



FACULDADE DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
LICENCIATURA EM ENGENHARIA MECÂNICA

TRABALHO DE LICENCIATURA

**Dimensionamento de um sistema híbrido Solar - eólico para geração de energia com sistema de armazenamento de Hidrogénio Verde para o Posto Administrativo de Savane**

**Autor:**

CURIMA, Manuel Joaquim Matute

**Supervisor:**

Prof. Doutor. Engº. Jorge Olívio Penicela Nhambiu

Maputo, Setembro de 2022



FACULDADE DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
LICENCIATURA EM ENGENHARIA MECÂNICA

TRABALHO DE LICENCIATURA

**Dimensionamento de um sistema híbrido solar - eólico para geração de energia  
com sistema de armazenamento de Hidrogénio Verde para o Posto  
Administrativo de Savane**

**Autor:**

CURIMA, Manuel Joaquim Matute

**Supervisor:**

Prof. Doutor. Eng<sup>o</sup>. Jorge Olívio Penicela Nhambiu

Maputo, Setembro de 2022

## TERMO DE ENTREGA DO RELATÓRIO DE TRABALHO DE LICENCIATURA

Declaro que o estudante Manuel Joaquim Matute Curima entregou no dia \_\_\_\_/\_\_\_\_/2022 as três cópias do relatório do seu Trabalho de Licenciatura com a referência: \_\_\_\_\_, intitulado: **Dimensionamento de um sistema híbrido solar - eólico para geração de energia com sistema de armazenamento de Hidrogénio Verde para o Posto Administrativo de Savane.**

Maputo, \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2022

Chefe da Secretaria

---



## DECLARAÇÃO DE HONRA

Eu, Manuel Joaquim Matute Curima, declaro, sob palavra de honra, que o presente trabalho de licenciatura com tema, **Dimensionamento de um sistema híbrido solar - eólico para geração de energia com sistema de armazenamento de Hidrogénio Verde para o Posto Administrativo de Savane**, que apresento para o cumprimento dos requisitos para a obtenção do grau de Licenciatura em Engenharia Mecânica, foi por mim realizado, com base nos recursos que no mesmo se faz referência.

---

(Manuel Joaquim Matute Curima)



## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu querido e amado irmão, Fernando Joaquim Curima, por estar presente em todo o meu percurso académico, disponibilizando os recursos à sua disposição para a minha formação e por me ajudar em todas as áreas da minha vida.



## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus, pois me tem agraciado com o dom da vida, me tem sustentado a cada dia e me abençoou com as habilidades que tenho.

Ao meu Supervisor, Prof. Doutor. Eng<sup>o</sup>. Jorge Olívio Penicela Nhambiu, pelas suas orientações durante o trabalho, pelos materiais, pela disponibilidade, paciência, pelo encorajamento que deu para a realização deste presente trabalho e pelos ricos ensinamentos.

À minha mãe, Rita Cuamba, aos meus irmãos, Albertina, Fernando, Samuel, Joana, João, Sebastião e a minha família em geral, pela educação, por fazerem parte de mim e por me darem milhares de motivos para seguir em frente.

À minha querida namorada, Frância Marcelino Pinto, por disponibilizar seu computador para realização de vários projectos escolares, pelas correcções ortográficas do presente trabalho, pela ajuda nas pesquisas e busca de informações extremamente úteis para o trabalho e pelas demais contribuições e ajuda prestada para a realização deste trabalho.

Aos meus amigos, especialmente ao Raúl Raposo, Faustino Maveto, Hélio Moisés, Moisés Maposse, Heldo Peixe e Igor Chissico por me acompanharem durante o período de aulas.

Aos meus colegas de turma e, também, amigos, especialmente ao Ésio, Micavo Jr, Zichumba, Bila, Meque, Chinhete, Kaalid, Liphola, Djidji, Massossote, Muhate e Massunda pela companhia e por compartilharem seus conhecimentos nas disciplinas do curso.

Aos meus colegas e amigos de quarto da residência universitária na qual morava, a saber, Aurélio Sacaeque e José Nédio pela companhia e amizade.

Ao Spark of Hope pela ajuda financeira que prestou durante a minha formação.

Aos meus irmãos em Cristo, pelo encorajamento e pelas orações que muito me fortaleceram.



## RESUMO

O presente trabalho apresenta um estudo realizado com a finalidade de avaliar a viabilidade de implementação de um sistema híbrido solar - eólico de geração de electricidade e de um sistema de armazenamento de energia na forma de Hidrogénio Verde, que consiste numa forma sustentável de armazenar e utilizar a energia.

Para suprir a necessidade de electricidade no Posto Administrativo de Savane, dimensionou-se um sistema híbrido solar eólico, munido de sistema de armazenamento de Hidrogénio Verde.

A proposta deste projecto não só vislumbra a necessidade de ampliar a electrificação no país, mas também, como este processo pode ocorrer de maneira sustentável.

Para dimensionar o sistema híbrido solar - eólico e o sistema de armazenamento foi usado também o aplicativo informático Homer Pro.

Foram necessários dados de entrada, como a temperatura média mensal e anual, a radiação, a velocidade do vento e a ocorrência de rios no local como fonte de água.

Após o dimensionamento do sistema de armazenamento de energia na forma de hidrogénio, foi também, avaliada a viabilidade do sistema de armazenamento em baterias e, por fim, estabeleceram-se as devidas comparações.

Foram retiradas conclusões relativamente aos resultados encontrados e aos objectivos previamente estabelecidos e são também deixadas as devidas recomendações.



## ABSTRACT

The present assignment presents a study carried out to assess the viability of implementing wind-solar hybrid systems for electricity generation and storage systems of Green Hydrogen, which consists of a sustainable way of storing and using energy.

A hybrid wind-solar system with a Green Hydrogen storage system was designed to supply the electricity needs in the Administrative Post of Savane.

The proposal of this project envisages the need to increase electrification in that area and how this process can occur sustainably.

The Homer Pro software was used for the size of the SHSE and hydrogen storage.

Input data, such as monthly and annual average temperature, irradiation, wind speed, and occurrence of rivers, was used wherever required.

After sizing the energy storage system of Hydrogen, the feasibility of the battery storage system was also synthetically evaluated, and in the end, the necessary comparisons were made.

Conclusions were made relative to the results and previously established objectives, and the necessary recommendations are also left.



## ÍNDICE

TERMO DE ENTREGA DO RELATÓRIO DE TRABALHO DE LICENCIATURA .....	i
DECLARAÇÃO DE HONRA .....	ii
DEDICATÓRIA .....	iii
AGRADECIMENTOS.....	iv
RESUMO .....	v
ABSTRACT .....	vi
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS .....	xii
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. Considerações preliminares .....	1
1.2. Estrutura do trabalho .....	2
1.3. Objectivo (s) .....	3
1.3.1. Geral .....	3
1.3.2. Específicos.....	3
2. ESTADO DA ARTE .....	4
2.1. Energia eléctrica.....	4
2.2. Sistemas híbridos de geração de electricidade .....	5
2.3. Sistemas híbridos solar - eólico.....	5
2.3.1. Princípio de funcionamento dos sistemas híbridos solar - eólico.....	6
2.3.2. Constituição dos sistemas híbridos solar - eólico .....	7
2.3.3. Aplicação dos sistemas híbridos solar - eólico.....	8
2.3.4. Vantagens e Desvantagens dos Sistemas híbridos Solar - Eólico.....	9
2.4. Armazenamento de energia .....	11
2.5. Tecnologias de armazenamento de energia.....	12
	vii



2.5.1. Mecânico.....	12
2.5.2. Electroquímica .....	13
2.5.3. Química.....	13
2.5.4. Eléctrica .....	13
2.5.5. Térmica.....	14
2.6. Hidrogénio .....	14
3. DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA HÍBRIDO SOLAR - EÓLICO .....	16
3.1. Caracterização do local de implantação do projecto .....	16
3.2. Dados relativos ao número de agregados.....	17
3.3. Estimativa da demanda de energia .....	18
3.4. Subsistema fotovoltaico.....	22
3.4.1. Número de Módulos fotovoltaicos.....	22
3.4.2. Energia gerada pelos módulos fotovoltaicos.....	24
3.5. Subsistema eólico .....	32
3.5.1. Especificação de turbinas eólicas .....	32
3.5.2. Energia gerada pelas Turbinas eólicas.....	36
4. DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA .....	39
4.1. Produção de Hidrogénio via Electrólise.....	39
4.2. Quantidade de água necessária para produção diária de Hidrogénio.....	45
4.3. Quantidade de Oxigénio produzido .....	46
4.4. Diagrama de bloco do processo de electrólise.....	46
4.5. Armazenamento do hidrogénio.....	47
5. APLICAÇÃO DO HIDROGÉNIO E OXIGÉNIO.....	49
5.1. Hidrogénio .....	49



5.1.1. Célula de Combustível .....	49
5.1.2. Diagrama de bloco do processo de células de combustível .....	51
5.2. Oxigénio .....	52
5.3. Diagrama de fluxo do processo .....	53
6. AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE DO SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA .....	56
6.1. Avaliação económica.....	56
6.1.1. Estimativa de custos para sistema de armazenamento de Hidrogénio.....	56
6.1.2. Estimativa de custos para sistema de armazenamento de Baterias.....	57
6.2. Análise comparativa entre sistema de armazenamento de hidrogénio e em baterias .....	57
7. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS .....	60
8. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES .....	61
8.1. CONCLUSÃO.....	61
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	62
ANEXOS.....	67



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Representação de um SHSE com sistema de armazenamento de Baterias.....	8
Figura 3.1. Localização geográfica do Posto Administrativo de Savane .....	17
Figura 3.2. Perfil diário da demanda para o Posto Administrativo de Savane .....	21
Figura 3.3. Valores médios mensais da radiação no Posto Administrativo de Savane .....	24
Figura 3.4. Circuito eléctrico equivalente de uma célula FV alimentando uma carga Z.....	25
Figura 3.5. Arranjo dos MF na vista de cima .....	27
Figura 3.6. Inversor Solar .....	28
Figura 3.7. Características da geração de electricidade do subsistema FV .....	31
Figura 3.8. Ilustração de uma turbina eólica horizontal. ....	32
Figura 3.9. Características operacionais (Potência x Velocidade do vento) da Turbina .....	35
Figura 3.10. Características de geração de electricidade do subsistema eólico .....	38
Figura 4.1. Electrólise da água com adição do ácido sulfúrico .....	40
Figura 4.2. Curvas características de custo e potência dos electrolisadores .....	41
Figura 4.3. Avaliação dos parâmetros operacionais dos electrolisadores .....	41
Figura 4.4. Representação de esquema da electrólise alcalina .....	42
Figura 4.5. Electrolisador alcalino Atmosférico .....	44
Figura 4.6. Características de produção hidrogénio .....	44
Figura 4.7. Diagrama de bloco do processo .....	47
Figura 5.1. Diagrama de bloco para geração de energia em uma célula de combustível. .	52
Figura 5.2. Diagrama do fluxo do processo .....	54
Figura 5.3. Resultados referentes à produção de energia.....	55
Figura 6.1. Avaliação comparativa dos custos dos dois sistemas com tempo .....	58



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Vantagens e Desvantagens dos SHSE .....	9
Tabela 3.1. Indicação das potências médias dos itens.....	18
Tabela 3.2. Indicação das quantidades dos itens e dos seus respectivos consumos diários .....	20
Tabela 3.4. Avaliação comparativa dos MF monocristalinos e policristalinos.....	22
Tabela 3.5. Avaliação comparativa de diferentes modelos de inversores .....	29
Tabela 3.6. Comparação das turbinas horizontais e verticais .....	32
Tabela 3.7. Classificação das turbinas horizontais de acordo com a Potência .....	33
Tabela 3.8. Especificações técnicas da turbina eólica.....	34
Tabela 3.9. Especificações técnicas do Rotor .....	35
Tabela 4.1. Especificações técnicas do electrolisador alcalino atmosférico .....	43
Tabela 5.1. Características de geração de energia através das células de combustível....	51
Tabela 6.3. Análise comparativa dos sistemas de armazenamento de Baterias e de Hidrogénio. ....	59



## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

$A$  – Área varrida pelas pás do rotor ( $m^2$ )

$A_T$  – Área total ocupada pelos módulos fotovoltaicos ( $m^2$ )

AC – Corrente alternada

$C_p$  – Coeficiente de Potência

$c$  – Velocidade característica (m/s)

CCUS – Captura, Utilização e Sequestro de Carbono

CNTP – Condições Normais de Temperatura e Pressão

CO<sub>2</sub> – Dióxido de Carbono

$d$  – Distância entre os módulos (ou fileiras de módulos) (m)

DC – Corrente contínua

$E_o$  – Energia eléctrica produtível anualmente por turbina (Wh)

$E_{eq}$  – Energia necessária para electrolisar uma mol de água (V)

$E_{irmín}$  - Irradiação solar mínima disponível no local (Wh/m<sup>2</sup>)

$f$  - Função de distribuição de probabilidade

FUNAE – Fundo de Energia

FV – Fotovoltaico

GE – Gerador eólico

GMG – Grupo Moto Gerador

GSF – Gerador Solar Fotovoltaico

H<sub>2</sub> – Gás Hidrogénio



$H_2O$  – Água

$I_0$  – Corrente máxima de saturação do díodo (A)

$I_{cc}$  – Corrente de curto-circuito (A)

INE – Instituto Nacional de Estatística

$k$  – Factor de forma

KOH – Hidróxido de Potássio

$L$  – Comprimento do módulo (m)

$M$  - Massa molecular de uma substância (g/mol)

$m$  – Factor de idealidade do díodo

$m_{H_2}$  - Taxa média de produção líquida de Hidrogénio (kgH<sub>2</sub>/dia)

$m(H_2O)$  – Massa da água (kg)

$m(O_2)$  - Quantidade de oxigénio produzido (kg)

MF – Módulo fotovoltaico

MPPT – Seguidor do ponto máximo de potência

$n(H_2)$  – Número de moles de Hidrogénio (mol)

$n(H_2O)$  – Número de moles da água (mol)

$n(O_2)$  – Número de moles de Oxigénio (mol)

$N_A$  - Número de agregados

$N_{elet}$  – Número de electrolisadores

$N_{mf}$  – Número de módulos fotovoltaicos

$N_{St.max}$  – Número máximo de módulos por inversor



$N_{St.min}$  – Número mínimo de módulos por inversor

$Nm^3$  – Metros cúbicos normais

$O_2$  – Gás Oxigénio

$P$  – Potência teórica (W)

$P_e$  - Potência eléctrica na saída da turbina (W)

$P_e(\bar{v})$  – Característica eléctrica do sistema de conversão de energia eólica

$P_{Pmf}$  – Potência produzida pelos módulos fotovoltaicos (W)

$P_{pte}$  – Potência produzida pelas Turbinas eólicas (W)

$P_T$  – Potência total instalada (W)

$q$  – Carga eléctrica do electrão (C)

$Q_i$  - Quantidade média de cada item

$S$  – Espaçamento entre os módulos (m)

SHSE – Sistema Híbrido Solar Eólico

$STC$  - Temperatura de Condição padrão (K)

$T$  – Temperatura absoluta da célula (K)

$T_c(V_{OC})$  - Coeficiente de Temperatura de Circuito aberto

TE – Turbina eólica

$\Delta t_i$  – Período médio mensal de radiação solar para cada mês  $i$  (h)

$\Delta t_{med}$  – Período médio anual de radiação solar (h)

$V$  – Tensão de saída (V)

$V_{OC}$  - Tensão do circuito aberto (V)



$V_{OCmax}$  - Máxima tensão de circuito aberto (V)

$V(H_2O)$  – Volume da água (L)

$v$  – Velocidade do vento (m/s)

$v_o$  – Velocidade de *cut-in* (de partida) (m/s)

$v_{MAX}$  – Velocidade de *cut-out* (de estagnação) (m/s)

VT – Potencial térmico (V)

$\alpha$  – Ângulo de inclinação inicial dos módulos ( $^{\circ}$ )

$\beta$  – Menor ângulo entre o sol e a superfície do solo ( $^{\circ}$ )

$\eta_m$  – Eficiência da caixa multiplicadora

$\eta_g$  - Eficiência do gerador eléctrico

$\rho$  – Massa específica do ar ( $kg/m^3$ )



## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. Considerações preliminares

A energia eléctrica é indispensável na vida quotidiana, ela constitui o fundamento dos processos produtivos a nível industrial.

A demanda de energia eléctrica é crescente com tempo e, na situação concreta de Moçambique, que trata-se de um país com baixa taxa de electrificação comparativamente aos outros países como África de Sul e Egipto, é necessário que haja projectos de electrificação rural massiva para resolver o problema de energia em diversos pontos do país. As áreas que necessitam de energia, em Moçambique, são maioritariamente rurais, onde o acesso à rede nacional é bastante difícil, e em alguns casos é praticamente insustentável ligar tais locais à rede, devido ao alto custo associado ao transporte de energia.

Dada a situação, sistemas de geração de energia que aproveitam fontes renováveis, equipados com sistema de armazenamento de energia, constituem uma solução viável para o problema.

O presente projecto surge na perspectiva de resolver o problema relacionado ao difícil acesso à energia eléctrica da rede nacional no Posto Administrativo de Savane, distrito de Dondo.

O projecto consiste num sistema híbrido solar - eólico com sistema de armazenamento de Hidrogénio Verde.

Os sistemas híbridos são bastante vantajosos, principalmente, em locais onde há disponibilidade de diversas fontes de energia, pois, estes sistemas utilizam os benefícios de tais fontes.

O hidrogénio é um elemento químico bastante abundante na natureza que possui alto poder calorífico, reagindo com o ar resulta em energia em corrente contínua, água e liberta grandes quantidades de calor.



## 1.2. Estrutura do trabalho

No Capítulo 2, é feito o estudo do estado da arte que consiste em um retrospecto histórico da utilização de energia eléctrica, das demais fontes renováveis usadas para geração de electricidade, dos sistemas híbridos, concretamente, solar - eólico, os pioneiros no uso de tais sistemas de geração de electricidade e, por último, dos sistemas de armazenamento de energia existentes, com ênfase nos sistemas de armazenamento de Hidrogénio Verde.

No Capítulo 3, é feito o dimensionamento do sistema híbrido solar - eólico que consiste no cálculo da quantidade de módulos fotovoltaicos e turbinas eólicas necessários, no dimensionamento do sistema de conversão de energia e demais parâmetros com recurso ao aplicativo informático Homer Pro, para responder à demanda de energia no local.

No Capítulo 4, é feito o dimensionamento do sistema de armazenamento de energia que consiste na determinação de electrolisadores e tanques de armazenamento de hidrogénio necessários, bem como o cálculo da quantidade de água necessária para a electrólise com recurso ao Homer Pro.

No Capítulo 5, são abordadas questões relacionadas com a aplicação dos produtos da electrólise, concretamente, a aplicação do hidrogénio, oxigénio, e sal obtido, visto que será usada mistura de água do rio com a do mar para aumentar a condutividade eléctrica.

No Capítulo 6, é feita a avaliação da viabilidade do sistema de armazenamento de hidrogénio em comparação com o sistema de armazenamento que usa baterias, considerando o comportamento dos dois sistemas de armazenamento, quanto ao custo, em um período de 75 anos, com recurso ao Homer Pro e Microsoft Excel.

No Capítulo 7, são apresentados os resultados dos parâmetros do projecto.

Finalmente, no Capítulo 8, são apresentadas as conclusões e recomendações relativamente ao trabalho.



### **1.3. Objectivo (s)**

#### **1.3.1. Geral**

- Dimensionar um sistema híbrido solar - eólico para geração de energia com sistema de armazenamento de Hidrogénio Verde para o Posto Administrativo de Savane, distrito de Dondo.

#### **1.3.2. Específicos**

- Dimensionar o sistema híbrido solar - eólico;
- Dimensionar o sistema de armazenamento de Hidrogénio Verde; e
- Avaliar a viabilidade do sistema de armazenamento de Hidrogénio Verde comparando-o com o sistema de armazenamento de baterias.



## 2. ESTADO DA ARTE

### 2.1. Energia eléctrica

A energia eléctrica, pela sua classificação, é uma energia secundária obtida a partir da transformação de energia de fontes primárias, como o Sol [3], portanto, conhecimentos sobre processos e tecnologias para conversão de energia são bastante importantes, de modo a que este processo ocorra eficientemente. [2]

A energia eléctrica é considerada a base, a força motriz dos processos produtivos existentes, bem como do desenvolvimento da humanidade, pois trata-se de um insumo fundamental para o mundo. Estudos indicam que sem o fornecimento de electricidade, não há possibilidade de crescimento económico, o que significa que, a electricidade é um dos factores que contribuem para o desenvolvimento económico. [1]

Do mesmo modo que a demanda de energia, a nível mundial, aumenta, também aumentam as instalações de centrais de geração de energia eléctrica. [1]

Os processos usados para a geração de electricidade têm sido, frequentemente, o solar, eólico, os combustíveis fósseis e a energia hídrica, no entanto, devido ao factor ambiental, a comunidade científica no seio da engenharia tem buscado minimizar e, se possível, eliminar o uso de fontes que contribuem grandemente para a poluição atmosférica, por esta razão, para a geração de electricidade tem-se apostado nas fontes renováveis que são consideradas limpas e amigas do ambiente. [2,4,5]

As fontes, solar e eólica são as de maior potencial para utilização na geração distribuída, que se caracterizam pelo uso de geradores próximos ao local de consumo sem a necessidade de linhas de transmissão por estarem conectadas directamente às redes de distribuição de baixa tensão da concessionária de energia local. [5]



## 2.2. Sistemas híbridos de geração de electricidade

Dentre as fontes renováveis, a solar e a eólica, além de possuírem vantagens que as tornam adequadas a diversos tipos de aplicações, podem ser ainda utilizadas de forma conjunta, com ou sem a presença de outras fontes, constituindo o que se conhece por sistemas híbridos de geração de energia. [1]

As fontes de energia solar e eólica são sazonais, o que significa que há períodos em que a sua ocorrência não é plena ou efectiva, o que, consequentemente, em algumas circunstâncias, não garantem muita segurança na sua utilização para a geração de electricidade de forma isolada. Por esta razão, foram e continuam sendo estudadas tecnologias que consistem no agrupamento destas fontes para reduzir as consequências resultantes da natureza sazonal das mesmas. [3,7]

Um sistema híbrido de geração de energia é aquele que utiliza conjuntamente mais de uma fonte de energia, dependendo da disponibilidade dos recursos energéticos locais, para geração de energia eléctrica, ou seja, quando desconectado da rede eléctrica, usa mais de uma forma de geração de energia, como energia eólica, motores de combustão e energia fotovoltaica. [1,2]

A aplicação óptima de sistemas híbridos ocorre quando há disponibilidade de recursos energéticos no local de instalação do sistema, e esses recursos são adequadamente combinados para garantir atendimento confiável e de qualidade aos consumidores. [1]

Os sistemas híbridos são importantes no sentido de garantirem que haja fornecimento de energia eléctrica mesmo que uma fonte não se faça disponível no momento. [2]

## 2.3. Sistemas híbridos solar - eólico

Antigamente, os sistemas de geração de energia *off grid*, não ligados à rede de distribuição, eram quase exclusivamente dependentes das turbinas eólicas e geradores a combustão interna como *backup*. A característica modular dos geradores fotovoltaicos (FV) transformou



o mercado dos sistemas de geração autónomos, permitindo uma melhor adequação às necessidades energéticas do consumidor. [1]

Devido à grande dependência do vento, das condições geográficas e climáticas do local, um sistema de geração eólico necessita de uma fonte complementar. O recurso solar, por ser mais previsível e estável ao longo do tempo, apresenta-se como uma boa opção de complementaridade ao recurso eólico. Por esta razão, o vento e o sol adaptam-se perfeitamente à configuração de sistemas híbridos, já que capitalizam as vantagens de ambos os recursos. [1]

Em locais mais remotos e afastados, onde a conexão com a rede de energia quase não é possível de ser feita, os sistemas híbridos solar - eólico (SHSE), munidos de baterias ou outras formas para o armazenamento da electricidade gerada, produzem perfeitamente a demanda necessária, fornecendo electricidade ao consumidor de maneira contínua e segura. [6]

Estes sistemas são tecnologias consolidadas para suprimento de electricidade principalmente em locais isolados, longe da rede de distribuição. [4]

### **2.3.1. Princípio de funcionamento dos sistemas híbridos solar - eólico**

Para a geração de energia eléctrica num sistema híbrido solar - eólico é preciso, primeiramente, haver a captação de energia. Os geradores solares fotovoltaicos (GSF) e geradores eólicos (GE) são responsáveis por captar e converter a energia solar e eólica respectivamente. [7]

O princípio de conversão de energia solar fotovoltaica baseia-se no Efeito Fotovoltaico. Os painéis FV são usados para a captação da radiação solar e posterior conversão. Eles contêm células fotovoltaicas que são constituídas por cristais de silício (muitas das vezes), e estes, por natureza, não produzem campo eléctrico, para que tal seja possível, os cristais são dopados para que haja uma diferença de potencial e se crie um campo eléctrico; a



dopagem do silício cria, na célula, duas camadas, uma tipo p e outra tipo n, que possuem, respectivamente, um excesso de cargas positivas e negativas relativamente ao silício.

Partindo do silício puro, pode-se introduzir átomos de boro numa camada e átomos de fósforo na outra, formando o que se chama junção p-n. O que ocorre na junção p-n é que os átomos livres do lado n passam para o lado p onde encontram buracos que os apreendem. Estas cargas capturadas dão origem a um campo eléctrico permanente que dificulta a passagem dos electrões do lado n para o lado p. Se a junção p-n for exposta à radiação solar ocorrerá a geração de pares electro-lacuna, gerando assim, uma corrente através da junção. Este deslocamento de cargas dá origem a uma diferença de potencial que se denomina efeito fotovoltaico. [1,8]

No caso da energia eólica, o processo é relativamente simples, capta-se o vento pelas pás, e o rotor, que é o órgão responsável em transformar a energia cinética do vento em trabalho mecânico de rotação, entra em acção aproveitando a energia cinética para convertê-la em rotação. O subsistema é equipado com gerador eléctrico que é responsável por converter as rotações, que é a energia mecânica, em energia eléctrica. [9]

O SHSE é equipado com um sistema de controlo que controla a velocidade de rotação, a carga, o rotor e outros parâmetros, de modo que, para qualquer funcionamento fora do padrão estabelecido, haja protecção do sistema e as pás não se danifiquem. [9]

### 2.3.2. Constituição dos sistemas híbridos solar - eólico

Os SHSE são basicamente constituídos por três subsistemas, a saber [1]:

- **Subsistema de geração:** É responsável por captar a energia e transformá-la (gerar energia). Tratando-se de um sistema híbrido, este subsistema é, por sua vez, composto pelo GE que é responsável por captar e converter a energia disponível do vento, GSF que é responsável por captar e converter a energia solar em forma de radiação e o Grupo Moto Gerador (GMG) que compreende o conjunto do gerador eléctrico.



- **Subsistema de armazenamento de energia:** Podem ser usadas baterias, sistemas de hidrogénio, sistema de armazenamento em forma de energia potencial da água e outros.
- **Subsistemas de controlo e condicionamento de potência:** Fazem parte, o controlador de carga e o inversor.

A figura abaixo mostra a configuração de um SHSE com um sistema de armazenamento de Baterias.

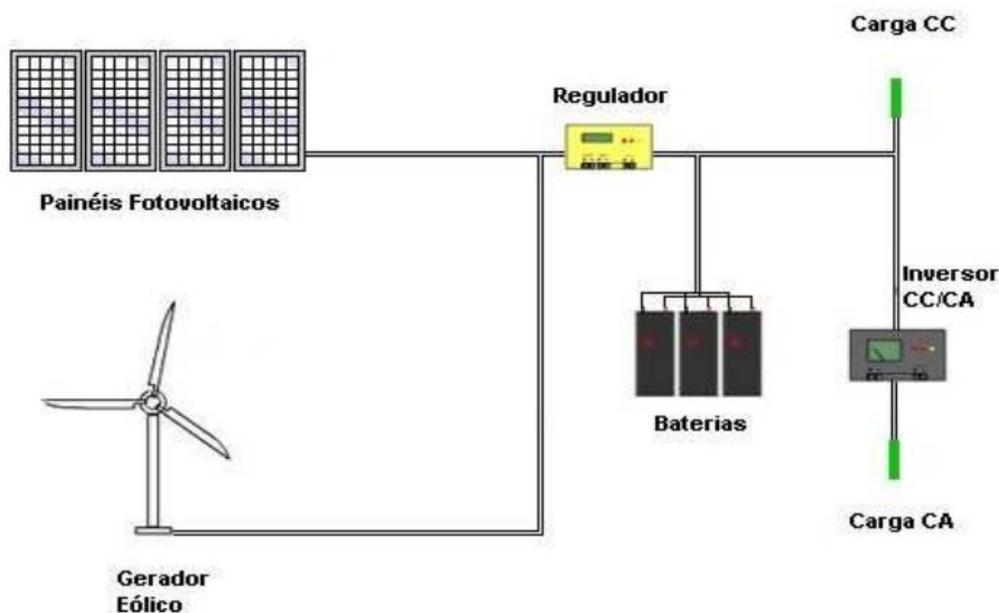


Figura 2.1. Representação de um SHSE com sistema de armazenamento de Baterias.

Fonte: [29]

### 2.3.3. Aplicação dos sistemas híbridos solar - eólico

Dentre várias aplicações dos SHSE pode-se destacar as seguintes [1]:

- Para bombeamento da água, seja para uma comunidade ou para irrigação de plantações;



- Serviços de saúde, principalmente nas zonas rurais, para iluminação de hospitais, refrigeração de vacinas, etc;
- Para protecção catódica, protecção contra corrosão;
- Sinalização, concretamente na iluminação de caminhos (vias) e faróis marítimos;
- Comunicação nas repetidoras de rádio, telefones de emergência, etc.;
- Electrificação rural, fornecimento de electricidade a uma comunidade afastada das redes de distribuição.

Estes sistemas já encontram aplicação, concretamente, na Austrália, na Índia, como os pioneiros nestes projectos, bem como em vários outros países, pois estão sendo considerados e tratados não de forma diferente de outras tecnologias de geração de electricidade. [16]

#### 2.3.4. Vantagens e Desvantagens dos sistemas híbridos solar - eólico

A Tabela 2.1 apresenta as vantagens e desvantagens dos SHSE considerando vários factores que influenciam directa e/ou indirectamente na sua viabilidade e aplicação.

Tabela 2.1. Vantagens e Desvantagens dos SHSE. Fonte: [1]

Variáveis/Parâmetros	VANTAGENS	DESvantagens
<b>Local de implantação do sistema</b>	Há maior aproveitamento dos recursos que estão disponíveis no local.	Requer uma complementaridade dos recursos energéticos (solar e eólico).
<b>Equipamento e investimento</b>	Sistemas facilmente ampliáveis, devido à modularidade dos subsistemas de geração.	Investimento inicial elevado (necessidade da importação dos principais equipamentos).



<b>Operação</b>	Sistemas independentes, não precisam estar ligados à rede de energia eléctrica convencional (forma de geração descentralizada).	Necessidade de armazenamento de energia em função da intermitência das fontes primárias.
<b>Desempenho</b>	Qualidade maior da energia fornecida, em comparação com sistemas com uma única fonte de geração.	O sistema de controle pode ser bastante complexo, dependendo do porte do sistema.
<b>Manutenção</b>	Pouca necessidade de manutenção para as tecnologias de geração renovável	Dependendo do sistema de armazenamento, pode ser de difícil manutenção (ex.: Baterias)
<b>Questões ambientais</b>	Baixo nível de emissão de CO <sub>2</sub> e outros gases, comparado à geração a partir de combustíveis fósseis.	Descarte e reciclagem das baterias são pontos fracos, se o sistema utilizar as baterias para armazenamento. Sistemas de grande porte tem-se a ocupação de grandes áreas (arranjo fotovoltaico), além do aspecto visual (aerogeradores).

Como pode-se observar da Tabela 2.1, apesar de exigirem alta complementaridade dos recursos renováveis para a sua aplicação, os SHSE são bastante ótimos para locais isolados da ligação à rede de distribuição, pois são independentes, principalmente quando possuem um bom sistema de armazenamento.



## 2.4. Armazenamento de energia

O grande problema hoje em dia, não são os processos de conversão de energia, mas sim, a sua armazenagem para utilizar no momento oportuno [18]. A sociedade global é dependente de algumas formas de armazenamento de energia, como, por exemplo, o armazenamento de energia potencial gravitacional em hidroelétricas, o que representa um grande avanço, porém, existem mais formas por serem exploradas. [17]

Os sistemas de armazenamento de energia são sistemas pensados e projectados para que se possa armazenar um montante de energia gerada e aceder posteriormente a essa energia sob a demanda necessária de um sistema a ser alimentado. [17, 18]

As tecnologias de armazenamento de energia podem ajudar a atingir os objectivos de segurança energética e de redução da emissão de dióxido de carbono para a atmosfera pela optimização da operação dos sistemas de fornecimento de energia. Estas tecnologias possibilitam [18]:

- O aproveitamento eficiente de diversas fontes renováveis para geração de electricidade;
- A integração de diferentes fontes de geração de energia com o uso final de energia eléctrica;
- A geração de energia eléctrica próximo ao consumidor;
- O acesso à energia eléctrica em regiões não conectadas à rede, a partir de fontes intermitentes;
- O aumento da estabilidade, flexibilidade, confiabilidade e resiliência da rede de energia eléctrica, a inserção e incremento do uso de fontes renováveis;
- O uso da energia num período diferente em que esta é produzida.

O recente interesse em armazenamento de energia está sendo motivado por pelo menos cinco factores: avanços em tecnologias de armazenamento, aumento de preços de combustíveis fósseis, desenvolvimento de mercados de energia desregulamentados, desafios à implantação de novos modelos de redes de transmissão e distribuição, e aumento da penetração de várias fontes de energia renováveis. [19]



## **2.5. Tecnologias de armazenamento de energia**

Os sistemas de armazenamento fornecem uma ampla gama de abordagens tecnológicas para gerenciar o fornecimento de energia a fim de criar uma infra-estrutura de energia mais resiliente e trazer economia de custos para concessionárias e consumidores. [21]

Os sistemas de armazenamento de energia mais comuns são [20, 21]:

### **2.5.1. Mecânico**

#### **2.5.1.1. Bombeamento Hidroelétrico**

Utiliza energia elétrica para bombear água para um reservatório elevado durante o período de carga e descarregando através da libertação da descida da água. As aplicações deste modelo envolvem gerenciamento de energia, controle de frequência e *backup*. No entanto, suas restrições de localização e elevado tempo de construção resultam em alto custo inicial, sendo estas as principais desvantagens deste modelo. [22, 23]

#### **2.5.1.2. Sistemas de ar comprimido**

O ar é armazenado em grandes cilindros ou mesmo em cavernas subterrâneas a alta pressão (comprimido). Quando necessário, o ar é expandido e forçado a circular por uma turbina, gerando electricidade. Este modelo possui tempo de resposta na faixa de minutos e flexibilidade de operação. No entanto, possui alto custo de instalação, devido à necessidade de reservatórios. Além disso, sua eficiência reduzida também se mostra como um problema a ser tratado no desenvolvimento desta tecnologia. [22]

#### **2.5.1.3. Volantes de inércia**

Os volantes de inércia armazenam energia de forma cinética numa massa girante apoiada num estator. No processo de carga, a energia elétrica armazenada, aumenta com o quadrado da aceleração da massa, seu modo de construção suporta altas velocidades e forças centrífugas. Durante o processo de descarga, esta é desacelerada, fornecendo electricidade através da actuação de um gerador. Essa tecnologia é de baixa manutenção, com capacidade de absorver e libertar energia num curto período de tempo. [18, 22]



## **2.5.2. Electroquímica**

### **2.5.2.1. Baterias electroquímicas**

Uma bateria é constituída por um grupo de células electroquímicas, onde cada célula possui um par de eléctrodos (ânodo e cátodo) mergulhados em um electrólito. Durante o processo de descarga, as reacções electroquímicas produzem o fluxo de electrões entre o ânodo e o cátodo, fornecendo energia eléctrica para o circuito externo. Essas reacções são reversíveis, permitindo a recarga da bateria. [18, 22]

### **2.5.2.2. Baterias de fluxo**

Armazenam energia em electrólito fluído, armazenado em tanques, e durante o processo de carga e descarga, este é bombeado para uma célula onde uma reacção de redução e oxidação do material activo ocorre. [17]

## **2.5.3. Química**

### **2.5.3.1. Hidrogénio**

A energia é armazenada na forma do gás hidrogénio, que pode ser obtido a partir da electrólise de substância que contém moléculas de Hidrogénio na sua composição, por via da gaseificação, a partir de combustíveis fósseis, entre outros. [22]

## **2.5.4. Eléctrica**

### **2.5.4.1. Sistemas Magnéticos Supercondutores (SMES)**

Os Sistemas Magnéticos Supercondutores servem para armazenar a energia eléctrica do sistema na forma de um campo electromagnético, criado por um fluxo de corrente contínua, por meio de uma bobina supercondutora. A energia armazenada pode ser injectada novamente no sistema eléctrico ao descarregar a bobina. [22, 23]

### **2.5.4.2. Supercapacitores**

Os supercapacitores armazenam energia no campo electrostático produzido entre dois condutores carregados e separados por um dieléctrico. Apresentam longos ciclos de vida, rápido tempo de resposta, de alguns segundos a minutos e alta densidade de potência. [17, 20]



### 2.5.5. Térmica

Trata-se de armazenamento de energia térmica por aquecimento ou resfriamento, faz-se utilizando como meio de armazenamento água, óleo ou sal fundido, para que possa ser utilizada posteriormente. [19, 22]

### 2.6. Hidrogénio

De acordo com [38], o hidrogénio é um gás incolor, inodoro, insípido e inflamável em CNTP, caracterizado por possuir grande quantidade de energia por unidade de massa 120,7 kJ/g, tem cerca de três vezes a energia da gasolina, o que o torna atractivo no mercado de energia.

Ele é um dos elementos mais abundantes no planeta terra, no entanto, está normalmente associado a outros elementos químicos, formando moléculas. Para obtenção de energia de Hidrogénio ( $H_2$ ), é necessário o uso de tecnologias apropriadas. [34]

A tecnologia de armazenamento de energia na forma de Hidrogénio está relacionada com a forma como este gás é obtido. [35]

A Comissão Europeia (2020) citada por [34] definiu os seguintes conceitos utilizados na classificação do hidrogénio, conforme a sustentabilidade do seu processo produtivo:

- **Hidrogénio baseado em electricidade** é o que se refere ao hidrogénio produzido através da electrólise da água independentemente da fonte de electricidade. As emissões de gases de efeito estufa, durante todo o ciclo de vida da produção de hidrogénio, com base na electricidade, dependem de como esta é produzida;
- **Hidrogénio renovável** é o produzido através da electrólise da água e com a electricidade proveniente de fontes renováveis. As emissões de gases de efeito estufa do ciclo de vida completo da produção do hidrogénio são praticamente zero. O hidrogénio renovável também pode ser produzido por meio do biogás (ao invés do



gás natural) ou da conversão bioquímica da biomassa, desde que em conformidade com os requisitos de sustentabilidade;

- **Hidrogénio baseado em fósseis** refere-se ao hidrogénio produzido através de uma variedade de processos, usando combustíveis fósseis como matéria-prima, principalmente, a reforma do gás natural ou a gaseificação do carvão. Isso representa a maior parte do hidrogénio produzido actualmente. As emissões de gases de efeito estufa decorrentes da produção de hidrogénio fóssil são altas;
- **Hidrogénio de base fóssil com captura de carbono** é uma subparte do hidrogénio de base fóssil, em que os gases de efeito estufa emitidos como parte do processo de produção de hidrogénio são capturados. As emissões de gases de efeito estufa da produção de hidrogénio de base fóssil, com captura de carbono ou pirólise, são menores que para o hidrogénio de combustível fóssil, porém, a eficácia variável da captura de gases de efeito estufa (máximo de 90%) precisa ser considerada;
- **Hidrogénio de baixo teor de carbono** abrange o hidrogénio baseado em fósseis, com captura de carbono e hidrogénio baseado em electricidade, com emissões de gases de efeito estufa de ciclo de vida significativamente reduzidas em comparação com a produção de hidrogénio existente;
- **Hidrogénio castanho** refere-se ao hidrogénio produzido do carvão mineral sem a captura, utilização e sequestro de carbono (CCUS, na sigla em inglês);
- **Hidrogénio cinza**, produzido a partir de combustíveis fósseis, principalmente gás natural, sem CCUS;
- **Hidrogénio azul**, produzido a partir de fontes fósseis, principalmente gás natural, mas com CCUS;
- **Hidrogénio Verde** (hidrogénio renovável), produzido por electrólise, com electricidade oriunda de fontes de energia renováveis, tais como solar, eólica, hidráulica, geotérmica, de marés, etc.



### 3. DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA HÍBRIDO SOLAR - EÓLICO

#### 3.1. Caracterização do local de implantação do projecto

O Posto Administrativo de Savane situa-se no distrito de Dondo (Sofala), e este por sua vez, encontra-se na margem esquerda do rio Púnguè, que vai desaguar junto da cidade da Beira, estendendo-se ao longo deste rio até aos limites do actual Município da Beira. Tem uma superfície de aproximadamente 400 km<sup>2</sup>. [24]

Segundo a classificação climática de Koppen, o clima do Posto Administrativo de Savane está compreendido na zona de transição do clima tropical chuvoso para o de estepe com estação seca no inverno. [24]

A temperatura média do ar é cerca de 27°C, com uma amplitude média de 7°C (cerca de 27,5°C em Janeiro e 21°C em Jul/Agosto). [24]

A média anual dos valores máximos é de 30 - 31°C, com os valores máximos possivelmente em Janeiro – Fevereiro (32 - 33°C) e os mínimos em Julho (26 - 27°C). O valor médio anual das temperaturas mínimas é de 18-19°C, com os valores mais altos em Janeiro – Fevereiro (22°C) e os mais baixos em Julho (14 - 15°C). [32]

A humidade relativa no distrito está entre 75 - 76% com pequena variação ao longo do ano. A precipitação média anual varia de 1 000 mm a 1 459 mm, com os valores mais altos na zona mais próxima da costa e diminuindo progressivamente para montante. [32]

Este Posto possui potencialidades agrícolas e de florestas, sendo a agricultura e pecuária as principais actividades económicas das famílias. [24, 32]

No distrito de Dondo, apenas 12,5% dos agregados familiares beneficiam directamente de electricidade e nesta percentagem, o Posto Administrativo de Savane possui uma percentagem relativamente baixa. Assim, segundo dados do INAQUA (2011), os maiores consumidores da energia eléctrica são as indústrias (Açucareira de Mafambisse, Cimentos de Moçambique, Sociedade Agrícola de Púnguè, Fábrica de Lusalite e Fábrica de Tijolos). [32]



A figura abaixo mostra a localização geográfica do Posto Administrativo de Savane, distrito do Dondo.



Figura 3.1. Localização geográfica do Posto Administrativo de Savane. Fonte: [31]

Estudos feitos pelo FUNAE demonstram que dentre vários locais com potencial para implantação de sistemas solares FV, Sofala faz parte, tendo um total de entre 1900-2000 kWh/m<sup>2</sup>/ano. [13]

Com os recursos apresentados nas estatísticas, o Posto Administrativo de Savane tem potencial suficiente para a instalação de projectos de SHSE, bem como os respectivos sistemas de armazenamento de energia na forma de Hidrogénio Verde. [13,14, 24, 32]

### **3.2. Dados relativos ao número de agregados**

Baseando-se nos dados do INE (2012), o Posto Administrativo de Savane possui 12,1% da população do Distrito, o que corresponde a 17 119 de habitantes. [36]



De acordo com as estatísticas do INE [24], no distrito de Dondo, os agregados são, em média, constituídos por 6 membros. Sendo assim, pode-se determinar o número de agregados pela Equação (1):

$$N_A = \frac{N_P}{6} \quad (1)$$

$$N_A = \frac{17\ 119}{6} = 2\ 853,16 \approx 2\ 854$$

Onde  $N_A$  e  $N_P$  são o número de agregados e o número de habitantes, respectivamente.

### 3.3. Estimativa da demanda de energia

Normalmente, quando há acesso à electricidade no seio dos agregados utiliza-se:

- Lâmpadas;
- Televisão;
- Congelador;
- Energia para carregamento de telefones móveis; e
- Aparelhos de som.

A Tabela 3.1 apresenta os equipamentos frequentemente usados no distrito do Dondo com os respectivos valores da potência média baseando-se em [37].

Tabela 3.1. Indicação das potências médias dos itens. Fonte: [Adaptado pelo Autor, de [37]]

Dispositivo/ item	Potência média (W)
Lâmpada incandescente	60
Televisão	150
Congelador	300



Computador	300
Telefone móvel	3
Geleira	250
Coluna de som	100
<i>DVD player</i>	30
Ferro eléctrico	1 000
Ar condicionado	1 400
Termoacumulador	2 000
Ventoinha	100
Chaleira	1 000
Microondas	2 000
Fogão eléctrico de 2 bocas	3 000

Para este dimensionamento, tem-se em conta que os agregados poderão, ao longo do tempo, usar os itens apresentados na Tabela 3.1, ou seja, tem-se em conta a evolução económica da população com tempo. Se a demanda for relativamente baixa, a energia será adicionada à energia usada para a produção do Hidrogénio.

Desta forma, tem-se o seguinte balanço energético:

$$P_{T/A} = \sum_{i=1}^n Q_i P_i \quad (W) \quad (2)$$

Onde:

$P_{T/A}$  - é a Potência total por agregado sem acesso a energia (W)

$P_i$  - é a Potência de cada item tabelado (W)

$Q_i$  - é a quantidade média de cada item tabelado, de acordo com a Tabela 3.2.



A Tabela 3.2 mostra também o consumo diário dos equipamentos considerando um tempo médio de utilização especificado.

Tabela 3.2. Indicação das quantidades dos itens e dos seus respectivos consumos diários.

Fonte: [Adaptado pelo Autor, de [37]]

Dispositivo/ item	Quant.	Pot. média (W)	Hr de uso/dia	Consumo (wh)	
				Unitário	Total
Lâmpada incandescente	6	60	8	480	2 880
Televisão	1	150	6	900	900
Congelador	1	300	24	7 200	7 200
Computador	1	300	4	1 200	1 200
Telefone móvel	4	3	4	12	48
Geleira	1	250	24	6 000	6 000
Coluna de som	2	100	2	200	400
DVD player	1	30	2	60	60
Ferro eléctrico	1	1 000	1	1 000	1 000
Ar condicionado	1	1 400	3	4 200	4 200
Termoacumulador	1	2 000	24	48 000	48 000
Ventoinha	1	100	3	300	300
Chaleira	1	1 000	1	1 000	1 000
Microondas	1	2 000	1	2 000	2 000
Fogão eléctrico de 2 bocas	1	3 000	3	9 000	9 000

Nota-se que os equipamentos que os agregados com condições médias utilizam, não consomem muita energia. Verifica-se maior consumo em equipamentos como ar condicionado, fogão eléctrico e outros com potência relativamente elevada.



De acordo com os dados apresentados na Tabela 3.2, usando o aplicativo informático Homer Pro, foram obtidos os dados relativos à demanda da comunidade do Posto Administrativo de Savane apresentados no Anexo A6 (dados em kW).

Note-se que o pico da demanda verifica-se no período da noite, no intervalo das 18 às 22 horas, pois de acordo com os dados da Electricidade de Moçambique [25], é neste período em que mais se utiliza a energia eléctrica em Moçambique.

O perfil diário de valores médios é apresentado na figura abaixo.

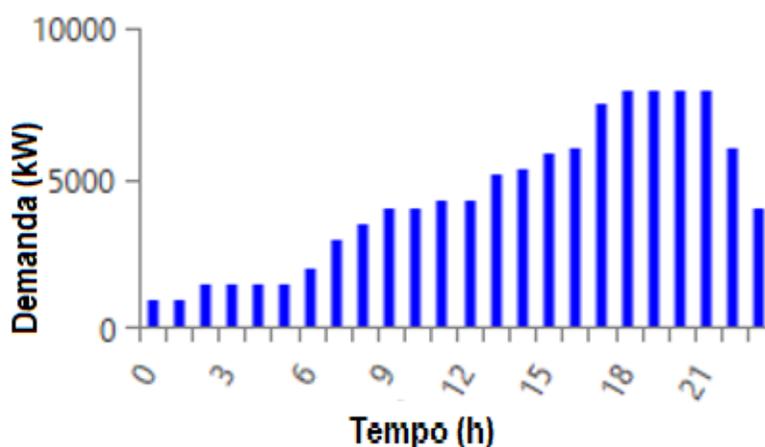


Figura 3.2. Perfil diário da demanda para o Posto Administrativo de Savane.

Fonte:[Adaptado pelo Autor, de Homer Pro]

Desta forma, tem-se a potência total instalada de 16,68 MW, incluindo a potência de armazenamento de 8 MW para um dia sem geração de energia a partir do SHSE. A potência para armazenamento é incluída na perspectiva de que haverá, eventualmente, dia com escassez dos recursos para geração de energia a partir do sistema híbrido. A demanda de potência para distribuição e a potência total podem também ser obtidas pelas Equações (3) e (4), respectivamente:

$$P_D = 0,8N_A \times P_{T/CM} + 0,2N_A \times P_{T/ACM} \quad (W) \quad (3)$$



$$P_T = 2 \times (k \times P_D) \quad (W) \quad (4)$$

Onde:

$P_{T/CM}$  - Potência total por agregado com condições médias (W);

$P_{T/ACM}$  - Potência total por agregado com condições acima da média (W);

$P_D$  - Potência ou demanda diária (W);

$P_T$  - Potência total instalada (W); e

k é o coeficiente de segurança.

### 3.4. Subsistema fotovoltaico

#### 3.4.1. Módulos fotovoltaicos

Quanto à forma, existem fundamentalmente dois tipos de módulos fotovoltaicos: planos e côncavos. De acordo com [30], os MF côncavos são bastantes onerosos.

Os MF planos são bastantes acessíveis no mercado comparativamente aos côncavos.

Quanto ao tipo, existem dois, monocristalinos e policristalinos. Na tabela abaixo são apresentadas as características comparativas dos dois.

De acordo com Homer Pro, módulos seleccionados para este projecto são planos policristalinos.

Tabela 3.3. Avaliação comparativa dos MF monocristalinos e policristalinos. Fonte:

[Adaptado pelo Autor, de [31]]

Monocristalinos	Policristalinos
Têm maior eficiência	Têm menor eficiência em comparação com os monocristalinos



São bastante caros	São baratos
Menor tamanho	Maior tamanho
Não possuem bom desempenho em climas quentes	Possuem bom desempenho em climas quentes
Baixa acessibilidade no mercado	Alta acessibilidade no mercado
Bastante usados quando há problema de espaço	Ocupam muito espaço

Os MF policristalinos convergem muitas vantagens para serem aplicados neste projecto, visto que o local tem clima quente, há disponibilidade de espaço e os MF são relativamente baratos.

De acordo com o aplicativo informático Homer Pro, considerando as condições do local de instalação do projecto, o subsistema deverá ser projectado para gerar uma potência de 680 kW utilizando MF de modelo Studer VarioTrack VT-65 de potência de 1 000 W cujas especificações se encontram no Anexo 1. O número de módulos é dado pela Equação (5).

$$N_{mf} = \frac{P_{Pmf}}{P_{mf}} \quad (5)$$

$$N_{mf} = 680$$

Onde:

$N_{mf}$  – é o número de MF;

$P_{Pmf}$  – é a potência produzida pelos MF (W); e

$P_{mf}$  – é a potência de um MF (W).



### 3.4.2. Energia gerada pelos módulos fotovoltaicos

Nem toda energia captada pelos módulos é efectivamente convertida em electricidade, por essa razão, serão levados em conta os dados relativos à radiação no local, à área do MF e a sua eficiência.

No gráfico apresentado na Figura 3.3 ilustra-se os dados de radiação no local de instalação do projecto.

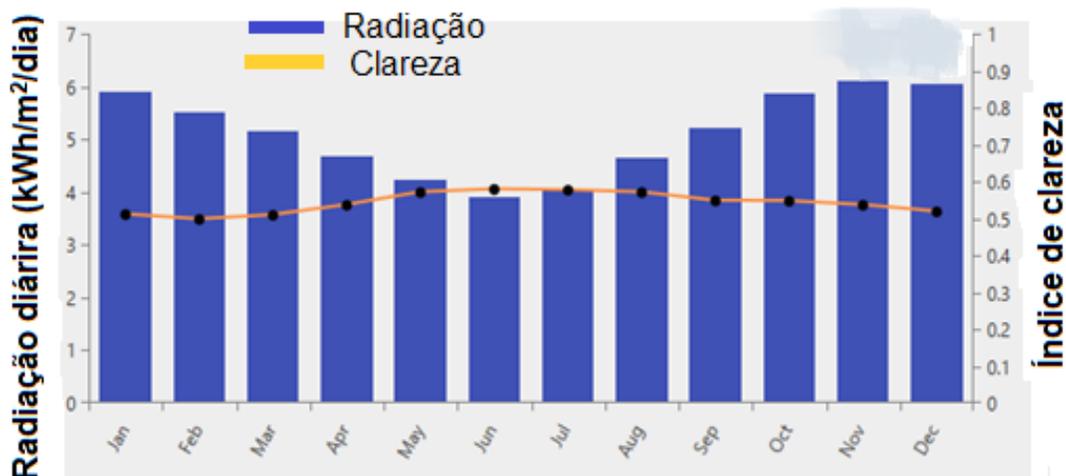


Figura 3.3. Valores médios mensais da radiação no Posto Administrativo de Savane.

Fonte: [48]

O dimensionamento é feito para que haja geração de electricidade para o mínimo de radiação disponível no local:

$$E_{irmin} = 4,3 \text{ kWh/m}^2 \text{ dia}$$

Onde  $E_{irmin}$  é a Irradiação solar mínima disponível no local ( $\text{kWh/m}^2 \text{ dia}$ ).

Para que uma célula funcione deve haver uma corrente circulando como resultado da diferença de potencial (ddp). O circuito que representa o comportamento de uma célula fotovoltaica é representado na Figura 3.4:

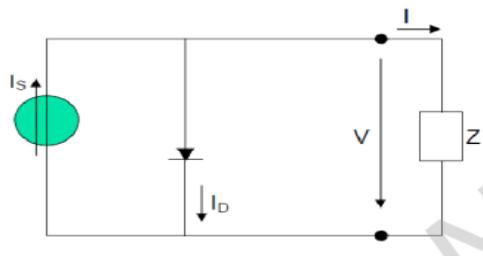


Figura 3.4. Circuito eléctrico equivalente de uma célula FV alimentando uma carga Z.

Fonte: [41]

A fonte de corrente  $I_s$  representa a corrente eléctrica gerada pelo feixe de radiação luminosa, constituído por fotões, ao atingir a superfície activa da célula (efeito fotovoltaico). A junção p-n funciona como um díodo que é atravessado por uma corrente interna unidireccional  $I_D$ , que depende da tensão  $V$  nos terminais da célula [41]. A potência eléctrica de saída ( $P$ ) de um módulo fotovoltaico é o produto entre a tensão e a corrente de saída dado pela Equação (6): [41]

$$P = VI = V \left[ I_{CC} - \left( I_0 \times e^{\frac{V}{m \times VT}} - 1 \right) \right] \quad (W) \quad (6)$$

Onde:

$V$  – é a tensão de saída (V);

$I_{CC}$  – é a corrente de curto-circuito (A);

$I_0$  – é a corrente máxima de saturação do díodo (A);

$m$  – é o factor de idealidade do díodo (díodo real  $m > 1$ );

$VT$  – é designado por potencial térmico  $VT = \frac{KT}{q}$  (V);

$T$  – é a temperatura absoluta da célula (K)

$q$  – é a carga eléctrica do electrão ( $1,6 \times 10^{-19}$  C).



### 3.4.2.1. Área ocupada pelos módulos fotovoltaicos

De acordo com as especificações dadas no Anexo 1, as dimensões do módulo seleccionado são:

- Comprimento – 320 mm;
- Largura – 220 mm.

O ângulo de inclinação dos módulos em relação à superfície do solo, sendo o sistema *off grid* (não ligado à rede) é dado por:

$$\alpha = \text{Latitude} + \frac{\text{Latitude}}{4} \quad (^\circ) \quad (7)$$

A latitude do Posto Administrativo de Savane, de acordo com o Google *Heart*, é de  $-19,6167^\circ$ . E Da Equação (7), a inclinação óptima de acordo com o aplicativo informático Homer Pro é de  $25^\circ$  para Nordeste. No entanto, o subsistema é equipado de seguidor solar, mecanismo rotativo que otimiza a captação da energia solar ao longo do dia.

Para evitar sombreamento, determina-se a distância de separação das fileiras de módulos que é dada pela Equação (8):

$$d \geq L \left( \cos \alpha + \frac{\sin \alpha}{\tan \beta} \right) \quad (m) \quad (8)$$

Onde:

$d$  – é a distância entre os centros das fileiras dos módulos (m);

$L$  – é o comprimento do(s) módulo(s), neste caso serão dois módulos em cada coluna (m);

$\beta$  – é o menor ângulo entre o sol e a superfície do solo, neste caso  $40^\circ$ .

Da Equação (8),

$$d \geq 1,95 \times 2 \times \left( \cos 25^\circ + \frac{\sin 25^\circ}{\tan 40^\circ} \right) \approx 7,1m$$

Para garantir que não haja sombreamento, adopta-se a distância de 7,5 m.

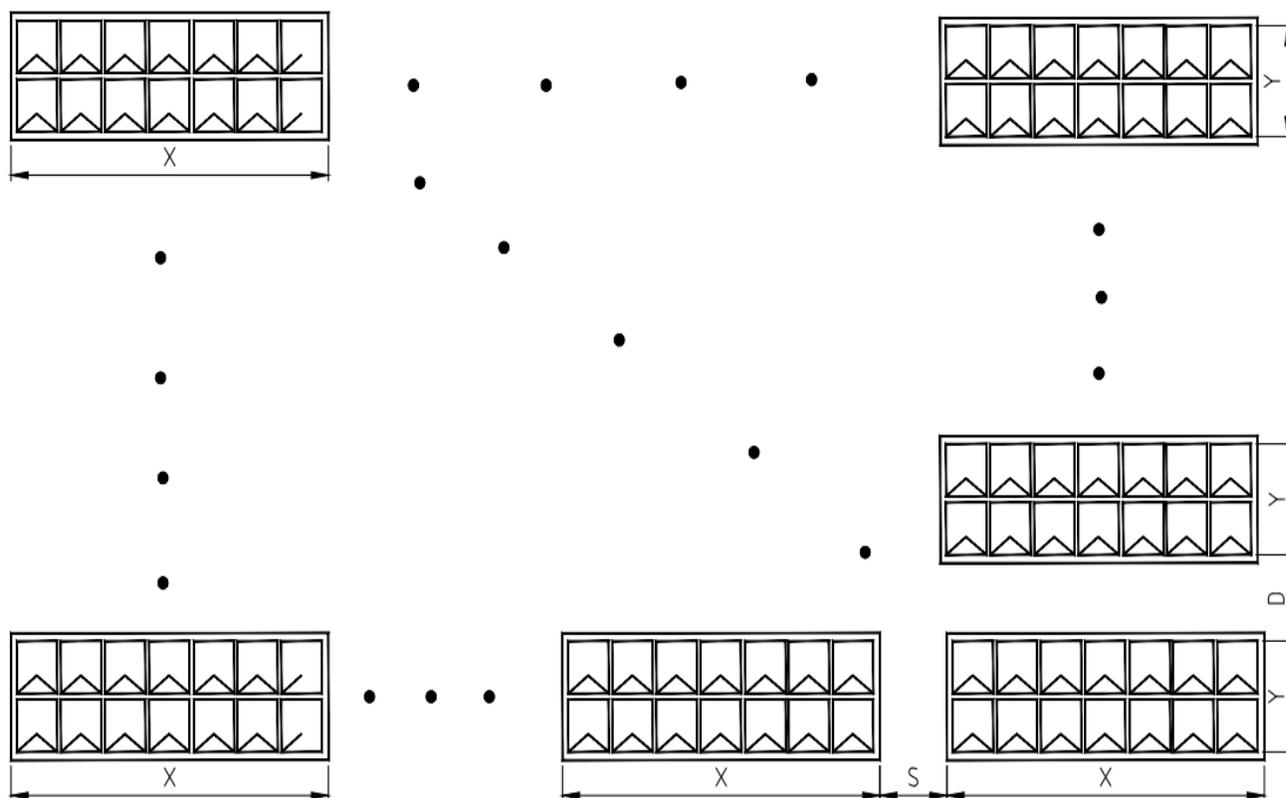


Figura 3.5. Arranjo dos MF na vista de cima. Fonte: [Autor]

Como os MF terão um mecanismo rotativo guiado pelo sensor de radiação solar, a área máxima do local verifica-se quando os MF estiverem voltados para cima, no entanto, tem-se em conta a questão de sombreamento. O arranjo será de 7 linhas e 7 colunas. As distâncias S e D são 0,35 e 3,9 metros respectivamente. A área é dada pela Equação (9).

$$A_T = 7 \times (X + S) \times 7 \times (Y + D) \text{ (m}^2\text{)} \quad (9)$$

$$A_T = 7\,950 \text{ m}^2$$

De acordo com [43], nem toda energia que chega aos MF é convertida em electricidade, as perdas verificam-se devido à temperatura, sujidade (poeira sobre os MF), má orientação



dos MF, inclinação inadequada, sombreamento, e mais; a limpeza dos MF é feita trimestralmente, tirando as supervisões feitas periodicamente ao longo das semanas.

#### **3.4.2.2. Inversor solar**

Boa parte dos equipamentos, normalmente, usa a tensão de 230V. A energia é gerada pelos MF, a tensão diferente da tensão da rede de distribuição, a corrente é contínua e é, portanto, necessário o uso de algum dispositivo que faça a conversão destes parâmetros para adequa-los ao uso doméstico. O dispositivo eléctrico que realiza tal função é o Inversor.



Figura 3.6. Inversor Solar. Fonte: [29]

Para a escolha do inversor não basta simplesmente haver uma boa relação custo/potência, existem, no entanto, vários outros factores a considerar. Dentre os modelos existentes, são seleccionados três com boa relação custo/potência para avaliar-se os demais factores, como mostra a tabela abaixo.



Tabela 3.4. Avaliação comparativa de diferentes modelos de inversores Fonte: [Adaptado pelo Autor, de [36,51]]

<b>Modelo</b> <b>Factor</b>	<b>Modelo GS</b> <b>3 -10.0RS</b> <b>(SUN GROUP)</b>	<b>Modelo MIN</b> <b>3000-1000TLX</b> <b>(GROWATT)</b>	<b>Modelo</b> <b>PRIMO 6-10.0-1</b> <b>(FRONIUS)</b>
<i>Overload</i> (Sobrecarga)	Até 50%	Até 35%	Até 50%
Tensão mínima de MPPT	Menor (BOM)	Maior (MAU)	Muito maior (MAU)
Tensão máxima de MPPT	Maior (BOM)	Mais baixa que o modelo GS (MAU)	Mais alto que o modelo MIN (MAU)
Tensão de Partida	Menor (BOM)	Relativamente maior (MAU)	Relativamente maior (MAU)
Máxima tensão de entrada	Suporta maior tensão (BOM)	Suporta maior tensão (BOM)	Suporta maior tensão (BOM)
Número de MPPT	2 para 6kW	2 para 6 kW	2 para 6 kW
Máxima corrente de entrada	16 A para 6 kW	12,5 A para 6 kW	12 A para 6 kW
Corrente de Curto-Circuito	20 A para 6 kW	16 A para 6 kW	18 A para 6 kW
Peso do inversor	10 kg	10.8 kg	21,6 kg
Comunicação	Ethernet, Wi-Fi e rs485	Wi-Fi e rs485	Ethernet, Wi-Fi e rs485
Anos de garantia	10 anos	10 anos	7 anos

Apesar do custo do inversor de modelo GS da série RS ser relativamente mais alto que os dois outros dados na Tabela 3.4, este modelo concentra várias vantagens como pode-se observar, por esta razão, para este projecto, é escolhido inversor **Modelo GS 10.0 RS da SUN GROUP**. O sistema de conversão de energia, de acordo com os resultados no



aplicativo informático Homer Pro, deverá ter a capacidade de 100 kW, sendo usado 100 inversores de capacidade nominal de 1000 W.

A tensão máxima do circuito aberto é dada pela expressão:

$$V_{OC\text{corrigida}} = V_{OC} + V_{OC} \left[ (T - STC) \times \frac{T_C(V_{OC})}{100} \right] \quad (V) \quad (9)$$

Onde:

$V_{OC\text{corrigida}}$  - é a tensão máxima de circuito aberto corrigida (V);

$V_{OC}$  - é a tensão do circuito aberto (V);

$T$  - é a temperatura mais baixa durante o ano (14°C);

$STC$  - é a temperatura de condição padrão (25°C);

$T_C(V_{OC})$  - é o coeficiente de temperatura de circuito aberto (°C/V).

Do Homer Pro, o número máximo de MF que um inversor deverá suportar dadas as especificações, voltagem, destes equipamentos é de 14 e o mínimo é de 2.

O número máximo e mínimo de MF por *String* é dado também pelas Equações (10) e (11), Respectivamente.

$$N_{St.max} = \frac{V_{in,max}}{V_{OC\text{corrigida}}} \quad (10)$$

Onde  $V_{in,max}$  - é a tensão máxima de entrada no inversor, que é de 1200 V.

$$N_{St.min} = \frac{V_{in,min}}{V_{OC\text{corrigida}}} \quad (11)$$

Onde  $V_{in,min}$  - é a tensão mínima de entrada no inversor, neste caso é de 65 V.



Com apenas 2 MF o inversor poderá converter a tensão DC em AC e o máximo que poderá suportar na sua entrada é de 14 MF, portanto, pode-se estabelecer qualquer valor compreendido neste intervalo.

Para o cálculo acima observa-se a condição:

$$P_{in,max} \geq N_{St,max} \times P_{MF,max} \quad (W) \quad (12)$$

Onde  $P_{in,max}$  é a potência máxima de entrada do inversor (W).

Do Homer Pro, determinou-se que o subsistema FV gera 1 752 MWh/ano, o que corresponde a aproximadamente 4,8 MWh/dia. O gráfico que apresenta as características de geração ao longo do dia e do ano é apresentado abaixo:

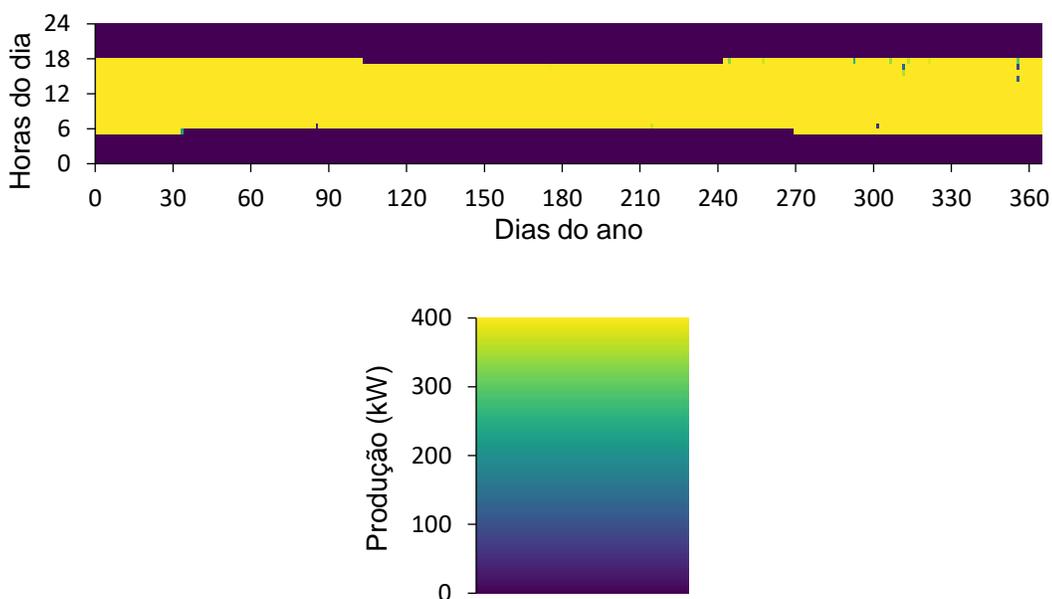


Figura 3.7. Características da geração de electricidade do subsistema FV.

Fonte:[Adaptado pelo Autor, do Homer Pro]

O subsistema FV gera energia eficiente e continuamente no período das 5 às 18 horas, o que significa que é fortemente dependente da hora do dia.



### 3.5. Subsistema eólico

#### 3.5.1. Turbinas eólicas

Turbinas eólicas são equipamentos que geram energia eléctrica a partir da energia cinética do vento. As turbinas são fundamentalmente classificadas em Horizontais e Verticais. A Tabela 3.5 apresenta as características de cada tipo.

Tabela 3.5. Comparação das turbinas horizontais e verticais. Fonte: [Adaptado pelo Autor, de [36,50]]

<b>Turbinas Horizontais</b>	<b>Turbinas Verticais</b>
Relativamente grandes	Relativamente pequenas
Difícil manutenção	Fácil manutenção
Alta eficiência	Baixa eficiência
Necessita de sistema de orientação	Não necessita de sistema de orientação
Uso para grande intervalo de potência	Normalmente de pequeno porte

Na figura abaixo são apresentadas as turbinas horizontais e verticais.



(a)



(b)

Figura 3.8. Ilustração de turbina eólica horizontal (a) e vertical (b). Fonte: [32]



Homer Pro otimizou o sistema para utilizar turbinas horizontais porque têm maior eficiência e podem ser usadas num grande intervalo de potência, o que representa grande vantagem para a instalação.

Na tabela abaixo mostra-se a classificação das turbinas horizontais de acordo com a potência.

Tabela 3.6. Classificação das turbinas horizontais de acordo com a Potência. Fonte:

[Adaptado pelo Autor, de [36,50]]

POTÊNCIA		
$P < 10 \text{ Kw}$	$10 \text{ kW} \leq P \leq 500 \text{ kW}$	$500 \text{ kW} \leq P \leq 8 \text{ MW}$
<b>Pequeno Porte</b>	<b>Médio Porte</b>	<b>Grande Porte</b>
Usadas para casa ( <i>on grid</i> )	Pequenas cidades	Usadas para Usinas, pequenas e grandes cidades
Usadas para fazendas	Nos sistemas híbridos	Nos sistemas híbridos
-	Geração distribuída	Geração distribuída <i>offshore</i> e <i>on shore</i>

Sendo a potência necessária, relativamente grande, Homer Pro otimizou o sistema para uso de TE de modelo Enercon de 4 MW. Devido às condições do local relativas ao aproveitamento da energia eólica, o subsistema eólico foi otimizado para produzir 16 MW. Este subsistema é equipado com 4 turbinas eólicas, gerando anualmente, 35 059,14 MWh e, diariamente, aproximadamente a 96,1 MWh.

Nota: A distância de separação das turbinas é de 300 m, considerando o diâmetro do rotor.



### Especificações técnicas da Turbina eólica seleccionada

A Tabela 3.7 ilustra as especificações operacionais da turbina escolhida, de acordo com uma boa combinação de potência gerada e o custo, a resistência mecânica e à corrosão, parâmetros estes bastante importantes a serem observados.

Tabela 3.7. Especificações técnicas da turbina eólica. Fonte:[50]

Informações operacionais	
Potência nominal (kW)	4 000
Velocidade eólica de conexão (m/s)	3,5
Velocidade eólica de desconexão (m/s)	32 (em altas temperaturas)
Nível IEC	IEC IB
Vento máximo (m/s)	70
Temperatura de operação (°C)	-10 ~40
Temperatura de estagnação (°C)	-20~50
Range de velocidade do Rotor (rpm)	5~14
Velocidade eólica nominal (m/s)	11-12
Ciclo	20
Peso do Rotor (ton)	100
Peso do cubo (ton)	47
Peso da gôndola (t)	140

A potência nominal da turbina reduz bastante o número de turbinas a usar, bem como a área de instalação.

A Tabela 3.8, apresenta os parâmetros de funcionamento do rotor da turbina escolhida.



Tabela 3.8. Especificações técnicas do Rotor. Fonte: [50]

Especificações do Rotor	
Diâmetro do Rotor (m)	130
Área varrida (m <sup>2</sup> )	13 300
Número de pás	3
Inclinação do Rotor (°)	6
Ângulo de cone do Rotor (°)	5,5

Note-se que o diâmetro da turbina é um parâmetro bastante importante, pois está directamente ligado a área varrida, o que indica também a quantidade de energia que pode ser captada e convertida em electricidade.

As características de funcionamento da turbina são apresentadas na figura abaixo:

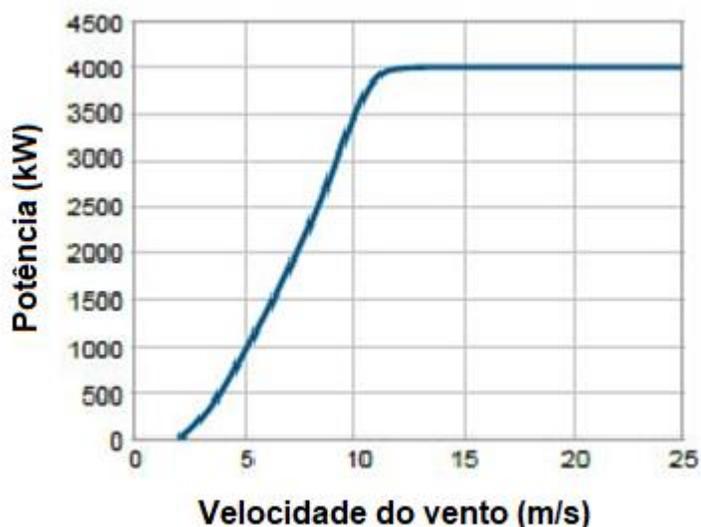


Figura 3.9. Características operacionais (Potência x Velocidade do vento) da Turbina.

Fonte:[50]



### 3.5.2. Energia gerada pelas Turbinas eólicas

As TE são projectadas para gerarem a máxima potência a uma determinada velocidade do vento. Esta potência é conhecida como potência nominal e a velocidade do vento a que ela é atingida é designada por velocidade nominal do vento. Esta velocidade é ajustada de acordo com o regime de ventos no local, sendo habitual encontrar valores entre 12 e 15 m/s. Para a adequação da velocidade do rotor ao gerador eléctrico são usadas caixas de engrenagens multiplicadoras. Dessa forma, a potência eléctrica de saída do TE é dada por: [15]

$$P_e = P \times C_p \times \eta_g \times \eta_m \quad (W) \quad (13)$$

Onde:

$P_e$  - Potência eléctrica na saída da turbina (W)

$P$  – Potência teórica (W)

$C_p$  – Coeficiente de Potência - 0,59. [15]

$\eta_m$  – Eficiência da caixa multiplicadora - 0,96. [15]

$\eta_g$  - Eficiência do gerador eléctrico - 0,95. [15]

A potência teórica, por sua vez, é dada por:

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (W) \quad (14)$$

Onde:

$\rho$  – É a massa específica do ar nas CNTP (kg/m<sup>3</sup>)

$A$  – É a área varrida pelas pás do rotor, sendo 13.300 m<sup>2</sup>.

$v$  – É a velocidade do vento (m/s)

Fazendo as substituições de (14) em (13) ter-se-á:



$$P_e = \frac{1}{2} \rho A v^3 \times C_p \times \eta_g \times \eta_m \quad (W) \quad (15)$$

Sendo nas CNTP,  $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$ , logo, em função da velocidade, a potência eléctrica na saída de cada TE será dada por:

$$P_e(v) = 4294 v^3 \quad (W) \quad (16)$$

Para se obter a energia produzível anualmente é necessário que se conheça a função de densidade de probabilidade de Weibull, dada pela expressão:

$$f = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-2} \times \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (17)$$

Onde:

$f$  - É a função de distribuição de probabilidade,

$k$  - É o factor de forma;

$c$  - Velocidade característica (m/s);

$v$  - Velocidade do vento (m/s)

$k$  e  $c$  dependem do local. A energia produzível anualmente é dada pela Equação (18):

$$E_o = 8760 \int_{v_o}^{v_{MAX}} f(\bar{v}) P_e(\bar{v}) d\bar{v} \quad (Wh) \quad (18)$$

Onde:

$E_o$  - Energia eléctrica produzível anualmente de cada turbina (Wh);

$v_o$  - Velocidade de *cut-in* (partida) (m/s);

$v_{MAX}$  - Velocidade de *cut-out* (paragem) (m/s);

$P_e(\bar{v})$  - Característica eléctrica (potência) do sistema de conversão de energia eólica (W);

$f(\bar{v})$  - Densidade de probabilidade da velocidade média do vento.



Substituindo (16) e (17) em (18) e resolvendo o integral é possível obter a energia gerada pelas TE.

Do Homer Pro, foi obtido o gráfico de características de geração de electricidade a partir do vento ao longo do dia e do ano, e é apresentado na figura abaixo.

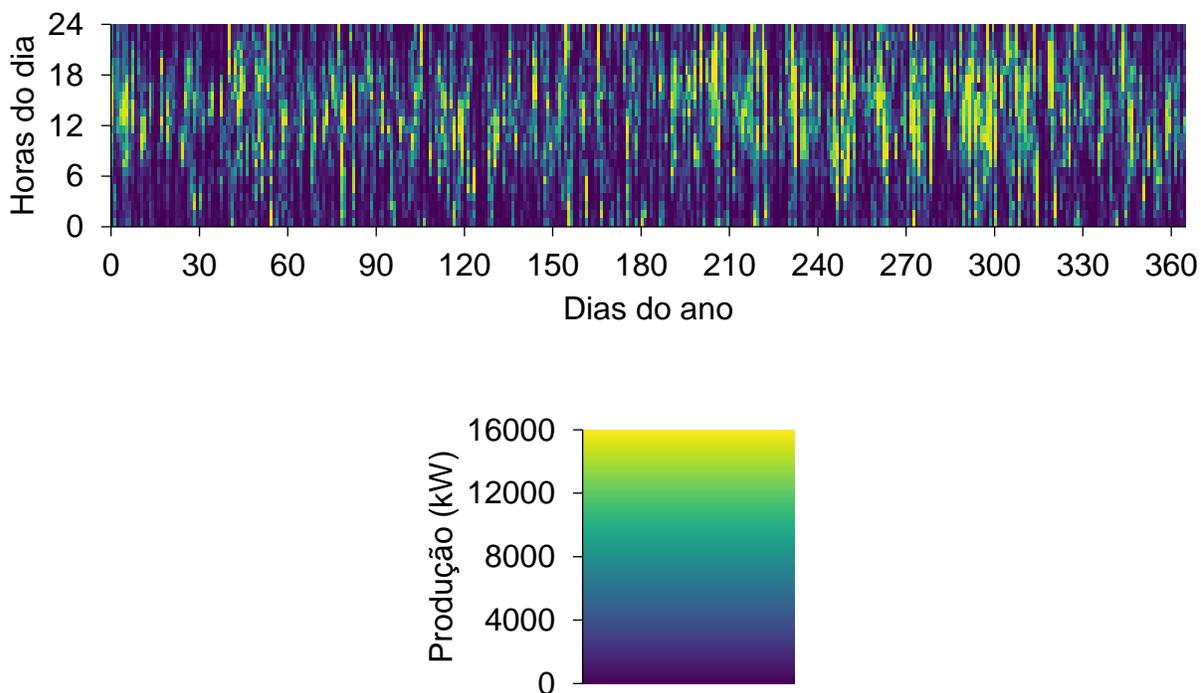


Figura 3.10. Características de geração de electricidade do subsistema eólico.

Fonte:[Adaptado pelo Autor, do Homer Pro]

Como pode-se observar do gráfico da Figura 3.10, as TE geram energia durante o dia todo devido a ocorrência de vento com velocidade suficiente para a produção de energia, o que contribuiu para se gerar a boa parte de potência da instalação através das TE.



#### 4. DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

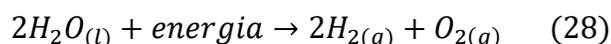
O sistema de armazenamento na forma de Hidrogénio Verde consiste, fundamentalmente, em separar o hidrogénio de outros elementos com os quais forma molécula a partir de electricidade gerada por fontes renováveis e, posteriormente, armazená-lo num tanque nas condições apropriadas para a sua utilização oportuna. [35]

Da energia produzida pelo sistema híbrido, uma parte será para o consumo e a outra para o armazenamento que será feito na forma de Hidrogénio Verde.

##### 4.1. Produção de Hidrogénio via Electrólise

A técnica de electrólise de água para produção de hidrogénio consiste na quebra da molécula da água que é inserida em um sistema contendo dois eléctrodos (ânodo e cátodo) conectados a uma fonte de energia DC. A eficiência deste processo pode ser consideravelmente aumentada com a adição de electrólitos na solução, como um ácido, base ou sal, no entanto, o uso da água salgada suprime o uso de sal ou base. [38]

A equação fundamental que representa este processo é a seguinte [39]:



Às CNTP (1 bar e 298 K), a reacção ocorre sob um potencial de 1,23 V. No entanto, na prática é necessário um potencial maior devido a cinética lenta das reacções de evolução de hidrogénio e reacção de evolução de oxigénio, dessa forma o consumo de energia nesse processo é em torno de 1,5 a 2,5 vezes maior do que o esperado.

Durante a electrólise, no cátodo observa-se a redução do ião Hidrogénio resultando no gás Hidrogénio e no ânodo, a oxidação resultando no gás Oxigénio.

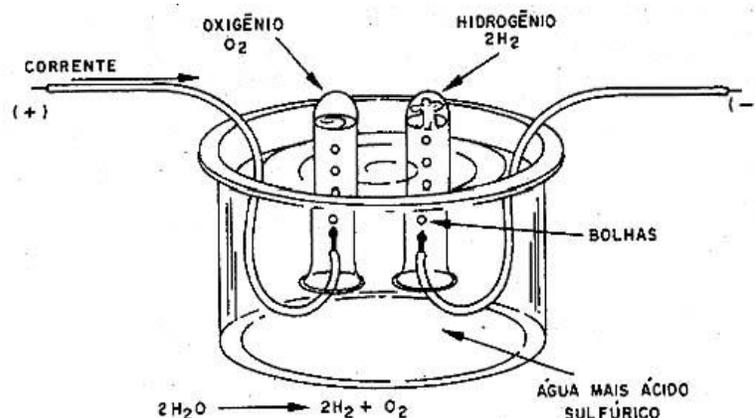
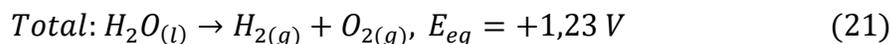
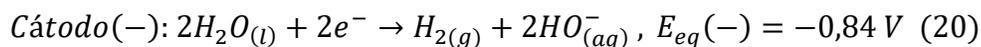
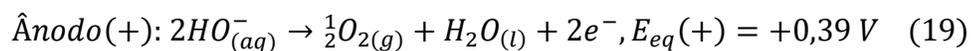


Figura 4.1. Electrólise da água com adição do ácido sulfúrico. Fonte: [49]

Para este caso, a electrólise será feita em um meio básico, desta forma, as reacções são:



Existem fundamentalmente três tipos de electrolisadores, a saber, Alcalino, com Membrana de troca de protões e de Óxido sólido.

A avaliação dos custos dos electrolisadores é apresentada no gráfico da Figura 4.2.

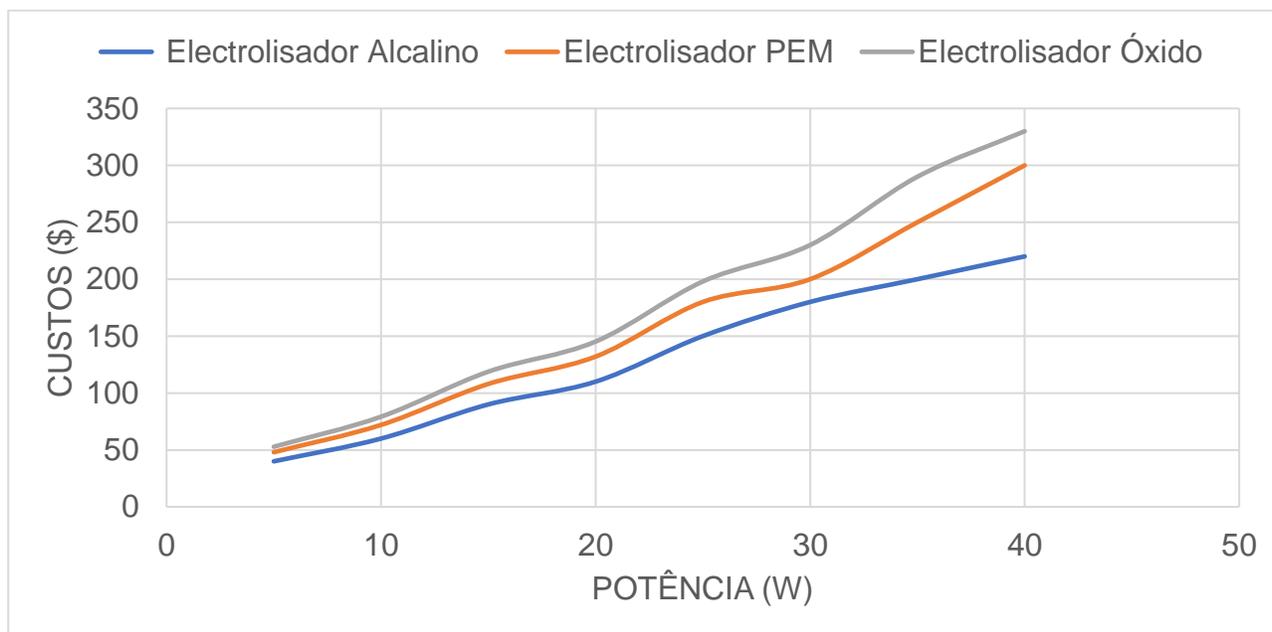


Figura 4.2. Curvas características de custo e potência dos electrolisadores. Fonte: [Adaptado pelo Autor, de [36,50]]

Os electrolisadores mais baratos são os alcalinos por não utilizarem componentes caros na sua construção e os mais caros são os electrolisadores de óxido sólido.

A tabela abaixo apresenta a comparação dos parâmetros operacionais dos electrolisadores apresentados na Figura 4.2.

Parâmetros técnicos	Alcalino	PEM	Óxido sólido
Temperatura (°C)	60-80	50-80	650-1000
Pressão (bar)	< 30	< 70	< 25
Pureza de H <sub>2(g)</sub> (%)	> 99.5	99.99	99.99
Demanda de energia do sistema (kWh/kgH <sub>2</sub> )	50-78	50-83	45-55
$\eta_{\text{electrólise}}$	42-66	40-66	60-74

Figura 4.3. Avaliação dos parâmetros operacionais dos electrolisadores. Fonte: [38]





Tabela 4.1. Especificações técnicas do electrolisador alcalino atmosférico. Fonte:[47]

Parâmetro técnico		Valor
<b>Electrolisador Alcalino Atmosférico</b>		
Taxa de Produção Líquida	Nm <sup>3</sup> /h @ 0°C, 1bar	90 – 190 Nm <sup>3</sup> /h
	Kg/24h	80 – 320 kg/24h
Taxa dinâmica da capacidade de produção		15 – 100% da faixa do fluxo
Consumo de energia na pilha		3,8 – 4.4 kWh/Nm <sup>3</sup>
Pureza de H <sub>2</sub>		99,9 ffl 0.1%
Pureza de H <sub>2</sub> (com purificação opcional)		99,99 – 99,999%
O <sub>2</sub> – conteúdo em H <sub>2</sub>		< 2ppm v
H <sub>2</sub> O – conteúdo em H <sub>2</sub>		< 2ppm v
Pureza de O <sub>2</sub>		99,5 ffl 0,2%
Pressão de entrega		1 – 200 barg
Dimensões		200 m <sup>2</sup>
Temperatura ambiente		5 – 35°C
Electrólito		Solução aquosa de KOH a 25%

A adição do electrólito, que constitui a solução aquosa de KOH é bastante importante neste processo para aumentar a condutividade eléctrica da solução, mas com o uso da água salgada resolve-se o problema da condutividade eléctrica.

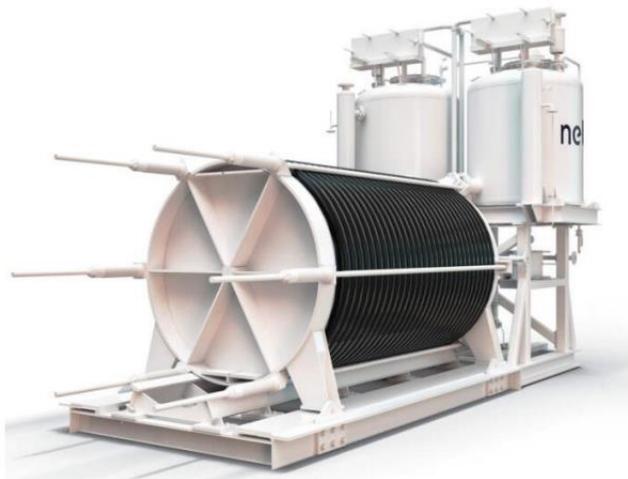


Figura 4.5. Electrolisador alcalino Atmosférico. Fonte: [47]

Considerando a radiação no local as características de produção de hidrogénio são mostradas na figura abaixo.

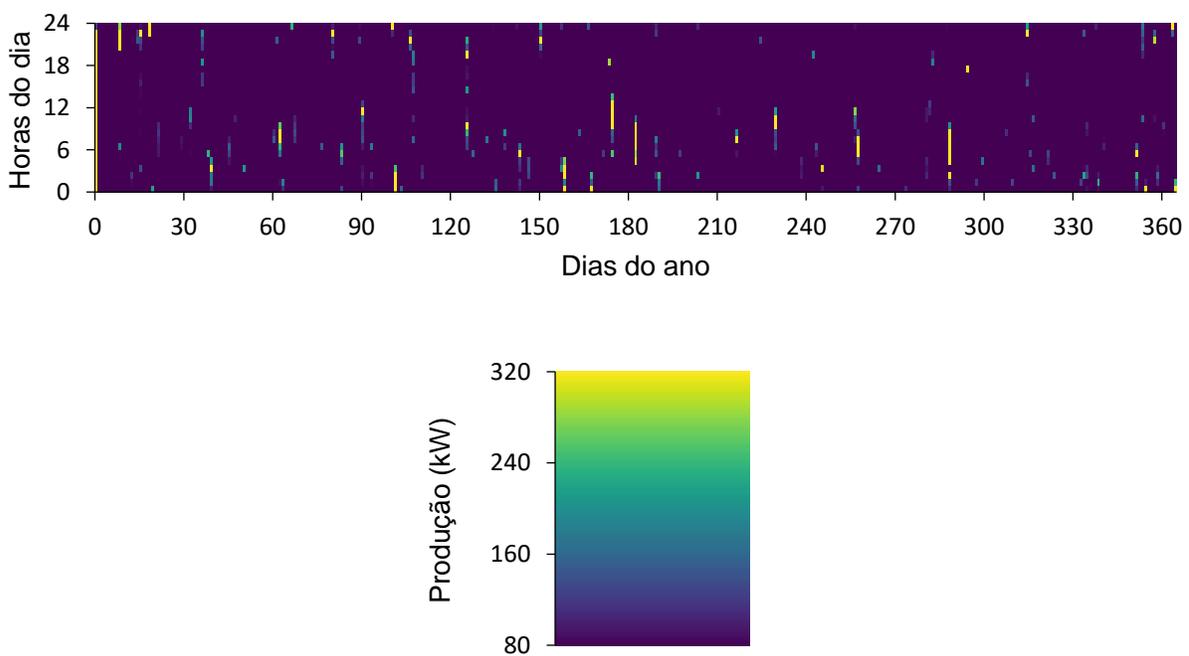


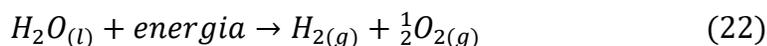
Figura 4.6. Características de produção hidrogénio. Fonte:[Adaptado pelo Autor, do Homer Pro]



De acordo com o aplicativo informático Homer Pro, os electrolisadores são optimizados para ter a capacidade de 100 kW, sendo usados 5 electrolisadores, visto que durante a noite quando os MF não gerarem energia, as TE poderão gerar, funcionando conjuntamente com as células de combustível. Pode-se observar que um electrolisador gera, no mínimo, aproximadamente 90 kg de hidrogénio diariamente, podendo gerar até 320 kg dependendo da energia fornecida e das condições do local. Desta forma, o sistema gerará, no mínimo, 450 kg de hidrogénio por dia. A quantidade máxima é de 1 600 kg de hidrogénio por dia.

#### 4.2. Quantidade de água necessária para produção diária de Hidrogénio

A equação que descreve o processo de electrólise é:



A quantidade de gás Hidrogénio produzido é conhecida, portanto, usando as relações estequiométricas, tem-se:

$$n(H_2) = \frac{m_{H_2}}{M(H_2)} \quad (mol) \quad (23)$$

Onde  $M(H_2)$  e  $n(H_2)$  são a massa molecular e o número de moles do gás Hidrogénio, respectivamente, em g/mol.

Fazendo-se a relação com a regra três simples, tendo como referência a Equação (22), obtêm-se o número de moles de água.

A massa da água é dada pela Equação (24):

$$m(H_2O) = n(H_2O) \times M(H_2O) \quad (kg) \quad (24)$$

e o volume correspondente, a temperatura ambiente, pela Equação (25):

$$V(H_2O) = \frac{m(H_2O)}{\rho(H_2O)} \quad (l) \quad (25)$$



Neste caso, são necessários,

$$V(H_2O) = 890 \text{ litros}$$

A água será obtida no rio próximo à instalação do projecto e será adicionada água salgada para aumentar a condutividade eléctrica. No local de instalação haverá tanques para armazenamento de água.

### 4.3. Quantidade de Oxigénio produzido

A água é composta por átomos de hidrogénio e de oxigénio, como mostra a Equação (22) Durante a electrólise, ocorre a separação destes elementos de maneira proporcional.

Portanto, nas condições dadas é possível determinar-se a quantidade do gás oxigénio produzido durante a electrólise.

Conhecendo-se o número de moles de Hidrogénio e usando a regra três simples, tendo como referência a Equação (22) pode-se obter o número de moles de oxigénio.

A massa do gás oxigénio é dada pela expressão abaixo:

$$m(O_2) = n(O_2) \times M(O_2) \quad (26)$$

Neste caso, serão produzidos, pelo sistema todo, aproximadamente 860 kg de oxigénio diariamente.

### 4.4. Diagrama de bloco do processo de electrólise

O diagrama de blocos na Figura 4.7 representa, simbolicamente, os fluxos de entrada e saída de cada elemento com vista a tornar claro e perceptível o processo que vai ocorrer durante a produção de hidrogénio.



Na saída, verifica-se o gás hidrogénio, o gás oxigénio que irão para tanques diferentes, ajustados às condições de armazenamento (pressão e temperatura de armazenamento) e o sal que será armazenado e poderá ser comercializado.

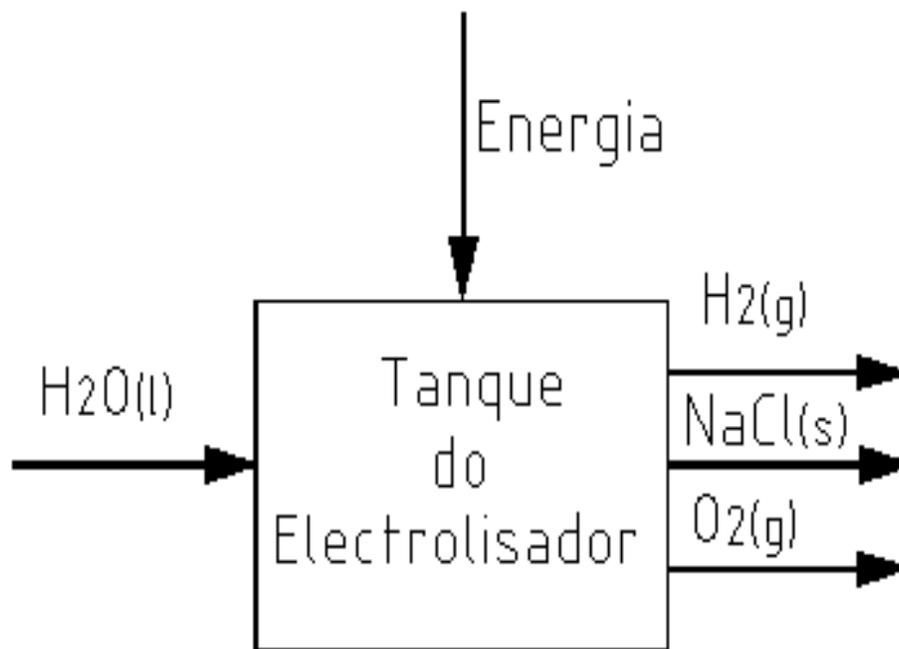


Figura 4.7. Diagrama de bloco do processo. Fonte: [Autor]

#### 4.5. Armazenamento do hidrogénio

O desenvolvimento de tecnologias para armazenamento de hidrogénio é fundamental para evitar as variações entre a produção e o consumo. A busca por rotas mais viáveis economicamente e acessíveis são bastante atraentes para o estabelecimento desse crescente mercado, que com o passar dos anos aumenta a diversidade de aplicação do gás hidrogénio. [44]

Armazenar hidrogénio como gás comprimido ou líquido são as duas opções mais viáveis comercialmente, mas sistemas de armazenamento mais rentáveis ainda têm de ser desenvolvidos. [40]



A forma mais adequada para o armazenamento do hidrogénio, considerando factores como o local, as condições climáticas é o armazenamento na forma líquida.

O armazenamento de hidrogénio líquido é realizado a temperatura de 20 K (abaixo do seu ponto de ebulição), nessa condição criogénica ocorre o aumento da densidade de energia de 2,5 MJ/L para 8 MJ/L, armazenando mais energia por unidade de volume. [44]

Para garantir as condições de armazenamento do produto, baixa-se a pressão do sistema ao invés da temperatura, pois, neste caso, os sistemas de controlo de pressão são de menor custos em relação aos sistemas de controlo de temperatura.

O hidrogénio no estado líquido é armazenado em vasos criogénicos que podem possuir uma região interna revestida de um forro metálico reforçado com fibra de carbono. O armazenamento no estado líquido é o tipo de tecnologia mais indicado para curtos períodos, a fim de evitar o risco de ebulição contínua do hidrogénio, e se em contacto com meio externo, por alguma fractura do material isolante à base do carbono (a baixas temperaturas o carbono torna-se quebradiço) pode resultar em uma faísca ou em algum acidente ao reagir com combustíveis. Ou ainda, pode ser armazenado em tanques cujas condições de armazenamento sejam devidamente estabelecidas. [44]

O sistema de armazenamento de hidrogénio tem a capacidade máxima de 1 740 kg de hidrogénio líquido diariamente, a quantidade mínima armazenada, diariamente, é de, 450 kg. Do Homer, o período de armazenamento deverá ser de 484 horas, que correspondem a 21 dias. No Anexo 8, são apresentados os resultados obtidos do Homer Pro, relativos aos tanques de armazenamento de hidrogénio.

Note-se que os tanques têm a capacidade de armazenamento de 290 kg de Hidrogénio na sua forma líquida, para se determinar o número de tanques faz-se a razão entre a capacidade do sistema pela capacidade de cada tanque, desta forma, são necessários 6 tanques de armazenamento de hidrogénio.

Os tanques de armazenamento de hidrogénio são equipados com sistemas de controlo e monitoramento de pressão.



## 5. APLICAÇÃO DO HIDROGÉNIO E OXIGÉNIO

### 5.1. Hidrogénio

O hidrogénio resultante da electrólise será utilizado no local, para geração de electricidade em períodos em que a demanda se verificar maior que a geração de electricidade pelo sistema híbrido.

Será feita uma análise sobre a quantidade de hidrogénio utilizado para a geração de electricidade e a quantidade do excedente, para comercialização do mesmo, quer para a geração de electricidade, quer para uma outra aplicação na qual se mostrar conveniente.

Na utilização local de hidrogénio para gerar electricidade serão usadas células de combustível.

#### 5.1.1. Célula de Combustível

As células de combustível são dispositivos electroquímicos que produzem energia eléctrica (corrente contínua) a partir de reacções redox (oxidação e redução) em que o oxigénio é o agente oxidante e o hidrogénio o agente redutor. As células de combustível fornecem energia eléctrica indefinidamente enquanto forem abastecidas por um combustível. [46]

Segundo (CARVALHO, 2013) citado em [46], as células de combustíveis são de fácil instalação, quer devido às suas dimensões, quer à facilidade de transporte. Comparativamente com as restantes formas de geração de energias “limpas”, as células de combustível não necessitam de condições especiais de instalação, podendo ser instaladas o mais próximo possível dos locais de consumo, reduzindo assim as perdas quer nas redes de transporte, quer nas de distribuição de energia.

Este processo electroquímico baseia-se em três etapas: [46]

1. Junto ao ânodo (eléctrodo negativo) ocorre a oxidação do hidrogénio ( $H_2$ ) com formação de protões ( $H^+$ ), que atravessam o electrólito, e electrões que se deslocam no circuito exterior, segundo a reacção da Equação (27):



2. Junto ao cátodo (eléctrodo positivo) o oxigénio, que é absorvido do ar, sofre uma redução ao receber electrões vindos do circuito externo. Esta movimentação de cargas constitui corrente eléctrica, segundo a reacção da Equação (28):



3. A nível do electrólito, os iões positivos ( $H^+$ ) e os negativos ( $O^{2-}$ ) que surgem das reacções que ocorrem a nível da interface entre eléctrodos e a solução, ligam-se entre si para formar a água, segundo a reacção da Equação (29):



A reacção química global do processo é representada pela Equação (30):



Como pode-se observar na reacção global, usando as células de combustível, não é necessária a queima, o que representa uma grande vantagem, pois reduz custos devido ao uso de fonte de calor. De modo geral, uma célula de combustível tem um princípio de funcionamento contrário ao de um electrolisador.

No período da noite o subsistema fotovoltaico não gerará electricidade, o que significa que neste período deve-se gerar maior quantidade de electricidade a partir das TE e das células de combustível.

De acordo com os resultados otimizados pelo aplicativo informático Homer Pro, a capacidade do sistema de geração de electricidade através das células é de 250 kW. Outros resultados relativos às células de combustível encontram-se na tabela e figura abaixo, respectivamente.



Tabela 5.1. Características de geração de electricidade através das células de combustível. Fonte: [Adaptado pelo Autor, do Homer Pro]

Capacidade	250 kW	Combustível	Hidrogénio armazenado
Tempo de vida operacional	55 anos	Preço do combustível	0 \$/kg
Custo de capital	\$750 000	Custos de manutenção	1 655 \$/ano
Capacidade de cada célula	5 kW	Produção eléctrica	182,5 MWh/ano

A partir dos dados na Tabela 5.1 pode-se constatar que as células contribuirão com a geração de 500 kWh/dia, o que significa que no período da noite o subsistema eólico cobrirá com a grande parte da potência diária, o que constitui vantagem devido à economia do hidrogénio.

As células usadas serão de 5 kW, desta forma, fazendo a razão entre a potência total pela de cada célula, o número de células de combustível é de 50. No Anexo 7.1 mostra-se uma célula de combustível.

### 5.1.2. Diagrama de blocos do processo de células de combustível

Nota-se também que, para além de se obter a energia eléctrica, se obtêm também a água e o calor, que pode ser aproveitado para aquecimento de água ou num outro processo.

As células de combustível serão utilizadas sempre que necessário para complementar o fornecimento de energia do sistema híbrido principalmente na hora ponta, das 18h às 21h.

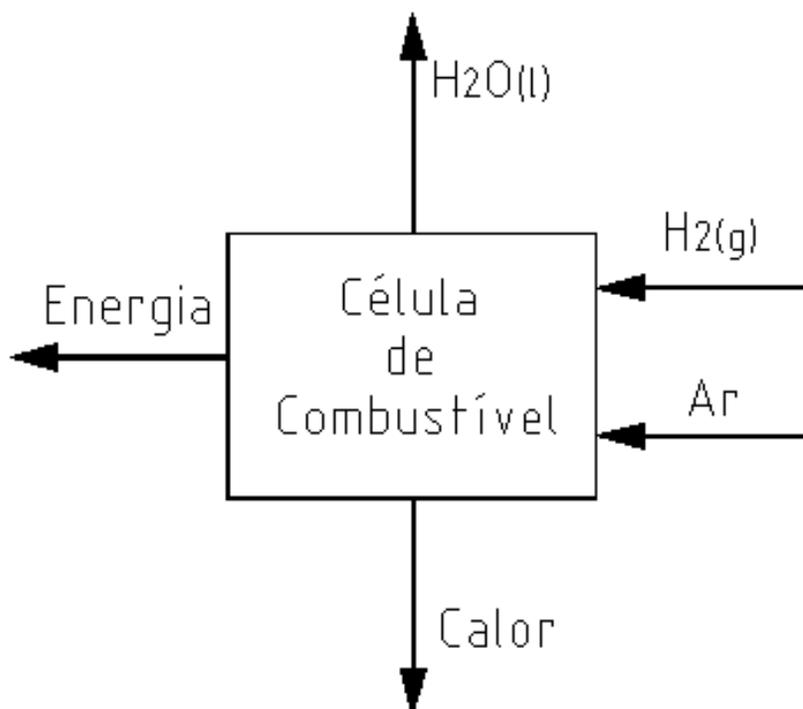


Figura 5.1. Diagrama de blocos para geração de electricidade em uma célula de combustível. Fonte: [Autor]

## 5.2. Oxigénio

O oxigénio obtido da electrólise será comercializado para diversas aplicações, como nos hospitais, na piscicultura, na produção de metais, na purificação de água, bem como na produção de vidros.

Para se aproveitar toda quantidade de oxigénio para aplicações mencionadas, na célula de combustível será usado o ar ao invés do oxigénio resultante da electrólise.

O oxigénio será armazenado na forma gasosa para facilitar a sua aplicação nas áreas mencionadas.



### **5.3. Diagrama de fluxo do processo**

Uma parte da energia produzida será directamente canalizada para o consumo, sendo, primeiro, transformada em corrente alternada pelos inversores DC/AC.

A outra parte, será utilizada para a electrólise da água e obtenção do gás hidrogénio para ser armazenado; Oportunamente, serão usadas células de combustível para a geração de electricidade para o consumo.

Note-se que para o accionamento do sistema de geração de electricidade a partir do gás hidrogénio, haverá um controlo de potência gerada, de modo que, se a potência produzida pelo sistema híbrido for relativamente menor que a estabelecida (necessária para o consumo), o reforço (as células de combustível) seja accionado e gere a potência necessária para compensar, caso contrário, o excedente seja canalizado para o circuito de produção de hidrogénio.

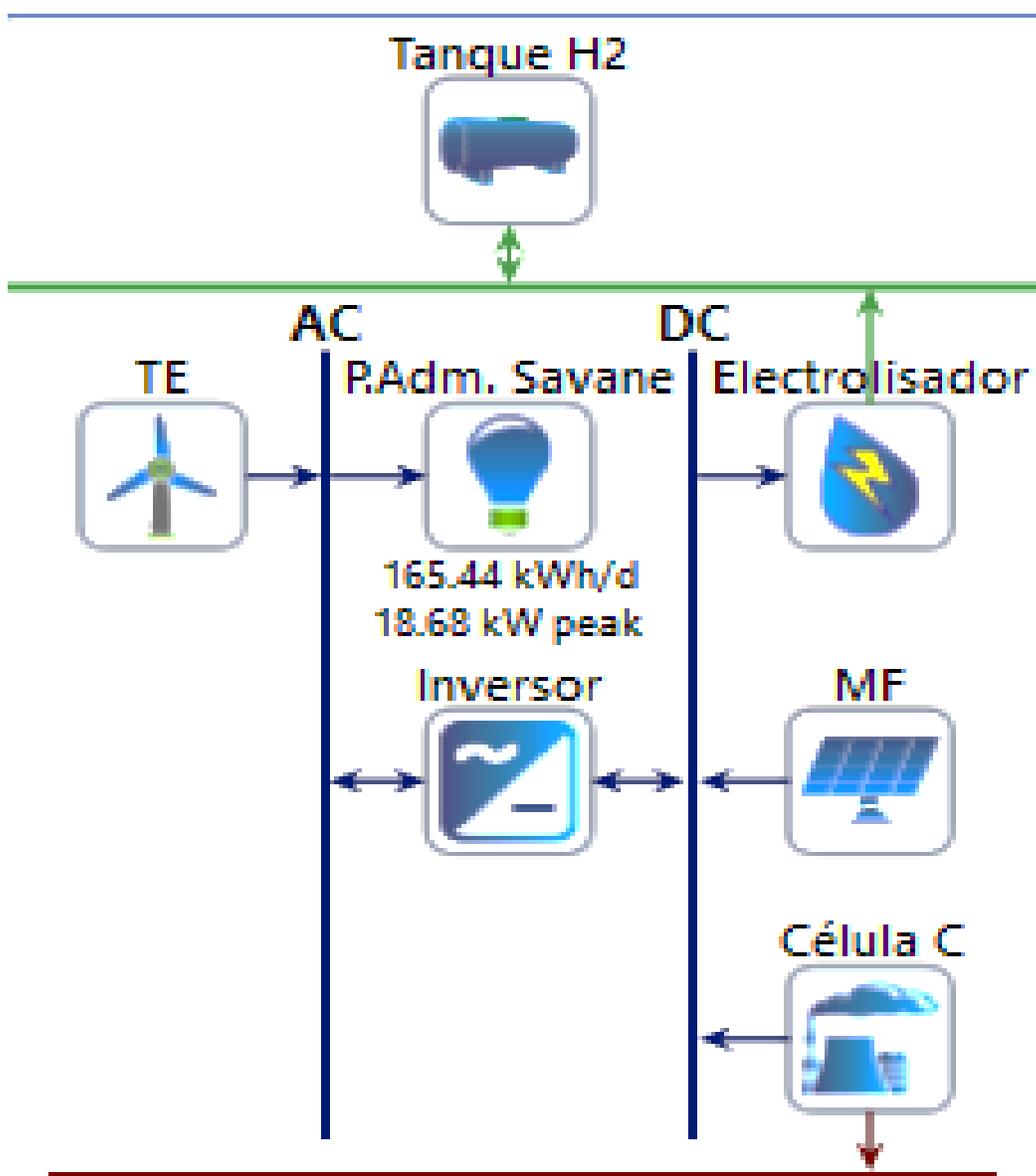


Figura 5.2. Diagrama do fluxo do processo. Fonte: [Adaptado pelo Autor, de Homer Pro]



De acordo com Homer Pro, os resultados relativos à produção de electricidade a partir do sistema todo, são apresentados no gráfico abaixo.

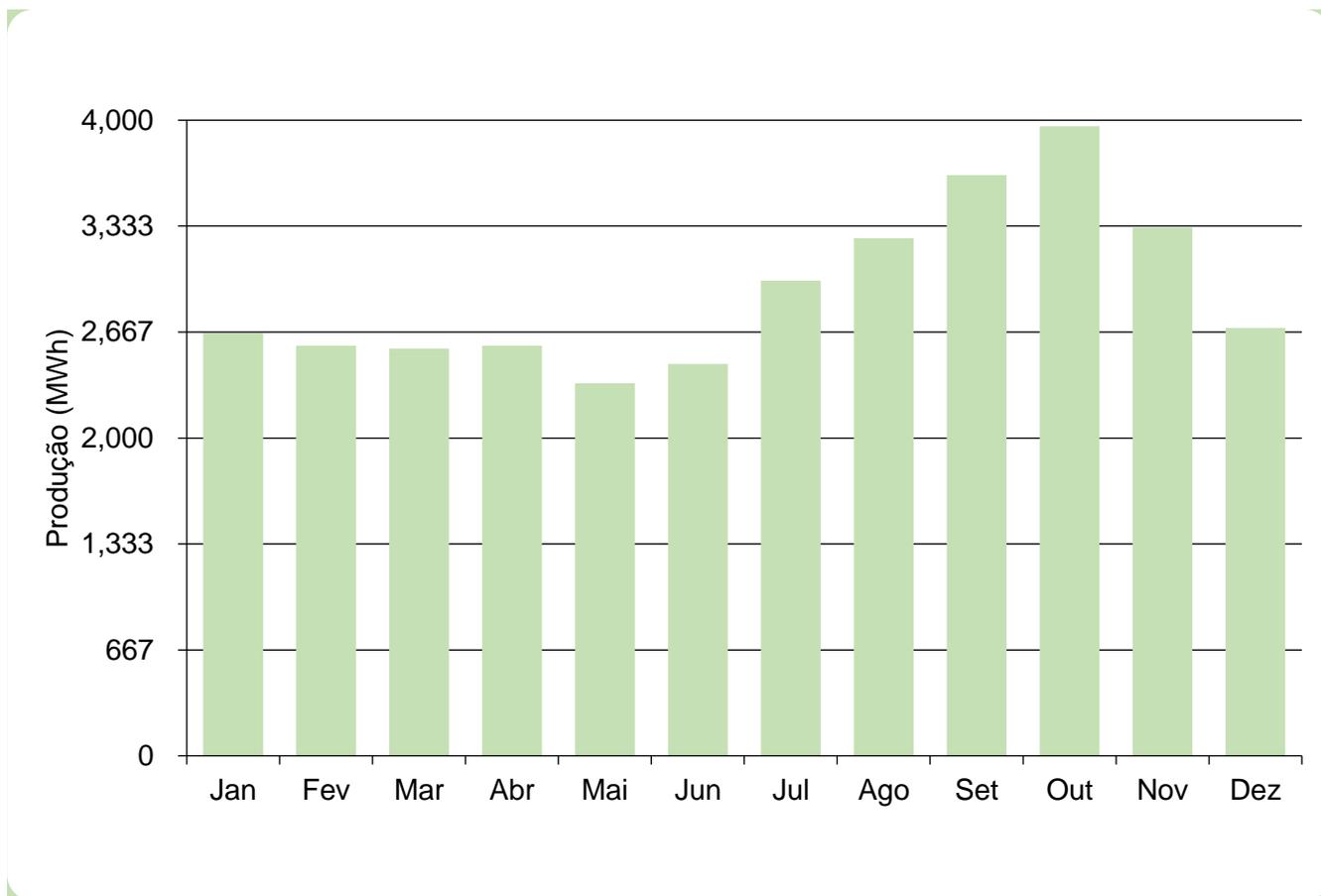


Figura 5.3. Resultados referentes à produção de energia. Fonte: [Adaptado pelo Autor, de Homer Pro]

Das três formas presentes de geração de electricidade, grande parte da energia é gerada pelas turbinas eólicas, isto porque, de acordo com as condições do local, a geração de electricidade foi otimizada para que o subsistema eólico gere maior quantidade de energia. Uma das vantagens do sistema eólico é que a fonte é bastante disponível ao longo do dia.



## **6. AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE DO SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA**

Nesta secção serão avaliados os custos do sistema de armazenamento de energia na forma de Hidrogénio Verde em comparação com o sistema de armazenamento num banco de baterias.

### **6.1. Avaliação económica**

#### **6.1.1. Estimativa de custos para sistema de armazenamento de Hidrogénio**

Para o sistema de armazenamento de hidrogénio serão usados os electrolisadores, os tanques de armazenamento de hidrogénio, de oxigénio, tanque de armazenamento de água, sistema de bombeamento de água e células de combustível.

O local onde será instalado o projecto facilita a aquisição da água, pois está próximo a um rio onde sempre corre água. [31,32]

Do Homer, a avaliação económica, excluindo os custos de transporte são apresentados no Anexo 6.1.

O capital de investimento do SHSE com sistema de armazenamento de Hidrogénio, de acordo com o aplicativo informático Homer Pro, é de 2,2 milhões de dólares, considerando os custos de transportes da China até o local de implantação do sistema, tem-se o custo total de 2,98 Milhões de dólares. Da tabela obtida do Homer Pro apresentada no Anexo 6.1, os custos totais de operação são de \$ 8 236 por ano. Os equipamentos do sistema de armazenamento têm o tempo de vida útil de 55 anos, após este período o seu desempenho baixa consideravelmente. Deste modo, as substituições de tais equipamentos deverão ser feitas de 55 em 55 anos, a um custo de aproximadamente de \$ 1 150 000.



### **6.1.2. Estimativa de custos para sistema de armazenamento de Baterias**

Para avaliação comparativa dos custos e da viabilidade de aplicação do sistema de armazenamento de hidrogénio, foi feito também um estudo do sistema de armazenamento que usa baterias para o mesmo SHSE. O estudo foi feito usando o aplicativo informático Homer Pro. Para a simulação do sistema de armazenamento em baterias o aplicativo informático optimizou o sistema para uso de baterias Li-ion, e os resultados obtidos são apresentados no Anexo 6.2.

O capital de investimento do SHSE com sistema de armazenamento em baterias, de acordo com o aplicativo informático Homer Pro, é de 1,7 milhão de dólares, considerando os custos de transportes da China até o local de implantação do sistema tem-se o custo total de aproximadamente a 2,1 Milhões de Dólares. Da Tabela A6.2 obtida do Homer Pro, os custos totais de operação por ano, em média, são de \$ 7 595,26. Estas baterias têm um tempo de vida útil de 9 anos, após este período o seu desempenho baixa consideravelmente e o seu funcionamento é praticamente insustentável. Deste modo, as substituições deverão ser feitas de 9 em 9 anos, a um custo de aproximadamente \$ 900 000, incluindo custos de transporte.

### **6.2. Análise comparativa entre sistema de armazenamento de hidrogénio e em baterias**

Da avaliação económica feita, pode-se constatar que o investimento inicial, bem como os custos de operações anuais são maiores no sistema de armazenamento de hidrogénio do que no sistema de armazenamento em baterias. No gráfico abaixo são apresentados os resultados da avaliação comparativa dos dois sistemas de armazenamento num período de 75 anos, isto é, até ocorrer a substituição do sistema de armazenamento de Hidrogénio a fim de se avaliar a viabilidade a longo prazo.

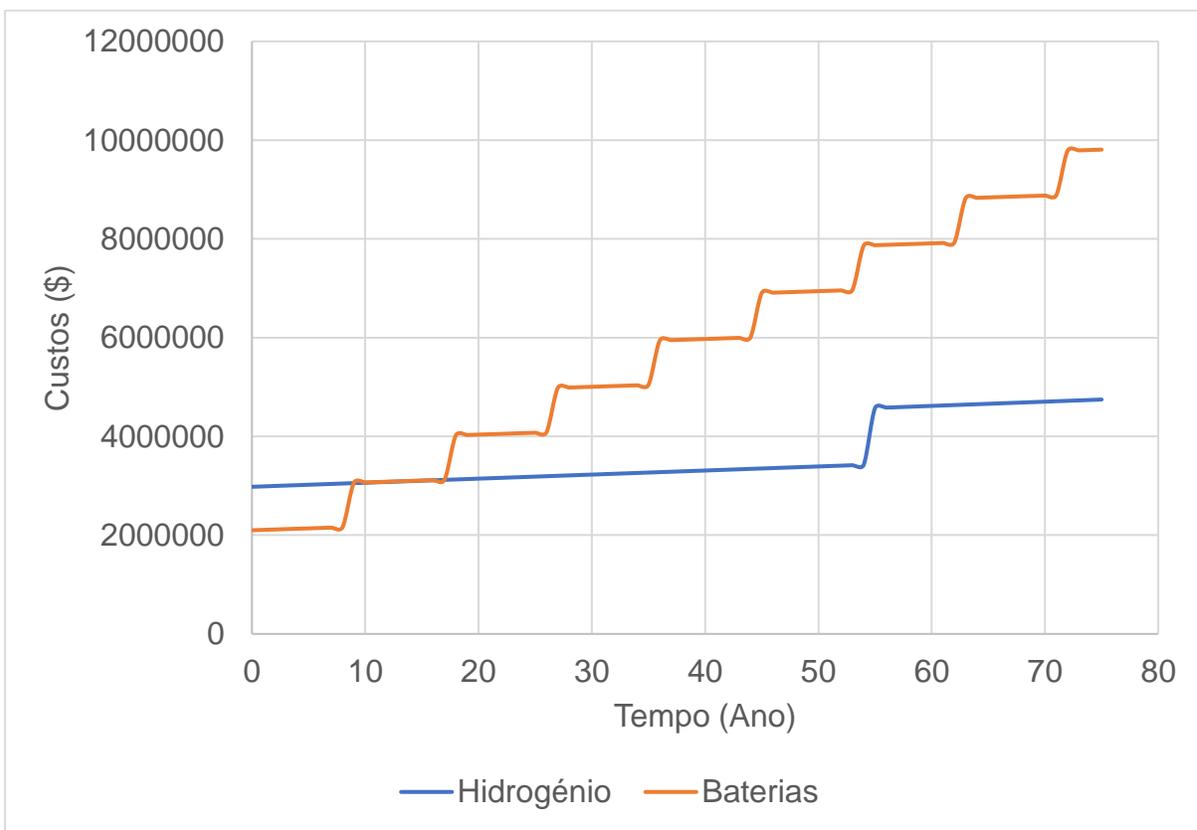


Figura 6.1. Avaliação comparativa dos custos dos dois sistemas com tempo

Fonte: [Autor]

Constata-se que depois de 9 anos, os custos do sistema de armazenamento em baterias superam os custos do sistema de armazenamento na base de hidrogénio.

Na tabela abaixo, faz-se uma avaliação comparativa dos sistemas considerando vários factores.



Tabela 6.1. Análise comparativa dos sistemas de armazenamento de Baterias e de Hidrogénio. Fonte: [Adaptado pelo Autor de [29,32,34,39,40]]

	<b>Hidrogénio</b>	<b>Baterias</b>
<b>Tempo de vida útil</b>	Relativamente alto, ultrapassa 40 anos. [21]	Relativamente baixo, no máximo 15 anos. [44]
<b>Complexidade de instalação</b>	Bastante simples por envolver poucos elementos. [34]	As baterias aumentam a complexidade do sistema de geração. [45]
<b>Custos</b>	Custo de investimento relativamente elevado para pequenas instalações e relativamente baixos para grandes instalações. [21]	Apresenta um alto custo para grandes instalações, torna-se viável para pequenas instalações. [45]
<b>Manutenção</b>	Possível e de fácil manutenção. [38]	Difícil manutenção e outras baterias, dependendo das condições, torna-se impossível de fazer. [45]
<b>Eficiência</b>	Varia de 40 a 69%. [36]	Relativamente alta. [44]
<b>Tempo de armazenamento</b>	Armazena por mais tempo do que o sistema que usa baterias. [21]	Armazenam por menos tempo em comparação com sistema de Hidrogénio. [45]
<b>Tempo de resposta</b>	Rápido. [21]	Rápido. [45]
<b>Tamanho</b>	Ocupam menos espaço. [23]	Para grandes instalações, ocupam muito espaço. [45]
<b>Capacidade de armazenamento</b>	Maior capacidade de armazenamento. [23]	Menor comparando com o sistema de Hidrogénio. [21]



## 7. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Relativamente ao dimensionamento do sistema híbrido e do sistema de armazenamento, são apresentados na tabela abaixo os resultados dos parâmetros do projecto.

Tabela 7.1. Apresentação dos resultados dos parâmetros do projecto. Fonte:[Autor]

Parâmetro	Quantidade
Número de agregados	2 584
Potência total instalada	16,68 MW
Número de MF	680
Número Inversores	100
Número mínimo de MF em um inversor	2
Número máximo de MF em um inversor	14
Área ocupada pelos MF	7 950 m <sup>2</sup>
Número de TE	4
Distância de separação das TE	300 m
Número de electrolisadores	5
Número de células de combustível	50
Número de tanques para Hidrogénio	6
Número de tanques para Oxigénio	8 (armazenado na forma gasosa)
Número de tanques para água	4
Quantidade de Hidrogénio produzido por dia	450 kg/dia
Quantidade de oxigénio produzido por dia	860 kg/dia
Quantidade de água necessária por dia	890 litros



## **8. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

### **8.1. CONCLUSÕES**

Neste trabalho foi feito o dimensionamento de um sistema híbrido solar - eólico com sistema de armazenamento de Hidrogénio Verde, onde foram determinados vários parâmetros que foram apresentados no Capítulo 7. De acordo com as condições do local, a instalação do sistema híbrido solar - eólico é sustentável e verifica-se um óptimo aproveitamento dos recursos energéticos disponíveis.

De acordo com a análise de viabilidade do sistema de armazenamento de hidrogénio em comparação com o sistema de banco de baterias durante um período de 75 anos feita no Capítulo 6, conclui-se que os custos de investimento e de operações são maiores no sistema de Hidrogénio, no entanto, ao longo do tempo, devido às frequentes substituições das baterias, o sistema de Hidrogénio torna-se viável a longo prazo.

Por último, conclui-se também que, para o sistema híbrido de geração de electricidade dimensionado para o Posto Administrativo de Savane, a solução viável do sistema de armazenamento, considerando que a vida do projecto ultrapassa 30 anos, é o sistema de armazenamento na base de Hidrogénio Verde.

### **8.2. RECOMENDAÇÕES**

Para a aplicação do projecto feito, recomenda-se que se tenha informações exactas sobre o local a ser implantado porque a má localização do projecto pode afectar o seu desempenho. Quanto aos parâmetros obtidos, recomenda-se que se faça uma reavaliação dos mesmos com outros aplicativos informáticos, para efeitos de comparação para garantir a confiabilidade dos mesmos, não só, mas também, que sejam avaliados outros parâmetros que influenciam indirectamente o projecto e, por último, que se desenvolvam mais sistemas de armazenamento para aplicação em Moçambique a fim de se aproveitar a energia disponível no país.



## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ROBERTS, Justo José, 2012, Análise De Desempenho De Um Sistema Híbrido De Geração De Energia Solar - eólico-Diesel Considerando Variações Probabilísticas Da Carga E Dos Recursos Renováveis, Guaratinguetá
- [2] ZANIRATO, Leandro Diniz; DE MOURA, Leandro César; CORDEIRO, ThiagoRoberto Nunes, 2011, Técnicas De Bombeamento De Fluídos Aplicando Energia Solar Fotovoltaica, Curitiba, Brasil
- [3] SISTEMAS ENERGÉTICOS, Disponível em [http:// www.nhambiu.uem.mz](http://www.nhambiu.uem.mz) (Acesso em 10 de Maio de 2022)
- [4] HÍBRIDO EÓLICO-SOLAR UNIFICADO (HESU): UMA INOVAÇÃO NO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL disponível em <http://dx.doi.org/10.15202/19811896.2016v21n42p39> (Acesso em 03 de Junho de 2022)
- [5] Proposta de utilização de sistema híbrido eólico/solar de geração de energia em estabelecimentos comerciais na Ilha do Mel-PR Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/330453567> (Acesso em 10 de Maio de 2022)
- [6] ANÁLISE DE SISTEMA HÍBRIDO SOLAR - EÓLICO DE GERAÇÃO DE ENERGIA ON GRID EM ASSENTAMENTO RURAL Disponível <http://www.googleacademico.com> (Acesso em 09 de Maio de 2022)
- [7] GERAÇÃO DISTRIBUÍDA EÓLICA-FOTOVOLTAICA disponível em <https://www.researchgate.net/publication/352667253> (Acesso em 08 de Maio de 2022)
- [8] VALENTE, Miguel Ângelo Silveiro, Caracterização Automática de um Painel Fotovoltaico,2011, Uniersidade Nova de Lisboa, Lisboa



- [9] LOPES, Anderson; SILVA, Energia Eólica, 2006, O Estado Da Arte, Julho, Campina Grande PB- Brasil
- [10] Energia Solar fotovoltaica: Fundamentos, Conversão e viabilidade técnico-econômica Disponível em [https:// gepea.co.br](https://gepea.co.br) (Acesso no dia 10 de Maio de 2022)
- [11] CASTRO, Rui M.G, 2009, Energias Renováveis e Produção e Descentralizada: Introdução a Energia Renovável, 2ª Edição, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa
- [12] CRESESB, 2008, Energia Eólica - Princípios E Tecnologias, Brasil
- [13] Fundo de Energia-FUNAE, 2015, *Atlas de Energias Renováveis de Moçambique*, Estoril.
- [14] ASSOCIAÇÃO LUSÓFONA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS, 2017, Energias Renováveis em Moçambique, Relatório Nacional do Ponto de Situação, 2ª Edição
- [15] LOPES, Anderson; SILVA, Energia Eólica , 2006, O Estado Da Arte, Julho, Campina Grande, PB- Brasil
- [16] Energia eléctrica Disponível em <https://www.iberdrola.com/inovacao/energia-hibrida> (Acesso em 10 de Maio de 2022)
- [17] SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA Disponível em [ahdfm@poli.br](mailto:ahdfm@poli.br) (Acesso em 10 de Maio de 2022)
- [18] ARMAZENAMENTO DE ENERGIA: SITUAÇÃO ATUAL, PERSPECTIVAS E RECOMENDAÇÕES Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/352667253> (Acesso em 08 de Maio de 2022)
- [19] OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM UMA REDE REAL DE DISTRIBUIÇÃO: PERSPECTIVAS DO CONSUMIDOR, DA DISTRIBUIDORA E DO OPERADOR DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO Disponível em [www.ConBRepro. co.br](http://www.ConBRepro.co.br) (Acesso em 08 de Maio de 2022)



- [20] ARMAZENAMENTO DE ENERGIA NA INDÚSTRIA Disponível em [www.ConBRepro.co.br](http://www.ConBRepro.co.br) (Acesso em 08 de Maio de 2022)
- [21] ARMAZENAMENTO ÓTIMO DE ENERGIA Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/352667253> (Acesso em 08 de Maio de 2022)
- [22] DE SOUSA, Adriana Schilive; 2021, Implantação E Análise De Um Sistema Fotovoltaico Conectado À Rede De 10,72 Kwp Com Sistema De Armazenamento De Energia Na UTFPR, Curitiba
- [23] VISÃO GERAL DE TECNOLOGIA E MERCADO PARA OS SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL Disponível em [WWW.abaque.com.br](http://WWW.abaque.com.br) (Acesso em 09 Maio de 2022)
- [24] MINISTÉRIO DA ADMINISTRAÇÃO ESTATAL, 2005, PERFIL DO DISTRITO DO DONDO, PROVÍNCIA DE SOFALA, ed 2005, Dondo, Sofala
- [25] <https://www.edm.co.mz> (Acesso em 09 de Maio de 2022)
- [26] JÄGER, Klaus at all, 2014, Solar Energy, Fundamentals, Technology and Systems, Copyright Delft University of Technology
- [27] DA ROCHA, João P. Do Couto, 2008, Metodologia de projecto de sistemas de produção de electricidade descentralizada baseados em Energia Hídrica, Porto-Portugal
- [28] PRIETO, Arnaldo F. De Giacomo, 2012, Geração De Energia Hidreléctrica: Estudo De Alternativa Sem Barramento Do Rio, Porto Alegre
- [29] Sistema Híbrido Eólico/Solar de Geração de Energia Renovável Disponível em [hptts://www.aprepro.co.br](https://www.aprepro.co.br) (Acesso no dia 10 de Maio de 2022)



- [30] U.S ENERGY INFORMATION AND ADMINISTRATION, 2020 Capital Cost and Performance Characteristic Estimates for Utility Scale Electric Power Generating Technologies, Washington DC, February
- [31] ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICO ECONOMICO PARA INSTALAÇÃO DE UM SISTEMA EÓLICO Disp-nível em [https:// gepea.co.br](https://gepea.co.br) (Acesso no dia 10 de Maio de 2022)
- [32] IMPACTO-PROJECTO E ESTUDOS AMBIENTAL; 2012 Perfil Ambiental E Mapeamento Do Uso Actual Da Terra Nos Distritos Da Zona Costeira De Moçambique, Sofala-Dondo, Julho;
- [33] CANEPPELE, Fernando De Lima; 2007, Desenvolvimento De Um Modelo Fuzzy Para Otimização Da Energia Gerada Por Um Sistema Híbrido (Solar Fotovoltaico E Eólico, Butucatu- SP
- [34] HIDROGÊNIO VERDE: NASCE UM GIGANTE NO SETOR DE ENERGIA Disponível em [http// www. diniz@bnb.gov.br](http://www.diniz@bnb.gov.br) (Acesso em 15 de Junho de 2022)
- [35] BASES PARA CONSOLIDAÇÃO DA ESTRATÉGIA BRASILEIRADO HIDROGÉNIO Disponível em <http://www.epe.gov.br> (acesso em 15 de Junho de 2022).eful
- [36] <https://www.minhacasasolar.com.br/painel-solar> Acesso em 12 de Junho de 2022
- [37] CONSUMIDORES>> Tabela de Consumo dos Aparelhos Disponível em <http://www.eful.com.br/consumidores/tabela-de-consumo> (Acesso em 23 de Junho de 2022)
- [38] PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE AMBIENTALMENTE SUSTENTÁVEL Disponível em <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/47548> (Acesso em 11 de Julho de 2022)
- [39] PROPOSTA DE APLICAÇÃO DO HIDROGÊNIO VERDE VIA ENERGIA EÓLICA NO TRANSPORTE COLETIVO URBANO DE FORTALEZA Disponível em <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/47548> (Acesso em 20 de Julho de 2022)



- [40] GERAÇÃO DE HIDROGÊNIO POR ELECTRÓLISE DA ÁGUA UTILIZANDO ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA Disponível em <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/47548> (Acesso em 20 de Julho de 2022)
- [41] DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS Disponível em <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/47548> (Acesso em 25 de Julho de 2022)
- [43] ESTUDO DE PERDAS EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/352667253> (Acesso em 27 de Julho de 2022)
- [44] NOVAS TECNOLOGIAS E INFRAESTRUTURA DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO – ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM BATERIAS Disponível em <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/47548> (Acesso em 27 de Julho de 2022)
- [45] VANTAGENS E DESVANTAGENS DE USO DE BATERIAS EM SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICO Disponível em <https://www.portal-energia.com/> (Acesso em 27 de Julho de 2022)
- [46] ESTUDO DE SISTEMAS HÍBRIDOS DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E CÉLULAS A COMBUSTÍVEL: UM ESTUDO DE CASO APLICADO AO INSTITUTO FEDERAL DE GOIÁS-CÂMPUS ITUMBIARA Disponível em <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/47548> (Acesso em 27 de Julho de 2022)
- [47] <https://nelhydrogen.com/> Acesso em 26 de Junho de 2022.
- [48] <https://pt.weatherspark.com> Acesso dia 26 de Junho de 2022.
- [49] <https://www.newtoncbraga.com.br> Acesso em 27 de Junho de 2022.
- [50] <https://www.etwinternational.es> Acesso em 05 de Julho de 2022.
- [51] RENEWABLE ENERGY ACCESSORIES, Disponível em <https://www.alibaba.com/> (Acesso em 28 de Julho de 2022).



# ANEXOS



## ANEXOS

## ANEXO 1. ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO MÓDULO FOTOVOLTAICO

Tabela A1. Especificações técnicas do módulo fotovoltaico Fonte: [Homer Pro]

Model	VT-65			VT-80		
<b>Electrical characteristics PV array side</b>						
At nominal battery voltage	12 V	24 V	48 V	12 V	24 V	48 V
Maximum solar power recommended (@STC)	1000 W	2000 W	4000 W	1250 W	2500 W	5000 W
Maximum solar open circuit voltage	75 V	150 V		75 V	150 V	
Maximum solar functional circuit voltage	75 V	145 V		75 V	145 V	
Minimum solar functional circuit voltage	Above battery voltage					
<b>Electrical characteristics battery side</b>						
Maximum output current	65 A			80 A		
Nominal battery voltages	Automatic / manual set to 12, 24 or 48 V					
Operating voltage range	7 - 68 V					
<b>Performances of the device</b>						
Power conversion efficiency (in a 48 V typical-system)	> 99 %					
Maximum stand-by self-consumption (48 V)	25 mA > 1.2 W					
Maximum stand-by self-consumption (24 V)	30 mA > 0.8 W					
Maximum stand-by self-consumption (12 V)	35 mA > 0.5 W					
Charging stages	4 stages: Bulk, Absorption, Float, Equalization					
Battery temperature compensation (available with accessory BTS-01)	-3 mV / °C /cell (25°C ref) default value adjustable -8 to 0 mV / °C					
<b>Electronic protections</b>						
PV reverse polarity	Up to -150 V					
Battery reverse polarity	Up to -150 V					
Battery overvoltage	Up to 150 V					
Over temperature	Protected					
Reverse current at night	Prevented by relays					
<b>Environment</b>						
Operating ambient temperature range	-20 to 55°C					
Humidity	100 %					
Ingress protection of enclosures	IP54, IEC/EN 60529:2001					
Mounting location	indoor					



Tabela A1. Especificações técnicas do módulo fotovoltaico Fonte: [Homer Pro]

General data		
Warranty	5 years	
ISO Certification	9001:2008 / 14001:2004	
Weight	5.2 kg	5.5 kg
Dimensions h/w/l [mm]	120 / 220 / 310	120 / 220 / 350
Parallel operation (separated PV arrays)	Up to 15 devices	
Max wire size	35 mm <sup>2</sup>	
Glands	M 20 x 1,5	
Communication		
Network cabling	STUDER communication BUS	
Remote control & Communication	RCC-02/-03, Xcom-232i / Xcom-LAN / Xcom-GSM / Xcom-SMS	
Menu languages	English / French / German / Spanish	
Data logging	With RCC-02/03, Xcom-232i on SD card · One point every minute	
Accordance to standards		
EU declaration of conformity	<b>Low Voltage Directive (LVD) 2014/35/EU:</b> - EN 50178:1997 <b>Electromagnetic Compliance (EMC) Directive 2014/30/EU:</b> - EN 61000-6-2:2005, - EN 61000-6-4:2007/A1:2011	
Accessories		
Remote control RCC-02 or RCC-03	•	•
Module Xcom-232i	•	•
Communication sets Xcom-LAN / Xcom-GSM / Xcom -SMS	•	•
Battery Status Processor BSP	•	•
2 aux. contacts module ARM-02	•	•
Cooling Module ECF-01	•	Included
Battery temp. sensor BTS-01 (3 m)	•	•
Communication cable CAB-RJ45-8-2	•	•

**ANEXO 2. ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO INVERSOR SOLAR**

Tabela A2. Especificações técnicas do inversor solar. Fonte: [51]

<b>Modelo GS 10.0 RS da SUN GROUP.</b>	
Potência (kW)	1000
Tensão máxima de MPPT (V)	1200
Tensão mínima de MPPT (V)	65
Tensão de partida (V)	59.5
Número de MPPT	2
Peso	10 kg



### ANEXO 3. COMPONENTES DA TURBINA EÓLICA

#### 3.1. Pá da turbina

Pala	
Tipo	B63
Longitud de la pala [m]	63.45
Configuración aerodinámica	DU-97-W-300 aerodinámico patente Siemens
Material de la pala	GRE

Figura A3.1. Características da pá da turbina. Fonte: [50]

#### 3.2. Sistema de controlo

Sistema de paso	
Tipo	Sistema de médula hidráulica
Velocidad de paso [ $^{\circ}$ /s]	7
Cojinete de paso	Esfera de contacto de cuatro puntos

Figura A3.2. Características do sistema passo. Fonte:[50]



### 3.3. Sistema de transmissão

Corrente de transmissão	
Conexão	Rotor Cubo-Eixo do Rotor: Flange;
tipo de engrenagem	3 Estágios Paralelo / Helicoidal
relação de engrenagem para engrenagem	1:119
Sistema de lubrificação de engrenagens	Força
Óleo de engrenagem [L]	~750
filtro de óleo da engrenagem	Sistema de refrigeração de óleo dividido
equipamento de geladeira	Refrigerante óleo-água-vento

Figura A3.3. Características do sistema de transmissão. Fonte: [50]

### 3.4. Sistema de Orientação

Sistema de orientação	
Cara	Sistema de Orientação Ativo
Rolamento do sistema de orientação	rolamentos de transmissão
Motor do Sistema de Orientação	6 conjuntos com motorreductor
Taxa do sistema de orientação [ $^{\circ}$ /min]	21,6 (0,06 rpm)

Figura A3.4. Características do sistema de orientação. Fonte: [50]



### 3.5. Sistema de travagem

Sistema de travagem	
Cara	tipo de passo
freio principal	Frenagem do Propulsor Variável Hidráulica
freio mecânico	Freio de pinça de disco hidráulico com fuso de alta velocidade

Figura A3.5. Características do sistema de travagem. Fonte:[50]

### 3.6. Componentes de Carga

componentes de carga	
Cubo	ferro fundido nodular
rolamento do rotor	rolamento de rolo esférico
Rotor	Liga de aço
chassi dianteiro	ferro fundido nodular
chassi traseiro	Aço
Agulha rotativa (tampa Bypass)	aço/alumínio

Figura A3.6. Componentes de carga. Fonte:[50]



### 3.7. Torre

Torre	
Cara	Cilíndrico
Altura do cubo da roda [m]	90m ou personalizado com base no site
Antisséptico	pintura anticorrosiva
nível de auto-corrosão	Seguindo as normas ISO12944, de acordo com o ambiente do parque eólico
Barril	Aço estrutural
Mesa	T ou L

Figura A3.7. Características da torre. Fonte:[50]

### 3.8. Gerador

Tabela A3.1. Especificações técnicas do Gerador. Fonte: [50]

Tipo	Gerador assíncrono de gaiola de esquilo
Potência nominal (kW)	4.250
Velocidade nominal (rpm)	600 – 1.800
Tensão nominal (V)	750
Frequência de rede (Hz)	50/60
Isolamento	F
Protecção	IP54
Refrigeração	Refrigerante Ar – Ar



### 3.9. Rotor

Tabela A3.2. Especificações técnicas do Rotor Fonte:[50]

Especificações do Rotor	
Diâmetro do Rotor (m)	130
Área varrida (m <sup>2</sup> )	13300
Número de pás	3
Inclinação do Rotor (°)	6
Ângulo de cone do Rotor (°)	5.5

### 3.10. Inversor

Tabela A3.3. Especificações técnicas do inversor. Fonte: [50]

Especificações técnicas do Inversor	
Potência aparente (kVA)	4000
Tensão nominal (V)	690
Frequência (Hz)	50/60
Interruptor	PWM
Tipo de Refrigeração	Refrigeração por água



### ANEXO 4. APLICATIVO INFORMÁTICO HOMER PRO

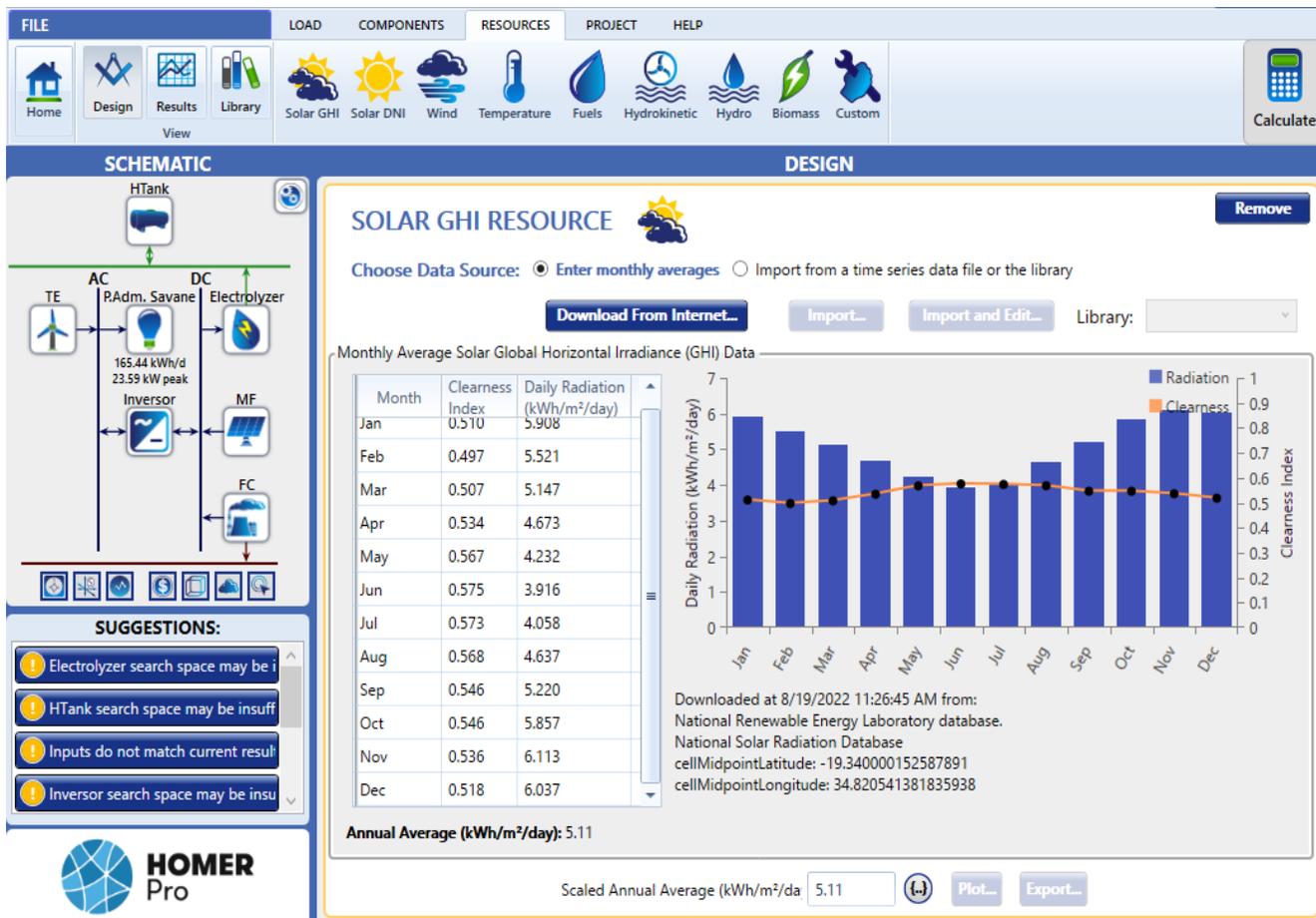


Figura A4. Ilustração do Aplicativo informático Homer Pro. Fonte: [Homer Pro]



## ANEXO 5: DADOS RELATIVOS A DEMANDA DA POTÊNCIA

Tabela A5. Dados anuais da demanda da potência. Fonte:[Adaptado pelo Autor, de Homer Pro]

Hour	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
0	1,000.000	1,000.000	1,000.000	1,000.000	1,000.000	1,000.000	1,000.000	1,000.000	1,000.000	1,000.000	1,000.000	1,000.000
1	1,000.000	1,000.000	1,000.000	1,000.000	1,000.000	1,000.000	1,000.000	1,000.000	1,000.000	1,000.000	1,000.000	1,000.000
2	1,500.000	1,500.000	1,500.000	1,500.000	1,500.000	1,500.000	1,500.000	1,500.000	1,500.000	1,500.000	1,500.000	1,500.000
3	1,500.000	1,500.000	1,500.000	1,500.000	1,500.000	1,500.000	1,500.000	1,500.000	1,500.000	1,500.000	1,500.000	1,500.000
4	1,500.000	1,500.000	1,500.000	1,500.000	1,500.000	1,500.000	1,500.000	1,500.000	1,500.000	1,500.000	1,500.000	1,500.000
5	1,500.000	1,500.000	1,500.000	1,500.000	1,500.000	1,500.000	1,500.000	1,500.000	1,500.000	1,500.000	1,500.000	1,500.000
6	2,000.000	2,000.000	2,000.000	2,000.000	2,000.000	2,000.000	2,000.000	2,000.000	2,000.000	2,000.000	2,000.000	2,000.000
7	3,000.000	3,000.000	3,000.000	3,000.000	3,000.000	3,000.000	3,000.000	3,000.000	3,000.000	3,000.000	3,000.000	3,000.000
8	3,500.000	3,500.000	3,500.000	3,500.000	3,500.000	3,500.000	3,500.000	3,500.000	3,500.000	3,500.000	3,500.000	3,500.000
9	4,000.000	4,000.000	4,000.000	4,000.000	4,000.000	4,000.000	4,000.000	4,000.000	4,000.000	4,000.000	4,000.000	4,000.000
10	4,000.000	4,000.000	4,000.000	4,000.000	4,000.000	4,000.000	4,000.000	4,000.000	4,000.000	4,000.000	4,000.000	4,000.000
11	4,300.000	4,300.000	4,300.000	4,300.000	4,300.000	4,300.000	4,300.000	4,300.000	4,300.000	4,300.000	4,300.000	4,300.000
12	4,300.000	4,300.000	4,300.000	4,300.000	4,300.000	4,300.000	4,300.000	4,300.000	4,300.000	4,300.000	4,300.000	4,300.000
13	5,100.000	5,100.000	5,100.000	5,100.000	5,100.000	5,100.000	5,100.000	5,100.000	5,100.000	5,100.000	5,100.000	5,100.000
14	5,300.000	5,300.000	5,300.000	5,300.000	5,300.000	5,300.000	5,300.000	5,300.000	5,300.000	5,300.000	5,300.000	5,300.000
15	5,800.000	5,800.000	5,800.000	5,800.000	5,800.000	5,800.000	5,800.000	5,800.000	5,800.000	5,800.000	5,800.000	5,800.000
16	6,000.000	6,000.000	6,000.000	6,000.000	6,000.000	6,000.000	6,000.000	6,000.000	6,000.000	6,000.000	6,000.000	6,000.000
17	7,500.000	7,500.000	7,500.000	7,500.000	7,500.000	7,500.000	7,500.000	7,500.000	7,500.000	7,500.000	7,500.000	7,500.000
18	7,900.000	7,900.000	7,900.000	7,900.000	7,900.000	7,900.000	7,900.000	7,900.000	7,900.000	7,900.000	7,900.000	7,900.000
19	7,900.000	7,900.000	7,900.000	7,900.000	7,900.000	7,900.000	7,900.000	7,900.000	7,900.000	7,900.000	7,900.000	7,900.000
20	7,900.000	7,900.000	7,900.000	7,900.000	7,900.000	7,900.000	7,900.000	7,900.000	7,900.000	7,900.000	7,900.000	7,900.000
21	7,950.000	7,950.000	7,950.000	7,950.000	7,950.000	7,950.000	7,950.000	7,950.000	7,950.000	7,950.000	7,950.000	7,950.000
22	6,000.000	6,000.000	6,000.000	6,000.000	6,000.000	6,000.000	6,000.000	6,000.000	6,000.000	6,000.000	6,000.000	6,000.000
23	4,000.000	4,000.000	4,000.000	4,000.000	4,000.000	4,000.000	4,000.000	4,000.000	4,000.000	4,000.000	4,000.000	4,000.000



**ANEXO 6. CASH FLOW DOS SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA**

Tabela A6.1. Fluxo de caixa para SHSE com Sistema de armazenamento de hidrogénio.

Fonte: [Adaptado pelo Autor, de Homer Pro]

Ano	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fuel Cell	(\$1,000)	(\$1,000)	(\$1,000)	(\$1,000)	(\$1,000)	(\$1,000)	(\$1,000)	(\$1,000)	(\$1,000)	(\$1,000)
Electrolyzer	(\$100.00)	(\$100.00)	(\$100.00)	(\$100.00)	(\$100.00)	(\$100.00)	(\$100.00)	(\$100.00)	(\$100.00)	(\$100.00)
Hydrogen Tank	(\$10.00)	(\$10.00)	(\$10.00)	(\$10.00)	(\$10.00)	(\$10.00)	(\$10.00)	(\$10.00)	(\$10.00)	(\$10.00)
Studer VarioTrack VT-65	(\$6,801)	(\$6,801)	(\$6,801)	(\$6,801)	(\$6,801)	(\$6,801)	(\$6,801)	(\$6,801)	(\$6,801)	(\$6,801)
System Converter	(\$100.00)	(\$100.00)	(\$100.00)	(\$100.00)	(\$100.00)	(\$100.00)	(\$100.00)	(\$100.00)	(\$100.00)	(\$100.00)
TE	(\$225.00)	(\$225.00)	(\$225.00)	(\$225.00)	(\$225.00)	(\$225.00)	(\$225.00)	(\$225.00)	(\$225.00)	(\$225.00)
<b>Ano</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>
Fuel Cell	(\$1,000)	(\$1,000)	(\$1,000)	(\$1,000)	(\$1,000)	(\$1,000)	(\$1,000)	(\$1,000)	(\$1,000)	(\$1,000)
Electrolyzer	(\$100.00)	(\$100.00)	(\$100.00)	(\$100.00)	(\$100.00)	(\$100.00)	(\$100.00)	(\$100.00)	(\$100.00)	(\$100.00)
Hydrogen Tank	(\$10.00)	(\$10.00)	(\$10.00)	(\$10.00)	(\$10.00)	(\$10.00)	(\$10.00)	(\$10.00)	(\$10.00)	(\$10.00)
Studer VarioTrack VT-65	(\$6,801)	(\$6,801)	(\$6,801)	(\$6,801)	(\$6,801)	(\$6,801)	(\$6,801)	(\$6,801)	(\$6,801)	(\$6,801)
System Converter	(\$100.00)	(\$100.00)	(\$100.00)	(\$100.00)	(\$100.00)	(\$100.00)	(\$100.00)	(\$100.00)	(\$100.00)	(\$100.00)
TE	(\$225.00)	(\$225.00)	(\$225.00)	(\$225.00)	(\$225.00)	(\$225.00)	(\$225.00)	(\$225.00)	(\$225.00)	(\$225.00)
<b>Ano</b>	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>24</b>	<b>25</b>					
Fuel Cell	(\$1,000)	(\$1,000)	(\$1,000)	(\$1,000)	(\$1,000)					
Electrolyzer	(\$100.00)	(\$100.00)	(\$100.00)	(\$100.00)	(\$100.00)					



Hydrogen Tank	(\$10.00)	(\$10.00)	(\$10.00)	(\$10.00)	(\$10.00)
Studer VarioTrack VT-65	(\$6,801)	(\$6,801)	(\$6,801)	(\$6,801)	(\$6,801)
System Converter	(\$100.00)	(\$100.00)	(\$100.00)	(\$100.00)	(\$100.00)
TE	(\$225.00)	(\$225.00)	(\$225.00)	(\$225.00)	(\$225.00)



Tabela A6.2. Fluxo de caixa do SHSE com sistema de armazenamento em baterias.

Fonte: [Adaptado pelo Autor, de Homer Pro]

Ano	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ABB PS-BatME2	(\$469.26)	(\$469.26)	(\$469.26)	(\$469.26)	(\$469.26)	(\$469.26)	(\$469.26)	(\$469.26)	(\$469.26)	(\$469.26)
Studer VarioTrack VT-65	(\$6,801)	(\$6,801)	(\$6,801)	(\$6,801)	(\$6,801)	(\$6,801)	(\$6,801)	(\$6,801)	(\$6,801)	(\$6,801)
System Converter	(\$100.00)	(\$100.00)	(\$100.00)	(\$100.00)	(\$100.00)	(\$100.00)	(\$100.00)	(\$100.00)	(\$100.00)	(\$100.00)
TE	(\$225.00)	(\$225.00)	(\$225.00)	(\$225.00)	(\$225.00)	(\$225.00)	(\$225.00)	(\$225.00)	(\$225.00)	(\$225.00)
Ano	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
ABB PS-BatME2	(\$469.26)	(\$469.26)	(\$469.26)	(\$469.26)	(\$469.26)	(\$469.26)	(\$469.26)	(\$469.26)	(\$469.26)	(\$469.26)
Studer VarioTrack VT-65	(\$6,801)	(\$6,801)	(\$6,801)	(\$6,801)	(\$6,801)	(\$6,801)	(\$6,801)	(\$6,801)	(\$6,801)	(\$6,801)
System Converter	(\$100.00)	(\$100.00)	(\$100.00)	(\$100.00)	(\$100.00)	(\$100.00)	(\$100.00)	(\$100.00)	(\$100.00)	(\$100.00)
TE	(\$225.00)	(\$225.00)	(\$225.00)	(\$225.00)	(\$225.00)	(\$225.00)	(\$225.00)	(\$225.00)	(\$225.00)	(\$225.00)
Ano	21	22	23	24	25					
ABB PS-BatME2	(\$469.26)	(\$469.26)	(\$469.26)	(\$469.26)	(\$469.26)					
Studer VarioTrack VT-65	(\$6,801)	(\$6,801)	(\$6,801)	(\$6,801)	(\$6,801)					
System Converter	(\$100.00)	(\$100.00)	(\$100.00)	(\$100.00)	(\$100.00)					
TE	(\$225.00)	(\$225.00)	(\$225.00)	(\$225.00)	(\$225.00)					



## ANEXO 7. COMPONENTES DO SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

### 7.1. Célula de combustível alcalina



Figura A7.1. Célula de combustível alcalina (CCA). Fonte: [51]

### 7.2. Tanques de Hidrogénio



Figura A7.2. Tanques de Hidrogénio. Fonte: [51]



## ANEXO 8. CARACTERÍSTICAS DE ARMAZENAMENTO AO LONGO DO DIA E DO ANOS

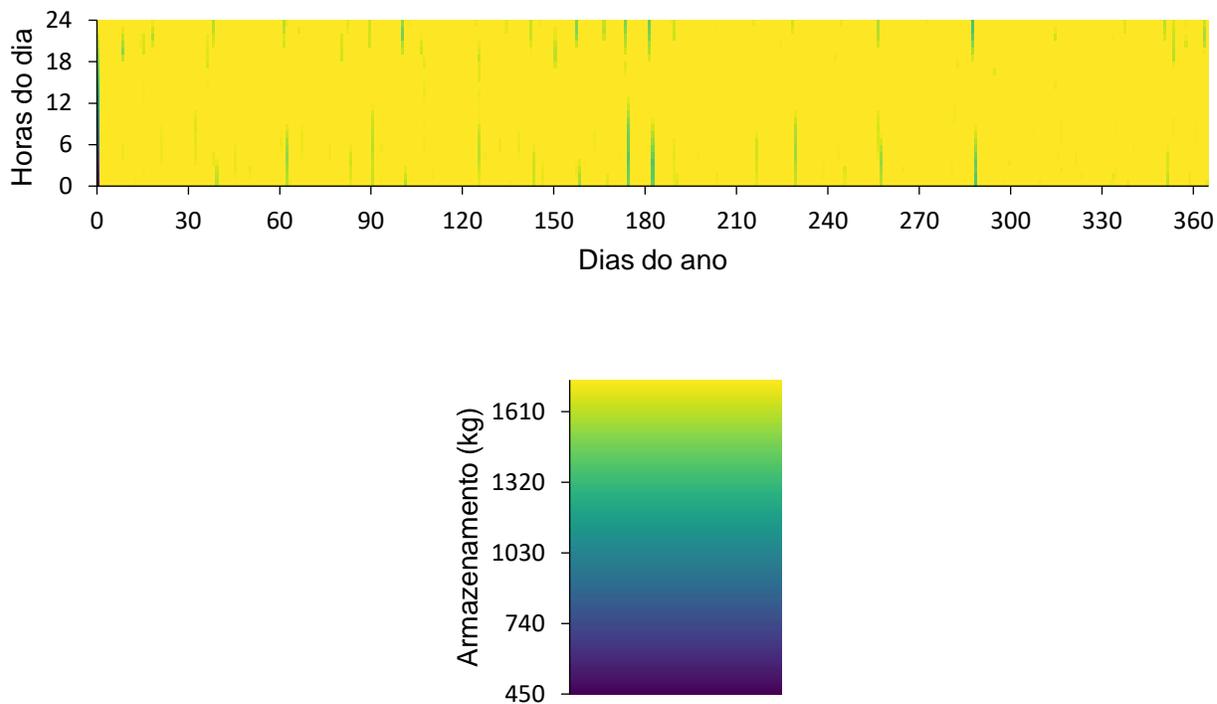


Figura A.8. Características operacionais do sistema de armazenamento. Fonte: [Adaptado pelo Autor, do Homer Pro]



## ANEXO 9. CARACTERÍSTICAS DE VENTO NO LOCAL



Figura A9. Características do vento considerando altura de referência (10 m). Fonte:  
[Adaptado pelo Autor, de Homer Pro]