade. A escolha das baterias demonstrou ser tecnicamente sólida, uma vez que garante um equilíbrio adequado entre capacidade útil, vida útil e fiabilidade.

O dimensionamento elétrico do sistema, realizado em conformidade com o RTIEBT, assegurou que a cablagem cumpre os critérios de segurança e eficiência, com quedas de tensão inferiores aos limites estipulados. Complementarmente, a seleção de proteções adequadas, como disjuntores e dispositivos de proteção, reforçou a robustez e a segurança global da instalação, prevenindo falhas e danos provocados por condições inesperadas de operação.

As simulações realizadas no *software HOMER*<sup>®</sup> Pro permitiram comparar os cálculos teóricos, evidenciando diferenças entre os cenários considerados. Verificou-se que, para o perfil de carga teórico de 3 kWh/dia, o sistema apresentou bom desempenho, garantindo suprimento energético com elevada fração renovável. Contudo, quando se analisou inicialmente a carga pré-definida pelo *HOMER*<sup>®</sup> Pro de 11,27 kWh/dia, os resultados demonstraram necessidade de maior capacidade de armazenamento e de potência instalada, permitindo assim revelar a sensibilidade do sistema à variação da procura.

Adicionalmente, foi possível observar que a variação sazonal do vento influencia diretamente a produção da turbina, o valor dos ventos reduzidos também prejudica a produção de energia elétrica. Este aspeto realça a importância de considerar curvas de potência reais e dados climáticos detalhados na fase de dimensionamento. Para que fosse favorável a instalação das turbinas comiseradas neste estudo, a velocidade do vento media deveria de estar entre 10m/s

e 15m/s durante o ano, para que as turbinas estejam a funcionar próximas da sua capacidade nominal.

Por fim, verificou-se que a implementação de um sistema modular e de instalação rápida com possibilidade de pré-fabricação de componentes e flexibilidade na expansão de capacidade.

## **5.2. Trabalhos Futuros**

Apesar do presente estudo mostrar algumas limitações técnicas do sistema autónomo baseado em turbinas eólicas de eixo vertical e baterias de lítio, devido à região escolhida para o estudo ser caracterizadas por ventos de fraca intensidade, existem várias vertentes que necessitam de investigação aprofundada de forma a consolidar a proposta e avaliar a sua aplicabilidade em contexto residencial. Em primeiro lugar, passará por encontrar regiões onde os ventos são mais elevados, para que o sistema possa funcionar à sua velocidade nominal, ou aproximado a esse valor.

Adicionalmente, um trabalho futuro mais relevante será a análise económica detalhada do sistema, de modo a determinar se a solução compensa financeiramente quando comparada com a energia fornecida pela rede pública, caso exista uma rede pública. Para tal, será essencial considerar o custo real dos equipamentos, da instalação e da manutenção ao longo do ciclo de vida, bem como eventuais custos de substituição de componentes críticos, como as baterias. A determinação do custo nivelado de energia (LCOE), aliada à análise do período de retorno do investimento, permitirá avaliar a competitividade da solução no mercado energético e o seu potencial de adoção em larga escala.

Para além da vertente económica, torna-se igualmente importante explorar a integração de outras fontes renováveis numa configuração híbrida. A incorporação de sistemas fotovoltaicos poderá complementar a geração eólica, assegurando maior estabilidade do fornecimento energético ao longo do ano, especialmente em períodos de vento reduzido, ou como neste caso o excesso de vento nos meses de verão, onde por sua vez existe mais exposição solar. Este tipo de abordagem híbrida aumentaria a resiliência e a flexibilidade do sistema, reduzindo a dependência de uma única fonte intermitente.

Outro eixo de desenvolvimento futuro passa pela análise do comportamento real das baterias em contexto de utilização prática. Embora as simulações considerem parâmetros fornecidos pelos fabricantes, fatores externos como variações de temperatura, ciclos irregulares de carga e descarga, ou condições específicas de operação, podem alterar significativamente a sua durabilidade e eficiência. A monitorização experimental de uma instalação piloto permitiria recolher dados reais que serviriam não só para validar os modelos teóricos, mas também para calibrar previsões de desempenho a longo prazo.

Finalmente, recomenda-se a implementação de projetos-piloto em ambientes residenciais reais, de modo a comparar os resultados de simulação com a operação prática do sistema.

Esta validação experimental proporcionaria dados fundamentais para otimizar o dimensionamento, melhorar a modelação económica e identificar potenciais barreiras técnicas e logísticas à implementação em grande escala.

Em resumo, os trabalhos futuros deverão centrar-se na verificação de outras regiões geográficas, viabilidade económica do sistema e na sua eventual integração com outras fontes renováveis, complementados pela validação prática através de instalações-piloto. Desta forma será possível assegurar não apenas a robustez técnica da solução, mas também a sua atratividade económica e sustentabilidade em termos de longo prazo.

## Capítulo 6 - Referências Bibliográficas

- Ali, Md Feroz, Md Rafiqul Islam Sheikh, Rubaiya Akter, K. M. Nazmul Islam, and A. H. M. Iftekhharul Ferdous. 2025. "Grid-Connected Hybrid Microgrids with PV/Wind/Battery: Sustainable Energy Solutions for Rural Education in Bangladesh." *Results in Engineering* 25. doi:10.1016/j.rineng.2024.103774.
- Azraq Refugee Camp Jordan. 2018. <http://data.unhcr.org/syrianrefugees/regional.php>-[www.facebook.com/UNHCRJordan](http://www.facebook.com/UNHCRJordan)-[twitter.com/UNHCRJo](http://twitter.com/UNHCRJo).
- Bazilian, Morgan, Moussa Blimpo, World Bank, Lauren Culver, Jacob Kincer, Meera Mahadavan, Vijay Modi, Bob Muhwezi, Rose Mutiso, Energy for Growth Hub, Jay Taneja, Mark Thurber, Johannes Urpelainen, Johns Hopkins SAIS, and Michael Webber. 2020. *The Modern Energy Minimum: The Case for a New Global Electricity Consumption Threshold*.
- Braga, Maria Helena Braga. 2020. "O Lítio e a Bateria de Ião-Li." *Revista de Ciência Elementar* 8(3). doi:10.24927/rce2020.033.
- Clean Power. 2025. "How Many KWh per Day Is Normal." [https://nrgcleanpower.com/learning-center/how-many-kwh-per-day-is-normal/?utm\\_source=chatgpt.com](https://nrgcleanpower.com/learning-center/how-many-kwh-per-day-is-normal/?utm_source=chatgpt.com).
- Controlador de Carga HY 48V 3000W. 2025. [https://livre.pt/products/controlador-de-carga-hy-48v-3000w?variant=44453725143326&country=PT&currency=EUR&utm\\_source=chatgpt.com](https://livre.pt/products/controlador-de-carga-hy-48v-3000w?variant=44453725143326&country=PT&currency=EUR&utm_source=chatgpt.com).
- DOKUR, Emrah, and Mehmet KURBAN. 2015. "Wind Speed Potential Analysis Based on Weibull Distribution." *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering* 3(4). doi:10.17694/bajece.72748.
- Electricity storage and renewables : costs and markets to 2030. 2017. International Renewable Energy Agency.
- EN-5KW-H Vertical Axis Wind Turbine Generator VAWT . 2025.
- Enessere. 2025. "Catálogo - Hercules Pegasus." <https://www.enessere.com/en/wp-content/uploads/sites/2/2020/12/20.03.03-enessere-hercules-pegasus-ENG.pdf>.
- Fatores que influenciam o consumo de kWh numa casa. 2025. <https://www.repsol.pt/particulares/assessoramento/quantos-kwh-consome-uma-familia/>.
- Ghanbari, Kamyar, Akbar Maleki, and Dariush Rezaei Ochbelagh. 2025. "Investigating the Effect of Various Types of Components in Optimal Designing of a Solar/Wind/Storage Hybrid System." *Journal of Energy Storage* 110. doi:10.1016/j.est.2024.115273.
- Goodenough, John B., and Kyu Sung Park. 2013. "The Li-Ion Rechargeable Battery: A Perspective." *Journal of the American Chemical Society* 135(4):1167–76.
- HAWT turbina eolica. 2025. <https://Pt.Rx-Generators.Com/Wind-Turbine/Horizontal-Wind-Turbine/Hawt-500w-Wind-Turbine.Html>. <https://pt.rx-generators.com/wind-turbine/horizontal-wind-turbine/hawt-500w-wind-turbine.html>.

- Huang, Pei Hsing, Jenn Kun Kuo, and Chun Yen Huang. 2016. "A New Application of the UltraBattery to Hybrid Fuel Cell Vehicles." *International Journal of Energy Research* 40(2):146–59. doi:10.1002/er.3426.
- Ibrahim, H., A. Ilinca, and J. Perron. 2008. "Energy Storage Systems-Characteristics and Comparisons." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12(5):1221–50.
- Icaza-Alvarez, Daniel, Francisco Jurado, Marcos Tostado-Véliz, and Paúl Arevalo. 2022. "Design to Include a Wind Turbine and Socio-Techno-Economic Analysis of an Isolated Airplane-Type Organic Building Based on a Photovoltaic/Hydrokinetic/Battery." *Energy Conversion and Management: X* 14. doi:10.1016/j.ecmx.2022.100202.
- Importância de baterias em fontes renováveis . 2025. <https://www.delfos.energy/pt/blog-posts/o-futuro-do-armazenamento-de-energia-quando-energia-solar-e-eolica-va-o-se-tornar-constante->.
- International Renewable Energy Agency, The. 2023. *Renewable Energy for Remote Communities: A Guidebook for off-Grid Projects*.
- Laryea, Harriet, and Andrea Schiffauerova. 2024. "A Novel Standalone Hybrid Renewable Energy Systems Onboard Conventional and Autonomous Tugboats." *Energy* 303. doi:10.1016/j.energy.2024.131948.
- Manwell, James F., Jon G. McGowan, and Anthony L. Rogers. 2010. *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*.
- Mars Rock. 2025. "MPPT Hybrid Wind Solar Controller."
- Ministério da Economia, Direção Geral da Energia. 2000. "Regras Técnicas Das Instalações Eléctricas de Baixa Tensão."
- Model IP1000-Plus, IP1500-Plus IP2000-Plus, IP3000-Plus IP4000-Plus, IP5000-Plus Pure sine wave inverter USER MANUAL Contents. 2025.
- MultiPlus-II 230V Este manual também está disponível em formato HTML5. PORTUGUÊS. 2025.
- Normandajc Lecanu, Pierre, Joel Breard, and Dominique Mouazé. 2025. *Theoretical Calculation of the Power of Wind Turbine or Tidal Turbine*. <https://hal.science/hal-01982516v3>.
- Renewable Energy Agency, International. 2019. *Renewables for Refugee Settlements: Sustainable Energy Access in Humanitarian Situations*.
- Sanda, Masoyi Garba, Mohamed Emam, Shinichi Ookawara, and Hamdy Hassan. 2025. "Techno-Enviro-Economic Evaluation of on-Grid and off-Grid Hybrid Photovoltaics and Vertical Axis Wind Turbines System with Battery Storage for Street Lighting Application." *Journal of Cleaner Production* 491. doi:10.1016/j.jclepro.2025.144866.
- Store, App. 2025. *Be Connect GET IT ON Google Play Download on the BYD Battery-Box Premium Quick Start Guide*. [www.eft-systems.de](http://www.eft-systems.de),.
- Trauernicht, N. (Nina), H. (Henry) Miguda, and A. (Alberto) Martinetti. 2024. "Design Guidelines for HAWT / VAWT Decision-Making in the Context of Underserved Communities." *Procedia CIRP* 128:448–53. doi:10.1016/j.procir.2024.03.025.
- Turbinas Aelos. 2025. <https://www.renugen.co.uk/vawt-vertical-axis-wind-turbine/>.







Utilidade de baterias num sistema eolico . 2025. <https://www.basengreen.com/pt/does-a-wind-system-need-battery-storage/?srsltid=AfmBOoqX0RXZaOm5LnOZIN4S7ksOQQfGGiotQPA0ATX9YwdT7Y7I mej4>.

Wang, Hao, Bendong Xiong, Zutao Zhang, Hexiang Zhang, and Ali Azam. 2023. "Small Wind Turbines and Their Potential for Internet of Things Applications." *IScience* 26(9).

# Capítulo 7 - Anexos

## Anexo 1. Características técnicas dos vários modelos disponíveis da BYD

### TECHNICAL PARAMETERS PREMIUM LVS

						
	LVS 4.0	LVS 8.0	LVS 12.0	LVS 16.0	LVS 20.0	LVS 24.0
Battery Module	LVS (4 kWh, 51.2 V, 45 kg)					
Number of Modules	1	2	3	4	5	6
Usable Energy [1]	4 kWh	8 kWh	12 kWh	16 kWh	20 kWh	24 kWh
Max Cont. Output Current [2]	65 A	130 A	195 A	250 A	250 A	250 A
Peak Output Current [2]	90 A, 5 s	180 A, 5 s	270 A, 5 s	360 A, 5 s	360 A, 5 s	360 A, 5 s
Dimensions (H/W/D)	478 x 650 x 298 mm	711 x 650 x 298 mm	944 x 650 x 298 mm	1177 x 650 x 298 mm	1410 x 650 x 298 mm	1643 x 650 x 298 mm
Weight	64 kg	109 kg	154 kg	199 kg	244 kg	289 kg
Nominal Voltage	51.2 V					
Operating Voltage	40-57.6 V					
Operating Temperature	-10 °C to +50°C					
Battery Cell Technology	Lithium Iron Phosphate (cobalt-free)					
Communication	CAN / RS485					
Enclosure Protection Rating	IP55					
Round-Trip Efficiency	≥95%					
Scalability [3]	Max. 64 Modules in Parallel (256 kWh)				Single Tower Only	
Certification	VDE2510-50 / IEC62619 / CE / CEC / UN38.3					
Applications	ON Grid / ON Grid + Backup / OFF Grid					
Warranty [4]	10 Years					
Compatible Inverters	Refer to BYD Battery-Box Premium LVS Minimum Configuration List					

[1] DC Usable Energy, Test conditions: 100% DOD, 0.2C charge & discharge at + 25 °C. System Usable Energy may vary with different inverter brands

[2] Charge derating will occur between -10 °C and +5 °C

[3] Parallel tower function only available for 1 to 4 battery modules per tower. LVS 20.0 and LVS 24.0 can only be used as a single tower.

[4] Conditions apply. Refer to BYD Battery-Box Premium Limited Warranty Letter.