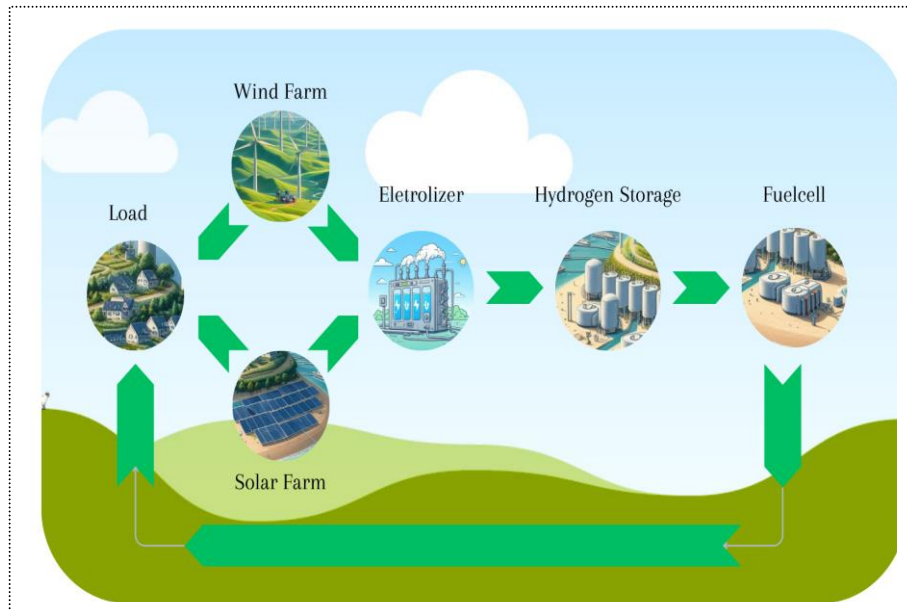




ISEL



Sistema de produção e armazenamento de hidrogénio verde através de microrrede DC

DERIK JORGE SPENCER SOARES
(Licenciado em Engenharia Eletrotécnica)

Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Eletrotécnica, no Ramo de Automação e Eletrónica Industrial

Orientadores:

Doutor Ricardo Jorge Ferreira Luís
Doutor Pedro Miguel Neves da Fonte

Júri:

Presidente: Doutor João Hermínio Ninitas Lagarto
Vogais:

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

Setembro de 2024

Sistema de produção e armazenamento de hidrogénio verde através de microrrede DC

DERIK JORGE SPENCER SOARES
(Licenciado em Engenharia Eletrotécnica)

Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Eletrotécnica, no Ramo de Automação e Eletrónica Industrial

Orientadores:

Doutor Ricardo Jorge Ferreira Luís, ISEL-DEEEA
Doutor Pedro Miguel Neves da Fonte, ISEL-DEEEA

Júri:

Presidente: Doutor João Hermínio Ninitas Lagarto, ISEL-DEEEA

Vogais:

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

Setembro de 2024

Agradecimentos

Este trabalho não teria sido possível sem o apoio inestimável de várias pessoas, às quais expresso minha mais profunda gratidão.

Agradeço, primeiramente, à minha família — especialmente aos meus pais, avós e minha irmã — pelo amor, pela confiança e pelo suporte incondicional, essenciais nos momentos mais desafiadores. À minha companheira, Cynthia Lopes Pinheiro, meu sincero agradecimento pelo apoio constante e pela paciência ao longo desta jornada. Agradeço também à Doutora Neusa Lopes Pinheiro, pelo suporte e pelos conselhos valiosos que tanto contribuíram para meu desenvolvimento.

Expresso ainda minha gratidão aos meus orientadores, Doutor Ricardo Jorge Ferreira Luís e Doutor Pedro Miguel Neves da Fontes, pela orientação, disponibilidade e incentivo contínuo.

Por fim gostaria de agradecer ao engenheiro Emanuel Spencer e à Electra SA pelos dados fornecidos, fundamentais para o desenvolvimento desta dissertação.

Declaração de integridade

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

O autor

Derek Soares

Lisboa, 20 de dezembro de 2024

Sistema de produção e armazenamento de hidrogénio verde através de microrrede DC

Resumo

Esta dissertação de mestrado tem como objetivo principal o estudo e implementação de um sistema de produção e armazenamento de energia, utilizando hidrogénio (H_2) e uma microrrede de corrente contínua (DC). O sistema proposto integra um eletrolisador e uma pilha de combustível para a produção de hidrogénio e eletricidade, com armazenamento do H_2 em garrafas de hidretos metálicos e da energia elétrica em baterias. Esses componentes estão conectados eletricamente por meio de uma microrrede DC, que também se liga à geração fotovoltaica (PV) e a cargas DC. O excesso de produção de energia renovável será convertido em hidrogénio verde através de um processo de eletrólise. A utilização de uma microrrede DC elimina a necessidade de conversões eletrónicas entre DC-AC e AC-DC, aumentando a eficiência geral do sistema. O estudo tem como cenário uma aplicação em Cabo Verde, visando melhorar a estabilidade da rede elétrica, reduzir os custos de eletricidade e diminuir o consumo de combustíveis fósseis.

Palavras-chave: [Armazenamento de hidrogénio, eletrolisador, energias renováveis, hidrogénio verde, pilha de combustível, microrrede DC]

Green hydrogen production and storage system through a DC microgrid

Abstract

This master's dissertation focuses on the study and implementation of an energy production and storage system, using hydrogen (H₂) and a direct current (DC) microgrid. The proposed system integrates an electrolyzer and a fuel cell for hydrogen and electricity production, with hydrogen stored in metal hydride tanks and electrical energy stored in batteries. These components are electrically connected through a DC microgrid, which also interfaces with photovoltaic (PV) generation and DC loads. The excess renewable energy produced will be used to generate green hydrogen via an electrolytic process. The use of a DC microgrid eliminates the need for DC-AC and AC-DC conversions, thus enhancing overall system efficiency. The study is applied to a scenario in Cape Verde, aiming to improve grid stability, reduce electricity costs, and decrease fossil fuel consumption.

Keywords: [Hydrogen storage, Electrolyze, Renewable energy, green hydrogen, Fuel cell, DC microgrid

Lista de Símbolos

E_1	Energia total diária consumida pela instalação (Wh).
E_2	Energia (média diária) produzida pela Fontes de Energias Renováveis (Wh).
E_3	Energia consumida pela instalação que não é coberta pela Fontes de Energias Renováveis (Wh).
E_4	Excedente de energia produzida pelas Fontes de Energias Renováveis (Wh).
E_{g0}	Energia de Gap de Banda do semicondutor (1,1 eV) (Eletrão Volt).
G	Irradiação Solar (W/m^2)
H_0	Capacidade calórica bruta do hidrogénio (10800 kJ/m ³)
H_n	Capacidade calórica Líquida do hidrogénio (12745 kJ/m ³).
i	Corrente de saída do painel fotovoltaico (em A)
I	Corrente do painel fotovoltaico (A)
I_0	Corrente de saturação (A)
I_{ph}	Corrente fotovoltaica (A)
I_{sc}	Corrente de curto-circuito (A)
I_{rs}	Corrente inversa de saturação (A)
I_{sh}	Corrente de derivação (A)
K	Constante de Boltzmann's
k_i	Corrente de curto-circuito de uma célula (A)
n	Fator de idealidade do díodo
N_s	Número de Células Conectadas em serie
P	Pressão em K Pa
R	Constante universal dos gases perfeitos ($N.m.K^{-1}.mol^{-1}$)
R_s	Resistência em serie (Ω)
R_{sh}	Resistência Shunt (Ω)
$T_{celsius}$	Temperatura em graus Celcius ($^{\circ}C$)
T_{kelvin}	Temperatura em Kelvin (K)
T_n	Temperatura de referência (normal) medida em Kelvin (298 K)
V_{oc}	Tensão de circuito aberto (V)
V_t	Tensão térmica do díodo (V)
η_{Dep}	Rendimento do depósito (%)
η_{Eletro}	Rendimento do Eletrolisador (%)
η_{FC}	Rendimento da Pilha de combustível (%)
η_{CP1}	Rendimento do conversor do grupo de energias renováveis (%)
η_{CP2}	Rendimento do conversor da DC/DC (%)
η_{CP3}	Rendimento do conversor DC/AC (%)

ϕ_{H_2} Fluxo molar de hidrogénio ou taxa de produção de hidrogénio (l/h)

ϕ_O Fluxo molar de oxigénio ou taxa de produção de oxigénio (l/h)

Lista de Siglas ou Acrónimos

<i>AC</i>	<i>Corrente alternada (alternated current)</i>
<i>DC</i>	<i>Corrente contínua (direct current)</i>
<i>PV</i>	<i>Fotovoltaico (photovoltaic)</i>
<i>RES</i>	<i>Energia de recursos renováveis (Renewable energy source)</i>
<i>MCH</i>	<i>methylcyclohexane</i>
<i>FER</i>	<i>Fontes de energias renováveis</i>

Índice

1	Introdução.....	1
1.1	Motivação do trabalho	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Enquadramento do trabalho	3
1.4	Estrutura da Dissertação	4
2	Sistemas de Armazenamento de hidrogénio em microrrede DC	5
2.1	Produção de energia através de fontes renováveis	6
2.2	Hidrogénio	8
2.2.1	Produção	9
2.2.2	Armazenamento	11
2.3	Pilhas de Combustível (Fuel Cell).....	13
2.4	Microrrede DC	14
3	Implementação do sistema de hidrogénio.....	17
3.1	Modelação do sistema de energias renováveis	18
3.1.1	Painéis solares:	19
3.1.2	Turbina eólica.....	22
3.2	Dimensionamento.....	23
3.2.1	Dimensionamento do eletrolisador	29
3.2.2	Dimensionamento da Pilha de Combustível	32
3.2.3	Dimensionamento do Depósito de hidrogénio	33
3.2.4	Integração da micro rede DC.....	35
4	Análise de resultados.....	37
4.1	Cenários analisados	37
4.2	Distribuição de Energia.....	37
4.3	Análise dos cenários	39
4.3.1	Cenário do mês de maio.....	39
4.3.2	Cenário do mês de novembro.....	41
4.3.3	Considerações relativamente à eficiência dos equipamentos.....	42
4.3.4	Considerações Finais	43
5	Conclusões	45
	Referências bibliográficas.....	47
	Anexos	51
	Anexo 1 - Ficha técnica da Turbina eólica	51
	Anexo 2 - Ficha técnica do eletrolisador	52

Anexo 3 - Ficha técnica da pilha de combustível	53
Anexo 4 - Ficha técnica do sistema de armazenamento de hidrogénio.....	53
Anexo 5 - Ficha técnica do sistema de armazenamento de hidrogénio.....	54
Anexo 6 - Dados de mês de agosto.....	56
Anexo 7 - Dados de mês de novembro.....	56

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Participação da energia renovável, 2009, 2019 e 2020 [10].	6
Figura 2.2 - Gráfico de Consumo de eletricidade em Cabo Verde [12].	7
Figura 2.3 - Gráfico de produção de energia renovável [12].	8
Figura 2.4 - Nomenclatura de cores de produção de hidrogénio [20].	10
Figura 2.5 - Possíveis rotas para produção e utilização do hidrogénio como vetor energético [4].	10
Figura 2.6 - Funcionamento de uma pilha de combustível [30][23].	13
Figura 2.7 - Interligação entre microrrede e rede principal referenciado em [33].	15
Figura 3.1 - Diagrama de blocos do sistema de geração e armazenamento de energia.	18
Figura 3.2 - Modelo de simulação em Matlab do painel fotovoltaico de 200 W.	19
Figura 3.3 - Bloco do módulo fotovoltaico.	20
Figura 3.4 - Modelo equivalente do painel fotovoltaico.	22
Figura 3.5 - Curva de potência da turbina eólica [40].	22
Figura 3.6 - Modelo de simulação em Matlab da turbina eólica.	23
Figura 3.7 - Produção de Energia em Cabo Verde [12].	23
Figura 3.8 - Repartição de potência das centrais térmicas em são Vicente [12].	24
Figura 3.9 - Balanço de potências para o mês de abril.	25
Figura 3.10 - Balanço de potências para o mês de maio.	25
Figura 3.11 - Balanço de potências para o mês de agosto.	26
Figura 3.12 - Balanço de potências para o mês de novembro.	26
Figura 3.13 - Produção media de energia da central de Matiota para agosto.	27
Figura 3.14 - Balanço de potências para o mês de maio. (8h até 16h).	31
Figura 4.1 - Modelo de simulação em Matlab.	38
Figura 4.2 - Representação do bloco de simulação.	38
Figura 4.3 - Resultados da simulação para o mês de maio.	39
Figura 4.4 - Evolução do tanque de armazenamento para o mês de maio.	40
Figura 4.5 - Resultados da simulação para o mês de novembro.	41
Figura 4.6 - Evolução do tanque de armazenamento para o mês de novembro.	42

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Características das tecnologias de armazenamento de hidrogénio [28] 12

Tabela 2.2 - Características de diferentes tipos de pilha de combustível [31][24] 14

1 Introdução

1.1 Motivação do trabalho

Atualmente a questão ambiental está em foco, e a busca por novas alternativas como fonte de energia é incessante. Visando conter as alterações climáticas e, dessa forma, viabilizar um futuro sustentável para o planeta, é necessário diminuir de forma expressiva as emissões de gases de efeito de estufa, nomeadamente o CO₂. Para isso, torna-se necessário substituir os combustíveis fósseis por fontes de energia renovável.

No futuro da economia energética o hidrogénio tem um papel proeminente como fonte alternativa e mais sustentável de energia limpa, para utilização em pilhas de combustível que podem ser utilizadas na indústria automóvel, e na produção descentralizada de energia entre outros. Porém é necessário encontrar soluções para produzi-lo, armazená-lo e transportá-lo. O hidrogénio, o primeiro elemento da tabela periódica, é o elemento menos complexo e o elemento mais abundante no universo [1].

A busca por conhecimento e novas tecnologias para solucionar os fatos citados e ainda para substituir os combustíveis fósseis pelos combustíveis renováveis tem sido uma constante.

As áreas de produção e sistemas de armazenamento de energias, são áreas em constante inovação, tanto na pesquisa por diferentes fontes de produção ou armazenamento de energia como alternativas que levem a um menor índice de poluição. O hidrogénio pode ser um pilar do armazenamento das energias renováveis e esta é uma área com grande potencial para investigação científica. Uma das formas de armazenamento é baseada em hidretos metálicos que é uma tecnologia de materiais que apresentam um elevado potencial de armazenamento de hidrogénio [2]. São conhecidos pela sua característica única de absorver hidrogénio e de seguida libertá-lo com, ou sem, aquecimento prévio do tanque [3].

Com o objetivo de solucionar problemas de instabilidade na rede, assim como formas de melhorar a eficiência de produção e armazenamento de energia em Cabo Verde, mais especificamente na ilha de São Vicente, optou-se por aprofundar este tema em busca de conhecimento, e soluções que melhor se enquadram no perfil da região. O país está localizado numa zona tropical e com recursos minerais escassos, a utilização de recursos naturais (ex.: vento, sol, energia dos mares, etc.) sendo explorados com uma certa facilidade, demonstra ser uma boa opção.

Este trabalho tem como motivação principal, contribuir para a segurança energética e a redução dos impactos económicos e ambientais provenientes do uso de combustíveis

fósseis importados em Cabo Verde. A segurança energética é evidenciada uma vez que a possibilidade de obtenção de hidrogénio de várias fontes permite privilegiar as fontes locais de cada país, diminuindo ou evitando a importação de energia. Os impactos ambientais também diminuem, já que a utilização do hidrogénio para geração de energia elétrica através de célula a combustível não produz gás de efeito estufa, gerando apenas água como subproduto. As emissões também são significativamente reduzidas na queima do hidrogénio em motores de combustão interna ou queimadores para a geração de calor [4].

1.2 Objetivos

Este trabalho de dissertação é composto pelos seguintes objetivos:

- Produção/armazenamento de hidrogénio a partir de uma fonte de energia renovável em uma microrrede DC;
- Utilização do hidrogénio como um vetor de energia;
- Desenvolver modelo de simulação em Matlab do sistema de energia aplicado ao caso de estudo;
- Avaliar diferentes cenários de produção e armazenamento de energia;
- Analisar os resultados;

Para a implementação de um sistema que faça uso dessas tecnologias, é fundamental realizar uma caracterização dos recursos energéticos disponíveis na região, bem como a caracterização do consumo de energia da demanda. Com essas informações, os componentes do sistema podem ser dimensionados de maneira a garantir uma geração adequada de energia elétrica para a carga e um armazenamento eficiente de energia elétrica.

Para utilizar o hidrogénio como fonte de energia, as células a combustível podem ser empregues para converter o hidrogénio em eletricidade, produzindo apenas água como subproduto. Esse processo é particularmente benéfico do ponto de vista ambiental, uma vez que permite evitar a emissão de gases poluentes.

A implementação de um sistema que integre essas tecnologias requer uma caracterização minuciosa dos recursos energéticos da região, avaliando a intermitência e a intensidade das fontes de energia solar e eólica. Além disso, é essencial caracterizar o perfil de consumo de energia a fim de ajustar o dimensionamento dos componentes do sistema. Com base nesses dados, é possível projetar um sistema equilibrado que garanta a produção de energia suficiente para atender à demanda local e maximizar a

eficiência do armazenamento, assegurando um fornecimento contínuo e confiável de energia.

1.3 Enquadramento do trabalho

Este trabalho está relacionado à produção e armazenamento de energia, com especial atenção ao armazenamento de energia proveniente de fontes renováveis. Prioriza-se o estudo da produção de energia fotovoltaica e o armazenamento de hidrogénio verde para reduzir as emissões de CO₂ e mitigar o impacto económico, reduzindo a importação de combustíveis fósseis.

Cabo Verde, um arquipélago localizado a cerca de 500 km da costa ocidental da África, utiliza principalmente combustíveis fósseis para gerar energia, com apenas uma pequena quantidade proveniente de fontes renováveis. Dito isso, a busca por alternativas de geração de energia de baixo custo e ambientalmente sustentáveis será, portanto, de extrema importância. O uso de recursos naturais locais, como vento e sol, pode ser uma solução viável. No entanto, a geração isolada de energia não é suficiente para garantir a estabilidade do fornecimento estável, especialmente em cenários de instabilidade da rede ou baixa produção de energia. Nesses casos, o armazenamento de energia torna-se essencial, permitindo o uso do excedente como reserva durante períodos de baixa geração.

O armazenamento do excedente de energia produzida é, portanto, uma estratégia para reduzir a instabilidade da rede, sendo o hidrogénio gerado por eletrólise uma opção promissora como vetor energético de armazenamento. Esse sistema possibilita uma operação sem emissões de CO₂, alinhando-se às metas de sustentabilidade ambiental.

Em sistemas de geração de energia renovável, seja por painéis fotovoltaicos ou por turbinas eólicas, várias tecnologias de baterias são aplicáveis para o armazenamento eficiente de energia. Entre essas tecnologias, destacam-se as baterias de Níquel-Cádmio, Níquel-Zinco, Chumbo-Ácido e Iões de Lítio, cada uma com características específicas que conferem vantagens para aplicações distintas [5]. No entanto, em relação à produção e reciclagem, esses sistemas frequentemente apresentam limitações para o que se considera energia verde.

Por outro lado, o hidrogénio oferece uma vantagem adicional em termos de armazenamento de longo prazo, pois evita o fenómeno de descarga lenta observado nas baterias convencionais, podendo ser mais eficaz e estável se bem dimensionado para atender às demandas de armazenamento energético prolongado.

1.4 Estrutura da Dissertação

Este documento está organizado em cinco capítulos e inclui anexos complementares.

No primeiro capítulo, apresentam-se as motivações, os objetivos, o enquadramento e a estrutura deste trabalho.

No segundo capítulo, aborda-se o estado da arte das principais áreas científicas relacionadas a este estudo.

No terceiro capítulo, descreve-se a implementação do sistema de hidrogénio, incluindo o dimensionamento dos seus componentes.

No quarto capítulo, analisam-se os resultados obtidos, com destaque para as principais conclusões e implicações do estudo.

No quinto capítulo, apresentam-se as conclusões gerais, juntamente com propostas e considerações para futuros desenvolvimentos relacionados ao tema.

Por fim, os anexos disponibilizam informações adicionais e detalhamentos técnicos que complementam o conteúdo apresentado nos capítulos principais.

2 Sistemas de Armazenamento de hidrogénio em microrrede DC

Neste capítulo, são apresentados os conceitos teóricos necessários para a compreensão deste projeto. A crescente demanda por fontes de energia renovável, impulsionada pelo impacto ambiental associado ao uso de combustíveis fósseis e pelo aumento dos custos desses recursos, tem tornado a produção de energia sustentável uma opção cada vez mais atraente. No entanto, ainda há desafios a superar, especialmente em relação ao armazenamento de energia.

O artigo [6] aborda os desafios técnicos e operacionais na integração e otimização de sistemas híbridos de energia renovável, destacando o uso do hidrogénio como portador de energia. Entre os principais desafios estão a intermitência das fontes renováveis, a complexidade da gestão de múltiplos vetores energéticos, as limitações dos componentes tecnológicos e a necessidade de ferramentas avançadas de modelagem e otimização. Em [7] compara-se o desempenho de abordagens integradas e não integradas em uma microrrede com altos níveis de fontes renováveis em três cenários de penetração (60%, 80% e 100%) no distrito de Saxony-Anhalt, Alemanha. Embora os resultados indiquem que ambas as abordagens ainda não são lucrativas no mercado atual, conclui-se que a abordagem não integrada é mais adequada para níveis menores de autossuficiência, enquanto a integrada é preferível em níveis mais elevados.

No artigo [8], é proposto um sistema de microrrede para a cidade de Chittagong, Bangladesh, que integra tecnologias de energias renováveis e hidrogénio, utilizando metilciclohexano (MCH) como meio de armazenamento de energia e deslocamento sazonal. A otimização do planejamento diário do sistema é realizada por meio de um algoritmo genético, escolhido devido à sua eficiência na resolução de problemas não lineares com múltiplas variáveis. Essa abordagem permite encontrar soluções otimizadas para minimizar o consumo de combustíveis fósseis e garantir um fornecimento de energia estável. O estudo mostra que o uso de MCH pode reduzir o consumo de combustíveis fósseis em até 32,21% em um típico dia de verão e diminuir as emissões de CO₂ em aproximadamente 11,17 milhões de toneladas por ano, quando comparado a uma microrrede baseada em motores a diesel.

Por fim, o artigo [9] analisa um sistema 100% baseado em energias renováveis e armazenamento em hidrogénio para abastecer um conjunto de microrredes, aplicando um algoritmo genético para gerenciar o sistema de geração, transmissão e consumo. Este algoritmo ajusta o uso do armazenamento conforme o nível de produção e armazenamento disponíveis, variando desde um estado vazio com excesso de

produção até um estado cheio. Simulações de um ano de operação sugerem que o conceito de um sistema inteiramente renovável é promissor.

2.1 Produção de energia através de fontes renováveis

A produção de energia por fontes renováveis, um conceito amplamente conhecido, apresenta grande potencial para mitigar as emissões de CO₂. Apesar de o percentual de energia gerada por fontes renováveis ter aumentado ao longo dos anos, o ritmo desse crescimento ainda está aquém do ideal, como demonstrado na Figura 2.1.

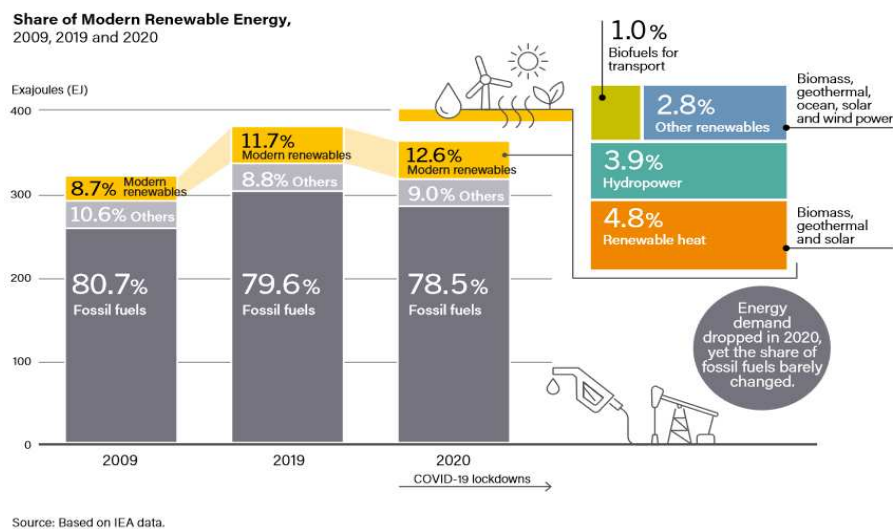


Figura 2.1 - Participação da energia renovável, 2009, 2019 e 2020 [10].

No contexto da exploração de energias renováveis associadas a sistemas de pilhas de combustível, diversos países têm apresentado iniciativas relevantes e resultados positivos. O artigo [11], evidencia que países como Estados Unidos, Japão e Brasil têm implementado tais sistemas em áreas como educação e transporte. Esses esforços buscam não apenas ampliar a conscientização ambiental entre os jovens, mas também inspirar as novas gerações a desenvolver soluções mais eficazes para o combate às emissões de CO₂.

Atualmente, os sistemas de produção de energia renovável mais amplamente utilizados incluem:

- Energias solar: conversão da radiação solar em energia elétrica por meio de painéis fotovoltaicos.
- Energia eólica: transformação da energia cinética do vento em eletricidade utilizando turbinas eólicas (aerogeradores)
- Energia hídrica: aproveitamento da energia potencial das águas, como correntes fluviais e quedas de água, por meio de barragens ou centrais hidrelétricas.

- Energia geotérmica: uso do calor terrestre, como fontes termais e vapores do interior da terra, por meio de centrais geotérmicas.
- Energia dos mares: conversão da energia cinética das ondas e marés em eletricidade por centrais similares às hidrelétricas
- Biomassa: geração de energia por meio da conversão de matéria orgânica em combustíveis, utilizando processos como pirólise, gaseificação ou combustão.

Cabo Verde, devido à sua localização geográfica e características económicas, possui grande potencial para se beneficiar de investimentos nesse setor. A expansão de fontes renováveis pode reduzir sua dependência de combustíveis fósseis importados e promover a produção de energia limpa, alinhando-se às metas globais de descarbonização.

Segundo fontes de empresas da área de energia elétrica¹, atualmente a ilha de São Vicente conta com sete turbinas eólicas pertencentes à empresa Cabeólica, com uma capacidade instalada total de 5,95 MW e produção diária de até 142 MWh em condições favoráveis de vento, além de 3 turbinas eólicas totalizando 0,9 MW sob responsabilidade da empresa Electra SA. De acordo com dados apresentados na Figura 2.2 e Figura 2.3, em 2020, o consumo total de energia elétrica em Cabo Verde foi de aproximadamente 420 GWh, enquanto a produção de energia renovável no mesmo ano atingiu apenas 70,5 GWh (Relatório Anual da Electra SA²[12]).

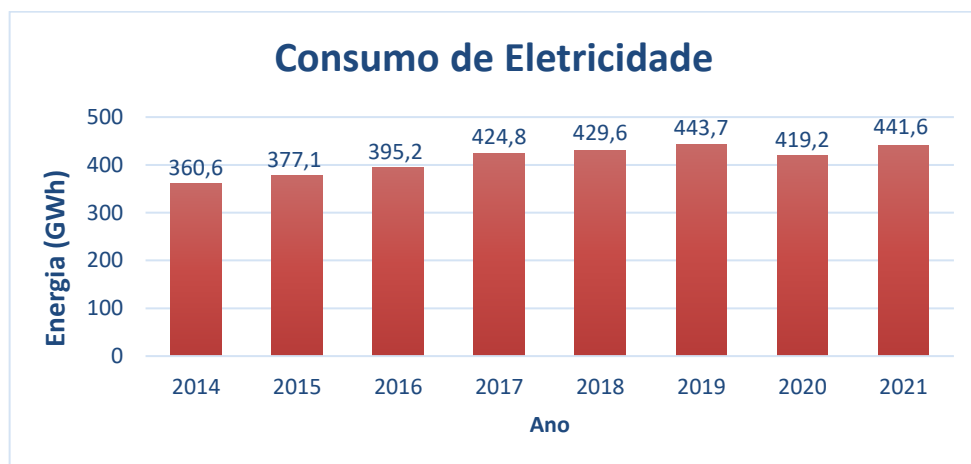


Figura 2.2 - Gráfico de Consumo de eletricidade em Cabo Verde [12].

¹ Dados fornecidos pela empresa Caboeólica da ilha do Sal

² Dados fornecidos pela empresa Electra SA, Electra Norte São Vicente

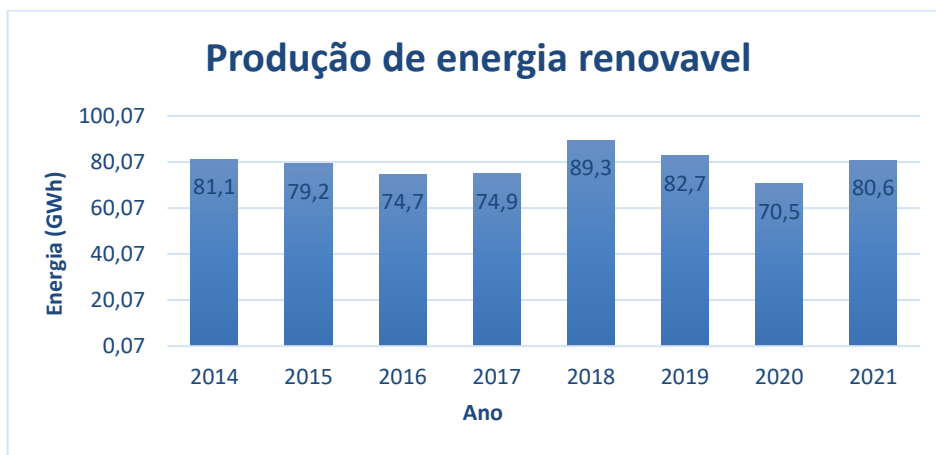


Figura 2.3 - Gráfico de produção de energia renovável [12].

Com o passar dos anos, as técnicas de produção de energia têm se tornado cada vez mais eficientes, e sua crescente popularização tem contribuído para a redução dos custos associados. Embora os resultados obtidos sejam promissores, a gestão de resíduos gerados por componentes das tecnologias de energias renováveis, como as pás de turbinas eólicas, continua sendo um desafio significativo. Estima-se que nos próximos anos haverá um volume substancial de resíduos provenientes desse setor, o que tem gerado debates intensos sobre as possíveis soluções para a sua reciclagem e reutilização [13].

Diversos esforços estão em curso para mitigar este problema. Um exemplo notável é a tecnologia proposta pela empresa *Vestas*, que sugere a desmontagem e o reaproveitamento de pás compostas por epóxi [14]. Outra iniciativa relevante é a da *Regen Fiber*, que desenvolveu um processo de reciclagem para converter as pás em materiais que podem ser aplicados em outros setores, como na construção civil [15]. Em relação aos painéis solares, a reciclagem tem se mostrado uma solução viável, permitindo a reutilização de seus materiais na fabricação de novos painéis solares. Este processo, além de contribuir para a sustentabilidade, pode também gerar oportunidades de emprego no setor de "empregos verdes".

2.2 Hidrogénio

O hidrogénio é o primeiro elemento químico da tabela periódica, identificado pelo símbolo H. Em condições naturais de temperatura e pressão, é encontrado principalmente na forma molecular, como gás diatômico (H_2). Sua combinação mais conhecida é com o oxigénio, formando a molécula de água (H_2O). É um gás inflamável, incolor, inodoro e insípido, que não é encontrado isoladamente na natureza. Para obtê-lo, é necessário empregá-lo em processos específicos, já que geralmente está ligado a outros elementos químicos [16].

Historicamente, o hidrogénio tem sido amplamente utilizado no aprimoramento de combustíveis fósseis, especialmente em processos como hidrogenação e hydrocracking, que aumentam a qualidade dos combustíveis ao remover impurezas, como enxofre e nitrogénio, e reduzem emissões de poluentes. Também é utilizado na produção de amónia (NH_3). Recentemente, no entanto, seu uso como fonte alternativa de energia tem ganhado destaque, especialmente em células de combustível usadas na indústria automóvel e na geração descentralizada de energia. Além disso, o hidrogénio desempenha um papel fundamental como sistema de armazenamento de energia, uma temática que será explorada em detalhes neste trabalho [9][17].

2.2.1 Produção

Ao longo dos anos, houve um avanço significativo nos métodos de produção de hidrogénio, possibilitando o uso de diferentes matérias-primas, como gás natural, carvão, biomassa e até mesmo água, utilizando tanto fontes de energia convencionais quanto renováveis. Essa flexibilidade representa uma vantagem importante, pois permite adequar os processos às disponibilidades locais de recursos e às exigências ambientais, promovendo a eficiência e a sustentabilidade energética, [18]. De forma geral, esses métodos podem ser classificados em dois grupos principais: os que utilizam fontes renováveis, como energia solar e eólica, e os que dependem de fontes não renováveis, como combustíveis fósseis.

Entre os processos que utilizam combustíveis fósseis, destacam-se a reforma do metano a vapor, a reforma do petróleo e da nafta, e a gaseificação de carvão ou biomassa por processos termoquímicos. Já as técnicas baseadas em fontes renováveis incluem a utilização de biomassa (fontes biológicas) e a eletrólise da água [19].

O hidrogénio possui uma nomenclatura de cores dependendo da fonte de energia usada para a sua produção, tal com Figura 2.4:

- Hidrogénio verde: produzido através da eletrólise da água, utilizando eletricidade gerada exclusivamente de fontes renováveis com energia eólica solar ou hidrelétrica. Com o objetivo de reduzir significativamente emissões de CO_2 .
- Hidrogénio cinza: obtido por reforma a vapor (queima de gás natural), resultando na emissão de grandes quantidades de CO_2 .
- Hidrogénio azul: possui o mesmo método de produção que o hidrogénio cinza, mas neste caso o CO_2 é aprisionado e armazenado no solo, gerando menos poluição.
- Hidrogénio turquesa: produzido através da pirólise (divisão térmica) do metano, gerando carbono sólido.
- Hidrogénio rosa: produzido através do uso da eletricidade proveniente de energia nuclear.

- Hidrogénio preto: derivado da gaseificação ou combustão de carvão, resultando em emissões muito elevadas de CO₂ para a atmosfera.

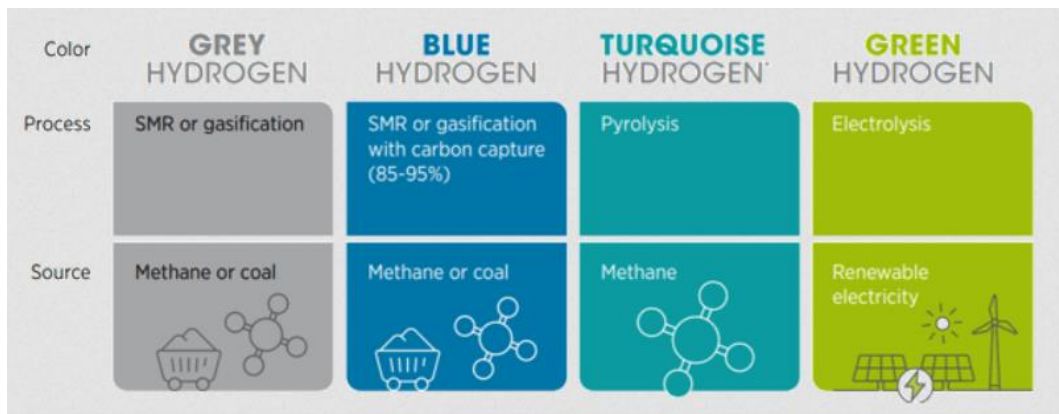


Figura 2.4 - Nomenclatura de cores de produção de hidrogénio [20].

Uma das características mais notáveis do hidrogénio é a sua versatilidade, permitindo que seja produzido a partir de diversos insumos e por meio de diferentes processos. Essa flexibilidade posiciona o hidrogénio como um elemento integrador entre várias tecnologias, como ilustrado nas Figura 2.4 e Figura 2.5.

No entanto, em um futuro sustentável, o papel do hidrogénio como vetor energético estará inevitavelmente associado às energias renováveis. Esse vínculo é essencial para alcançar uma significativa redução das emissões de CO₂, contribuindo para os objetivos globais de descarbonização e para a transição energética.

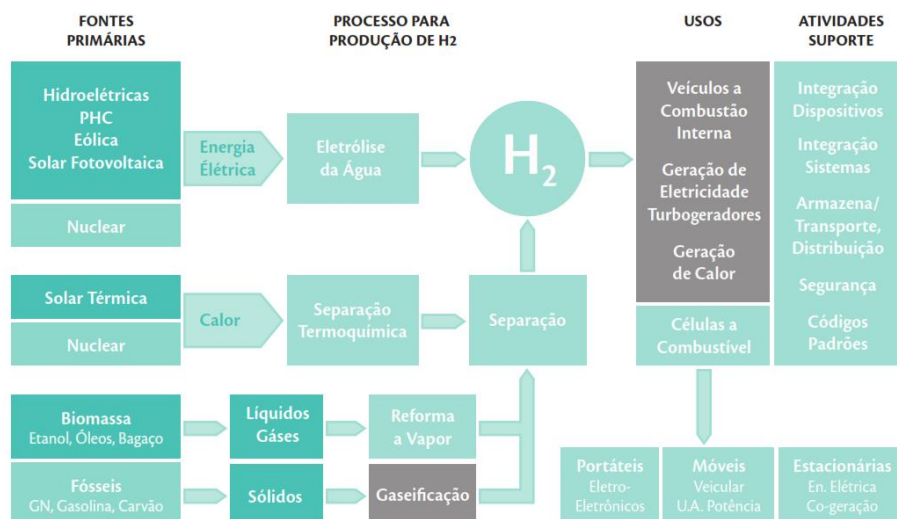


Figura 2.5 - Possíveis rotas para produção e utilização do hidrogénio como vetor energético [4].

2.2.2 Armazenamento

A procura por métodos eficazes de armazenamento de hidrogénio é um dos principais obstáculos para a sua utilização eficiente como fonte de energia [21][22]. Isso ocorre devido ao fato de que o hidrogénio é o elemento mais leve da tabela periódica e possui baixa densidade energética por unidade de volume.

As principais tecnologias mais utilizadas para armazenamento de hidrogénio são: compressão de gás hidrogénio, uso de tanques criogénicos para armazenamento de hidrogénio líquido, adsorção em carbono (um procedimento para reter partículas líquidas ou gasosas em superfícies sólidas) e utilização de hidretos metálicos [18][23][24][25].

De seguida, irão ser expostas as principais características destes métodos:

Gás hidrogénio comprimido: Consiste no armazenamento de gás, utilizando cilindro de alta pressão podendo chegar a 250 bar. Os materiais utilizados para confeção dos cilindros podem ser feitos totalmente de alumínio ou aço, camada fina de aço ou alumínio envolvido em outro composto (ex.: fibra de carbono), ou até mesmo uma camada de plástico resistente envolvido por outro composto resistente.

Tanques criogénicos: Os tanques criogénicos são projetados para armazenar hidrogénio em estado líquido, oferecendo vantagens em relação ao peso e ao tamanho, aspetos que representam limitações nos cilindros de gás comprimido. Esses tanques operam sob pressão relativamente baixa, em torno de 52 bar, mas requerem um isolamento térmico altamente eficiente para manter a temperatura necessária ao armazenamento do hidrogénio.

O hidrogénio líquido não é encontrado naturalmente, sendo necessário resfriá-lo a temperaturas inferiores a $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$, ponto em que atinge seu estado de liquefação.

Hidretos metálicos: Este método baseia-se na capacidade de certos metais de absorver hidrogénio sob condições moderadas de pressão e temperatura, formando hidretos metálicos [26]. Essa tecnologia permite armazenar hidrogénio em alta densidade e em condições de baixa pressão.

As principais aplicações físicas dos hidretos metálicos consistem em:

- **Armazenamento:** Os hidretos metálicos permitem armazenar hidrogénio em alta densidade volumétrica, utilizando a capacidade de certos metais e ligas de absorverem e liberarem hidrogénio sob condições específicas de temperatura e pressão.
- **Compressão:** Podem ser usados para comprimir hidrogénio de forma eficiente, aproveitando as propriedades de absorção e dessorção do gás em ciclos controlados.

- Purificação: Facilitam a purificação do hidrogénio ao separar espécies com diferentes eletroafinidades, um processo baseado nas propriedades seletivas dos metais ao interagir com moléculas de hidrogénio e impurezas.

Adsorção em carbono: A adsorção em carbono consiste em armazenar hidrogénio na superfície de materiais como nano fibras ou nanotubos de carbono poroso. Apesar do grande potencial dessa técnica, especialmente pela eficiência e segurança que oferece, ela ainda enfrenta desafios como os altos custos dos materiais, o que limita sua aplicação prática atualmente.

Neste trabalho, optou-se pelo uso de hidretos metálicos como alternativa para o armazenamento de hidrogénio, considerando aspetos como segurança, eficiência no armazenamento e viabilidade prática [27].

A Tabela 2.1 apresenta as principais características de cada tipo de armazenamento de hidrogénio, as quais são determinantes para a escolha do sistema de armazenamento mais adequado a cada caso de uso.

Tabela 2.1 - Características das tecnologias de armazenamento de hidrogénio [28]

Características	Hidrogénio comprimido	Armazenamento geológico	Hidrogénio líquido	Hidretos metálicos
Capacidade (kWh)	102 - 104	GWh a TWh	105 – 108	10-1 – 5 x 103
Taxa de ciclo	Elevada - minutos	Baixa	Média - horas	Média - horas
Capacidade armazenamento	Elevada	Elevada	Baixa - evaporação	Elevada
Eficiência ^{a)} (%)	100 (s/compressão)	90-95 (c/compressão)	Evaporação (0.3%/dia)	100 (s/sistemas auxiliares)
Densidade gravimétrica (%)	3 – 4.8 (sistema)	n.e.	6.5 - 14 (sistema)	2 – 6.7 (material)
Densidade volumétrica ^{a)} (kWh/m ³)	567 - 1100	58 (a 20 bar)	1166 - 1333	< 5000
Custo ^{b)} (USD/kWh)	6-10	~8	0.8 - 10	> 15
Maturidade	Madura	I&D	Madura	I&D

^{a)} baseado no poder calorífico inferior do hidrogénio; ^{b)} os custos referem-se à saída de energia; n.e. = não especificado

Relativamente ao sistema de armazenamento de hidrogénio, a tecnologia ainda apresenta algumas desvantagens importantes:

- Necessidade de grandes reservatórios: Devido à baixa densidade energética do hidrogénio, são necessários tanques maiores e mais pesados para armazenar quantidades significativas.
- Degradação térmica: Variações de temperatura no processo de armazenamento podem acelerar a degradação dos hidretos químicos, reduzindo sua eficiência.

- Exigência de pureza: O armazenamento requer hidrogénio de alta pureza, pois contaminantes podem comprometer os hidretos, causando perda de capacidade, corrosão e degradação cinética.

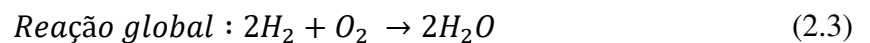
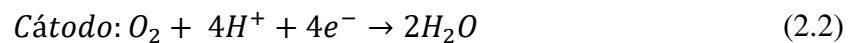
2.3 Pilhas de Combustível (Fuel Cell)

A pilha de combustível é um dispositivo que funciona de forma inversa ao processo de eletrólise, fazendo uso do hidrogénio e do oxigénio do ar para gerar, energia elétrica, energia térmica (calor) e água [29].

Uma célula eletroquímica é capaz de converter energia química em energia elétrica, com o benefício de se poder manter o sistema não poluente uma vez que o processo resume na liberação de vapor de água.

A pilha é composta por um ânodo e um cátodo ambos revestidos por uma camada catalisadora de platina, e separados por um eletrólito. Fazendo a alimentação do combustível (hidrogénio) pelo ânodo e o oxidante pelo cátodo, ocorre as seguintes reações eletroquímicas:

As reações que ocorrem no ânodo, no cátodo e a reação global da célula a combustível são apresentadas nas equações (2.1), (2.2) e (2.3):



A Figura 2.6 ilustra o funcionamento de uma célula a combustível, mostrando as reações que ocorrem no ânodo, no cátodo e a função da membrana eletrolítica na separação de cargas e condução de prótons.

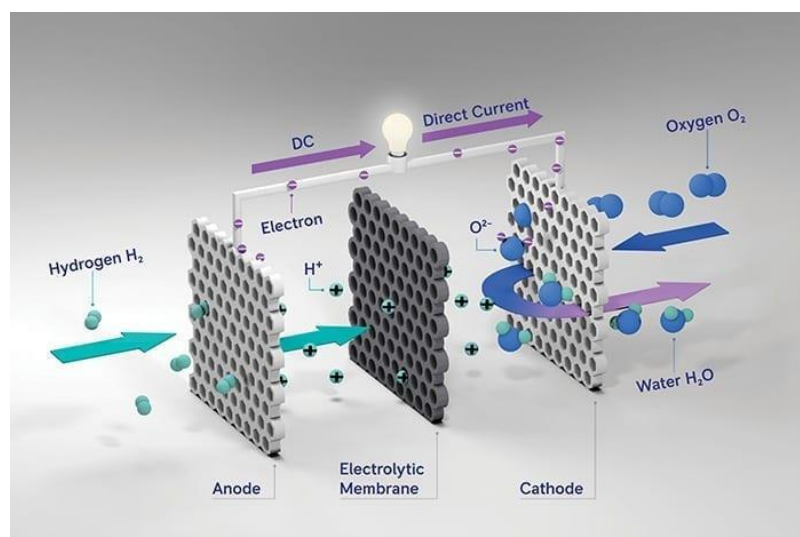


Figura 2.6 - Funcionamento de uma pilha de combustível [30][23].

A Tabela 2.2 apresenta os diferentes tipos de células a combustível, destacando as suas principais características, como o tipo de eletrólito utilizado, a temperatura de operação, a eficiência e a dimensão típica. Essas informações são fundamentais para determinar o uso adequado de cada tipo de célula em diferentes aplicações.

Tabela 2.2 - Características de diferentes tipos de pilha de combustível [31][24]

Tipo de fuel cell	Eletrólito	Combustível	Oxidante	Íon Cond.	Temperatura de funcionamento [°C]	Rendimento eléctrico [% PCI]	Dimensão típica
AFC	KOH (hidróxido de potássio)	H ₂ puro	Ar + H ₂ O (s/CO ₂)	OH ⁻	60 - 90	55 - 60	< 7 kW
PEFC / PEM	Membrana de polímero	H ₂ puro	Ar (s/CO)	H ⁺	70 - 90	35 - 45	5 - 250 kW
PAFC	Ácido fosfórico	H ₂	Ar (s/CO)	H ⁺	200	35 - 45	200 kW
MCFC	Lítio, potássio, carbonato fundido	CH ₄ , H ₂ , CO	Ar + CO ₂	CO ₃ ²⁻	600 - 650	45 - 55	2 - 3 MW
SOFC	Óxidos de Ytria e Zircónio	CH ₄ , H ₂ , CO	Ar	O ²⁻	800 - 1000	45 - 55	Tubular: 100-5000 kW Planar: 50-100 kW

2.4 Microrrede DC

A microrrede DC atua como o elemento central de interligação entre os componentes do sistema, permitindo a integração eficiente de painéis fotovoltaicos e células de combustível, que operam nativamente em corrente contínua. As turbinas eólicas e o eletrolisador, embora operem em corrente alternada, podem ser integrados à microrrede através de conversores AC/DC. Além disso, a microrrede DC desempenha a função de amortecer flutuações energéticas, equilibrando a energia proveniente de fontes renováveis, cuja geração é naturalmente variável e imprevisível [32][25]. Adicionalmente, a utilização de uma microrrede DC reduz a necessidade de conversões eletrônicas desnecessárias, como DC/AC e AC/DC, minimizando perdas no sistema e aumentando a eficiência global.

Uma das principais motivações para a adoção de microrredes é a preocupação com a instabilidade e as vulnerabilidades da rede principal, o que tem gerado um crescente interesse no desenvolvimento de redes autossuficientes [33]. As microrredes, por sua vez, podem operar tanto conectadas à rede principal como de forma isolada (em modo ilha) [34], proporcionando elevada flexibilidade no dimensionamento e na exploração destas redes.

Na Figura 2.7, podem ser observados diversos benefícios associados à utilização de microrredes, tais como:

- Aumento da integração de fontes de energia renovável;
- Aumento da confiabilidade e segurança do sistema;

- Aumento da capacidade de fornecimento de energia em mercados com carência de infraestrutura;
- Criação de um ambiente propício à inovação no setor energético.

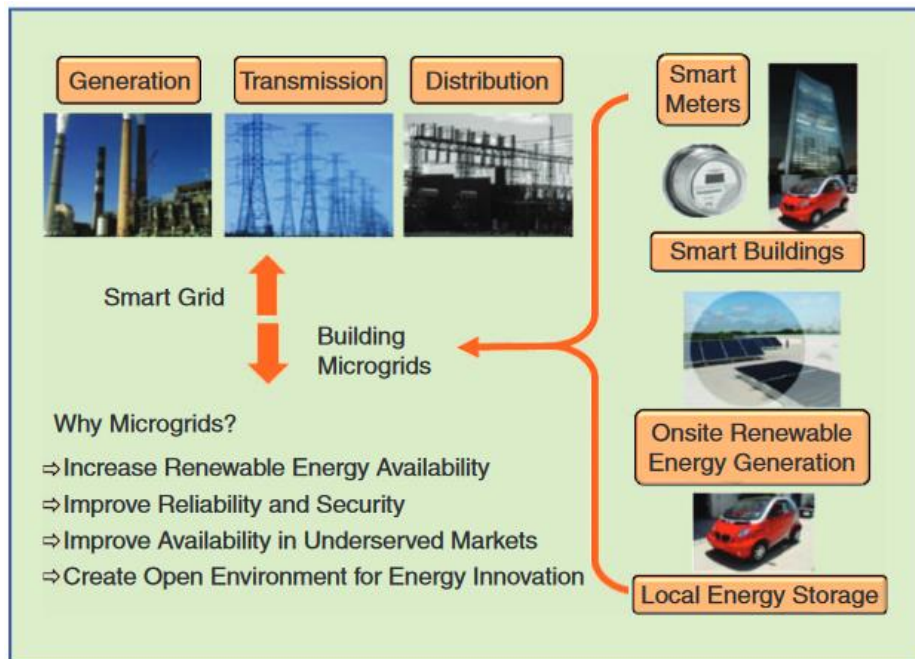


Figura 2.7 - Interligação entre microrrede e rede principal referenciado em [33].

Uma das grandes vantagens também representa um grande desafio. A capacidade de funcionamento integrada à rede principal ou em modo de ilha acaba por criar problemas como, fluxos bidirecionais, transitórios, dessincronização e dificuldade na detecção de correntes de curto-circuito devido a diferença de potência [35].

Outros desafios associados às microrredes incluem:

- Modelagem - As modelagens atualmente utilizadas e dimensionadas para sistemas convencionais não são adequadas para microrredes, devido às suas características específicas [36].
- Baixa inércia - Microrredes frequentemente apresentam baixa inércia, principalmente devido à predominância de fontes intermitentes, o que pode resultar em desvios graves de frequência durante a operação autônoma na ausência de um controle adequado [36].
- Incerteza – A operação de microrredes demanda um planejamento mais detalhado, considerando aspectos como consumo, geração de energia e a taxa de falha dos componentes essenciais [36].

3 Implementação do sistema de hidrogénio

O presente estudo descreve o desenvolvimento de um sistema de geração de energia renovável combinado com um sistema de armazenamento de hidrogénio como vetor energético, integrado a uma microrrede DC. O sistema é composto por painéis solares fotovoltaicos que geram eletricidade a partir da radiação solar, além de um sistema de armazenamento de energia baseado na produção de hidrogénio.

A potência gerada pelos painéis solares é influenciada por variáveis como a intensidade da luz solar incidente, o ângulo de incidência e a eficiência dos painéis. Essa eletricidade alimenta diretamente o sistema ou é utilizada no processo de produção de hidrogénio por meio da eletrólise.

A eletrólise é um processo no qual a água é decomposta em hidrogénio e oxigénio pela aplicação de corrente elétrica contínua, utilizando a eletricidade das fontes renováveis da microrrede. Quando há excedente de produção de energia elétrica, essa energia é direcionada ao eletrolisador, onde é usada para a produção de hidrogénio, que é então armazenado em tanques de hidretos metálicos.

O armazenamento de hidrogénio se destaca como uma alternativa promissora aos sistemas de baterias convencionais, como as de íões de lítio. Ele permite armazenar grandes quantidades de energia em um espaço reduzido e oferece flexibilidade para ser transportado e utilizado em outras aplicações, como combustível para veículos com células de combustível, tornando-o uma fonte de energia versátil e sustentável.

A Figura 3.1 apresenta um diagrama de blocos do sistema de geração e armazenamento de energia em uma microrrede DC. O diagrama destaca os principais componentes do sistema, incluindo a geração de energia renovável, o processo de produção e armazenamento de hidrogénio, e a conversão do hidrogénio em eletricidade. Além disso, ilustra o fluxo de energia entre os subsistemas, desde a geração até a injeção de energia na rede, proporcionando uma visão clara da integração e operação do sistema.

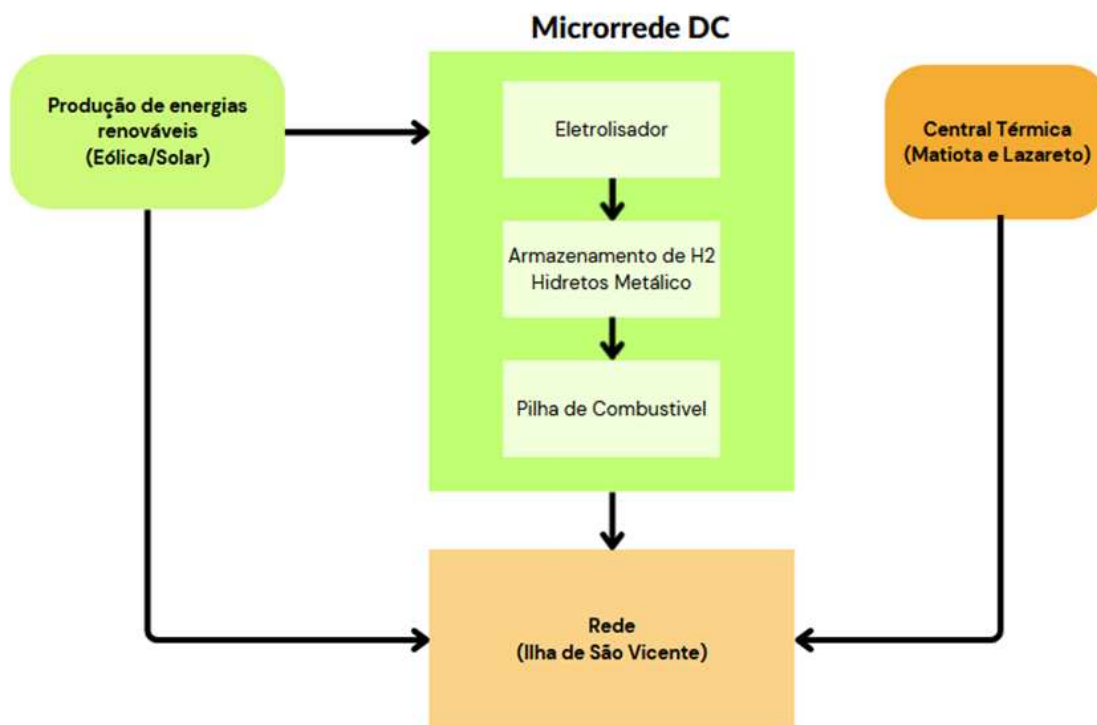


Figura 3.1 - Diagrama de blocos do sistema de geração e armazenamento de energia.

Em suma, o sistema de geração de energia renovável proposto, baseado em hidrogénio, apresenta uma solução viável e eficiente para geração e armazenamento de energia em microrrede de corrente contínua. Além de sua sustentabilidade, a produção de hidrogénio a partir de fontes renováveis contribui para a redução da dependência de combustíveis fósseis e avança em direção a metas globais de descarbonização.

Para este projeto, foram analisados dados de irradiação solar, temperatura, velocidade do vento e consumo energético para a ilha de São Vicente no ano de 2020. Com base nesses dados, dois cenários foram simulados para representar os meses com maior e menor produção de energias renováveis, maio e novembro, respetivamente. Os dados climáticos foram obtidos através da plataforma NSRDB (*National Solar Radiation Database*), enquanto os dados de consumo energético foram fornecidos pela Electra SA, empresa responsável pela distribuição de energia em Cabo Verde.

3.1 Modelação do sistema de energias renováveis

A modelagem matemática desempenha um papel fundamental na análise, otimização e compreensão de sistemas complexos. Neste estudo, concentramo-nos na modelagem do sistema de energias renováveis por forma a obter valores de potência disponibilizados de cada uma das fontes de enérgicas (eólica e solar) com base nos

parâmetros (velocidade de vento, irradiação solar e temperatura) registados na ilha de São Vicente.

3.1.1 Painéis solares:

Para a simulação em Matlab, foi utilizado um modelo de painel fotovoltaico com potência nominal de 200 W, sendo essa potência multiplicada pelo número necessário de painéis para atingir a potência total requerida pela estação fotovoltaica projetada.

O modelo recebe como entradas os valores de temperatura e irradiação solar, e como saídas, os valores de tensão e corrente. Multiplicando esses parâmetros de saída, obtém-se a potência total gerada pelo painel fotovoltaico.

A seguir, são apresentados os principais dados do painel fotovoltaico utilizado na simulação:

- Potência nominal (P_n) – 200 W
- Tensão à potência máxima V_{mp} – 26,4 V
- Corrente à potência máxima I_{mp} – 7,58A
- Tensão de circuito aberto V_{oc} – 32,9 V
- Corrente de curto-circuito I_{sc} – 8,21 A
- Número de células em Serie N_s – 54
- Número de células em Paralelo N_p – 1

A Figura 3.2 apresenta o modelo de simulação do painel fotovoltaico descrito anteriormente.

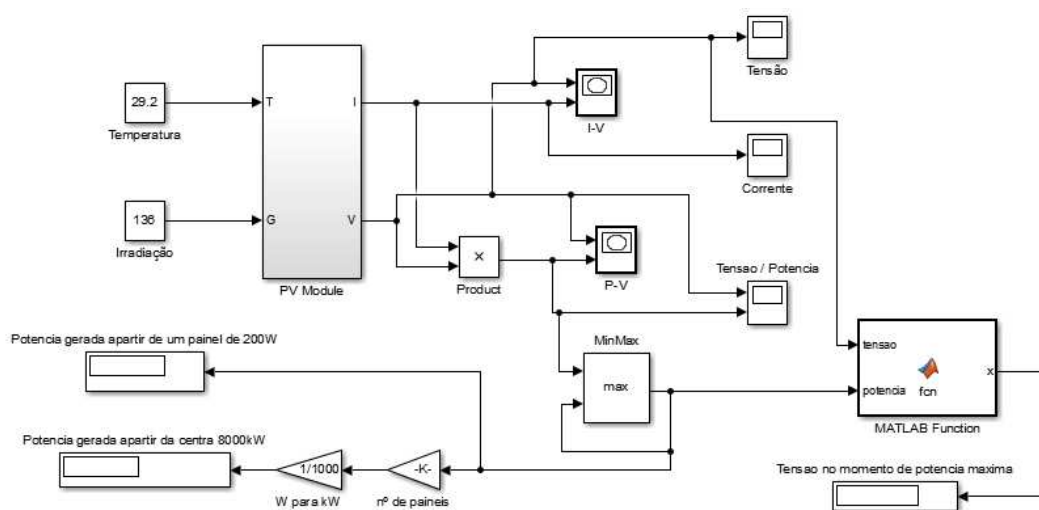


Figura 3.2 - Modelo de simulação em Matlab do painel fotovoltaico de 200 W.

Já a Figura 3.3 ilustra o módulo fotovoltaico incluindo as equações que descrevem seu comportamento e os parâmetros necessários para o cálculo da corrente gerada pelo módulo.

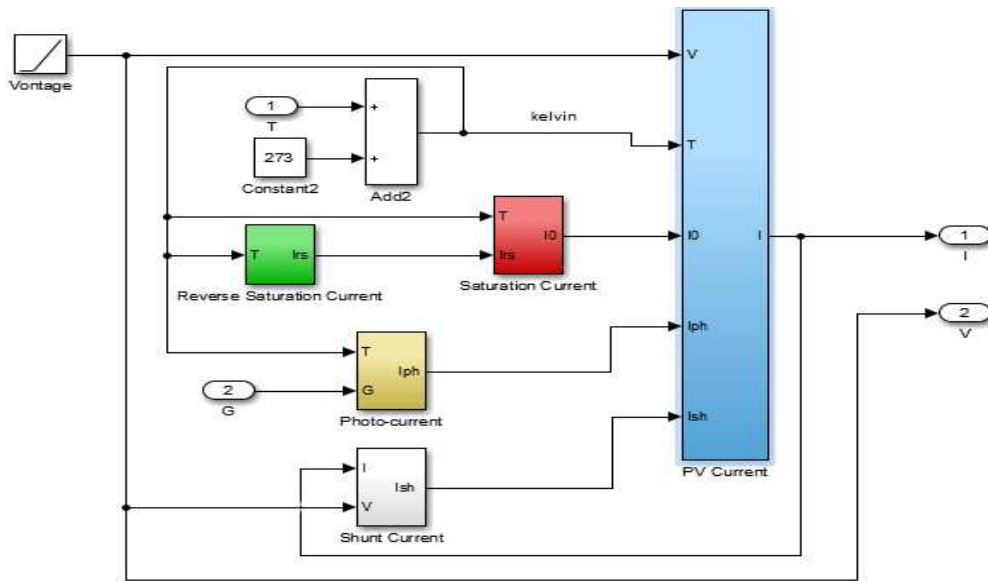


Figura 3.3 - Bloco do módulo fotovoltaico.

Equações do Módulo Fotovoltaico

A corrente de saída do painel i , representada pelo bloco PV Current, é calculada pela Equação (3.1):

$$i = I_{ph} - I_0 \cdot \left[e^{\left(\frac{q \cdot (V - I \cdot R_s)}{n \cdot K \cdot T \cdot N_s} \right)} - 1 \right] - I_{sh} \quad (3.1)$$

Em que I_{ph} é a corrente fotovoltaica (A), I_0 corrente de saturação (A), q carga elementar (C), V tensão do painel (V), I_0 corrente do painel (A), R_s resistência série (0.2210 Ω), n fator de idealidade do díodo, K constante de Boltzmann ((1,38·10⁻²³ J/K)), T temperatura do painel (K), N_s número de células em série e I_{sh} corrente de derivação (A).

A corrente de saturação I_0 representada pelo bloco *Saturation current*, é calculada pela Equação (3.2):

$$I_0 = I_{rs} \cdot \left(\frac{T}{T_n} \right)^3 \cdot e^{\left(\frac{q \cdot E_{g0} \cdot \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right)}{n \cdot K} \right)} \quad (3.2)$$

Em que I_{rs} é a corrente inversa de saturação (A), T temperatura do painel fotovoltaico (°K), T_n temperatura de referência (°K) (298 K, 25°C), q carga elétrica do elétron ($1,6 \cdot 10^{-19}$ C), E_{g0} energia de Gap de Banda do semiconductor (1,1 eV), n fator de idealidade do díodo, geralmente entre 1 e 2 e K constante de Boltzmann's ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K).

A corrente inversa de saturação I_{rs} representada pelo bloco *Reverse saturation current*, é dada pela Equação (3.3):

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{e^{\left(\frac{q \cdot V_{oc}}{n \cdot N_s \cdot K \cdot T}\right)} - 1} \quad (3.3)$$

Em que I_{sc} é a corrente de curto-circuito (A), V_{oc} tensão de circuito aberto (V), n fator de idealidade do díodo, N_s número de células em série, q carga elétrica do elétron ($1,6 \cdot 10^{-19}$ C), K constante de Boltzmann (J/K) e T temperatura do painel (K).

A corrente de derivação I_{sh} representada pelo bloco *Shunt current*, é calculada pela Equação (3.4):

$$I_{sh} = \frac{V \cdot I \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (3.4)$$

Em que I_{sh} é a corrente de derivação (A), V tensão do painel (V), I corrente do painel (A), R_s resistência serie (0,2210 Ω) e R_{sh} resistência shunt (415,405 Ω).

Por fim, a corrente fotovoltaica I_{ph} representada pelo bloco *Photo-current*, é obtida pela Equação (3.5):

$$I_{ph} = [I_{sc} + k_i \cdot (T - 298)] \cdot \frac{G}{1000} \quad (3.5)$$

Em que I_{sc} é a corrente de curto-circuito (A), k_i Corrente de curto-circuito de uma célula a 25°C e 1000W/m², T temperatura de operação (K) e G irradiação solar (W/m²).

Na Figura 3.4 é apresentado o modelo equivalente do painel fotovoltaico que serviu de base para as equações (3.1) a (3.5).

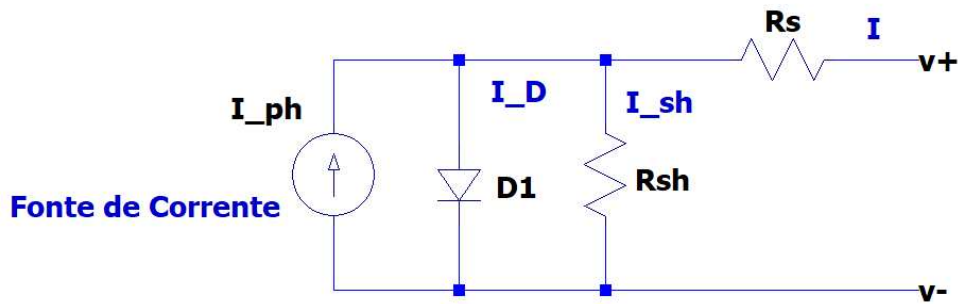


Figura 3.4 - Modelo equivalente do painel fotovoltaico.

3.1.2 Turbina eólica

A modelagem do grupo eólico considerou a curva de potência de uma turbina Enercon E-126 EP4 de 4,2 MW (ver anexo 1) conforme ilustrado na Figura 3.5.

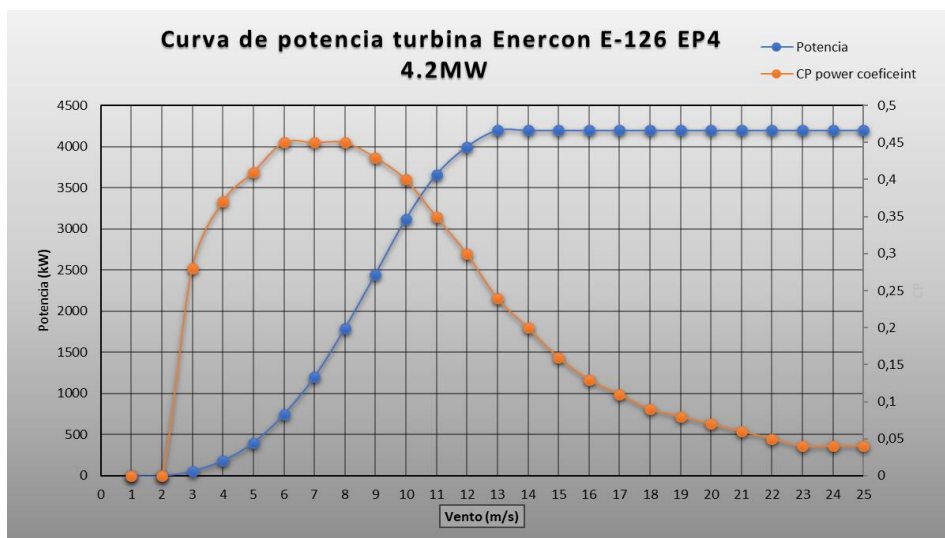


Figura 3.5 - Curva de potência da turbina eólica [40].

Para a simulação em Matlab foi definido um *Simulation Stop Time* de 23 pois o período de amostragem de dados foi feito de 0h até 23 h.

O bloco turbina eólica apresentado na Figura 3.6 é constituído por 3 *lookup table*, em que dois dos blocos representam os dados de velocidade do vento para os meses de maio e novembro, e o terceiro bloco de *lookup table* é referente à curva da potência da turbina utilizada.

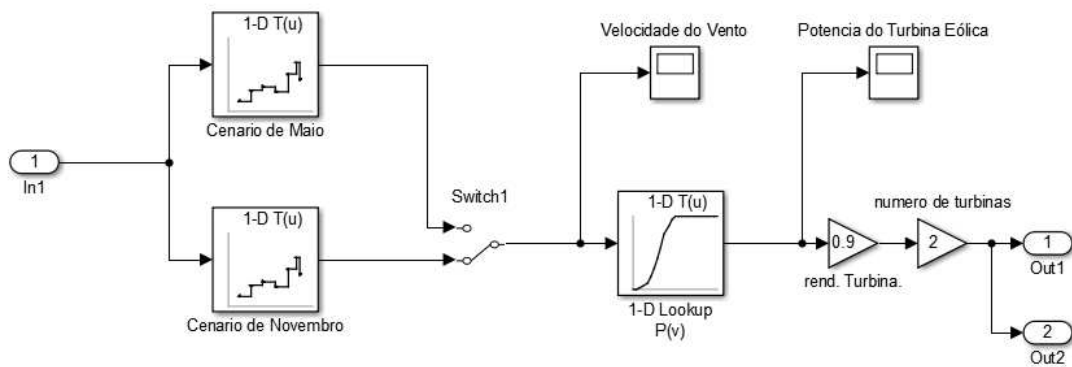


Figura 3.6 - Modelo de simulação em Matlab da turbina eólica.

3.2 Dimensionamento

No contexto da transição global para fontes de energia mais sustentáveis, é crucial realizar uma análise aprofundada do balanço energético em regiões específicas. Este parágrafo apresenta uma abordagem acadêmica para dimensionar o balanço energético da Ilha de São Vicente. O foco será dado ao consumo energético total diário (representado por E_1), à produção média diária de energias renováveis (expressa por E_2) e à energia consumida pela instalação não coberta pelo sistema fotovoltaico (denominada E_3).

Em análise ao relatório disponibilizado pela companhia de eletricidade de Cabo Verde, Electra SA, a ilha de São Vicente teve uma produção de energia de aproximadamente 77 511 144 kWh no ano de 2020, dados presentes na Figura 3.7.

Ilha	Central	Térmica 2021	Térmica 2020	Δ [2021-2020]	Éolica 2021	Éolica 2020	Δ [2021-2020]	Solar 2021	Solar 2020	Δ [2021-2020]	Total 2021	Total 2020	Δ [2021-2020]
Santo Antão		16 513 063	15 516 894	6,4%	1 517 277	1 153 510	31,5%	134 286	145 120	100,0%	18 164 626	16 815 524	8,0%
	Porto Novo	16 513 063	15 516 894					134 286	145 120		16 647 349	15 662 014	
	Ribeira Grande				1 517 277	1 153 510					1 517 277	1 153 510	
S.Vicente		60 468 943	58 461 281	3,4%	21 414 856	19 049 863	12,4%				81 883 799	77 511 144	5,6%
	Matiota	668 000	2 447 320		21 414 856	19 049 863					22 082 856	21 497 183	
	Lazareto	59 800 943	56 013 961								59 800 943	56 013 961	
S.Nicolau	Tarrafal	7 578 042	7 299 194	3,8%							7 578 042	7 299 194	3,8%
Sal	Palmeira	41 435 270	37 326 995	11,0%	17 214 910	13 781 940	24,9%		399 019	-100,0%	58 650 180	51 507 954	13,9%
Maio	Porto Inglês	4 078 987	4 010 667	1,7%							4 078 987	4 010 667	1,7%
Santiago		211 994 370	208 520 621	1,7%	33 636 550	29 946 686	12,3%	6 682 511	5 979 966	11,7%	252 313 431	244 447 273	3,2%
	S.Catarina	267 724	74 789								267 724	74 789	
	Palmarejo	211 726 646	208 445 832		33 636 550	29 946 686	12,3%	6 682 511	5 979 966	11,7%	252 045 707	244 372 484	
Fogo	S.Filipe	15 862 605	14 684 453	8,0%							15 862 605	14 684 453	8,0%
Brava	Favetal	3 048 439	2 967 320	2,7%							3 048 439	2 967 320	2,7%
Total Electra		360 978 719	348 787 425	3,5%	73 783 593	63 931 999	15,4%	6 816 797	6 524 105	4,5%	441 580 109	419 243 529	5,3%

Figura 3.7 - Produção de Energia em Cabo Verde [12].

Na Figura 3.8, pode-se observar a distribuição de potência na ilha de São Vicente. Nela, estão localizadas duas centrais térmicas: a central da Matiota, com uma potência

instalada de 7,936 kVA, e a central do Lazareto, com uma potência instalada de 22,618 kVA. Além disso, a ilha conta com uma pequena central eólica.

Ilha	Unidade de Produção	Potência Instalada 2021					Potência Disponível Térmica 2021 [kW]	Potência Disponível Térmica 2020 [kW]	Δ [2021-2020]
		Nominal [KVA]	Nominal [kW]	Térmica [kW]	Eólica [kW]	Solar [kW]			
TOTAL ELECTRA		174 783	140 322	140 322	900	6 780	109 068	116 387	-7 319
Electra Norte		63 954	51 163	51 163	900	2 500	35 800	37 800	-2 000
Santo Antão	Porto Novo/Ribeira Grande	10 570	8 456	8 456			4 800	4 800	0
	Porto Novo	8 250	6 600	6 600			4 800	4 800	0
	Ribeira Grande	2 320	1 856	1 856			0	0	0
São Vicente	Matiota/Lazareto	30 554	24 443	24 443	900		20 000	20 000	0
	Matiota	7 936	6 349	6 349	900		4 000	4 000	0
	Lazareto	22 618	18 094	18 094			16 000	16 000	0
S. Nicolau	Tarrafal	5 905	4 724	4 724			3 500	3 500	0
Sal	Palmeira	16 925	13 540	13 540		2 500	7 500	9 500	-2 000

Figura 3.8 - Repartição de potência das centrais térmicas em São Vicente [12].

Na presente análise, foi proposta a instalação de uma central fotovoltaica de 8 MW e uma central eólica de 8 MW na ilha de São Vicente, com o objetivo de substituir parcialmente a geração de energia atualmente realizada pelas centrais térmicas locais. Esta medida tem como principal finalidade reduzir o consumo de combustíveis fósseis e, consequentemente, diminuir as emissões de CO₂, contribuindo para a transição energética da ilha e o cumprimento de metas ambientais.

As centrais renováveis seriam uma alternativa para substituir a geração da central de Matiota, resultando em uma redução significativa nas emissões de CO₂. Parte da energia gerada poderia ser utilizada para suprir a demanda durante os horários de pico ou em momentos de escassez de energia. Além disso, essas centrais renováveis funcionariam em conjunto com a central de Lazareto, integrada ao sistema de produção desta, complementando e otimizando a geração energética.

A análise considerou quatro meses específicos: abril (com menor consumo diário), maio (com maior produção de energias renováveis), agosto (com maior consumo diário) e novembro (com menor produção de energias renováveis). Para cada um desses meses, foi criado um perfil médio, representando um dia típico de consumo energético, com base nos dados fornecidos. A partir desses perfis, foram estimados os valores de potência gerada por cada uma das centrais. Com os dados simulados para as centrais eólica e solar, foi possível elaborar diagramas ilustrativos do balanço energético.

As Figura 3.9, Figura 3.10, Figura 3.11 e Figura 3.12 mostram o balanço de potência para os meses de abril, maio, agosto e novembro, respetivamente. Em cada figura, são apresentados o consumo diário, a produção de energias renováveis simulada, e a diferença resultante da subtração da energia renovável do consumo diário. Esses

gráficos fornecem uma visão clara da contribuição das fontes renováveis para a redução do consumo de energia convencional ao longo de cada um dos períodos analisados.

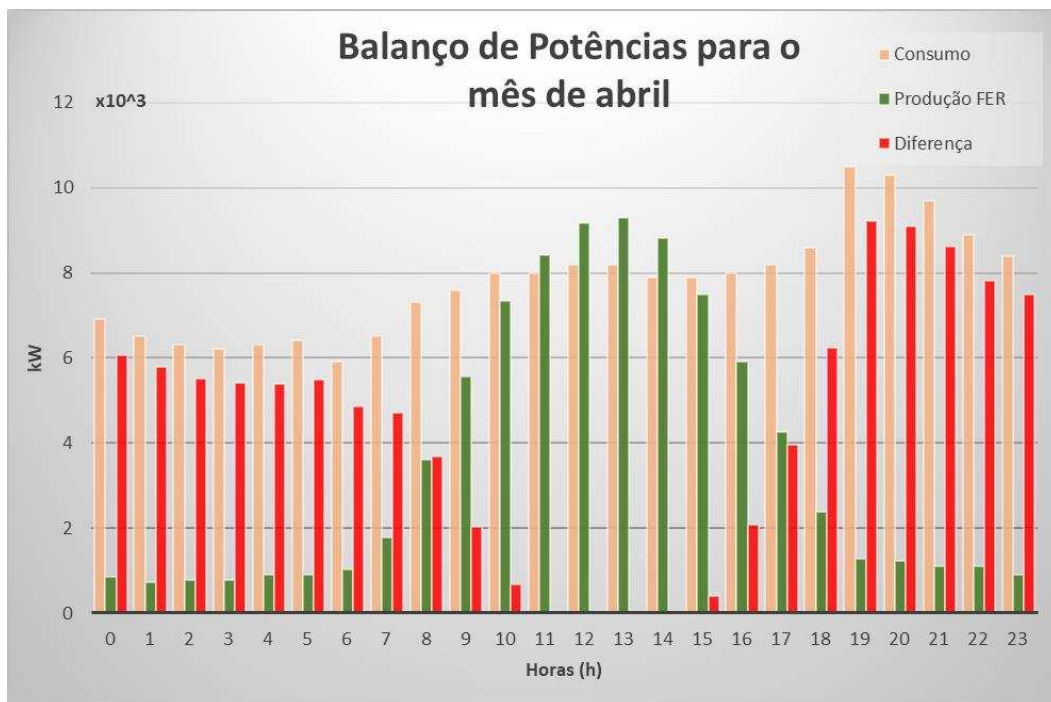


Figura 3.9 - Balanco de potências para o mês de abril.

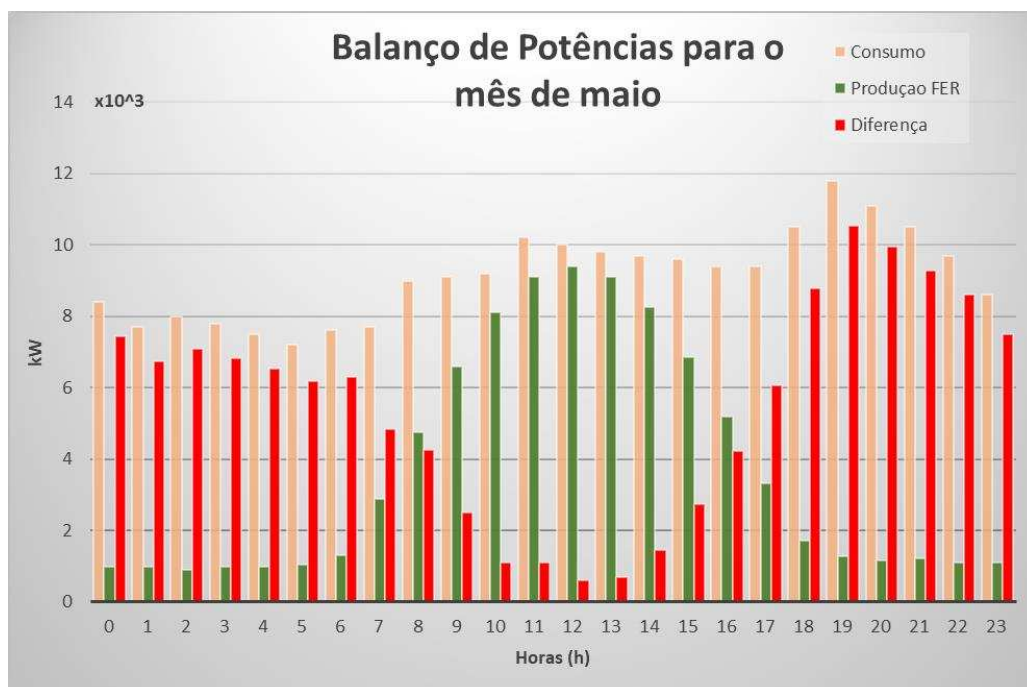


Figura 3.10 - Balanco de potências para o mês de maio.

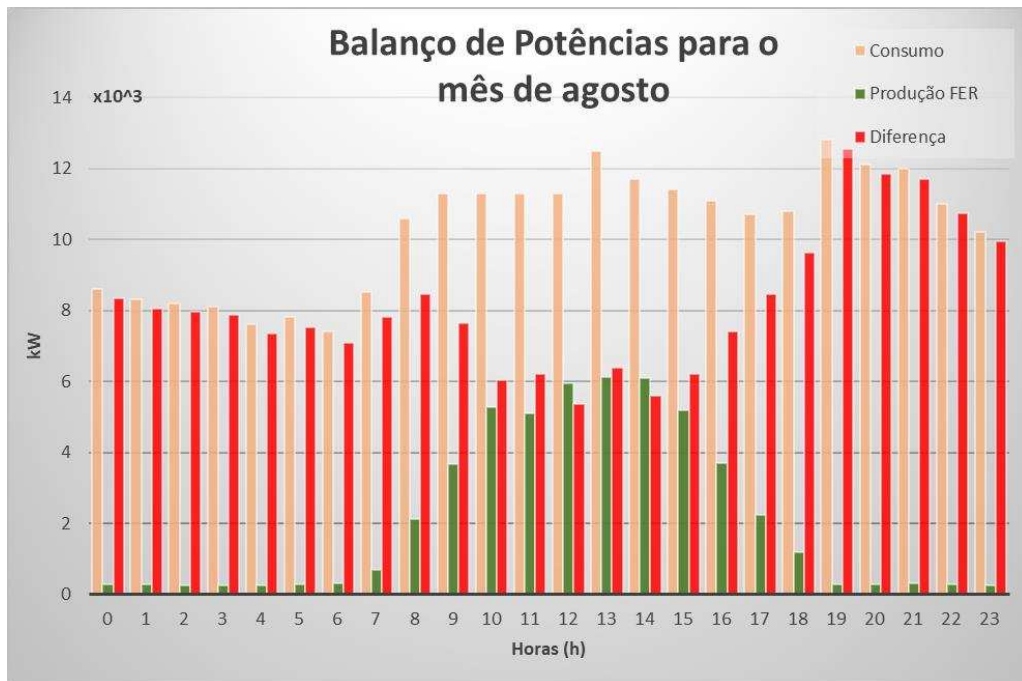


Figura 3.11 - Balço de potências para o mês de agosto.

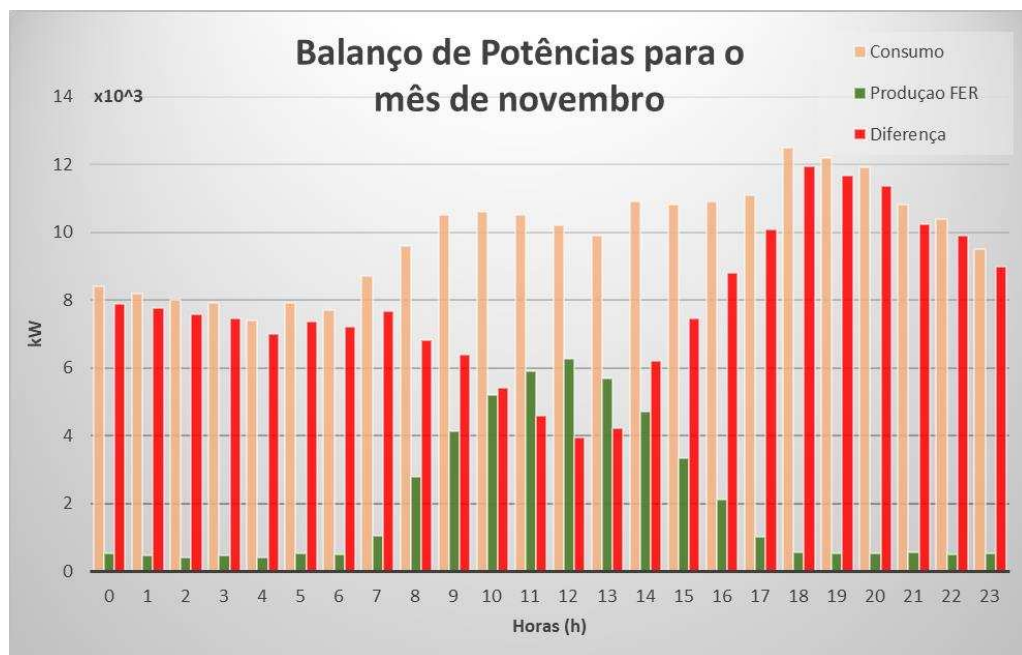


Figura 3.12 - Balço de potências para o mês de novembro.

Entre os meses analisados, o que mais dependeu da energia fornecida pela central de Matiota foi o mês de agosto, conforme ilustrado na Figura 3.13.



Figura 3.13 - Produção media de energia da central de Matiota para agosto.

Nos anexos 06 e 07 são apresentados os dados de vento e irradiação solar para os meses de maio e novembro.

Para o dimensionamento dos equipamentos, o mês de maio foi utilizado como referência, uma vez que apresentou a maior produção de energias renováveis.

Dados considerados:

η_T - Produto de todos os rendimentos

η_{CP1} - Rendimento do conversor DC/DC ou AC/DC (associado aos painéis e às turbinas eólicas)

η_{CP2} - Rendimento conversor DC/DC

η_{elec} - Rendimento eletrolisador

η_{FC} - Rendimento da pilha de combustível

η_{Dep} - Rendimento do deposito de armazenamento

η_{CP3} - Rendimento do conversor DC/AC

E_1 - Energia total diária consumida 219,5 MW

Este valor representa a quantidade total de energia consumida diariamente na ilha de São Vicente, englobando os setores residencial, comercial e industrial.

E_2 - Energia média diária de fontes renováveis 88,2 MW

Corresponde à produção média diária de energia proveniente de fontes renováveis, como solar e eólica.

E_3 - Energia consumida pela ilha, não coberta pelo sistema fotovoltaico 131,3 MW

Refere-se à parcela de energia consumida que não é atendida pelo sistema de energias renováveis, incluindo demandas específicas que não podem ser supridas pelas fontes renováveis disponíveis.

O dimensionamento do balanço energético será realizado com base na energia média diária proveniente das fontes renováveis, já que a capacidade instalada não é suficiente para gerar excedentes.

E'_2 - Energia consumida pela carga coberta pelo sistema de energias renováveis:

Este valor indica a fração da energia consumida diariamente que é atendida pelo sistema de energias renováveis, sendo calculada pelas equações (3.6) e (3.7):

$$E'_2 = E_1 - E_3 \quad (3.6)$$

$$E'_2 = 219,5 - 131,3 = 88,2 \text{ MWh}$$

$$E''_2 = \frac{E'_2}{\eta_{CP1} \times \eta_{CP3}} \quad (3.7)$$

$$E''_2 = \frac{88,2}{0,92 \times 0,92} = 104,2 \text{ MWh}$$

E'_3 – Energia a ser produzida para satisfazer a energia consumida pela ilha, que não é coberta pelo sistema de energias renováveis, dado pela equação (3.8) e (3.9).

$$E'_3 \times \eta_T = E_3 \quad (3.8)$$

$$E'_3 = \frac{E_3}{\eta_{CP1} \times \eta_{CP2} \times \eta_{ELECT} \times \eta_{FC} \times \eta_{Dep}} \quad (3.9)$$

$$= \frac{131,3}{0,92 \times 0,92 \times 0,77 \times 0,55 \times 0,95} = 385, \text{ MWh}$$

E_4 - Excedente produzido pelo sistema de renováveis:

Representa a quantidade de energia excedente produzida pelo sistema de renováveis que não é consumida. Pode ser determinado pela equação (3.10):

$$E_4 = E_2 - E''_2 \quad (3.10)$$

Considerando que, no mês de maio, toda a energia gerada será consumida, esta poderá ser estrategicamente distribuída durante os períodos de maior demanda, contribuindo para a redução da sobrecarga nas centrais térmicas.

Essas variáveis adicionais, E'2, E'3 e E'4, fornecem uma visão mais detalhada do fluxo de energia na ilha, permitindo uma análise melhorada do balanço energético.

3.2.1 Dimensionamento do eletrolisador

Volume de hidrogénio e oxigénio produzido pelo eletrolisador

Para dimensionamento do eletrolisador será usado como referência o mês com maior produção de energias renováveis

Mês de maio

$$E_1 = 219,5 \text{ MWh}$$

$$E_2 = 88,2 \text{ MWh}$$

$$E_3 = 131,3 \text{ MWh}$$

$$E_4 = 0 \text{ MWh}$$

$$E''_2 = 104,2 \text{ MWh}$$

$$E'_3 = 385,6 \text{ MWh}$$

A energia que chega ao eletrolisador $E_{\text{eletrolisador}}$ é dada pela equação (3.11):

$$E_{\text{eletrolisador}} = E_2 \times \eta_{\text{CP1}} = 88,2 \times 0,92 = 81,1 \text{ MWh} \quad (3.11)$$

A partir da potência calculada fornecida ao eletrolisador, é possível determinar o volume de hidrogénio $V_{H_2\text{eletro}}$ produzido em condições padrão (1 atmosfera e 0 ° C) utilizando a Equação 3.12. Considerando que 1 kWh equivale a 3600 kJ, temos:

$$V_{H_2\text{eletro}} = \frac{3600 \times E_{\text{eletrolisador}} \times \eta_{\text{eletrolisador}}}{H_0} \quad (3.12)$$

$$V_{H_2\text{eletro}} = \frac{3600 \times 81100 \times 0,77}{10800} = 20815,7 \text{ m}^3 = 20816 \cdot 10^3 \text{ L}$$

Com base na equação dos gases ideais dada pela equação (3.13).

$$P \times V = n \times R \times T_{kelvin} \quad (3.13)$$

Em que P é a pressão (Pa) sendo 1 atm equivalente a 101325 Pa, V volume (L), n número de Mol, R constante universal dos gases perfeitos, T_{kelvin} temperatura em Kelvin (K), $T_{celcius}$ temperatura em graus Celcius ($^{\circ}\text{C}$), η_{Dep} rendimento do deposito, η_{CP3} rendimento do conversor DC/AC e H_0 capacidade calórica bruta do hidrogénio.

De seguida, é realizado o cálculo do número de moles de hidrogénio n_{H_2} calculada através da equação (3.14).

$$n_{H_2} = \frac{V_{H_2\text{eletra}} \times P}{R \times (273.15 + T_{celcius})} \quad (3.14)$$

$$n_{H_2} = \frac{20816 \times 101325}{8.314 \times (273.15 + 0)} = 928759 \text{ moles}$$

O cálculo do volume de hidrogénio à temperatura de 25°C e pressão de 20 bar é realizado através da equação (3.15).

$$V_{H_2\text{eletra}(20 \text{ bar})} = \frac{R \times T \times n_{H_2}}{P} \quad (3.15)$$

$$V_{H_2\text{eletra}(20 \text{ bar})} = \frac{8.314 \times (273,15 + 25) \times 928759}{20 \cdot 10^5} = 1152 \text{ m}^3$$

A equação que descreve a reação química da eletrólise da água permite verificar que, para cada duas moléculas de hidrogénio produzidas, corresponde uma molécula de oxigénio. Assim, o volume de oxigénio $V_{O_2\text{eletra}(20 \text{ bar})}$ produzido é aproximadamente metade do volume de hidrogénio, como demonstrado na equação (3.16).

$$V_{O_2\text{eletra}(20 \text{ bar})} = \frac{1}{2} \times V_{H_2\text{eletra}(20 \text{ bar})} \quad (3.16)$$

$$V_{O_2\text{eletra}(20 \text{ bar})} = \frac{1}{2} \times 1152 = 576 \text{ m}^3$$

Durante os períodos de maior produção de energias renováveis, o hidrogénio produzido é armazenado para utilização futura, enquanto o oxigénio pode ser armazenado ou liberado, dependendo das necessidades específicas.

A Figura 3.14 ilustra o balanço de potência para o mês de maio, destacando o intervalo em que se observou a maior produção de energias renováveis. Esse período foi crucial para maximizar a produção de hidrogénio.

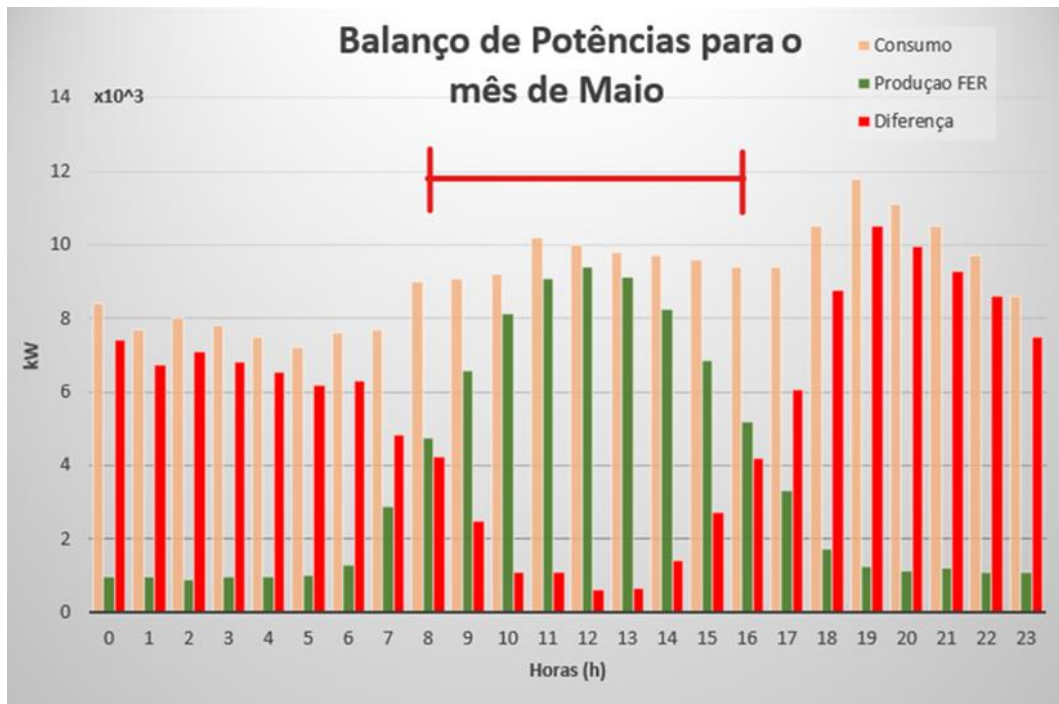


Figura 3.14 - Balanço de potências para o mês de maio. (8h até 16h).

As Equações (3.17) e (3.18) permitem calcular os valores do fluxo de hidrogénio e oxigénio, respetivamente.

$$\phi_{H2eleetro} = \frac{V_{H2eleetro(20\ bar)}}{\Delta t} = \frac{1152}{9} = 128\ m^3/h = 128000\ l/h \quad (3.17)$$

$$\phi_{O2eleetro} = \frac{V_{O2eleetro(20\ bar)}}{\Delta t} = \frac{576}{9} = 64\ m^3/h = 64000\ l/h \quad (3.18)$$

Escolha do modelo de Eletrolisador

Com base na equação dos gases ideais, calcula-se que o volume de hidrogénio produzido a 1 atm e 0 °C é de 20,816 Nm³. A partir da Equação (3.19), pode-se também determinar o fluxo de hidrogénio nessas mesmas condições.

$$\phi_{H2eleetro} = \frac{20816}{9} \cong 2313\ Nm^3/h\ ou\ 2313 \cdot 10^3\ NL/h \quad (3.19)$$

Com base nos resultados obtidos, o eletrolisador deve ser capaz de cumprir com os valores de volume de hidrogénio e pressão calculados. Assim, optou-se por um eletrolisador de 10 MW da H-TEC SYSTEMS, que se adequa às especificações do sistema (ver anexo 2).

3.2.2 Dimensionamento da Pilha de Combustível

Volume de hidrogénio consumido pela pilha

As pilhas de combustível recebem 81,100 kWh provenientes do sistema. Para determinar o volume de hidrogénio consumido pelas pilhas de combustível V_{H_2FC} , utilizam-se as Equações (3.20) e (3.21), que permitem calcular o volume consumido de hidrogénio em condições padrão, ou seja, a 1 atmosfera e 0 ° C.

$$V_{H_2FC} = \frac{3600 \times E_{elect} \times \eta_{elect} \times \eta_{Dep}}{H_n} \quad (3.20)$$

$$V_{H_2FC} = \frac{3600 \times 81100 \times 0,77 \times 0,95}{12745} \cong 16757,1 \text{ m}^3 \quad (3.21)$$

Este valor corresponde ao volume de hidrogénio consumido em condições padrão de temperatura e pressão. Considerando os seguintes parâmetros:

em que H_n capacidade calórica líquida do hidrogénio (12745 KJ/m³), η_{elect} rendimento do eletrolisador, E_{elect} energia que chega ao eletrolisador e η_{Dep} rendimento do deposito de hidrogénio, considerando possíveis perdas durante a compressão e o armazenamento do hidrogénio.

Escolha da Pilha de Combustível

Para estimar a potência necessária para a pilha de combustível, é essencial considerar:

- Volume de hidrogénio Disponível: 16757,1 m³.
- Tempo de Operação Desejado: 10 horas por dia (valor determinado por conveniência).
- Eficiência da Pilha de Combustível: 55% (0.55).
- Energia por unidade de hidrogénio: Aproximadamente 3 kWh/Nm³ (media obtida a partir de estudos técnicos sobre energia fornecida pelo hidrogénio nas condições típicas de operação [38][39]).

A potência requerida pode ser determinada através das Equações (3.22), (3.23) e (3.24), que fornecem os cálculos de consumo de hidrogénio e potência da pilha de combustível.

$$\text{Consumo diario de hidrogenio} = \frac{\text{Pot. Necessária (kW)}}{\eta_{FC} \times 3 \text{ kWh/Nm}^3} \times 10 \text{ h} \quad (3.22)$$

$$\text{Pot. Necessária (kW)} = \frac{\text{Cons. diario de hidrogenio}}{10 \text{ h}} \times (\eta_{FC} \times 3 \text{ kWh/Nm}^3) \quad (3.23)$$

$$Pot. Necessária (kW) = \frac{16757,1 \text{ Nm}^3}{10 \text{ h}} \times (0,55 \times 3) = 2765 \text{ kW} \quad (3.24)$$

Com base nos cálculos efetuados, foram selecionadas três pilhas de combustível da fabricante Plug, modelo GenSure MW-Scale Power, com uma potência máxima de 1 MW e uma tensão de saída de 480 V. Estas células consomem entre 66 e 69 kg de hidrogénio por MWh produzido e são capazes de operar com hidrogénio tanto em alta quanto em baixa pressão (ver anexo 3).

3.2.3 Dimensionamento do Depósito de hidrogénio

Considerando que o conjunto de pilhas de combustível tem um consumo total de 16757,1 m³ de hidrogénio, o cálculo do número de moles de hidrogénio consumido é realizado conforme descrito na Equação (3.25).

$$n_{H_2FC} = \frac{V_{H_2FC} \times P}{R \times (273,15 + T)} = \frac{16757,1 \times 101325}{8,314 \times (273,15 + 0)} \cong 747661 \text{ moles} \quad (3.25)$$

A pressão de operação das pilhas de combustível é de 8,58 bar (7,58 barg, bar gauge - pressão medida em relação à pressão atmosférica) mais 1 bar da pressão atmosférica, e a temperatura de funcionamento é de 25 °C, conforme indicado em (3.26) e (3.27).

$$V_{H_2FC(8,58 \text{ bar})} = \frac{R \times T \times n_{H_2FC}}{P} = \frac{8,314 \times (273,15 + 25) \times 747661}{8,58 \cdot 10^3} \quad (3.26)$$

$$= 216004,3 \text{ L} = 216,1 \text{ m}^3$$

$$V_{H_2FC(20 \text{ bar})} = \frac{P_{FC(8,58 \text{ bar})} \times V_{H_2FC(8,58 \text{ bar})}}{P_{FC(20 \text{ bar})}} = \frac{8,58 \times 216,1}{20} = 92,7 \text{ m}^3 \quad (3.27)$$

Constata-se que o consumo de hidrogénio pelas pilhas de combustível não corresponde ao volume total produzido pelo eletrolisador, devido à eficiência distinta dos equipamentos. Portanto, o volume de hidrogénio a ser armazenado corresponde à diferença entre a produção e o consumo. Assim, a diferença entre o hidrogénio produzido pelo eletrolisador e o hidrogénio consumido pelas pilhas de combustível é dada por:

$$\begin{cases} V_{H_2Electro(20bar)} = 1152 \text{ m}^3 \\ V_{H_2FC(20 \text{ bar})} = 92,7 \text{ m}^3 \end{cases}$$

Portanto, o depósito deverá armazenar um volume de 1059,3 m³ de hidrogénio, resultante da diferença entre $V_{H_2Electro(20bar)} - V_{H_2FC(20bar)}$, para assegurar que a

célula de combustível tenha a quantidade necessária quando o hidrogénio for descomprimido de 20 bar para 8,58 bar.

Escolha do depósito de hidrogénio

Uma solução viável para o armazenamento de hidrogénio é o sistema HY2MEGA da GKN Hydrogen, que oferece capacidade de armazenamento de até 250 kg por unidade. O sistema opera a pressões que variam entre 0,5 e 40 bar e é compatível com hidrogénio de pureza entre 5.0 e 99.999%. Por ser modular, o HY2MEGA permite a expansão da capacidade de armazenamento conforme as necessidades específicas do projeto, proporcionando flexibilidade operacional (ver anexo 4).

Além disso, a GKN Hydrogen disponibiliza o modelo HY2MEDI, uma solução mais abrangente que integra diretamente com eletrolisadores e pilhas de combustível, facilitando a produção e o consumo de hidrogénio em sistemas energéticos sustentáveis (anexo 5).

O hidrogénio armazenado no depósito provém unicamente da energia renovável, captada durante os momentos de maior produção das fontes sustentáveis. Adotando uma temperatura de operação de 25 °C e considerando a conversão de 1 kWh para 3.600 kJ, o cálculo é apresentado na Equação (3.28)

$$V_{H_2(1atm)} = \frac{3600 * E_{elect} * \eta_{elect} * \eta_{CP1}}{H_n} \quad (3.28)$$

$$= \frac{3600 \times 81,1 \cdot 10^3 \times 0,77 \times 0,95}{12745} = 16757,1 \text{ m}^3$$

Onde:

$H_n = 12745 \text{ kJ/m}^3$ - Capacidade calórica líquida do hidrogénio.

Para determinar o número de moles de hidrogénio excedente, utiliza-se a Equação (3.29):

$$n_{H_2 \text{ excedente}} = \frac{V_{H_2(1 atm)} \times P}{R \times (273,15 + T_{Celsius})} = \frac{16757,1 \times 101325}{8,314 \times (273,15 + 0)} \quad (3.29)$$

$$n_{H_2 \text{ excedente}} \cong 747660 \text{ moles}$$

O volume de hidrogénio em condições de pressão de 20 bar é então calculado pela Equação (3.30):

$$V_{H_2(\text{excedente } 20 \text{ bar})} = \frac{R \times T \times n_{H_2 \text{ excedente}}}{P} \quad (3.30)$$

$$= \frac{8,314 \times (273,15 + 25) \times 747660}{20 \cdot 10^5} \cong 926,7 \text{ m}^3$$

Por forma a assegurar uma folga no dimensionamento foi considerado 10% de armazenamento extra, assim sendo o volume de armazenamento é de $V_{H_2(\text{armazenado})} \cong 1019,3 \text{ m}^3$.

O consumo de hidrogénio armazenado por hora é apresentado na Equação (3.31):

$$\Phi_{H_2(\text{armazenado})} = \frac{V_{H_2(\text{armazenado})}}{\text{horas}} = \frac{1019,3}{10} = 101,9 \text{ m}^3/\text{h} \quad (3.31)$$

Com base nos cálculos anteriores, propõe-se um armazenamento mínimo equivalente a dois dias, sendo que este armazenamento adicional poderá ser utilizado para suprir eventuais cortes de energia na rede, garantindo o fornecimento contínuo para serviços essenciais. Os valores para este cenário são calculados nas Equações (3.32) e (3.33):

$$V_{H_2(\text{armazenamento 2 dias})} = 1019,3 \times 2 = 2038,6 \text{ m}^3 \quad (3.32)$$

$$\Phi_{H_2(\text{armazenado 2 dias})} = 101,9 \times 2 = 203,8 \text{ m}^3/\text{h} = 203800 \text{ L/h} \quad (3.33)$$

Escolha do depósito de hidrogénio

Como forma de cumprir os requisitos mínimos necessários o depósito de hidrogénio escolhido terá de possuir uma capacidade mínima de armazenamento $2038,6 \text{ m}^3$.

3.2.4 Integração da micro rede DC

A microrrede DC desempenha um papel central no sistema de produção e armazenamento de hidrogénio verde proposto, servindo como o elemento integrador entre os diversos componentes do sistema, como o eletrolisador, os painéis fotovoltaicos, a turbina eólica, a pilha de combustível e as baterias. A utilização de uma microrrede de corrente contínua (DC) permite uma conexão direta entre esses elementos, visto que a maioria deles opera nativamente em corrente contínua. Isso elimina a necessidade de conversões adicionais entre DC-AC e AC-DC, o que não apenas simplifica o sistema, mas também aumenta a eficiência global, reduzindo as perdas associadas a essas conversões eletrônicas.

A escolha de uma microrrede DC é justificada pela sua capacidade de otimizar a gestão energética, melhorando a eficiência e a confiabilidade da operação. Além disso, o sistema evita a complexidade e os custos associados às frequentes conversões de energia, o que é especialmente relevante em contextos como o de Cabo Verde, onde a eficiência energética e a redução de custos são fundamentais para aumentar a penetração de energias renováveis e diminuir a dependência de combustíveis fósseis.

Embora a microrrede DC não seja amplamente mencionada no contexto desta tese, ela é uma componente essencial do projeto, funcionando como uma microrrede DC híbrida. Esta configuração oferece a flexibilidade de operar tanto em modo conectado à rede (*grid-tied*) quanto em modo isolado (ilha), aumentando assim a resiliência e a autossuficiência do sistema. Desta forma, a microrrede DC pode continuar a alimentar o sistema de produção de hidrogénio e as cargas críticas, mesmo em caso de falha da rede principal.

Além disso, a microrrede proporciona uma transição suave entre a operação em modo isolado e a conexão com a rede principal, minimizando a instabilidade e as vulnerabilidades que podem surgir na rede AC, especialmente em sistemas que incorporam fontes renováveis intermitentes. Por fim, sua simplicidade estrutural e elevada eficiência contribuem para a redução da complexidade do sistema, permitindo uma integração mais eficaz entre os diferentes elementos do sistema de hidrogénio verde, consolidando assim o papel estratégico da microrrede no equilíbrio e na sustentabilidade do sistema.

4 Análise de resultados

4.1 Cenários analisados

Neste capítulo, realiza-se a análise de dois cenários distintos, com base em simulações realizadas no software MATLAB Simulink. Os meses de maio e novembro foram escolhidos como referência devido às suas características opostas no que diz respeito à produção de energias renováveis para a ilha de São Vicente. O mês de maio apresenta uma maior disponibilidade de energias renováveis, com predominância de fontes eólicas e solares, enquanto o mês de novembro reflete um cenário mais crítico, com menor produção dessas energias.

A análise desses dois períodos foi fundamental para testar a viabilidade da produção de hidrogénio como vetor energético e para avaliar sua integração com a rede elétrica local.

4.2 Distribuição de Energia

A partir das simulações realizadas no MATLAB, definiu-se que 50% da energia renovável produzida seria injetada diretamente na rede elétrica, enquanto os 50% restantes seriam convertidos em hidrogénio. O hidrogénio gerado poderá ser utilizado em dois momentos críticos:

- Horários de pico, quando o consumo de energia é mais elevado.
- Interrupções no fornecimento de energia, quando o hidrogénio armazenado serviria como fonte de backup.
- Essa abordagem proporciona um uso equilibrado das energias renováveis, mesmo considerando as ineficiências associadas ao processo de conversão, como as perdas no eletrolisador e na pilha de combustível.

Na Figura 4.1, apresenta-se o modelo de simulação utilizado no MATLAB para representar este sistema.

4.3 Análise dos cenários

4.3.1 Cenário do mês de maio

A simulação demonstrou que o sistema operou de forma eficiente, atendendo a uma parcela significativa do consumo energético e mantendo níveis não nulos de hidrogénio armazenado no tanque.

Na Figura 4.3, são apresentados os resultados da simulação para o mês de maio, ilustrando a produção de energia renovável, a produção térmica, o funcionamento da pilha de combustível e o consumo de energia.

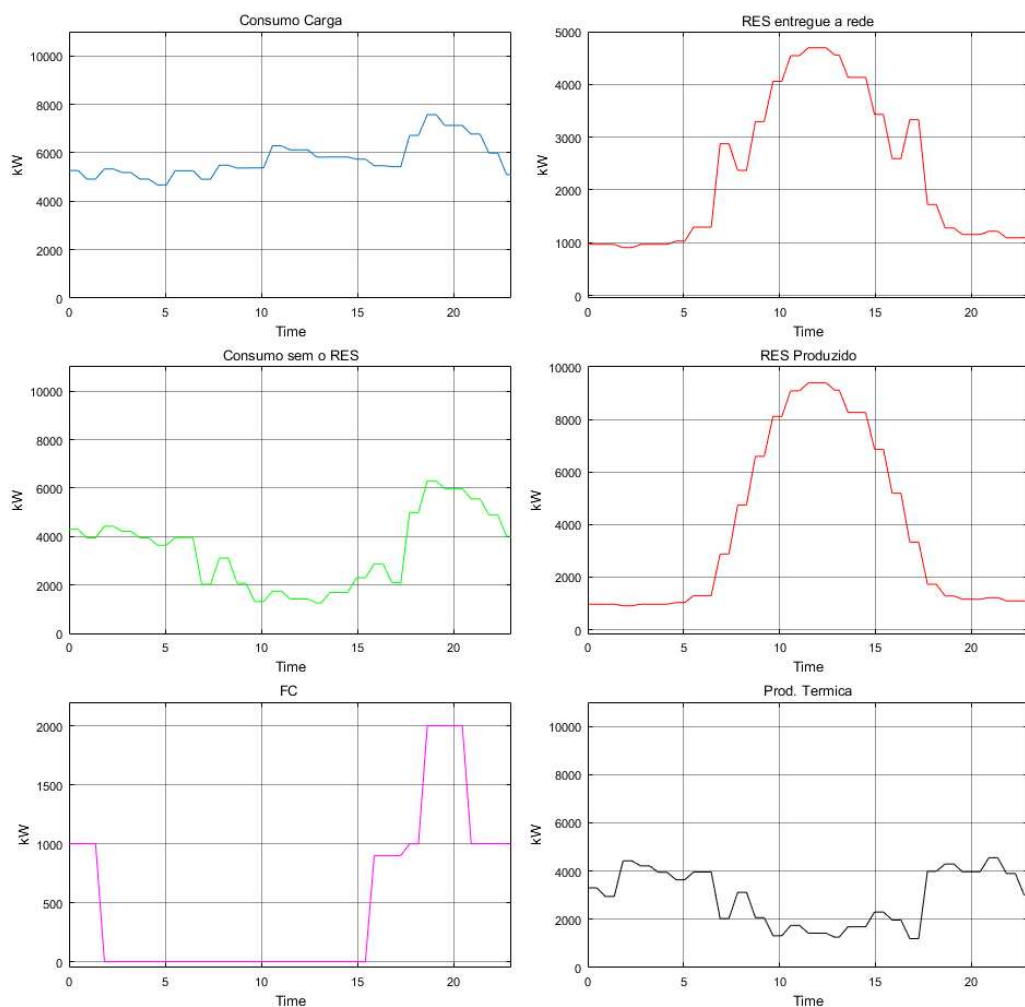


Figura 4.3 - Resultados da simulação para o mês de maio.

Além disso, a Figura 4.4 mostra a evolução do tanque de armazenamento de hidrogénio ao longo do mês de maio, evidenciando o comportamento do sistema de armazenamento.

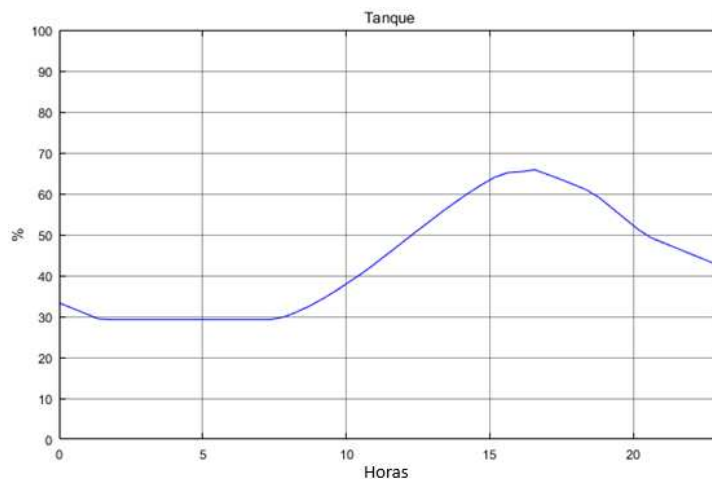


Figura 4.4 - Evolução do tanque de armazenamento para o mês de maio.

O cenário energético observado em maio apresentou resultados particularmente promissores, alinhados com as expectativas de maximizar o uso de fontes renováveis. Durante esse período, as energias renováveis contribuíram com aproximadamente 48% da energia total demandada pela carga da ilha de São Vicente. Notavelmente, nos horários de pico de produção renovável (entre 8h e 16h), essa participação subiu para cerca de 67%, evidenciando a capacidade dessas fontes em atender uma parcela majoritária da demanda.

Este cenário destacou-se pelos seguintes aspetos:

- Redução do consumo de energia térmica: O aumento na disponibilidade de energias renováveis possibilitou uma redução expressiva na necessidade de geração térmica, promovendo um consumo mais sustentável e diminuindo a dependência de fontes fósseis.
- Aumento da produção e armazenamento de hidrogénio: A geração renovável em excesso foi direcionada para a produção de hidrogénio, o que permitiu o armazenamento de volumes consideráveis, representando uma estratégia eficaz para suprir futuras demandas energéticas e equilibrar a intermitência das fontes renováveis.

As simulações realizadas demonstram que o sistema operou com boa eficiência, conseguindo atender uma fração substancial do consumo da ilha por meio de fontes renováveis. Este desempenho ressalta a viabilidade de uma matriz energética mais sustentável e a importância de investimentos contínuos em energias limpas, considerando o impacto direto das emissões de carbono e na autonomia energética local.

4.3.2 Cenário do mês de novembro

Em contraste, o cenário observado em novembro revelou resultados menos favoráveis, consequência direta da baixa produção de energias renováveis.

Na Figura 4.5, são apresentados os resultados detalhados da simulação para o mês de novembro, incluindo as variáveis observadas em maio: produção de energias renováveis, produção térmica, operação da pilha de combustível e consumo de energia. Esses dados permitem uma análise comparativa dos diferentes cenários e a identificação de medidas para melhorar a resiliência energética da ilha de São Vicente.

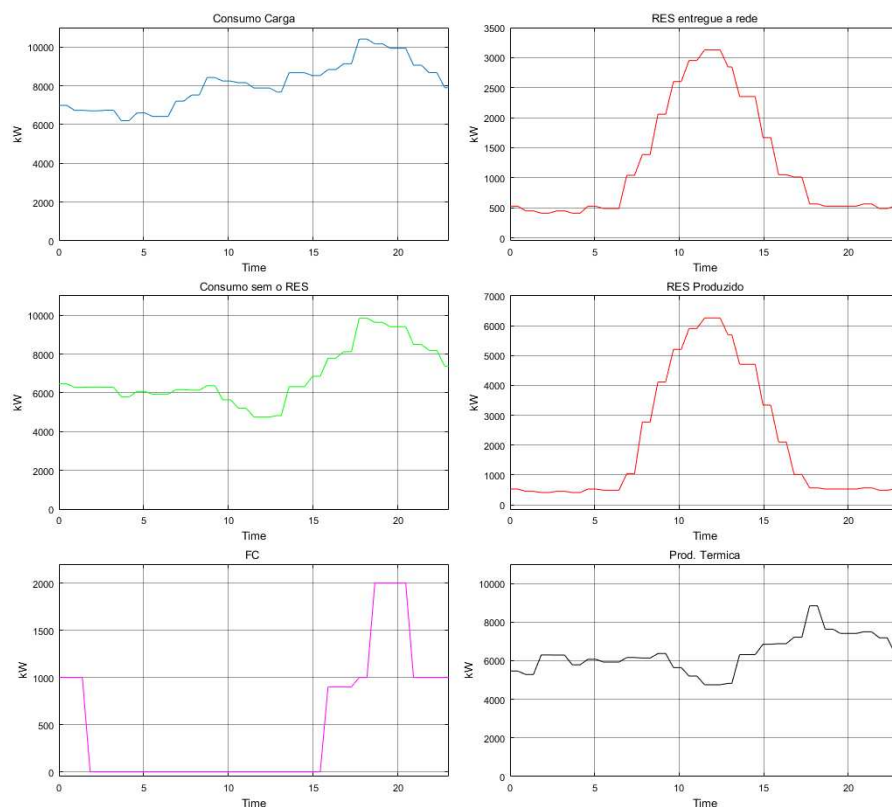


Figura 4.5 - Resultados da simulação para o mês de novembro.

Além disso, a Figura 4.6 ilustra a evolução do nível de hidrogénio no tanque de armazenamento durante o mês de novembro, evidenciando os desafios enfrentados nesse período.

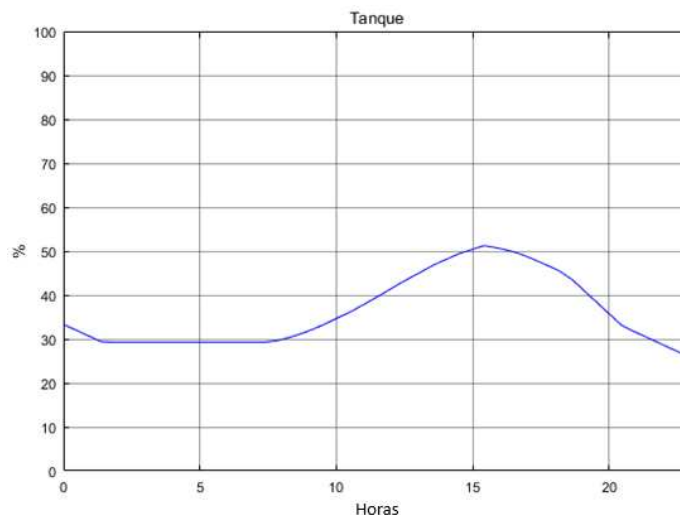


Figura 4.6 - Evolução do tanque de armazenamento para o mês de novembro.

Nesse período, as fontes renováveis contribuíram com apenas 20% da energia consumida pela carga da ilha de São Vicente. Mesmo nos horários de maior produção renovável, entre 8h e 16h, essa participação subiu modestamente para cerca de 28%, destacando a limitação de geração de energia sustentável para atender à demanda total.

Esse cenário caracterizou-se pelos seguintes pontos críticos:

- Interrupções na produção de hidrogénio: Devido à insuficiência de geração de energia renovável, a produção de hidrogénio foi severamente impactada, levando a frequentes interrupções e a diminuição dos níveis de hidrogénio no tanque de armazenamento.
- Aumento da dependência de centrais térmicas: A baixa produção de energia renovável durante o mês fez com que as centrais térmicas tivessem de compensar a maior parte da demanda energética, aumentando a dependência de fontes fósseis e reduzindo a sustentabilidade do sistema.

Este cenário enfatiza a necessidade de uma gestão estratégica no armazenamento e na distribuição de energia, especialmente em períodos com baixa disponibilidade de fontes renováveis. A implementação de estratégias para assegurar o fornecimento ininterrupto e a otimização de recursos fósseis tornam-se cruciais em tais condições.

4.3.3 Considerações relativamente à eficiência dos equipamentos

Em ambos os cenários, ficou evidente que o rendimento dos equipamentos, especialmente da pilha de combustível, tem um impacto direto nos resultados. A eficiência relativamente baixa da pilha de combustível (55%) resulta em uma perda significativa de energia durante o processo de conversão de hidrogénio em eletricidade.

Proposta de melhoria:

Uma possível solução seria aumentar a potência da pilha de combustível, visando uma operação mais eficiente nos horários de maior demanda. Por exemplo, utilizando a pilha de combustível entre as 19h e 21h, quando o consumo de energia é mais elevado, seria possível produzir uma média de 2000 kW por hora, totalizando 6000 kWh por dia.

Esse uso estratégico da pilha de combustível em horários de pico permitiria maior armazenamento de hidrogénio e aumentaria a segurança energética, especialmente para enfrentar interrupções no fornecimento de energia. Na ilha de São Vicente, por exemplo, a média anual de horas sem fornecimento de energia em 2020 foi de aproximadamente 38 horas.

4.3.4 Considerações Finais

A análise dos cenários de maio e novembro destaca a importância da integração de energias renováveis com a produção de hidrogénio. Ajustar a distribuição de energia entre a injeção direta na rede e a conversão em hidrogénio, dependendo das condições de produção, é fundamental.

Para futuras implementações, é essencial:

- Aumentar a capacidade de armazenamento e otimizar o uso da pilha de combustível.
- Estudar formas mais eficientes de balanceamento energético, a fim de maximizar o aproveitamento das energias renováveis disponíveis.

Com a adoção dessas medidas, espera-se alcançar maior estabilidade energética, sobretudo em períodos de baixa produção renovável, como os observados em novembro.

5 Conclusões

A análise realizada ao longo desta tese demonstra que a implementação de um sistema de produção e armazenamento de hidrogénio em São Vicente faz sentido do ponto de vista técnico e ambiental, trazendo grandes benefícios tanto para a ilha quanto para Cabo Verde como um todo. O uso de hidrogénio como vetor energético permitiria a integração eficiente das energias renováveis na matriz energética local, contribuindo significativamente para a redução das emissões de CO₂ e diminuindo a dependência de combustíveis fósseis. Embora o investimento inicial seja elevado, o retorno a longo prazo seria viável devido à economia gerada pela menor necessidade de importação de combustíveis e à possibilidade de aproveitar essa experiência como modelo para expansão futura nas demais ilhas.

Do ponto de vista económico, a implementação do sistema de hidrogénio oferece o potencial de transformar a estrutura energética da ilha. O sistema, além de reduzir o impacto ambiental, promoveria maior independência energética para Cabo Verde, um país que ainda depende fortemente de fontes externas de energia. Além disso, a instalação desse sistema em São Vicente poderia servir como uma fase piloto, criando uma base sólida para a expansão da tecnologia em outras ilhas do arquipélago, maximizando o aproveitamento de suas características climáticas favoráveis para a geração de energias renováveis.

Os resultados mostram que, durante o mês de maio, que apresentou alta produção de energia renovável, a integração do hidrogénio foi particularmente eficiente, reforçando o potencial dessa tecnologia em períodos de alta disponibilidade de fontes eólica e solar. Já no mês de novembro, com menor produção renovável, a análise evidenciou a importância de uma gestão energética cuidadosa e o papel crítico do armazenamento para garantir a segurança energética. Assim, a implementação do sistema de hidrogénio se configura como uma solução promissora, mesmo considerando os desafios apresentados.

Para aprofundar e otimizar os resultados apresentados nesta tese, algumas recomendações e sugestões de estudos futuros podem ser consideradas:

Estudo de Viabilidade Económica: Embora a análise técnica tenha mostrado a viabilidade da produção e armazenamento de hidrogénio, um estudo económico detalhado é crucial para avaliar o retorno do investimento. Esse estudo deve incluir estimativas sobre os custos de instalação, manutenção, operação, e o impacto económico positivo da redução de importação de combustíveis fósseis.

Análise da Rede DC: Seria interessante realizar um estudo aprofundado sobre a viabilidade da implementação de uma rede elétrica DC (corrente contínua) na ilha. A rede DC poderia potencialmente melhorar a eficiência do sistema, uma vez que muitos dos equipamentos de geração e armazenamento funcionam melhor em corrente contínua, evitando perdas de conversão.

Integração inter-ilhas: Outra recomendação relevante é estudar a possibilidade de integrar ilhas próximas em uma única rede DC compartilhada. A criação de uma rede de energia inter-ilhas poderia permitir um maior equilíbrio na geração e no consumo de energia, aproveitando os picos de produção em uma ilha para suprir a demanda de outra.

Estudo do Impacto Ambiental: A longo prazo, seria interessante aprofundar o estudo sobre os benefícios ambientais da implementação de um sistema baseado em hidrogénio, focando na redução de emissões de gases poluentes e no impacto positivo sobre os ecossistemas locais.

Tecnologia e Eficiência dos Equipamentos: Outra área para futuros estudos envolve a otimização da eficiência dos equipamentos utilizados, como o eletrolisador e a pilha de combustível. Avanços tecnológicos podem melhorar significativamente a eficiência e reduzir os custos operacionais do sistema.

Abastecimento de Veículos com hidrogénio: Uma proposta adicional seria explorar a possibilidade de utilizar o hidrogénio também como combustível para veículos, abrindo espaço para o desenvolvimento de um mercado de mobilidade sustentável em Cabo Verde. A introdução de veículos movidos a hidrogénio seria uma alternativa de baixo carbono ao transporte tradicional, contribuindo para a redução de emissões e a diversificação do setor de energia. Além disso, a criação de uma infraestrutura de abastecimento de hidrogénio poderia não só servir à demanda interna, mas também posicionar Cabo Verde como um pioneiro regional na adoção dessa tecnologia emergente.

Essas recomendações visam fornecer diretrizes para futuras pesquisas e aprimorar a viabilidade prática e económica da transição energética proposta nesta tese. Com planejamento adequado e o apoio de políticas públicas voltadas para a inovação energética, o hidrogénio pode se tornar um elemento-chave na estratégia de sustentabilidade de Cabo Verde e em outras regiões com características semelhantes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. Pusz, “The history of hydrogen goes back to the XVI century, when T | Enhanced Reader.” Accessed: Feb. 23, 2023. [Online]. Available: <http://asynbrain.baf.cz/sanatorium/1/h2fuel/aes.pdf>
- [2] K. L. Lim, H. Kazemian, Z. Yaakob, and W. R. W. Daud, “Solid-state Materials and Methods for Hydrogen Storage: A Critical Review,” *Chem Eng Technol*, vol. 33, no. 2, pp. 213–226, Feb. 2010, doi: 10.1002/ceat.200900376.
- [3] B. SAKINTUNA, F. LAMARIDARKRIM, and M. HIRSCHER, “Metal hydride materials for solid hydrogen storage: A review☆,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 32, no. 9, pp. 1121–1140, Jun. 2007, doi: 10.1016/j.ijhydene.2006.11.022.
- [4] CGEE - CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS, “Hidrogênio energético no Brasil Ministério da Ciência e Tecnologia,” 2010, Accessed: Feb. 23, 2023. [Online]. Available: https://www.cgee.org.br/documents/10195/734063/Hidrogenio_energetico_completo_22102010_9561.pdf/367532ec-43ca-4b4f-8162-acf8e5ad25dc?version=1.5
- [5] S. O. Amrouche, D. Rekioua, and T. Rekioua, “Overview of energy storage in renewable energy systems,” in *2015 3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, IEEE, Dec. 2015, pp. 1–6. doi: 10.1109/IRSEC.2015.7454988.
- [6] E. L. V. Eriksson and E. MacA. Gray, “Optimization and integration of hybrid renewable energy hydrogen fuel cell energy systems – A critical review,” *Appl Energy*, vol. 202, pp. 348–364, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.03.132.
- [7] J. Dancker, M. Wolter, J. Rosberg, and E. Tsotsas, “Increasing self-sufficiency in a micro grid: integrated vs. non-integrated energy system approach,” in *2018 53rd International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, IEEE, Sep. 2018, pp. 1–6. doi: 10.1109/UPEC.2018.8541875.
- [8] Md. R. Islam, “Operation Planning of a Microgrid Incorporating Hydrogen Energy and RE Technology,” in *2020 International Conference on System, Computation, Automation and Networking (ICSCAN)*, IEEE, Jul. 2020, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICSCAN49426.2020.9262348.
- [9] B. Li, “Build 100% renewable energy based power station and microgrid clusters through hydrogen-centric storage systems,” in *2020 4th International Conference on HVDC (HVDC)*, IEEE, Nov. 2020, pp. 1253–1257. doi: 10.1109/HVDC50696.2020.9292836.
- [10] REN21 Renewables Now, “RENEWABLES 2022 GLOBAL STATUS REPORT,” 2022. Accessed: Feb. 23, 2023. [Online]. Available: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2022_Full_Report.pdf

- [11] T. P. Fang, W. R. Wan Daud, L. Halim, and M. S. Masdar, "How Ready is Renewable Energy? A Review on Renewable Energy and Fuel Cell Teaching in Schools," in *2017 7th World Engineering Education Forum (WEEF)*, IEEE, Nov. 2017, pp. 236–244. doi: 10.1109/WEEF.2017.8466971.
- [12] The Global Economy, "Cabo Verde: Produção de energia renovável." Accessed: Mar. 09, 2023. [Online]. Available: https://pt.theglobaleconomy.com/Cape-Verde/renewable_power_generation/
- [13] Iberdrola, "Reciclagem das pás eólicas: um novo desafio para a energia eólica." Accessed: Feb. 23, 2023. [Online]. Available: <https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/reciclagem-pas-eolicas>
- [14] P. Reis, "Vestas revela solução inédita para reciclagem de pás de turbinas eólicas," Portal Energias. Accessed: Feb. 23, 2023. [Online]. Available: <https://www.portal-energia.com/vestas-revela-solucao-inedita-reciclagem-pas-turbinas-eolicas/>
- [15] Redação Away, "Revelada solução inovadora de reciclagem para pás de turbinas eólicas - AWAY magazine," Away. Accessed: Mar. 01, 2023. [Online]. Available: <https://away.iol.pt/reciclagem/turbinas-eolicas/revelada-solucao-inovadora-de-reciclagem-para-pas-de-turbinas-eolicas/20230118/63c548a70cf28f3e15c78ec2>
- [16] C. A. Grimes, O. K. Varghese, and S. Ranjan, Eds., *Light, Water, Hydrogen*. Boston, MA: Springer US, 2008. doi: 10.1007/978-0-387-68238-9.
- [17] W. Lepecki, "A ENERGIA NUCLEAR E A ECONOMIA DO HIDROGÊNIO," 2011, Accessed: Mar. 09, 2023. [Online]. Available: http://www.inee.org.br/download/eficiencia/Economia_Hidrogenio_Lepecki.pdf
- [18] P. Nikolaidis and A. Poullikkas, "A comparative overview of hydrogen production processes," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 67, pp. 597–611, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.09.044.
- [19] L. Vidas and R. Castro, "Recent Developments on Hydrogen Production Technologies: State-of-the-Art Review with a Focus on Green-Electrolysis," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 23, p. 11363, Dec. 2021, doi: 10.3390/app112311363.
- [20] "Hydrogen.", Lenntech. [Online]. Available: <https://www.lenntech.com.pt/applications/hydrogen.htm>. Accessed: Feb. 23, 2023.
- [21] G. W. Crabtree, M. S. Dresselhaus, and M. V. Buchanan, "The Hydrogen Economy," *Phys Today*, vol. 57, no. 12, pp. 39–44, Dec. 2004, doi: 10.1063/1.1878333.
- [22] I. Harris, D. Book, P. Anderson, and P.P. Edwards, "Hydrogen Storage: The Grand Challenge," *The Fuel Cell Review*, vol. 1, pp. 17–23, Jan. 2004.
- [23] A. Willige, "4 ways of storing hydrogen from renewable energy | Spectra." Accessed: Mar. 09, 2023. [Online]. Available: <https://spectra.mhi.com/4-ways-of-storing-hydrogen-from-renewable-energy>
- [24] J. Ren, N. M. Musyoka, H. W. Langmi, M. Mathe, and S. Liao, "Current research trends and perspectives on materials-based hydrogen storage solutions: A critical review," *Int J*

- Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 1, pp. 289–311, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.11.195.
- [25] P. Costa, “Armazenamento e Transporte de Hidrogénio,” *Cadeira de Hidrogénio, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa*, 2014.
- [26] Y. Fukai, “Diffusion,” in *The Metal-Hydrogen System: Basic Bulk Properties*, 2nd ed., Springer Series in Materials Science, Berlin: Springer-Verlag, 2005, pp. 303–400. doi: 10.1007/3-540-28883-X_6.
- [27] C. Sobrinho, “Caracterização Dinâmica dos Processos de Adsorção e Desorção de Hidrogénio em Hidretos Metálicos,” Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2008.
- [28] Rangel C M, V. R. Fernandes, and Gano A J, “SISTEMA DE PRODUÇÃO E ARMAZENAMENTO DE HIDROGÉNIO INTEGRADO BASEADO EM HIDRETOS METÁLICOS PARA APLICAÇÕES ESTACIONÁRIAS,” 2020, doi: 10.34637/cies2020.2.5153.
- [29] J. Neto et al., “Produção de hidrogénio diretamente a partir de energia solar,” *Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa*, 2015.
- [30] Power, “Understanding Fuel Cells and Their Role in the Green Energy Revolution,” Power. Accessed: Feb. 22, 2023. [Online]. Available: <https://www.powermag.com/understanding-fuel-cells-and-their-role-in-the-green-energy-revolution/>
- [31] R. Neves, “PDIS – Pilhas de Combústivel | Enhanced Reader.” [Online]. Available: https://paginas.fe.up.pt/~ee02035/Pilhas_Combustivel.pdf. Accessed: Mar. 01, 2023.
- [32] J. Hu and A. Lanzon, “Distributed Finite-Time Consensus Control for Heterogeneous Battery Energy Storage Systems in Droop-Controlled Microgrids,” *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 10, no. 5, pp. 4751–4761, Sep. 2019, doi: 10.1109/TSG.2018.2868112.
- [33] B. T. Patterson, “DC, Come Home: DC Microgrids and the Birth of the ‘Eternet,’” *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 10, no. 6, pp. 60–69, Nov. 2012, doi: 10.1109/MPE.2012.2212610.
- [34] “Distributed Control Systems for Small-Scale Power Networks: Using Multiagent Cooperative Control Theory,” *IEEE Control Syst*, vol. 34, no. 6, pp. 56–77, Dec. 2014, doi: 10.1109/MCS.2014.2350571.
- [35] L. Paulis Mendonça, “INTRODUÇÃO ÀS MICRORREDES E SEUS DESAFIOS,” Monografia de Licenciatura, Departamento de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011. [Online]. Available: <https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/8104/1/monopoli10003805.pdf>. Accessed: Mar. 01, 2023.
- [36] D. E. Olivares *et al.*, “Trends in Microgrid Control,” *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 5, no. 4, pp. 1905–1919, Jul. 2014, doi: 10.1109/TSG.2013.2295514.
- [37] H. Djoudi, A. Badji, N. Benyahia, M. Zaouia, H. Denoun, and N. Benamrouche, “Modeling and power management control of the photovoltaic and fuel cell/electrolyzer system

for stand-alone applications," in 2015 4th International Conference on Electrical Engineering (ICEE), IEEE, Dec. 2015, pp. 1–6. doi: 10.1109/INTEE.2015.7416750.

- [38] A. Züttel, "Hydrogen storage methods," *Naturwissenschaften*, vol. 91, no. 5, pp. 157–172, May 2004, doi: 10.1007/s00114-004-0510-6.
- [39] D. E. Olivares et al., "Trends in Microgrid Control," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, no. 4, pp. 1905–1919, Jul. 2014, doi: 10.1109/TSG.2013.2295514.
- [40] "Welcome to wind-turbine-models," *Wind Turbin Models*, May 2016. [Online]. Available: <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/1183-enercon-e-126-ep4>. [Accessed: Feb. 23, 2023].

ANEXOS

Anexo 1 - Ficha técnica da Turbina eólica

Enercon E-126 EP4

Start / Turbines / Enercon / E-126 EP4

Datasheet

Power		Generator	
Rated power:	4,200.0 kW	Type:	synchronous
Flexible power ratings:	-	Number:	1.0
Cut-in wind speed:	3.0 m/s	Speed, max:	11.6 U/min
Rated wind speed:	13.5 m/s	Voltage:	690.0 V
Cut-out wind speed:	34.0 m/s	Grid connection:	inverters
Survival wind speed:	-	Grid frequency:	50.0 Hz
Wind zone (DIBt):	III	Manufacturer:	Enercon
Wind class (IEC):	IIa		

Anexo 2 - Ficha técnica do eletrolisador

10 MW Block Parameters



H₂ production nominal	4600 kg/d 2130 Nm ³ /h
Energy consumption¹	4.6 kWh/Nm ³ H ₂ 51 kWh/kg
System efficiency¹	77 %
Performance class	10 MW
H₂ production modulation range	213 – 2130 Nm ³ /h 10 – 100 %
H₂ purity including optional hydrogen purification	3.0 or 5.0 (meets ISO 14687:2019 Table 2)
H₂ purity without optional hydrogen purification	Water saturated at 65 °C and 30 bar(g)
H₂ output pressure	30 bar (g)
Load change	30 s (Minimal load to nominal load)
H₂O required quality including optional fresh water treatment	TrinkwV 2020 EU Directive 2020/2184-EU
H₂O required quality without optional fresh water treatment	DI water (fully desalinated)
DI water consumption nominal	1850 kg/h
Dimensions LxWxH (Indoor)	ca. 10 x 24 x 4.5 m
Temperature (Indoor)	+5 °C to + 40 °C

Technical changes reserved

¹ Battery limit for the efficiency: stacks and converters; standard conditions: BoL (Begin of Life), 15 °C, 30 bar(g) H₂ transfer pressure, 2000 Nm³/h, based on Higher Heating Value (HHV)



Anexo 3 - Ficha técnica da pilha de combustível

Output	
Maximum Electrical Output Power	1 MW
Electrical Connection	480V, 3P, 50/60Hz
Duty Cycle	Standby, Prime
Physical	
Dimensions	Fuel Cell Container: 40' x 8' x 19' 12.19m x 2.44m x 5.79m
	Optional Battery Module: 12' x 8' x 8' 3.66m x 2.44m x 2.44m
Protection	Outdoor Rated Enclosure
Weight	Fuel Cell Container: 70,000 kg
	Battery Module: < 9,000 kg
Operational	
Ambient Temperature	-20°C to 45°C*
Design Life	20 years
Emissions	Zero Emissions
Water Output	Up to 600L / MWh
Codes and Standards	ANSI/CSA FC1 (IEC62282-3-100)
	UL 1741-SA (IEEE 1547)
	Configuration Specific
	IEC 62619, UL 9540, NFPA 2, NFPA 853, NFPA 855
Inputs	
Fuel (Full Spec Available On Request)	99.95% Hydrogen
Input Fuel Pressure	110 psig +/- 5 psig (7.58 barg +/- .34 barg)
Fuel Storage	Low-Pressure And High-Pressure Gases, Liquid Options Available
H2 Consumption	66-69 kg/MWh

Anexo 4 - Ficha técnica do sistema de armazenamento de hidrogénio

Hydrogen Storage

HY2MEGA

Dimensions / Weight
3m x 2.5m x 2.6m /
4,000 – 6,000 kg

Key Specifications

Hydrogen Storage Capacity
Up to 250 kg / Unit
Units can be clustered / stacked

Transportable
By truck and train

Output Voltages
EU 120V / 230V / 400V – 50Hz
NA 120V / 240V / 480V – 60Hz

Pressure Range
0.5 – 40bar(g)

Hydrogen Quality
5 – 99.999%

Electrolyzer and Fuel Cell upon Customer request

Anexo 5 - Ficha técnica do sistema de armazenamento de hidrogênio



GREEN ENERGY STORAGE HY2MEDI



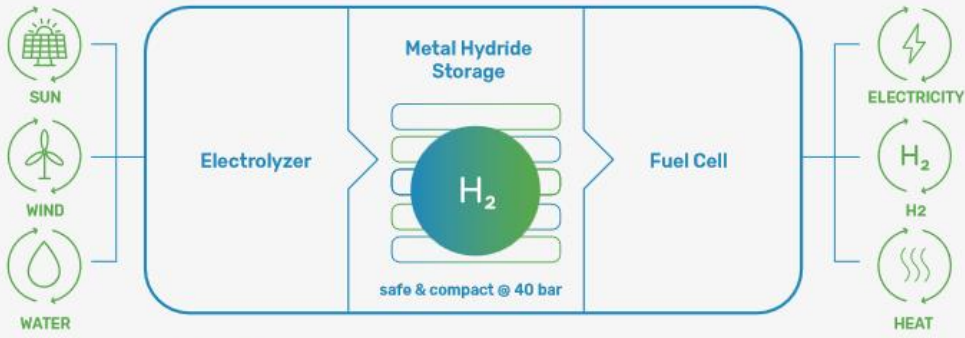
Energy storage capacity
30 – 120 kg hydrogen
 (0.5 – 2MWh electrical)

Power
7 – 14kw / 14 – 19kW
 peak load (15 min every 12h)

Electrical system
1 or 3 Phase to local requirement
 EU 120V/230V/400V – 50 Hz
 NA 120V/240V/480V – 60 Hz

20 feet containerized solution

**How to increase use of renewable energy?
 Store as green hydrogen and reuse on-demand!**



Want to learn more? www.gknhydrogen.com

SPECIFICATION



Energy storage capacity
0.5 – 2 MWh electrical
30 – 120 kg H2 @max. 40bar



Nominal load
7-14kW



Peak load
14W / 19kW
(15 min every 12h)



Output voltages
EU 120V/230V/400V - 50 Hz
NA 120V/240V/480V - 60 Hz



Power during outage
7kW up to 285h /
14kW up to 142h



Electrolyzer
Up to 10 kg hydrogen per day



Dimensions / Weight
6.0 m x 2.5 m x 2.6 m /
13,000 - 20,000 kg

Application areas



INDUSTRY



BACK-UP
 POWER SUPPLY



MICRO GRIDS
 & AUTARCHY



ENERGY BALANCING



ELECTRICAL
 VEHICLE CHARGING

Unique advantages

- 100% recyclable
- 100% safe – Solid state hydrogen storage at max. 40 bar
- Superior energy / space ratio vs. batteries or compressed gas storage
- Storage life expectancy of 30 years
- Energy storage capacity maintained over lifetime
- No compressor needed

Requirements

- Concrete foundation (building authority)
- Interface points (Input: PV, wind.../ Output: power line, waste heat recovery line)
- Definition of operational mode (off-grid, grid-parallel, back-up power)
- Certification authority request

Want to learn more? www.gknhydrogen.com



Anexo 6 - Dados de mês de agosto

valor medio para mês de				Painel Fotovoltaico		Parque Fotovoltaico	Turbian Eolica
Hour	Temperature	GHI	Wind Speed	Tensao	para 200W	de 8.000 kW	8000kW
0	28,2	0	3,7	0	0	0	264,42
1	28,2	0	3,7	0	0	0	264,42
2	28,0	0	3,6	0	0	0	241,56
3	27,9	0	3,6	0	0	0	241,56
4	28,0	0	3,6	0	0	0	241,56
5	27,9	0	3,8	0	0	0	287,28
6	27,9	0	3,9	0	0	0	310,14
7	28,2	54	4,1	21,6	7,88	315,20	371,7
8	28,5	253	3,9	24	45,5	1820	310,14
9	28,8	448	3,9	24,8	83,8	3352	310,14
10	29,2	649	4,0	25	123,1	4924	333
11	29,5	635	3,8	25	120	4800	287,28
12	29,7	748	3,7	25,6	141,9	5676	264,42
13	29,8	777	3,5	25,6	147,5	5900	218,7
14	29,9	776	3,5	25,6	147,1	5884	218,7
15	29,9	659	3,5	25,9	124,3	4972	218,7
16	29,7	465	3,6	24,8	86,5	3460	241,56
17	29,5	276	3,7	24	49,5	1980	264,42
18	29,2	136	3,7	23,2	22,8	912	264,42
19	28,9	1	3,7	0	0	0	264,42
20	28,7	0	3,7	0	0	0	264,42
21	28,6	0	3,9	0	0	0	310,14
22	28,5	0	3,7	0	0	0	264,42
23	28,4	0	3,6	0	0	0	241,56
					1099,88	43995,2	6499,08

Anexo 7 - Dados de mês de novembro

valor medio para mês de				Painel Fotovoltaico		Parque Fotovoltaico	Turbian Eolica
Hour	Temperature	GHI	Wind Speed	Tensao	para 200W	de 8000 kW	8000kW
0	27,4	0	4,5	0	0	0,0	526,5
1	27,3	0	4,3	0	0	0,0	449,1
2	27,2	0	4,2	0	0	0,0	410,4
3	27,1	0	4,3	0	0	0,0	449,1
4	27,1	0	4,2	0	0	0,0	410,4
5	27,0	0	4,5	0	0	0,0	526,5
6	27,0	0	4,4	0	0	0,0	487,8
7	27,2	21	4,4	23,14	13,85	554,0	487,8
8	27,5	195	5,1	24,81	49,75	1990,0	782,1
9	27,9	385	5,0	25,58	84,88	3395,2	720
10	28,3	554	5,0	25,58	112,1	4484,0	720
11	28,5	667	5,0	25,58	129,6	5184,0	720
12	28,8	724	5,1	25,58	136,9	5476,0	782,1
13	28,9	713	5,0	25,58	124,3	4972,0	720
14	29,0	625	4,9	25,58	100,6	4024,0	681,3
15	29,0	482	4,8	24,8	67,41	2696,4	642,6
16	28,8	321	5,0	24	34,54	1381,6	720
17	28,5	147	4,9	21,6	8,29	331,6	681,3
18	28,2	1	4,6	0	0	0,0	565,2
19	28,0	0	4,5	0	0	0,0	526,5
20	27,8	0	4,5	0	0	0,0	526,5
21	27,6	0	4,6	0	0	0,0	565,2
22	27,5	0	4,4	0	0	0,0	487,8
23	27,4	0	4,5	0	0	0,0	526,5
					862,22	34488,8	14114,7