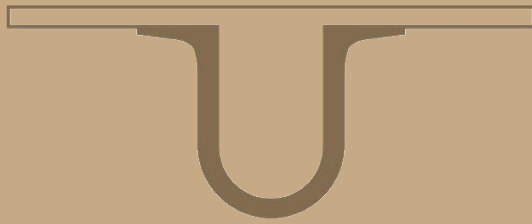




UNIVERSIDADE DE
COIMBRA



Jonathan Ignácio Pita Rodrigues

**INTEGRAÇÃO DE FONTES DE ENERGIA RENOVÁVEL EM
SISTEMAS ELÉTRICOS ISOLADOS**

Dissertação de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Área de Especialização em Energia

Fevereiro de 2019



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETROTECNICA E DE
COMPUTADORES

**Integração de Fontes de Energia Renovável em
Sistemas Elétricos Isolados**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Eletrotécnica na Especialidade de Energia

Autor

Jonathan Ignácio Pita Rodrigues

Orientador

Professor Doutor Humberto Manuel Matos Jorge

Presidente do Júri

Professor Doutor Álvaro Filipe Peixoto Cardoso de Oliveira Gomes

Vogal

Professor Doutor Pedro Manuel Soares Moura

Coimbra, fevereiro, 2019.

A simplicidade é o último grau de sofisticação.

Leonardo da Vinci.

Agradecimentos

Esta dissertação marca o tão esperado fim de uma longa caminhada, que não seria feita sem as pessoas que me acompanharam e deram força, mesmo estando longe, assim ficam aqui as minhas palavras de agradecimento

Em primeiro lugar, à minha família. À minha mãe, por ser sempre uma enorme fonte de força e alegria, mesmo quando só lhe ligava de mês em mês e as suas primeiras palavras eram sempre: “*ainda és vivo?*”. À minha irmã, por ser o motivo pelo qual escolhi vir para Coimbra e, embora seja pequenina, carregou-me durante todo este percurso. Sem o seu apoio nos primeiros tempos, as minhas malas estavam arrumadas e eu pronto para voltar para a ilha. Ao meu pai, ainda que o discurso motivacional não ser o seu forte, apenas quer que eu dê sempre o meu melhor. Por último, ao meu irmão, que dizem ser igual a mim e eu só espero que seja melhor.

Ao meu orientador, Professor Doutor Humberto Manuel Matos Jorge, pela disponibilidade, sugestões e orientação prestadas ao longo do desenvolvimento desta dissertação.

À Pipa, a minha melhor amiga, por ser a minha companhia e por obrigar-me a estudar sempre que não tinha vontade, que era nunca. Sem ela, estes últimos anos não tinham sido os mesmos.

Às meninas da CCQ, Rita, Beta, Sara e Bruna, por todos os risos, todos os jogos, todas as conversas, mesmo não sendo eu muito participativo, enfim, todos os momentos foram especiais, fizeram-me sentir sempre em casa, fizeram-me crescer e por tudo isto levá-las para sempre no coração.

A todos os amigos que fiz ao longo destes anos, pelo companheirismo, pelas saídas e por todos os momentos de diversão que me impediram de estudar.

Por último, ao NEEEC/AAC e a todas as pessoas com que tive o prazer de trabalhar durante os quatro anos que o representei.

Resumo

O consumo de energia elétrica tem vindo a aumentar globalmente, de ano para ano, devido ao aumento constante de população mundial, ao desenvolvimento tecnológico atual em países desenvolvidos e a evolução de países em desenvolvimento. Sendo que esta tendência não apresenta sinais de abrandamento, a aposta e desenvolvimento de alternativas ao consumo de combustíveis fósseis para a produção de energia é um dever. A produção de energia a partir de fontes de renováveis é o caminho a seguir, de forma a atingir a sustentabilidade energética.

A operação de sistemas isolados com alta penetração de energias renováveis, embora seja um passo em direção à sustentabilidade energética, traz problemas acrescidos na gestão do equilíbrio entre a produção e a procura de energia, devido a geração inconstante e a falta de resposta a variações de carga. A introdução de sistemas de armazenamento de energia à escala do sistema elétrico, para auxiliar a integração de energias renováveis na produção de eletricidade, é a solução analisada nesta dissertação, utilizando os sistemas elétricos das ilhas da Graciosa e do Porto Santo como estudo de caso.

Com recurso ao software *Hybrid Optimization Model for Electric Renewable (Homer Energy Pro)*, desenvolvido especialmente para o *design* e análise tecno-económica de sistemas híbridos de pequena dimensão, apresenta-se o dimensionamento e análise dos sistemas referidos anteriormente, a avaliação do impacto da introdução de sistemas de armazenamento e a capacidade de estes operarem totalmente a partir de fontes de energia renovável.

Palavras-chave: Sustentabilidade energética, energia renovável, sistemas isolados, sistemas híbridos, sistema de armazenamento de energia.

Abstract

The electrical energy consumption has been increasing globally, year by year, due to continuous world population growth, the current technological development in developed countries and the evolution of developing countries. Considering that this trend shows no signs of slowing down, the investment and development of alternatives to fossil fuel consumption relating to energy production is an obligation. Production of energy from renewable sources is the way in order to achieve energy sustainability.

The operation of isolated systems with high penetration of renewable energies, although it is a step towards energy sustainability, brings increased problems in the management of the balance between production and demand for energy, due to inconstant generation and lack of response to load variations. The introduction of energy storage systems in the electric system, to help the integration of renewable energies in the production of electricity, is the solution analyzed in this dissertation, using the electrical systems of the islands of Graciosa and Porto Santo as a starting point.

With the use of *Hybrid Optimization Model for Electric Renewable (Homer Energy Pro)* software, developed entirely for the desing and techno-economic analysis of small-sized hybrid systems, the sizing and analysis of the systems mentioned above, the assessment of the impact of the introduction of storage systems and the ability of them to operate fully from renewable energy sources nowadays are presented.

Keywords Energy sustainability, renewable energy, isolated systems, hybrid systems, energy storage.

Índice

Índice de Figuras.....	xi
Índice de Tabelas	xiii
Siglas	xv
Siglas	xv
1. Introdução.....	1
1.1. Motivação.....	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Estrutura.....	2
2. Estado da Arte.....	3
2.1. Sustentabilidade Energética	3
2.2. Energia Renovável.....	4
2.2.1. Energia Eólica	4
2.2.2. Energia Solar	5
2.3. Utilização de energia renovável nos arquipélagos da Madeira e dos Açores	6
2.3.1. Arquipélago da Madeira.....	6
2.3.2. Arquipélago dos Açores.....	7
2.4. Armazenamento de Energia	7
2.4.1. Armazenamento Eletroquímico – Baterias	8
2.4.2. Armazenamento hidroelétrico por bombagem	9
3. Sistemas Isolados	11
3.1. Impactos da alta penetração de energias renováveis	11
3.2. Controlo de Frequência	12
3.2.1. Resposta Inercial.....	14
3.2.2. Regulação primária e secundária.....	14
3.3. Sistemas Híbridos	16
3.3.1. Sistema híbrido Eólico-fotovoltaico- <i>diesel</i>	16
3.3.2. Sistema híbrido Eólico-fotovoltaico	18
4. Dimensionamento de Sistemas Isolados nas ilhas da Graciosa e do Porto Santo	19
4.1. Ilha da Graciosa, Açores	19
4.1.1. Dimensionamento da Carga	20
4.1.2. Dimensionamento da Geração.....	22
4.1.2.1. Geração Termoelétrica.....	22
4.1.2.2. Geração Eólica	24
4.1.2.3. Geração Fotovoltaica	26
4.2. Ilha do Porto Santo, Madeira.....	27
4.2.1. Dimensionamento da Carga	28
4.2.2. Dimensionamento da Geração.....	29
4.2.2.1. Geração Termoelétrica.....	29
4.2.2.2. Geração Eólica	30

4.2.2.3. Geração Fotovoltaica.....	31
4.3. Parametrização das características do sistema.....	32
5. Resultados de estudos de caso.....	35
5.1. Estudo de caso 1: Graciosa, caso base.....	35
5.1.1. Resultados e discussão	35
5.2. Estudo de caso 2: Graciosa, introdução de sistemas de armazenamento	38
5.2.1. Dimensionamento do sistema de armazenamento	39
5.2.2. Resultados e discussão	39
5.3. Estudo de caso 3: Graciosa, sistema 100% renovável.....	42
5.3.1. Resultados e discussão	42
5.4. Estudo de caso 4: Porto Santo, caso base	44
5.4.1. Resultados e discussão	44
5.5. Estudo de caso 5: Porto Santo, introdução de sistemas de armazenamento a baterias	47
5.5.1. Dimensionamento do sistema de armazenamento	47
5.5.2. Resultados e discussão	47
5.6. Estudo de caso 6: Porto Santo, sistema 100% renovável	51
5.6.1. Resultados e discussão	51
6. Conclusão	53
Referências Bibliográficas	55
Anexo A: Dimensionamento das cargas.....	59
Anexo B: Dimensionamento da geração térmica na ilha da Graciosa	60
Anexo C: Recurso eólico da ilha da Graciosa.....	61
Anexo D: Recurso Solar da ilha da Graciosa.....	62
Anexo E: Estudo de caso 1	63
Anexo F: Estudo de caso 2.....	66
Anexo G: Estudo de caso 3.....	70
Anexo H: Estudo de caso 4.....	72
Anexo I: Estudo de caso 5	75
Anexo J: Estudo de caso 6	78

Índice de Figuras

Figura 1 - Tipos de turbinas eólicas: Eixo vertical (esquerda e centro) e eixo horizontal (direita) [11].	5
Figura 2 - Balanço da produção de eletricidade na Região Autónoma da Madeira (janeiro a junho 2018) [14].	6
Figura 3 - Balanço da produção de eletricidade na Região Autónoma dos Açores (janeiro a agosto 2018) [15].	7
Figura 4 - Diagrama representativo de um sistema de armazenamento hidroelétrico por bombagem (Adaptado de [18]).	9
Figura 5 - Representação gráfica do controlo de frequência convencional [23].	13
Figura 6 - Desvio de frequência para duas constantes de inércia diferentes [23].	15
Figura 7 - Configuração de um sistema híbrido eólico-fotovoltaico-diesel (adaptado de [30]).	17
Figura 8 - Exemplo de um sistema híbrido eólico-fotovoltaico (adaptado de [31]).	18
Figura 9 - Evolução da produção anual da ilha da Graciosa.	20
Figura 10 - Diagramas de carga de dias típicos [33].	21
Figura 11 - Diagramas de carga da ilha da Graciosa apresentados pelo software <i>Homer Pro</i> .	22
Figura 12 - Esquema unifilar simplificado da Central Termoelétrica da Graciosa [33].	23
Figura 13 - Curvas características do gerador CAT 1100 kVA.	24
Figura 14 - Velocidade média do vento na ilha da Graciosa.	25
Figura 15 - Curva de potência da turbina eólica ENERCON E-44.	25
Figura 16 - Radiação solar média e índice de claridade para a ilha da Graciosa.	26
Figura 17 - Evolução da produção anual da ilha do Porto Santo.	27
Figura 18 - Diagramas de carga característicos por estação [38].	28
Figura 19 - Diagramas de carga da ilha do Porto Santo apresentados pelo <i>Homer Pro</i> .	28
Figura 20 - Curvas características do gerador de 4250 kW.	29
Figura 21 - Velocidade média do vento na ilha do Porto Santo.	30
Figura 22 - Curvas de potência das turbinas eólicas Vestas: (1) modelo V29 e (2) modelo V47.	31
Figura 23 - Radiação solar média e índice de claridade para a ilha do Porto Santo.	32
Figura 24 - Produção de energia: (1) Renovável vs Não Renovável e (2) Geração Eólica vs Solar.	36
Figura 25 - Mapa térmico da geração eólica.	37
Figura 26 - Mapa térmico da geração fotovoltaica.	37
Figura 27 - Mapa térmico do consumo de combustível pelos geradores termoelétricos.	38
Figura 28 - Produção de energia renovável vs não renovável.	40
Figura 29 - Mapa térmico do estado de carga do sistema de armazenamento.	41
Figura 30 - Representação gráfica da carga não alimentada (1) e da escassez de capacidade (2).	43
Figura 31 - Produção de energia: (1) Renovável vs Não Renovável e (2) Geração Eólica vs Solar.	44
Figura 32 - Mapa térmico do consumo de combustível pelos geradores termoelétricos.	45
Figura 33 - Mapa térmico da geração fotovoltaica.	46
Figura 34 - Mapa térmico da geração de energia eólica do gerador Vestas V47.	46

Figura 35 - Produção de energia renovável vs não renovável.	48
Figura 36 - Mapa térmico do estado de carga do sistema de armazenamento.....	49
Figura 37 - Mapa térmico do consumo de combustível.	50
Figura 38 - Representação gráfica da carga não alimentada (1) e da escassez de capacidade (2).....	52
Figura 39 - Perfil de carga diária por mês da ilha da Graciosa.	59
Figura 40 - Perfil de carga diária por mês da ilha do Porto Santo.	59
Figura 41 - Curvas características do gerador CAT 1275 kVA.	60
Figura 42 - Curvas características do gerador CAT 725 kVA.	60
Figura 43 - Caso 1: Potência de saída do gerador CAT 1100 kVA.	63
Figura 44 - Caso 1: Potência de saída do gerador CAT 1275 kVA número 1.	63
Figura 45 - Caso 1: Potência de saída do gerador CAT 1275 kVA número 2.	63
Figura 46 - Caso 1: Potência de saída do gerador CAT 725 kVA número 1.	64
Figura 47 - Caso 1: Potência de saída do gerador CAT 725 kVA número 2.	64
Figura 48 - Caso 1: Potência de saída do gerador CAT 725 kVA número 3.	64
Figura 49 - Caso 2: Potência de saída do gerador CAT 1100 kVA.	66
Figura 50 - Caso 2: Potência de saída do gerador CAT 1275 kVA número 1.	66
Figura 51 - Caso 2: Potência de saída do gerador CAT 1275 kVA número 2.	66
Figura 52 - Caso 2: Potência de saída do gerador CAT 725 kVA número 1.	67
Figura 53 - Caso 2: Potência de saída do gerador CAT 725 kVA número 2.	67
Figura 54 - Caso 2: Potência de saída do gerador CAT 725 kVA número 3.	67
Figura 55 - Caso 2: Geração eólica.	68
Figura 56 - Caso 2: Geração fotovoltaica.	68
Figura 57 - Caso 3: Estado de carga do sistema de armazenamento.	70
Figura 58 - Caso 3: Geração eólica (instalação atual).	70
Figura 59 - Caso 3: Geração eólica (reforço).	70
Figura 60 - Caso 3: Geração fotovoltaica (instalação atual).	71
Figura 61 - Caso 3: Geração fotovoltaica (reforço).	71
Figura 62 - Caso 4: Potência de saída do gerador G4250 kVA (1).	72
Figura 63 - Caso 4: Potência de saída do gerador G4250 kVA (2).	72
Figura 64 - Caso 4: Potência de saída do gerador G4250 kVA (3).	72
Figura 65 - Caso 4: Potência de saída do gerador G4250 kVA (4).	73
Figura 66 - Caso 4: Geração de energia dos geradores Vestas V27.	73
Figura 67 - Caso 5: Potência de saída do gerador G4250 kVA (1).	75
Figura 68 - Caso 5: Potência de saída do gerador G4250 kVA (2).	75
Figura 69 - Caso 5: Potência de saída do gerador G4250 kVA (3).	75
Figura 70 - Caso 5: Geração de energia do gerador Vestas V49.	76
Figura 71 - Caso 5: Geração de energia dos geradores Vestas V27.	76
Figura 72 - Caso 5: Geração fotovoltaica.	76
Figura 73 - Caso 6: Estado de carga do sistema de armazenamento.	78
Figura 74 - Caso 6: Geração eólica (instalação atual).	78
Figura 75 - Caso 6: Geração eólica (reforço).	78
Figura 76 - Caso 6: Geração fotovoltaica (reforço).	79
Figura 77 - Caso 6: Geração fotovoltaica (instalação atual).	79

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Dados referentes ao dimensionamento da carga da ilha da Graciosa.....	22
Tabela 2 - Dados para o dimensionamento do gerador ENERCON E-44.	25
Tabela 3 - Dados para o dimensionamento do parque fotovoltaico da ilha da Graciosa.	26
Tabela 4 - Dados referentes ao dimensionamento da carga da ilha do Porto Santo.	29
Tabela 5 - Dados para o dimensionamento dos aerogeradores Vestas V29 e V47.	30
Tabela 6 – Dados para o dimensionamento do parque fotovoltaico da ilha do Porto Santo.	31
Tabela 7 - Parametrização da reserva de operação.	33
Tabela 8 - Funcionamento do sistema.	35
Tabela 9 - Produção de energia anual por tipo de geração.	36
Tabela 10 – Custos gerais do sistema.	36
Tabela 11 – Dados para o dimensionamento do sistema de armazenamento da ilha da Graciosa.	39
Tabela 12 – Funcionamento do sistema após a introdução de baterias.	39
Tabela 13 - Energia produzida anual por tipo de geração.	40
Tabela 14 - Custos gerais do sistema.	40
Tabela 15 - Dados de operação do sistema de armazenamento.	41
Tabela 16 - Dados do reforço do sistema.	42
Tabela 17 - Funcionamento do sistema 100% renovável da ilha da Graciosa.	42
Tabela 18 - Funcionamento do sistema.	44
Tabela 19 - Produção de energia anual por tipo de geração.	45
Tabela 20 – Custos gerais do sistema.	45
Tabela 21 – Dados para o dimensionamento do sistema de armazenamento da ilha do Porto Santo.	47
Tabela 22 - Funcionamento do sistema.	48
Tabela 23 - Produção de energia anual por tipo de geração.	49
Tabela 24 - Custos gerais do sistema.	49
Tabela 25 - Dados de operação do sistema de armazenamento.	50
Tabela 26 - Dados do reforço do sistema.	51
Tabela 27 - Funcionamento do sistema 100% renovável da ilha da Graciosa.	51
Tabela 28 - Dados da velocidade média do vento na ilha da Graciosa.	61
Tabela 29 - Recurso eólico da ilha da Graciosa.	61
Tabela 30 - Recurso Solar da ilha da Graciosa.	62
Tabela 31 - Recurso Solar da ilha da Graciosa.	62
Tabela 32 - Caso 1: Produção de energia por gerador.	65
Tabela 33 - Caso 1: Emissão de gases pelo sistema.	65
Tabela 34 - Caso 2: Produção de energia por gerador.	68
Tabela 35 - Caso 2: Emissão de gases pelo sistema.	69
Tabela 36 - Caso 2: Produção de energia por gerador.	71
Tabela 37 - Dados de operação do sistema de armazenamento.	71
Tabela 38 - Caso 4: Produção de energia por gerador.	73
Tabela 39 - Caso 4: Emissão de gases pelo sistema.	74
Tabela 40 - Caso 5: Produção de energia por gerador.	77

Tabela 41 - Caso 5: Emissão de gases pelo sistema.....	77
Tabela 42 - Caso 6: Produção de energia por gerador.....	79
Tabela 43 -Caso 6 Dados de operação do sistema de armazenamento.	79

Siglas

Siglas

EDA – Eletricidade dos Açores

EEM – Empresa de Eletricidade da Madeira

1. Introdução

1.1. Motivação

Atingir a sustentabilidade, em todas as vertentes, é um dos principais objetivos da atualidade, sendo que o setor elétrico não é exceção, em que o consumo de energia aumenta de dia para dia globalmente. É imperativo que o consumo de combustíveis fósseis para a produção de energia elétrica seja reduzido, dado ao impacto ambiental associado às emissões de gases de efeito de estufa e a sua natureza finita.

Desde a publicação do Protocolo de Quioto, assinado em 1997 e que estabeleceu metas para a redução da emissão de gases de efeito de estufa, vários países e regiões promoveram o uso de fontes de energia renovável. Em seguimento deste protocolo, a Comissão Europeia apresentou a estratégia “*Europa 2020*”, para um crescimento inteligente, sustentável e inclusivo da União Europeia, com uma série de objetivos a cumprir pelos países-membros até o ano 2020, em que objetivos para o setor elétrico passam por reduzir 20% da emissão de gases de efeito de estufa, relativamente aos níveis de 1990, aumentar 20% a utilização de energias renováveis no consumo de energia e aumentar 20% a eficiência energética [1].

Nos sistemas isolados, como são as ilhas, o uso de sistemas de produção de energia renovável é visto como um bom investimento, não só do ponto de vista ambiental, como também económico. No entanto, apresenta dificuldades acrescidas devido às características de intermitência que têm as energias renováveis.

Apesar das vantagens da utilização de sistemas de energia renovável serem óbvias, a sua implementação proporciona uma série de desafios na operação do sistema elétrico, sendo estes desafios ainda mais complexos em sistemas isolados, em que a geração de energia inconstante e a ausência de capacidade de resposta a variações de carga são problemas a ter em conta. Em resposta a estes problemas, a instalação de baterias à escala do sistema elétrico é uma solução a ter em conta. A meta final passará pela conjugação de vários componentes e estratégias para a integração de energia renovável, de forma a produção de energia ser inteiramente feita a partir de recursos naturais [2].

1.2. Objetivos

Os objetivos desta dissertação passam pela avaliação dos sistemas elétricos das ilhas da Graciosa, do arquipélago dos Açores, e do Porto Santo, do arquipélago da Madeira, que embora tenham dimensões semelhantes, são bastante diferentes em termos de geração e de carga.

Será feita a análise do impacto da introdução de sistemas de armazenamento nos respetivos sistemas elétricos, de forma a testar a sua viabilidade, técnica e economicamente. Por último, será testada a operação destes sistemas com apenas sistemas de geração de energia renovável.

1.3. Estrutura

Este trabalho encontra-se dividido em seis capítulos, em que no capítulo 1 é feita a introdução à dissertação.

No capítulo 2, dedicado ao estado da arte, são apresentados conceitos de sustentabilidade energética, energia renovável e armazenamento de energia. Também é apresentada a utilização de energia renovável nos arquipélagos portugueses.

No capítulo 3 é apresentada a definição de sistemas isolados, os impactos da alta penetração de energias renováveis, o conceito de controlo de frequência e a definição de sistemas híbridos.

No capítulo 4 é feita a descrição dos componentes que compõem os sistemas elétricos das ilhas da Graciosa e do Porto Santo. Com base nesses dados, estes sistemas foram implementados no *software* utilizado na elaboração desta dissertação, o *Homer Pro*.

O capítulo 5 é dedicado à análise e discussão de resultados, técnicos e económicos, obtidos através das simulações de diferentes casos de estudo, com base nos sistemas implementados anteriormente.

Por fim, no capítulo 6 são expostas todas as conclusões retiradas dos resultados dos casos de estudo.

2. Estado da Arte

2.1. Sustentabilidade Energética

O conceito de sustentabilidade é relativamente recente. Em [3], desenvolvimento sustentável é definido como desenvolvimento que satisfaz as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazerem as suas próprias necessidades. Este conceito assenta em três pilares: económico, social e ambiental, que devem ser tidos em conta de forma igual, sendo que o fator ambiental é o principal motivo para o aparecimento deste movimento, devido aos danos a longo prazo causados até então.

O consumo de energia tem vindo a aumentar ano após ano, desde a revolução industrial, em meados de 1800 [4]. Este aumento surge devido a fatores como o aumento da população no mundo, o desenvolvimento e constante uso da tecnologia em países desenvolvidos e a evolução dos países em desenvolvimento. O uso de combustíveis fósseis continua a ser a principal fonte de energia primária, o que traz consequências prejudiciais para o ambiente, como a degradação da camada de ozono, alterações climáticas e o aumento dos riscos para a saúde dos seres vivos [5], devido a libertação de gases de estufa, principalmente dióxido de carbono. Estes recursos têm ainda uma natureza limitada, portanto não é espectável que consigam acompanhar o aumento da procura.

A adoção de sistemas de energia limpa é a solução ideal para suprir o aumento da procura de energia, sem prejudicar o ambiente e depender dos combustíveis fósseis, o que levará a benefícios sociais, ambientais, económicos e energéticos. Para ser verdadeiramente sustentável, um sistema de energia deverá cumprir os seguintes critérios:

- i. Impacto social e ambiental mínimo ou nulo;
- ii. Preservação de recursos naturais;
- iii. Suprir a procura de energia atual e futura de forma eficiente e ambientalmente neutra;
- iv. Proteção do ambiente;
- v. Emissão de gases de estufa mínima ou nula [6].

2.2. Energia Renovável

As fontes de energia renovável têm o potencial de desempenhar um papel importante no futuro. Estas são reabastecidas naturalmente, mas limitadas pelo fluxo. São praticamente inesgotáveis, mas limitadas na quantidade de energia disponível por unidade de tempo [7]. Têm a capacidade de fornecer energia livre de emissões poluentes, de uma forma fiável, acessível e ambientalmente sustentável de produzir energia de maneira descentralizada para atender às necessidades de energia em sistemas de pequena escala, sendo então uma alternativa ideal aos combustíveis fósseis. Várias tecnologias de energia renovável como a hídrica, solar, eólica, geotérmica, biomassa e das ondas e mares, estão hoje em prática e atualmente fornecem cerca de 26.5% da procura mundial de energia [8], mas muitas ainda estão em desenvolvimento [9]. A. Hussain et al. faz ainda uma análise a fontes de energia renovável emergentes.

Apesar das vantagens apresentadas, existem contrapartidas como a intermitência na produção, devido a variações sazonais e climáticas, pois a maioria estão dependentes do clima, por isso a sua exploração exige métodos complexos de otimização de projeto, planeamento e controlo [10].

2.2.1. Energia Eólica

O vento pode ser uma fonte efetiva de geração de energia e tem um vasto potencial para suprir as necessidades energéticas no mundo. É renovável, limpo e favorece a proteção ambiental, pois não produz gases de efeito de estufa durante a produção de energia e requer uma área reduzida de terra. O aproveitamento de energia a partir do vento é uma tecnologia madura, há mais de 3500 anos turbinas eólicas têm fornecido energia para a humanidade e hoje está pronta para ser implementada em grande escala a um custo razoável, mesmo em comparação com outras fontes de energias renováveis. A energia eólica pode ser usada diretamente como potência mecânica, ou indiretamente, ao converter a energia cinética do vento em energia elétrica.

Uma turbina eólica consiste tipicamente em: três pás eólicas, um rotor, uma torre, uma caixa de velocidades e um gerador. O design e o tamanho das turbinas são fatores cruciais na geração de energia. Os principais objetivos do desenvolvimento tecnológico das turbinas eólicas são maximizar o aproveitamento do vento e redução dos custos envolvidos. Como resultado, a potência nominal das turbinas eólicas hoje no mercado pode variar entre

vários kilowatts a megawatts. O diâmetro da turbina é um parâmetro importante, pois as pás mais longas aproveitam uma área de vento maior e assim produzem mais energia.

As turbinas eólicas podem ser divididas em dois tipos: (1) turbinas eólicas de eixo horizontal e (2) turbinas eólicas de eixo vertical, apresentados na Figura 1, em que as primeiras são as mais utilizadas, devido a sua maior eficiência e produção de energia. Estas podem ser instaladas em terra (*onshore*) ou no mar (*offshore*) [11].

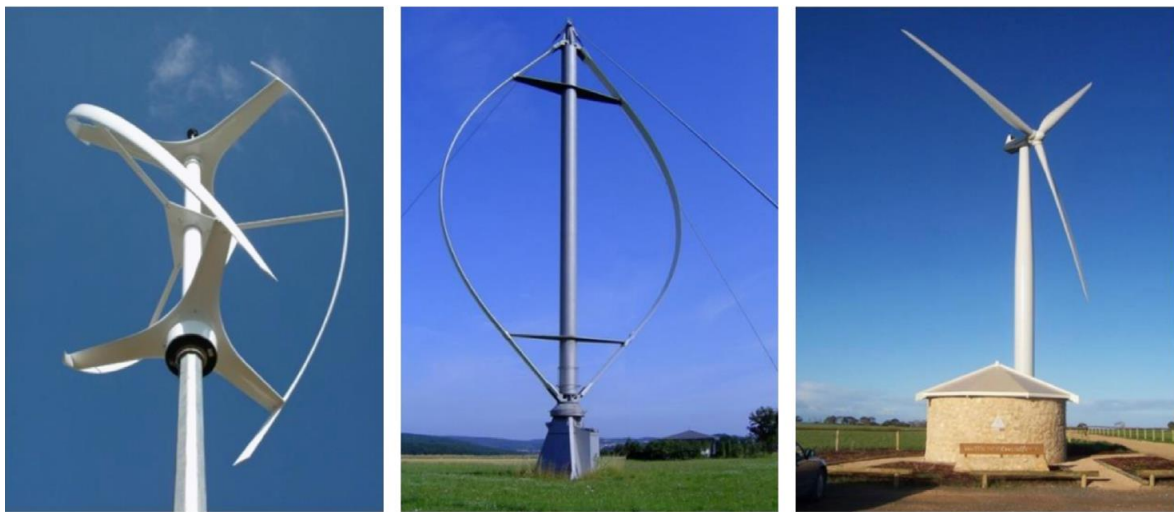


Figura 1 - Tipos de turbinas eólicas: Eixo vertical (esquerda e centro) e eixo horizontal (direita) [11].

2.2.2. Energia Solar

O Sol é uma das principais fontes de energia livre e inesgotável para o planeta Terra. Teoricamente, a energia solar possui o potencial para satisfazer totalmente a procura de energia no mundo, se as tecnologias para o seu aproveitamento estivessem disponíveis. Cerca de quatro milhões de exajoules ($1 \text{ EJ} = 10^{18} \text{ J}$) de energia solar atingem a terra por ano, aproximadamente $5 \times 10^4 \text{ EJ}$ dos quais podem ser facilmente aproveitados. Apesar do enorme potencial, a contribuição da energia solar no fornecimento global de energia é mínima. A capacidade de aproveitamento da energia solar também é influenciada por fatores como latitude, variação diurna e o clima.

As tecnologias de energia solar podem ser divididas em tecnologias passivas ou ativas. As tecnologias passivas são aquelas que utilizam a energia térmica ou luz sem qualquer tipo de transformação, como o aproveitamento da luz natural. Por outro lado,

sistemas de energia solar ativos são aqueles que captam a radiação solar e a convertem em calor ou energia elétrica. Estas podem ser divididas em duas categorias: (1) tecnologia fotovoltaica, em pequena e grande escala, e (2) tecnologia solar térmica, para aplicações domésticas e/ou comerciais. O uso de painéis fotovoltaicos para produzir eletricidade é um dos mais promissores mercados no campo da energia renovável, devido a ser uma tecnologia em evolução e com perspectivas de altos investimentos envolvidos, mas para já é um sistema que tem algumas lacunas, como altos custos de instalação e eficiência baixa [12].

2.3. Utilização de energia renovável nos arquipélagos da Madeira e dos Açores

2.3.1. Arquipélago da Madeira

O setor elétrico do arquipélago da Madeira é dominado pela utilização dos combustíveis fósseis. Nos últimos doze meses foram produzidos 833.3 GWh em que as fontes de energia primária diesel e gás natural são as principais contribuidoras, com 51.6% e 17.4% respetivamente. As tecnologias de energia renovável produziram os restantes 31% de toda a energia produzida, em especial a energia eólica (12.2%) e a energia hídrica (11.1%). A energia solar forneceu 4.4% [13].

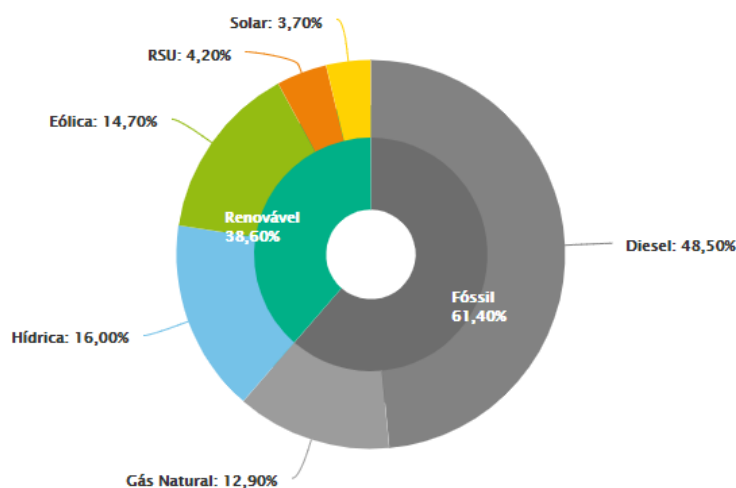


Figura 2 - Balanço da produção de eletricidade na Região Autónoma da Madeira (janeiro a junho 2018) [14].

2.3.2. Arquipélago dos Açores

De janeiro a agosto de 2018 foram produzidos mais de 811 GWh na Região Autónoma dos Açores, sendo que 743 GWh destes foram consumidos. Os combustíveis fósseis são a principal fonte de produção de energia elétrica, com 61.3% de toda a produção. As energias renováveis produzem os restantes 38.7%. A energia geotérmica é a mais explorada na região, contribuindo com 26.1% da eletricidade produzida. A energia eólica contribuiu com 7.5% [15].

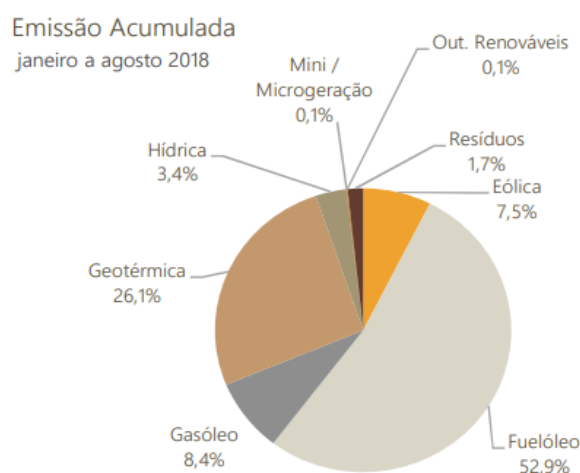


Figura 3 - Balanço da produção de eletricidade na Região Autónoma dos Açores (janeiro a agosto 2018) [15].

2.4. Armazenamento de Energia

O armazenamento de energia é essencial num sistema de fornecimento de energia elétrica moderno, onde se pretende uma integração crescente das energias renováveis. O grande desafio que a maioria dos recursos energéticos renováveis enfrenta, em especial a solar e a eólica, é a sua natureza intermitente, o que as torna inviáveis para o fornecimento constante de energia. Este problema pode ser resolvido com a integração de sistemas de armazenamento de energia, armazenando o excesso de energia gerada quando os recursos renováveis estão disponíveis e despachar esta energia quando os recursos renováveis não estiverem disponíveis.

A forma mais comum e estável em que a energia é armazenada é na sua forma primária, o que faz com que a maioria das energias primárias sejam facilmente armazenadas. Porém, no caso dos recursos de energia renovável, a sua forma primária não é armazenável,

o que obriga a que sejam convertidos em formas de energia secundária, como calor e eletricidade. O conceito geral do armazenamento de energia é guardar energia produzida num intervalo de tempo e utilizá-la mais tarde. O processo de captura de energia é denominado como carregamento, enquanto o processo de libertação de energia é considerado como descarga.

Este processo tem vários benefícios: ajuda a reduzir o consumo excessivo de combustíveis fósseis, associado com o aquecimento global, ao mesmo tempo conserva esses recursos com uma natureza não renovável. Pode desempenhar um papel importante na penetração de recursos energéticos renováveis, limpos e intermitentes. Ajuda no planeamento, operação e controlo de frequência dos sistemas de energia elétrica. Ajuda ainda a manter a estabilidade e melhorar a qualidade da energia em microrredes [16].

2.4.1. Armazenamento Eletroquímico – Baterias

As baterias serão um dos métodos de armazenamento escolhidos neste caso de estudo. Consistem na conversão direta da energia química presente no material do sistema de armazenamento em energia elétrica. As baterias são uma técnica avançada para armazenar energia elétrica em modo eletroquímico. Uma vantagem do uso de baterias é a ampla gama de tamanhos em que pode ser usada, através de ligações em série ou paralelo de células para obter níveis de tensão e corrente operacionais.

Existem hoje no mercado vários tipos de baterias, com diferentes níveis de desempenho e custo. As baterias de ácido-chumbo estão disponíveis em grandes quantidades, em vários tamanhos e modelos. Têm um alto desempenho e são a opção mais económica. As baterias de níquel-cádmio e de hidreto de níquel possuem uma boa capacidade de carga, alta densidade de energia e um longo ciclo de vida, contudo são economicamente menos viáveis que as anteriores. As baterias de íões de lítio têm uma capacidade de carga rápida, alta densidade de energia, não precisam de manutenção durante a operação e uma muito baixa perda de energia. No entanto, o seu desempenho diminui a altas temperaturas e necessitam de sistemas de proteção. Por último, as baterias de sódio-enxofre precisam de operar a alta temperatura para manter o sódio no estado líquido, o que leva a dificuldades de operação e aumenta o custo de implementação, porém a sua eficiência é alta e são sistemas muito flexíveis [17].

2.4.2. Armazenamento hidroelétrico por bombagem

O armazenamento hidroelétrico por bombagem é a tecnologia de armazenamento de energia mais utilizada nos sistemas de energia elétrica. Fornece uma solução mais madura e acessível comercialmente entre toda a gama de sistemas de armazenamento. Tem várias utilidades para estabilizar a rede elétrica, como a modulação dos picos de procura, balanço de carga, controlo de frequência e a gestão da reserva. É composto tipicamente por turbinas reversíveis e dois reservatórios, um com altitude ao outro, como apresentado na Figura 4. Na bombagem usa-se eletricidade existente em excesso no sistema e a baixo custo para mover a água do reservatório inferior para o superior. Durante períodos de alta procura de eletricidade, a água é libertada do reservatório superior para o inferior, produzindo energia.

Existem sistemas de armazenamento têm dois tipos de instalações distintas: (1) Puro ou *off-stream*, que dependem inteiramente de água previamente bombeada para um reservatório superior para produzir energia; (2) Combinados ou híbridos, em que o reservatório superior é abastecido tanto por bombagem como por um fluxo de água natural. Estes sistemas são bastante eficientes, varia entre 60% para instalações mais antigas e 80% para sistemas mais recentes, por serem sistemas utilizados e desenvolvidos já há muito tempo e com um longo ciclo de vida [18].

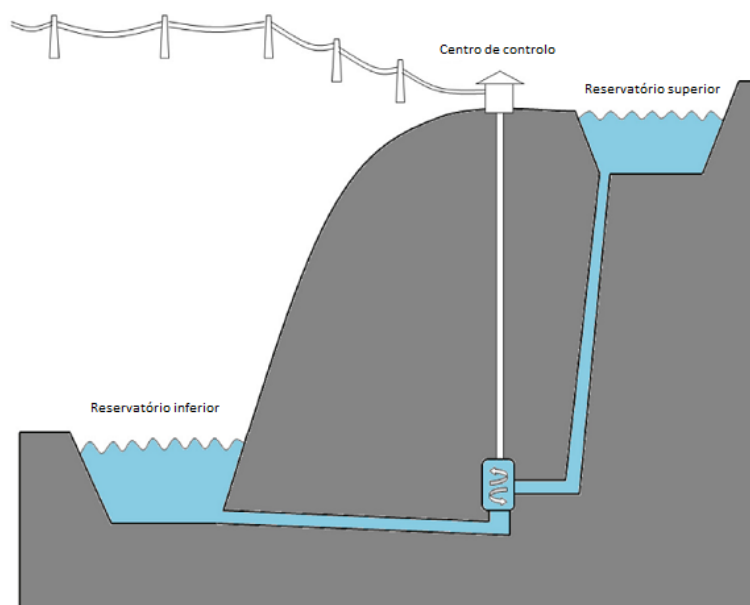


Figura 4 - Diagrama representativo de um sistema de armazenamento hidroelétrico por bombagem (Adaptado de [18]).

3. Sistemas Isolados

Sistemas isolados são sistemas que têm de produzir e gerir a sua própria energia, pois não estão ligados a rede elétrica principal, como é o caso de ilhas e aldeias remotas, logo o planeamento energético nestas regiões é muito diferente. Enormes distâncias dos grandes centros populacionais, acesso às redes de serviços públicos limitado e alta dependência em energia importada, principalmente combustíveis fósseis, com custos adicionais pelo transporte são as principais características deste tipo de sistema [19].

No caso concreto das ilhas, devido a localização e a pequena área, as fontes de energia tradicionais são limitadas, o que leva a serem dependentes da importação de combustíveis fósseis. Porém, o custo destas fontes de energia é consideravelmente mais alto em ilhas em relação a áreas continentais, o que é um desafio para a economia destas regiões, além dos problemas ambientais associados ao seu consumo. Por estas razões, a penetração de energias renováveis neste tipo de sistema é vista como a melhor solução a este problema. Os recursos de energia renováveis são abundantes nestas regiões, com as vantagens de serem recursos inesgotáveis, limpos e sem requisitos de transporte. Contudo, a alta penetração de energias renováveis, por serem dependentes de elementos naturais inconstantes, levará a instabilidade no sistema de energia. Portanto é essencial desenvolver e aplicar tecnologias integradas na rede para garantir o fornecimento de energia constante e estável [20].

3.1. Impactos da alta penetração de energias renováveis

Os sistemas isolados são extremamente vulneráveis a variações de frequência, aliados a desequilíbrios entre a geração e a procura de energia, por terem um momento de inércia menor e uma rede mais fraca do que a rede elétrica convencional. A alta penetração de energias renováveis, como a solar e a eólica, torna o problema pior. Isto faz com que as estratégias de controlo deste tipo de sistema, especialmente com a penetração de energias renováveis, sejam diferentes das estratégias convencionais [21]. Estes impactos negativos para a qualidade de energia podem ser divididos em dois grupos: (1) do ponto de vista dos sistemas de energia renovável e (2) do ponto de vista da rede elétrica. É vital desenvolver

métodos de controlo apropriados para que as energias renováveis possam fazer parte da regulação dos sistemas elétricos futuros, de forma autónoma e segura.

Do ponto de vista dos sistemas de energia renovável, especialmente a solar e a eólica, a geração de energia é intermitente, devido a natureza imprevisível e não controlável dos recursos usados. Uma turbina eólica necessita de vento e um sistema fotovoltaico requer luz solar para operar. Quando as velocidades de vento e a luz solar variam, a produção de energia varia da mesma forma. Esta variabilidade incontrollável pode resultar em flutuações de tensão e frequência no sistema de energia, o que requer energia adicional para equilibrar a produção e a procura de forma instantânea e ainda regulação de frequência e tensão, portanto é essencial desenvolver integrar tecnologias de suporte apropriados.

Do ponto de vista da rede elétrica, o equilíbrio entre a produção e a procura de energia deve manter-se, mas isto nem sempre é possível, devido a variações súbitas de produção ou carga, o que leva a variação da frequência do sistema. A variação de frequência é mais acentuada em sistemas pequenos isolados, pois a inércia do sistema é menor em relação a rede convencional, ainda menor com a penetração de energias renováveis. Também a resposta destas tecnologias a variações de frequência é limitada, tanto que a dadas variações de frequência, postos de produção com fontes de energia renovável são desligados da rede, não contribuindo para o controlo de frequência necessário para voltar a estabilizar a rede [22].

3.2. Controlo de Frequência

O método convencional de controlo de frequência está representado na Figura 5. Durante a operação normal, a frequência do sistema é 50Hz. No entanto, devido a ocorrência de um evento que cause o desequilíbrio entre a geração e a procura de energia, a frequência do sistema irá variar. Esta variação depende da inércia total do sistema e da gravidade do desequilíbrio entre a produção e a procura, como apresentado na equação seguinte:

$$\frac{df}{dt} = \frac{f_0}{2H_s S_n} (P_m - P_e) \quad (1)$$

Sendo:

df/dt – Variação de frequência num intervalo de tempo;

f_0 – Frequência do sistema;

H_s – constante de inércia total do sistema;

S_n – Potência aparente nominal;

P_m – Potência mecânica;

P_e – Potência elétrica.

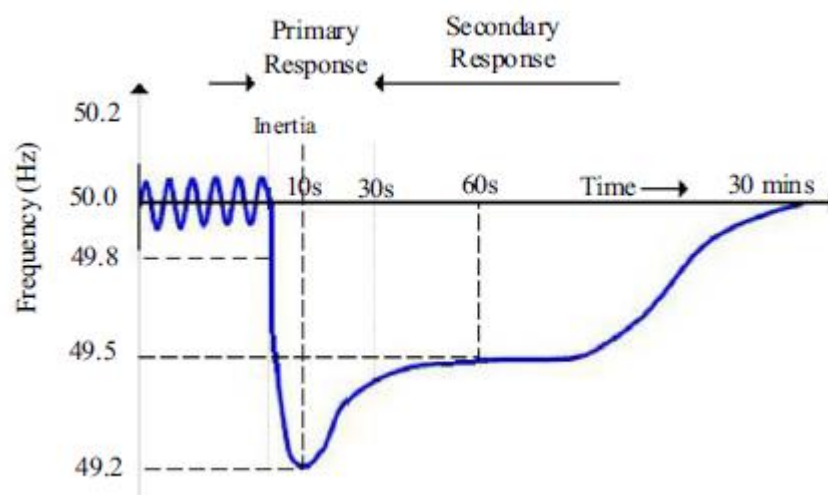


Figura 5 - Representação gráfica do controlo de frequência convencional [23].

A operação do controlo de frequência pode ser dividida em duas fases distintas: (1) a resposta inercial, fase em que os geradores usam a energia cinética presente nas turbinas e estabilizam a frequência durante um curto espaço de tempo, e (2) a regulação primária e secundária, controlos ativos pelo operador da rede e pelos centros de produção de energia. Na primeira fase, antes de qualquer controlo ser ativo, os geradores libertam ou absorvem a energia cinética própria da sua massa giratória, o que mantém a frequência estável durante aproximadamente 10 segundos. Posteriormente, se o desvio de frequência ultrapassar um valor específico, a regulação primária será ativada, pelo controlador da rede, que usa os geradores em funcionamento para colocar a frequência num valor seguro dentro de 30 segundos. Após isto, é ativada a regulação secundária, com o objetivo de retornar a frequência no sistema ao seu valor nominal [23].

3.2.1. Resposta Inercial

Inércia é definida como sendo a resistência de um objeto físico a uma mudança do seu estado de movimento. Aplicando esta definição ao sistema de energia elétrica, os objetos físicos em movimento são as máquinas rotativas conectadas ao sistema de energia, enquanto que a resistência à mudança de velocidade é expressa pelo momento de inércia da sua massa rotativa. A constante de inércia é analiticamente demonstrada em [24][25], assumindo que apenas geradores síncronos estão ligados ao sistema de energia. É expressa em segundos e com valores entre os 2 a 9 segundos tipicamente, dependendo do tamanho, velocidade e do tipo da máquina.

Em sistemas elétricos futuros, muitas destas unidades de geração convencional serão substituídas por unidades de produção com fonte renovável. Neste contexto, essas unidades têm comportamentos diferentes em relação as instalações convencionais. Em primeiro lugar, os geradores de energia a partir de fonte renovável são geralmente ligados à rede principal por um conversor eletrônico de energia, que em resposta a uma variação de frequência, separa parcial ou totalmente o gerador da rede, portanto, a ligação entre a rotação do gerador e a frequência do sistema é removida. Como resultado, essas unidades de produção não contribuem inerentemente para a inércia total do sistema. Em segundo lugar, a energia cinética disponível em unidades convencionais está sempre ausente, em que por exemplo, na produção de eletricidade a partir de energia fotovoltaica, onde não há partes rotativas envolvidas [24].

3.2.2. Regulação primária e secundária

A regulação primária é definida pela ERSE como sendo um serviço de sistema de carácter obrigatório e não remunerado fornecido pelos geradores em serviço, que tem como objetivo corrigir automaticamente os desequilíbrios instantâneos entre a produção e consumo. O seu fornecimento realiza-se através da variação de potência dos geradores de forma imediata e autónoma por atuação dos reguladores de velocidade das turbinas como resposta às variações de frequência. Todas as unidades de produção que estejam diretamente ligadas à rede devem dispor de regulação primária, na banda de, pelo menos 5% da sua potência nominal, em torno de cada ponto de funcionamento estável [26].

A regulação secundária é uma operação executada pelo regulador central, com o objetivo de repor a frequência do sistema ao seu valor nominal, perante desequilíbrios bruscos entre a produção e o consumo, ao ligar unidades na reserva de regulação secundária, ou desligar unidades em funcionamento, dependendo do tipo de desvio de frequência em questão. Em situações que a procura é maior que a produção e a contratação de reserva de regulação secundária não se possam realizar, podem aplicar-se mecanismos de último recurso, como o *Load Shedding*, definido como a quantidade de carga que deve ser instantaneamente removida de um sistema de energia, de forma a atingir um novo estado de equilíbrio [27].

As energias renováveis estão geralmente isentas de participar no controlo primário e secundário de frequência. Juntamente com a falta de inércia, a substituição da produção convencional por renováveis influenciará negativamente o controlo de frequência. Os sistemas de geração de energia renovável trabalham tipicamente à sua máxima capacidade, não conseguindo aumentar a sua produção para atenuar a queda do nível de frequência requerido na regulação primária, nem apresentam condições para fazerem parte da reserva a utilizar na regulação secundária. Também devido a menor inércia do sistema, os geradores síncronos têm menos tempo para reagir. Juntamente com uma quantidade menor de geradores fornecendo controlo primário, a frequência atingirá novos limites máximos e mínimos quando ocorrer algum evento que cause o desequilíbrio no sistema de energia, como apresentado na Figura 6. Com isto, uma frequência mínima menor pode levar a interrupção de fornecimento de energia parcial ou total [25].

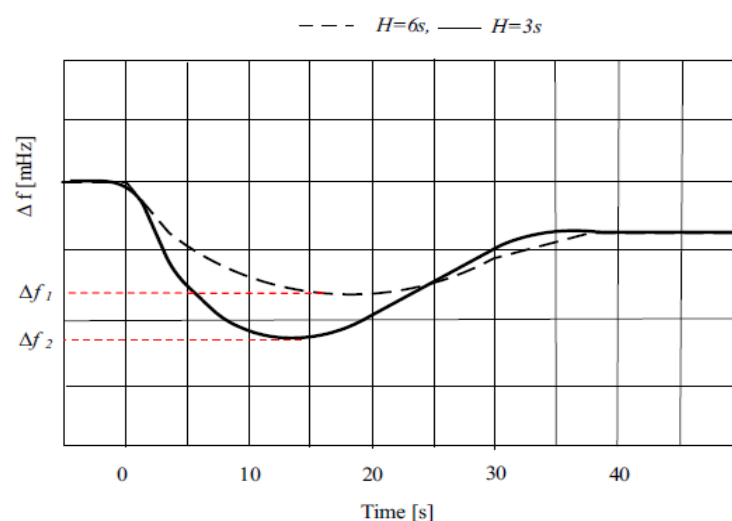


Figura 6 - Desvio de frequência para duas constantes de inércia diferentes [23].

3.3. Sistemas Híbridos

Um sistema de energia híbrido geralmente consiste em duas ou mais fontes de energia renováveis, utilizadas em conjunto para proporcionar maior eficiência no sistema, bem como a utilização eficiente dos recursos renováveis. O sistema híbrido pode gerir a energia flutuante de forma mais eficiente, de forma a equilibrar a oferta de energia com a procura. Ao contribuir para a eficiência energética, reduz significativamente os impactos ambientais do sector energético, aumenta a compreensão do potencial de algumas energias renováveis, amplia o potencial de desenvolvimento da energia sustentável e, conseqüentemente, leva a uma melhor segurança energética [28].

Um sistema híbrido proporciona uma melhor opção do que um sistema baseado em uma fonte única, em termos de custo, fiabilidade e eficiência. Diferentes tipos de combinações de sistemas híbridos são viáveis dependendo da necessidade e da disponibilidade de recursos em um dado local, o que os torna numa alternativa segura para a produção de eletricidade para ilhas, aldeias remotas e outros locais onde a energia da rede convencional não se encontra acessível, nos quais a produção de eletricidade a partir de fontes renováveis pode ser considerável. A combinação de energia solar e eólica num sistema híbrido é uma das soluções mais promissoras, devido à sua natureza complementar. A velocidade do vento é habitualmente baixa nas estações em que o recurso solar está no seu melhor, mas por outro lado, nas estações em que há menor radiação solar, o vento é frequentemente mais forte, embora estas fontes estejam dependentes de condições climáticas imprevisíveis. De forma a melhorar a confiabilidade de um sistema híbrido, geradores a diesel irão fazer parte do sistema, tal como a integração de sistemas de armazenamento, com o objetivo de manter o balanço entre a produção e a procura de energia [29].

As configurações de sistemas híbridos que serão avaliadas são as seguintes:

- Eólico-fotovoltaico-*diesel*
- Eólico-fotovoltaico

3.3.1. Sistema híbrido Eólico-fotovoltaico-*diesel*

Este sistema é constituído por cinco componentes principais: um sistema fotovoltaico, turbinas eólicas, geradores *diesel*, sistemas de armazenamento a baterias e um inversor. A configuração deste tipo de sistema híbrido é apresentada na Figura 7.

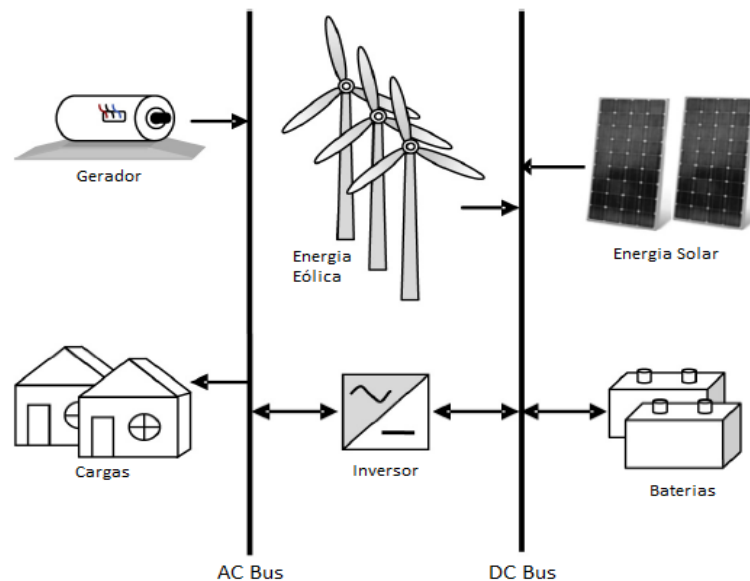


Figura 7 - Configuração de um sistema híbrido eólico-fotovoltaico-diesel (adaptado de [30])

As energias solar e eólica são recursos intermitentes, imprevisíveis e dependem do local onde são instalados. Sistemas autónomos de energia solar ou eólica não são soluções viáveis, pois não têm capacidade de fornecer energia de forma contínua para atender a procura de energia. No entanto, a operação combinada de sistemas de energia solar e eólica ajuda a suavizar a irregularidade da geração e, em comparação, garante um fornecimento de energia mais fiável. A combinação destas com geradores convencionais e sistemas de armazenamento, reforçam a viabilidade do sistema, pois podem ser usados para lidar com a intermitência do fornecimento de energia, onde o sistema de armazenamento é usado para atenuar o desequilíbrio entre a produção e a procura de energia, armazenando a energia produzida em excesso e fornecer essa energia quando houver um défice de produção.

Em geral, os geradores a *diesel* são operados como principal fonte de eletricidade e mantém o equilíbrio de energia no sistema e é imperativo que as fontes de energia renovável sejam operadas em combinação com sistemas de armazenamento, de forma a otimizar o fornecimento de energia às cargas [30].

3.3.2. Sistema híbrido Eólico-fotovoltaico

Um sistema híbrido de energia solar e eólica é composto por geradores fotovoltaicos, turbinas eólicas, banco de baterias, inversores e controladores. O esquema representativo é apresentado na Figura 8. A energia gerada pelo sistema fotovoltaico e pelas turbinas eólicas carrega a bateria depois de atender a procura, mas se a energia gerada for menor que a procura, a bateria fornecerá a carga de acordo com a capacidade de armazenamento [29].

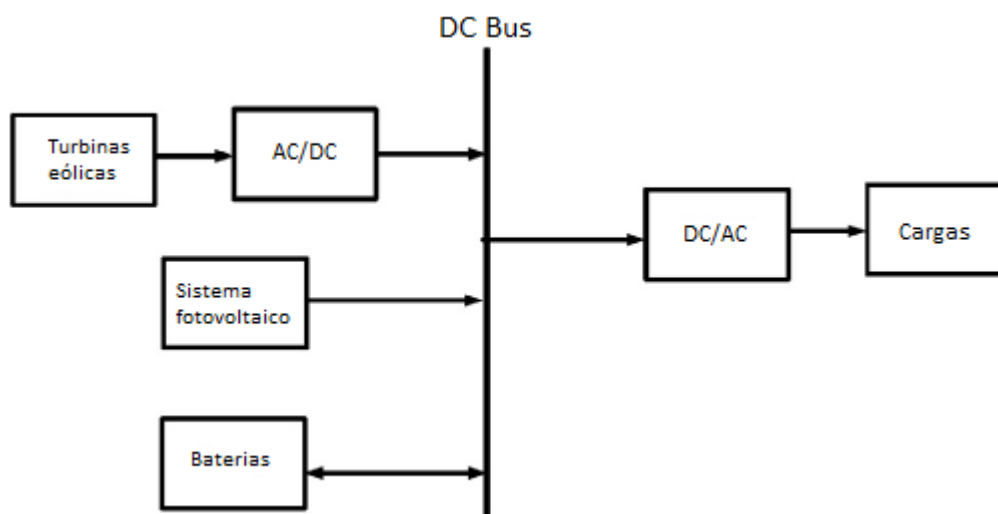


Figura 8 - Exemplo de um sistema híbrido eólico-fotovoltaico (adaptado de [31]).

A robustez e a simplicidade do *design*, bem como os requisitos de manutenção baixos, tornam os sistemas de energia solar e eólica fáceis de usar e mais econômicos do que os outros sistemas de geração de energia renovável. No entanto, a potência destes dois sistemas é afetada significativamente pela variabilidade na velocidade do vento e na radiação solar, logo a integração de sistemas de armazenamento tornam o sistema mais confiável e eficiente.

A desvantagem fundamental das energias renováveis é a flutuação da potência de saída, especialmente nos sistemas fotovoltaicos, e é essencial mitigar essas flutuações. A introdução de baterias neste tipo de sistema é um fator vital. Contribuem para compensar as variações sazonais dos recursos renováveis, bem como atenuar as flutuações de carga.

Em termos econômicos, o dimensionamento ideal deste tipo de sistema deve ser feito com o objetivo de minimizar o custo anual total do sistema, determinando o número ideal de turbinas elétricas, painéis fotovoltaicos e baterias que minimize o custo total do sistema, sem colocar o fornecimento de energia em causa [31].

4. Dimensionamento de Sistemas Isolados nas ilhas da Graciosa e do Porto Santo

Nesta fase serão analisados os sistemas elétricos das ilhas da Graciosa e do Porto Santo, dos arquipélagos dos Açores e da Madeira, respetivamente, por serem sistemas geograficamente pequenos e isolados, com recurso ao software *Homer Pro*. Este software especializa-se no *design* e análise tecno-económica de sistemas híbridos de pequena dimensão, que podem estar ligados a rede convencional ou de forma isolada, como é o caso destas ilhas. O *Homer Pro* requer de vários tipos de dados para a simulação e otimização de projetos, incluindo dados meteorológicos, perfil de carga, características dos equipamentos de geração de energia, dados económicos e técnicos, obtidos através de uma pesquisa prévia [32].

4.1. Ilha da Graciosa, Açores

A Graciosa faz parte no grupo central do arquipélago dos Açores, situado no oceano Atlântico, com coordenadas geográficas 39° 05' N e 28° 05' O. Tem 60,66 km² de área, com 12,5 km de comprimento e 7,5 km de largura, sendo a segunda ilha mais pequena do arquipélago, e é a menos montanhosa das ilhas açorianas, atingindo os 405 metros de altura. De acordo com o Serviço Regional de Estatística dos Açores, a estimativa da população média é de 4283 habitantes em 2017.

O sistema elétrico da ilha da Graciosa é composto por uma central de produção de energia elétrica, uma rede de distribuição de média tensão a 15 kV e redes de distribuição de baixa tensão a 0.4 kV. O sistema electroprodutor atual é constituído unicamente pela Central Termoelétrica da Graciosa (CTGR), composto por seis geradores a *diesel*, com uma potência total instalada de 4679 kW [33]. No passado foi ainda composto pelo parque eólico da Serra Branca, instalado em 1992 e ampliado em 2002, constituído no total por 3 aerogeradores com uma potência total de 0.8 MW, tendo cessado o seu funcionamento em 2014 [34].

A evolução da produção de energia elétrica acumulada ao longo dos anos esta apresentada na Figura 9, em que podemos verificar que no ano 2017 foram produzidos 14,268 GWh, sendo que em 2010 foi o ano em que se produziu mais energia na região com 14,295 GWh [35].

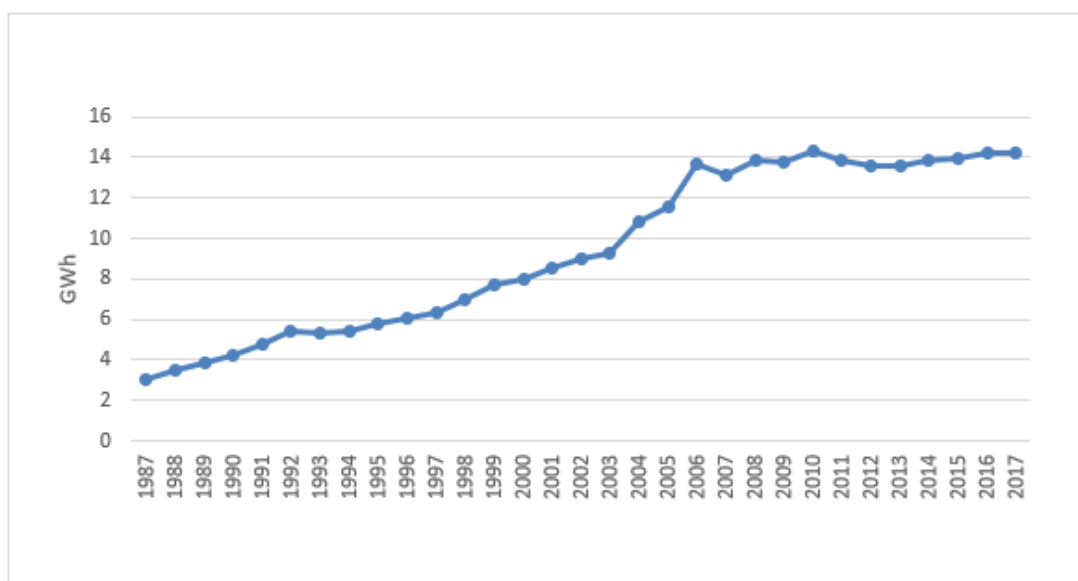


Figura 9 – Evolução da produção anual da ilha da Graciosa.

Em 2015 foi acertado um projeto entre a empresa alemã *Younicos* e a Eletricidade dos Açores, S.A. que ira revolucionar o sector elétrico na ilha da Graciosa. Este projeto consiste na instalação de um novo sistema híbrido, composto por um parque eólico e uma central fotovoltaica, de 4,5 MW e 1 MW de potência instalada respetivamente, e um sistema de armazenamento de energia por baterias de iões de lítio de 3,2 MWh. Com este sistema em pleno funcionamento e assumindo que a procura de energia mantém-se aproximadamente constante, a percentagem de penetração de energia renovável poderá atingir os 65% de toda a energia produzida na região [36].

4.1.1. Dimensionamento da Carga

A carga é o componente do sistema que consome energia. O software *Homer Pro* permite-nos adicionar à simulação quatro tipos de carga: elétrica, térmica, deferível e de hidrogénio, sendo possível adicionar duas cargas elétricas e/ou térmicas diferentes. Nestas simulações foram usadas apenas cargas elétricas, sendo definida pelo software como sendo a carga primária que o sistema deve atender imediatamente, de forma a manter o equilíbrio entre a produção e a procura de energia. Em cada intervalo de tempo, o *Homer Pro* despacha os componentes produtores de energia do sistema para atender à carga primária total.

Após selecionar o tipo de carga, o utilizador tem de introduzir valores de potência, em kW, para cada intervalo de tempo. Também é possível inserir valores diferentes para dias de semana e para dias de fim-de-semana. Para isso, foram analisados diagramas de carga de

dias típicos de cada estação do ano na ilha da Graciosa, apresentados na Figura 10. Para os dias de semana foram utilizados os dados relativos a quarta-feira e para os dias referentes aos fins-de-semana foram utilizados os dados relativos a domingo [33].

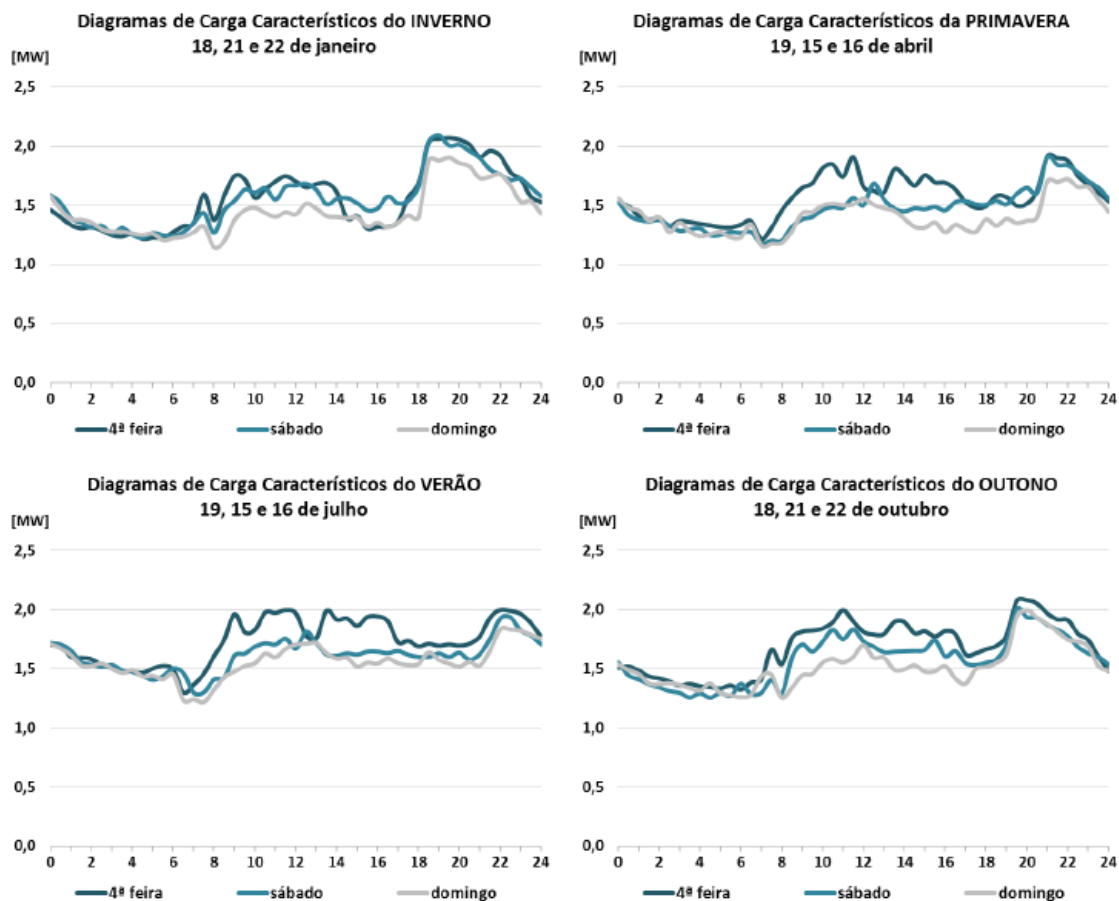


Figura 10 - Diagramas de carga de dias típicos [33].

Ainda é possível introduzir aleatoriedade aos dados de carga, em percentagem, de forma a tornar o perfil de carga mais realista. Assim, foi introduzido uma variabilidade de 10% dia-a-dia e de 20% por intervalo de tempo.

Após a introdução dos dados anteriormente mencionados, o software faz a representação do perfil de carga em diagramas de carga com diferentes escalas de tempo, onde podemos ver o perfil diário, mensal e anual, apresentado na Figura 11.

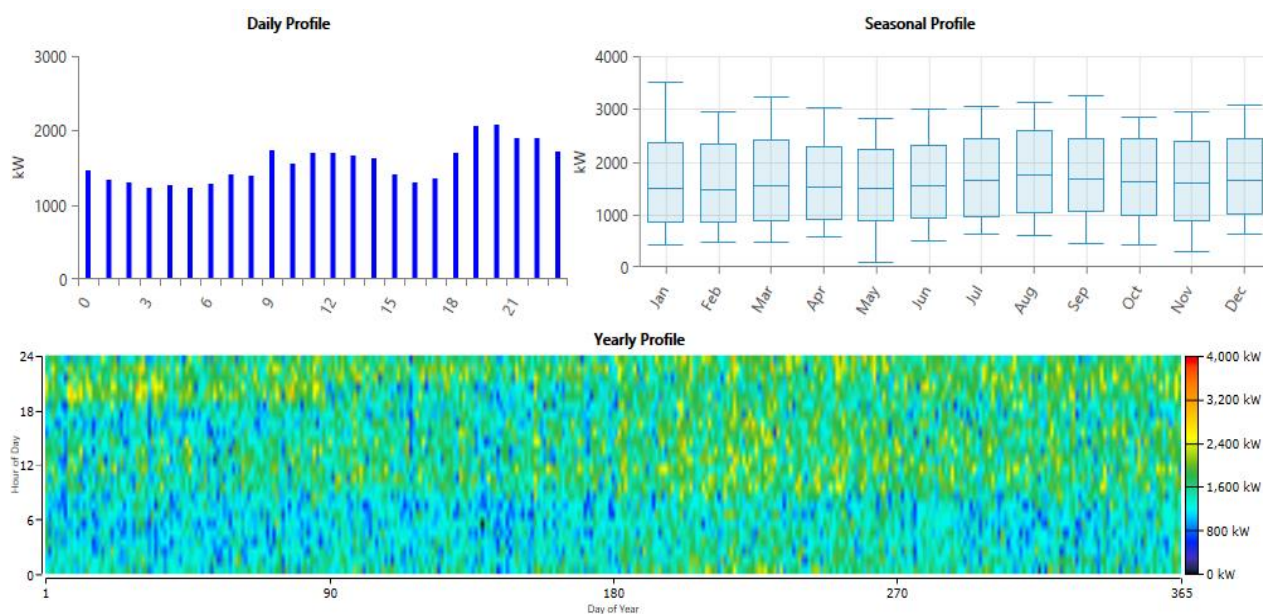


Figura 11 – Diagramas de carga da ilha da Graciosa apresentados pelo software *Homer Pro*.

O software ainda nos mostra dados informativos acerca do perfil de carga simulado, apresentados na Tabela 1:

Tabela 1 – Dados referentes ao dimensionamento da carga da ilha da Graciosa

Perfil de Carga		Unidade
Energia média por dia	38576.04	kWh/dia
Potência média	1607.3 kW	kW
Pico máximo	3788.03 kW	kW
Fator de carga	0.42	

4.1.2. Dimensionamento da Geração

4.1.2.1. Geração Termoelétrica

A central térmica da Graciosa entrou em serviço no ano 2004 e atualmente é constituída por seis grupos geradores que utilizam o *diesel* como fonte primária de energia, totalizando uma potência instalada de 4679 kW. O esquema unifilar simplificado desta central é apresentado na Figura 12 [33].

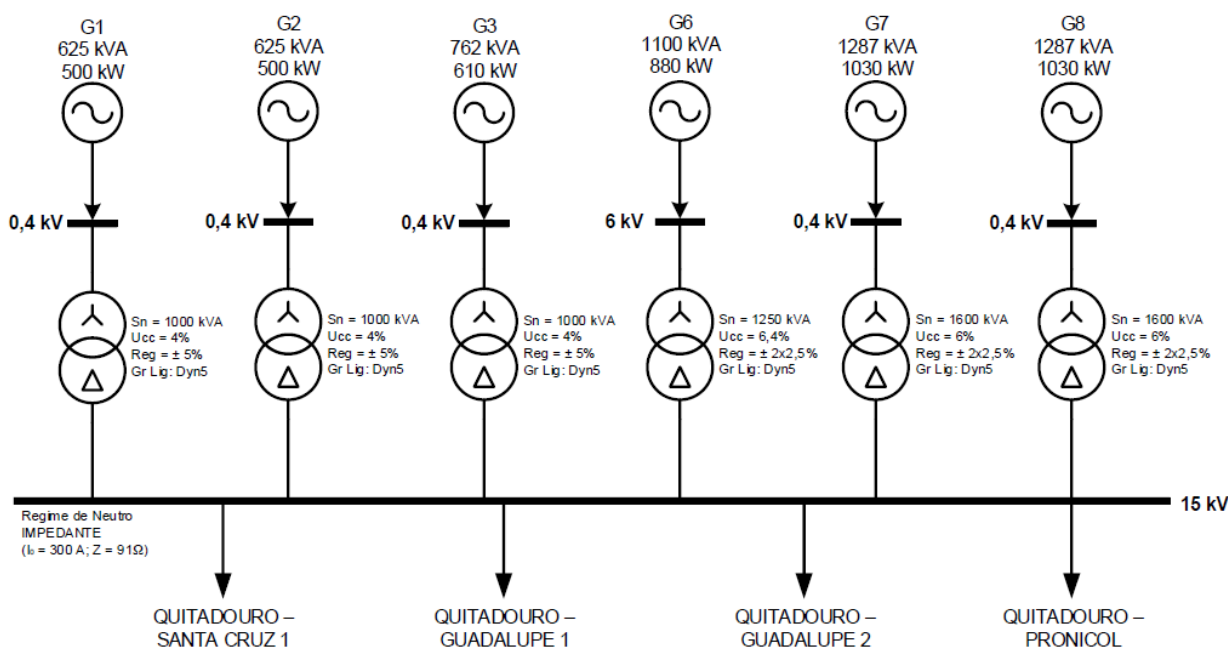


Figura 12 - Esquema unifilar simplificado da Central Termoelétrica da Graciosa [33].

Para dimensionar geração térmica no *Homer Pro* podemos ter três abordagens diferentes. Podemos selecionar entre um gerador genérico que se dimensiona automaticamente de forma a atender à carga, um tipo de gerador genérico em que o utilizador poderá dimensionar por conta própria, introduzindo o valor de potência que pretende, ou ainda selecionar um gerador predefinido existente no catálogo do software, onde podemos encontrar geradores específicos de vários fabricantes, em função da potência e do tipo de combustível que queremos, de forma a simulação ser mais realista.

Neste caso foram selecionados seis geradores do fabricante Caterpillar, em que três são de 725 kVA, dois de 1275 kVA e um último de 1100kVA, o que totaliza uma potência aparente de 5825 kVA e uma potência ativa de 4660 kW. Para cada gerador são pedidos valores de custo inicial, custo de substituição e o custo por hora em funcionamento. O custo inicial será definido como 0 €, por não se tratar da instalação de um novo equipamento no sistema, tal como o custo de substituição, pois só será feita a análise durante um ano, logo a substituição de equipamentos será desprezada. Foi definido um custo de 0.1 € por hora em funcionamento, para todos os geradores utilizados.

No *Homer Pro* podemos definir o tipo de combustível a utilizar. Desta forma foi definido o *diesel* como o combustível do grupo gerador, com um preço de 0.7 €/l.

Após a introdução dos dados necessários para a parametrização dos geradores convencionais, o *Homer Pro* dá-nos dois gráficos em função à potência de saída (kW): (1) o consumo de combustível (L/h) e (2) o rendimento (%). Como exemplo, a Figura 13, apresenta as curvas de combustível e de rendimento, para o gerador CAT 1100 kVA. As curvas características dos restantes geradores estão apresentadas no Anexo B.

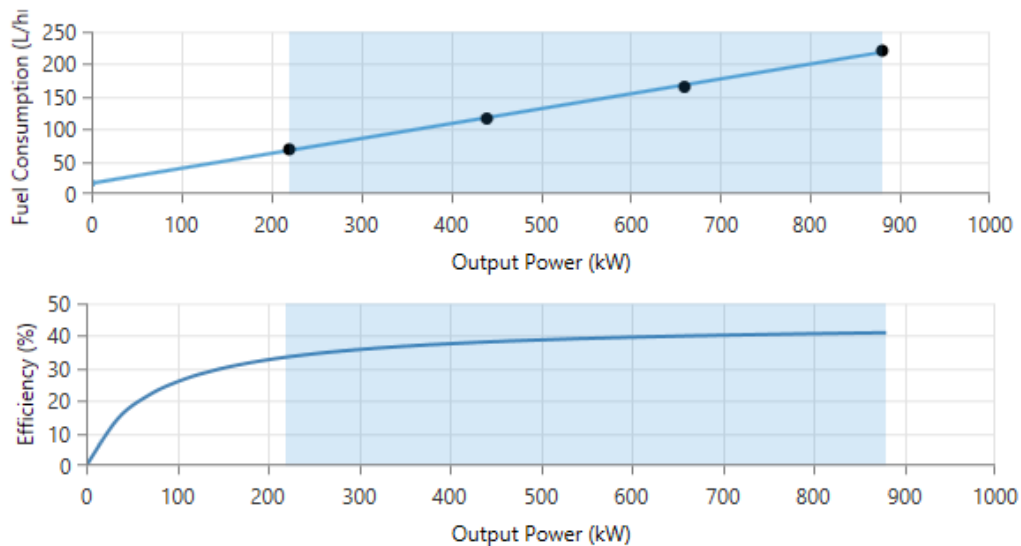


Figura 13 - Curvas características do gerador CAT 1100 kVA.

Quanto ao funcionamento dos geradores, foi definido que a carga mínima permitida em cada gerador é de 25% da sua capacidade e foi agendada manutenção depois de 3500 horas em operação, em que estarão fora de funcionamento durante 72 horas e terá o custo de 10 €/kW.

4.1.2.2. Geração Eólica

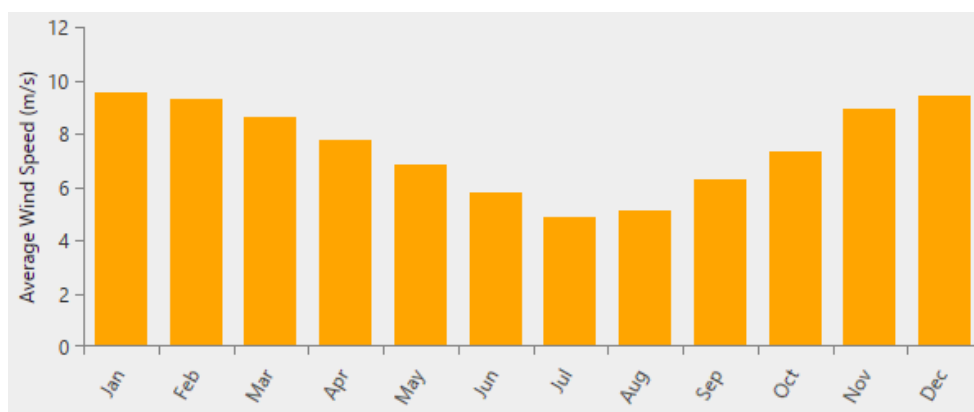
O parque eólico instalado na ilha da Graciosa, no ano 2016, pela parceria entre a empresa alemã Yunicos e a EDA, S.A. tem uma potência total de 4,5 MW. É constituído por 5 aerogeradores ENERCON E-44, com uma potência nominal de 900 kW [34].

A introdução de sistemas de geração eólica no *Homer Pro* pode ser feita de duas formas: (1) podemos selecionar um gerador eólico genérico, em que o software nos fornece várias opções com potências nominais diferentes ou (2) podemos selecionar um gerador existente no catálogo, onde podemos escolher o fabricante e o modelo que pretendemos. Como no catálogo disponibilizado existe o aerogerador acima descrito, foram introduzidos cinco geradores ENERCON E-44. Para o dimensionamento destes, foram introduzidos os dados da Tabela 2.

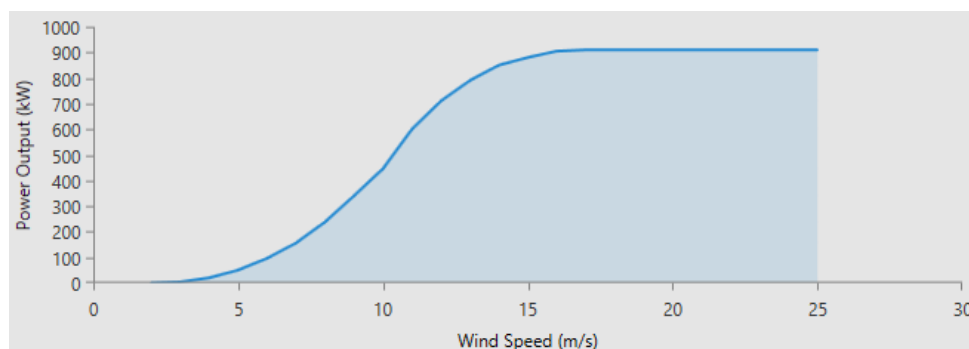
Tabela 2 - Dados para o dimensionamento do gerador ENERCON E-44.

Altura da turbina	55 m
Tempo de vida	20 anos
Custos de operação e manutenção	6500 €/ano

Apos a introdução e a devida parametrização do sistema eólico, o software pede que sejam introduzidos dados referentes à velocidade do vento na região. Para isto, o utilizador pode introduzir valores da velocidade média do vento por mês, em metros por segundo. A outra opção é fazer o *download* dos dados automaticamente, a partir do *Homer Pro*, em que este usa o *site* da NASA como fonte. Nesta simulação, os dados da velocidade média do vento foram retirados a partir do *Homer Pro* e estão apresentados na Figura 14. A média anual é de 7.48 m/s.

**Figura 14 - Velocidade média do vento na ilha da Graciosa.**

Por fim, é-nos apresentado a curva de potência para o gerador eólico ENERCON E-44, apresentada na Figura 15.

**Figura 15 - Curva de potência da turbina eólica ENERCON E-44.**

4.1.2.3. Geração Fotovoltaica

O sistema fotovoltaico instalado pela Yunicos na ilha da Graciosa, é composto por 4000 painéis solares de 250 kW, fazendo o total de 1 MW de potência instalada, foi instalado em 2017 e entrou em funcionamento no ano 2018 [33][36].

Podemos modelar um sistema fotovoltaico no *Homer Pro* ao escolher entre um sistema genérico, dimensionado conforme necessário, ou a selecionar um painel solar de um fornecedor específico. Neste caso foi usado um sistema genérico, dimensionado com 1 MW de potência e com os seguintes dados apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Dados para o dimensionamento do parque fotovoltaico da ilha da Graciosa.

Fator de depreciação	80 %
Tempo de vida	25 anos
Custos de operação e manutenção	5000 €/ano

Posto isto, é necessário introduzir um recurso solar. Para isso é necessário introduzir valores médios diários de radiação solar e do índice de claridade para cada mês na região. Estes dados podem ser introduzidos pelo utilizador, ou podem ser obtidos através do software, que acede a base de dados da NASA. Nesta simulação, os dados foram retirados diretamente do *Homer Pro* e estão apresentados na Figura 16.

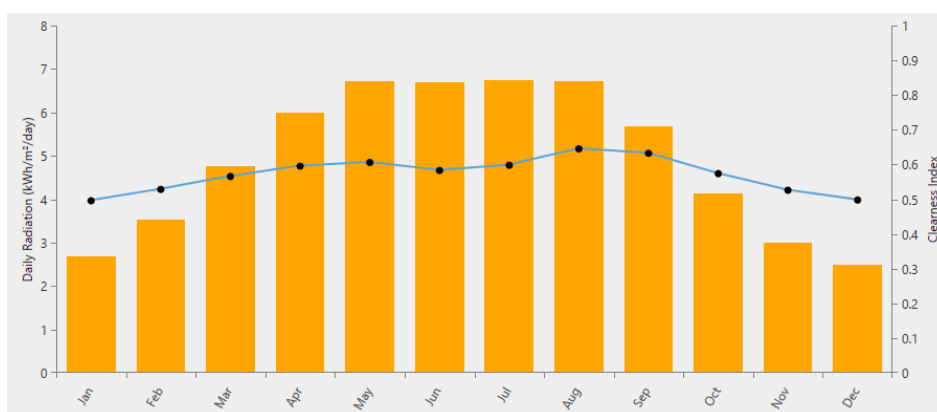


Figura 16 – Radiação solar média e índice de claridade para a ilha da Graciosa.

É ainda necessário instalar um conversor de potência, para converter a energia produzida pelo sistema fotovoltaico, em DC, para AC. Foi introduzido um conversor que se dimensiona automaticamente, de forma a que toda a energia produzida seja utilizada.

4.2. Ilha do Porto Santo, Madeira

A ilha do Porto Santo faz parte do arquipélago da Madeira, situado no oceano Atlântico, com coordenadas geográficas 33° 3' N e 16° 21' O. Tem 42,84 Km² de área, 11,4 km de comprimento e 6 km de largura, sendo a ilha mais pequena habitada do arquipélago, com cerca de 5500 habitantes, e apresenta uma configuração pouco montanhosa, sendo que o ponto mais alto atinge os 517 metros de altura.

O sistema elétrico é constituído por quatro centrais de produção de energia elétrica, redes de distribuição de média tensão a 30 kV e 6,6 kV e redes de distribuição de baixa tensão a 400 V. O sistema electroprodutor é constituído por uma central termoelétrica a *diesel*, um parque eólico e uma planta fotovoltaica. A Central Termoelétrica do Porto Santo, situada no sítio do Penedo e em funcionamento desde 1992, é composta por 4 geradores a *diesel* com uma potência total de 17,28 MW. O parque eólico do Cabeço do Carvalho, instalado no ano 1996 e ampliado no ano 2000, é composto por três aerogeradores com uma potência total de 1110 kW. Por fim, a central fotovoltaica, em funcionamento desde 2010, tem uma potência instalada de 2.62 MW. A contribuição por cada uma das centrais de produção de energia no ano 2017 foi de 84.7%, 11.3% e 4.0%, respetivamente [38]. Relativamente à produção de energia elétrica acumulada ao longo dos anos na ilha do Porto Santo, a Figura 17 apresenta a sua evolução desde o ano 2003 até 2015.

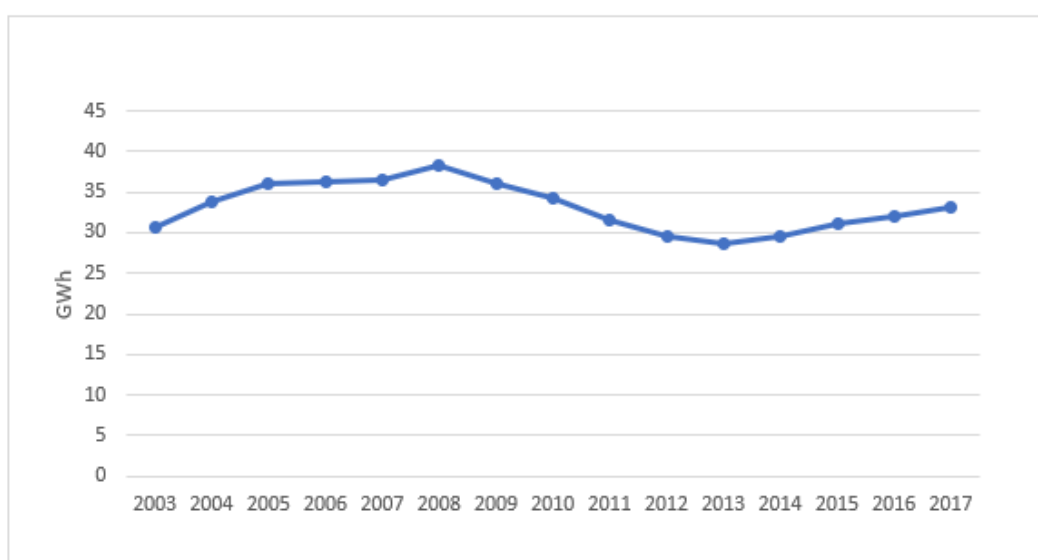


Figura 17 – Evolução da produção anual da ilha do Porto Santo.

4.2.1. Dimensionamento da Carga

O dimensionamento da carga da ilha do Porto Santo segue a mesma metodologia usada anteriormente para a ilha da Graciosa, onde foi escolhida uma carga elétrica única. Assim os dados relativos à carga foram retirados da Figura 18. De referir que não há distinção entre dias de semana e dias de fim-de-semana, logo foram usados os mesmos dados para os dois campos. Da análise aos diagramas de carga característicos, podemos ver que a potência de ponta no verão é bastante maior as outras estações do ano, o que se justifica por ser um local com grande atração turística durante essa época [38].

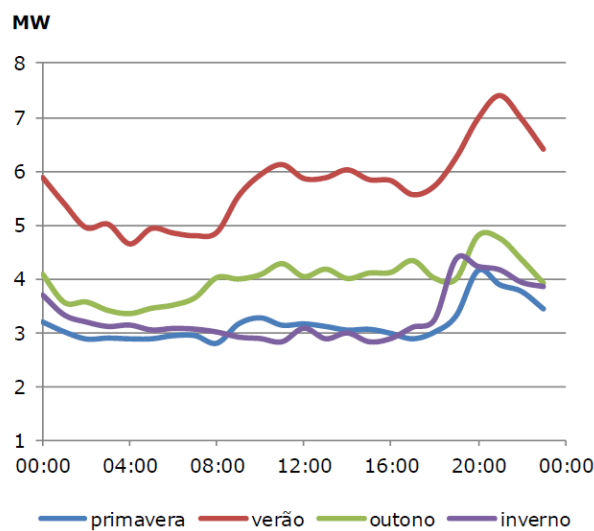


Figura 18 - Diagramas de carga característicos por estação [38].

Foi introduzida aleatoriedade aos dados de carga, de 10% dia-a-dia e de 20% por intervalo de tempo. Os diagramas de carga simulados pelo *Homer Pro* estão apresentados na Figura 19, onde verificamos claramente a maior procura de energia na época do verão.

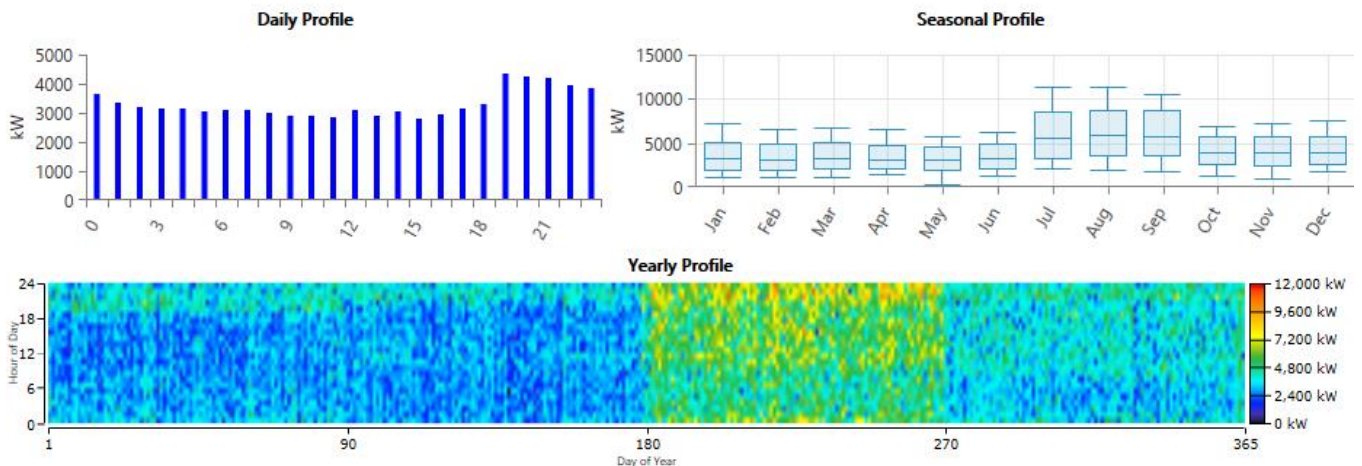


Figura 19 - Diagramas de carga da ilha do Porto Santo apresentados pelo *Homer Pro*.

A Tabela 4 apresenta os valores informativos do perfil de carga simulado neste caso. De referir que o pico de potência foi atingido no mês de julho.

Tabela 4 - Dados referentes ao dimensionamento da carga da ilha do Porto Santo.

Perfil de Carga		Unidade
Energia média por dia	97 272,29	kWh/dia
Potência média	4 053,01	kW
Pico máximo	11 435,39	kW
Fator de carga	0,35	

4.2.2. Dimensionamento da Geração

4.2.2.1. Geração Termoelétrica

A central termoelétrica do Porto Santo é composta por quatro geradores a *diesel*, com uma potência total de 17,28 MW. Como não existe no catálogo do software um gerador com a capacidade necessária para dimensionar este grupo gerador, foi criado um novo modelo de um gerador, com 4250 kW de potência, a partir do modelo de gerador genérico de grande capacidade disponibilizado pelo *Homer Pro*. Feito isto, foram introduzidos quatro geradores deste tipo, que em conjunto totalizam 17 MW.

Os dados relativos aos custos foram mantidos, em relação ao caso anterior, ou seja, 0 € de custo inicial e de substituição e 0,1 € por hora em funcionamento. O combustível escolhido foi o *diesel*, com o preço de 0,7 €/L. As curvas de uso de combustível e rendimento, ambas em função da potência de saída, estão apresentadas na Figura 20.

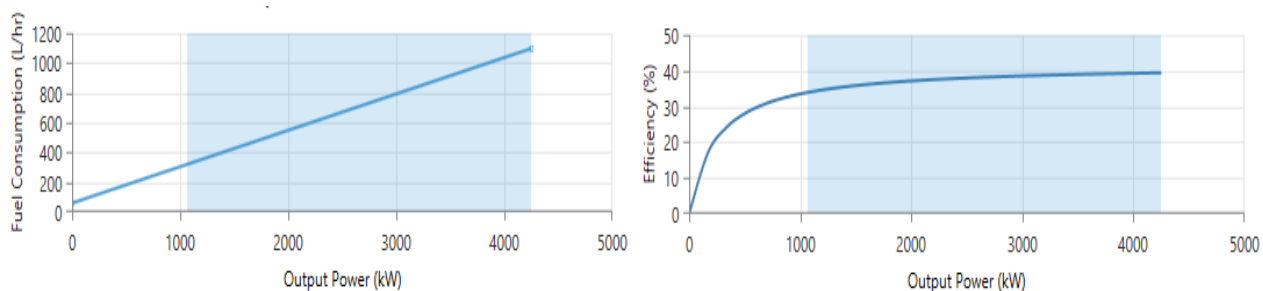


Figura 20 - Curvas características do gerador de 4250 kW.

Quanto ao funcionamento dos geradores, foi definido que a carga mínima permitida em cada gerador é de 25% da sua capacidade e foi agendada manutenção depois de 3500 horas em operação, em que estarão fora de funcionamento durante 72 horas e terá o custo de 10 €/kW.

4.2.2.2. Geração Eólica

O parque eólico do Cabeço do Carvalho, instalado no ano 1996 e ampliado no ano 2000, tem uma potência total de 1110 kW. É composto por três aerogeradores da Vestas, dois do modelo V29 e o outro do modelo V47 [33], com potências nominais por gerador de 225 kW e 660 kW, respetivamente [39][40]. Estes modelos existem no catálogo disponibilizado pelo software, portanto foram introduzidos de forma direta com os dados da Tabela 5:

Tabela 5 - Dados para o dimensionamento dos aerogeradores Vestas V29 e V47.

	Vestas V29	Vestas V47
Altura da turbina	45 m	55 m
Tempo de vida	20 anos	20 anos
Custos de operação e manutenção	3000 €/ano	3500 €/ano

A introdução dos dados para o recurso eólico utilizada foi feita de igual forma a simulação anterior. Foi feito o *download* dos dados de velocidade média do vento na ilha do Porto Santo diretamente do *Homer Pro*, obtidos através da base de dados da NASA e apresentados na Figura 21. Neste caso, a média anual é de 6,2 m/s.

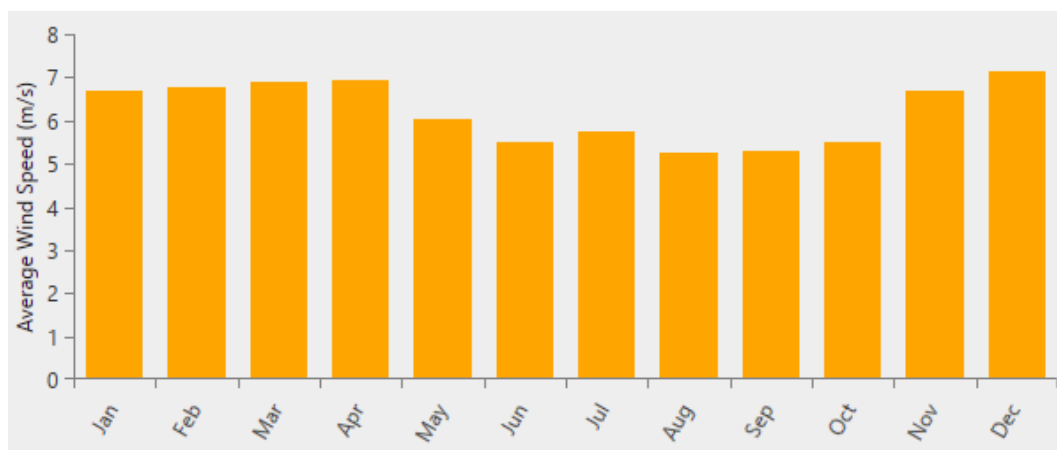


Figura 21 – Velocidade média do vento na ilha do Porto Santo.

Finalmente, foram obtidas as curvas características de potência em função da velocidade do vento para cada tipo de gerador eólico utilizado, apresentadas na Figura 22.

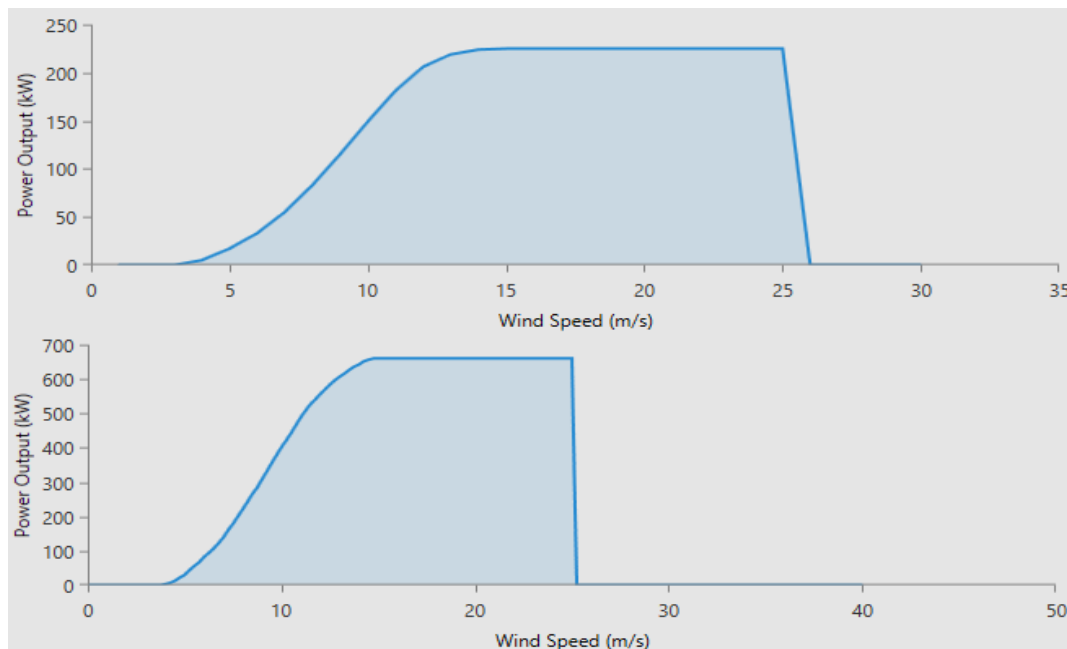


Figura 22 - Curvas de potência das turbinas eólicas Vestas: (1) modelo V29 e (2) modelo V47.

4.2.2.3. Geração Fotovoltaica

O parque fotovoltaico do Porto Santo, em funcionamento desde 2010, tem uma potência instalada de 2620 kW e em 2017 contribuiu 8,84 % de toda a produção de energia na região [38]. Para introduzir este componente do sistema foi usado um tipo de painel fotovoltaico genérico, com 2620 kW de potência e com os parâmetros da Tabela 6:

Tabela 6 – Dados para o dimensionamento do parque fotovoltaico da ilha do Porto Santo.

Fator de depreciação	80 %
Tempo de vida	25 anos
Custos de operação e manutenção	13100 €/ano

É importante referir que o fator de depreciação é um fator de escala que o *Homer Pro* aplica à saída de energia do sistema fotovoltaico para reduzir a saída de energia, considerando fatores como a sujidade dos painéis, sombreamento, envelhecimento e o efeito da temperatura.

Por último, o software requer a introdução do perfil do recurso solar. Assim, os valores de radiação solar média diária e do índice de claridade na ilha do Porto Santo foram obtidos diretamente através do *Homer Pro* e estão apresentados na Figura 23. A média anual de radiação solar é de 4,27 kWh/m²/dia.

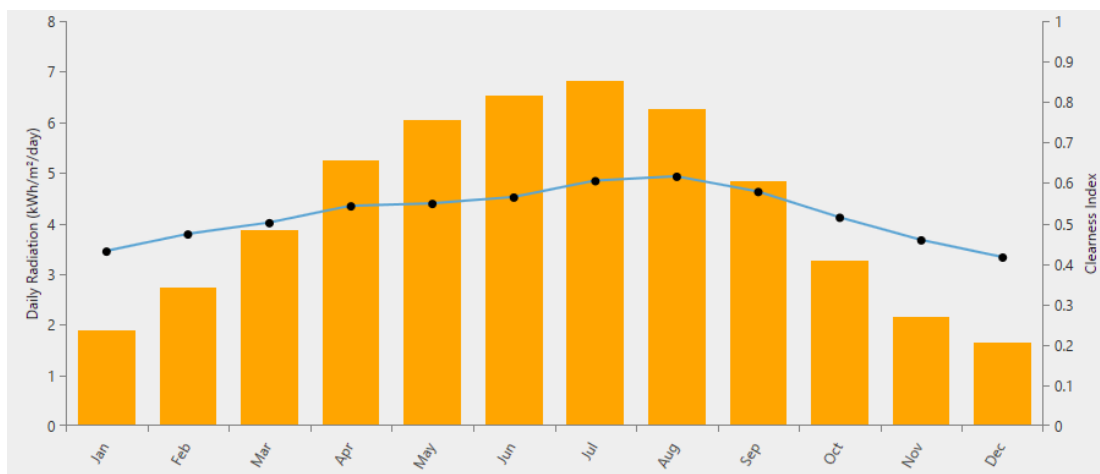


Figura 23 - Radiação solar média e índice de claridade para a ilha do Porto Santo

Neste caso, tal como no sistema dimensionado da ilha Graciosa, foi introduzido um conversor que se dimensiona automaticamente, de forma a não haver limites na conversão de energia, tanto para os sistemas fotovoltaicos alimentarem as cargas, como para a introdução dos sistemas de armazenamento, abordada mais a frente.

4.3. Parametrização das características do sistema.

Concluído o dimensionamento de cada componente dos sistemas híbridos em estudo, o *Homer Pro* permite modelar parâmetros próprios do sistema. Podemos adicionar controladores que determinam o comportamento dos componentes geradores a trabalhar em conjunto, modelar a reserva no sistema e definir parâmetros como a escassez máxima de capacidade anual e a percentagem mínima de energia renovável, que devem ser cumpridas nas simulações de hora em hora.

Começamos pela reserva de operação, pois este conceito afeta significativamente as decisões de despacho nas simulações. Esta fornece uma margem de segurança que ajuda a garantir o fornecimento adequado de eletricidade, apesar da variabilidade da carga e dos geradores de energia renovável. O *Homer Pro* define a quantidade necessária de reserva

operacional usando quatro entradas, duas relacionadas à variabilidade da carga e duas relacionadas à variabilidade das energias renováveis, definidas na Tabela 7. Em cada etapa da simulação, o sistema é operado de modo a manter a reserva operacional igual ou maior que a reserva necessária.

Tabela 7 - Parametrização da reserva de operação.

Reserva operacional		
Variabilidade da carga	Carga em cada espaço de tempo	10 %
	Pico de carga anual	0 %
Variabilidade das energias renováveis	Produção de energia solar	15 %
	Produção de energia eólica	25 %

Se o sistema for incapaz de fornecer a quantidade necessária de carga mais a reserva operacional, o *software* registrará o déficit como falta de capacidade. O *Homer Pro* calcula o montante total da escassez ao longo do ano e divide a escassez de capacidade total pela carga elétrica anual para determinar a fração de escassez de capacidade. O utilizador pode introduzir o valor de escassez máxima anual, em percentagem, sendo que o software descarta como inviável qualquer simulação que exceda essa restrição. De forma a garantir que não há interrupções no fornecimento de energia às cargas, foi introduzido uma escassez máxima anual nula.

Por último, o *Homer Pro* permite ao utilizador introduzir controladores para especificar o modo de operação do sistema em cada simulação. O controlo usado nestas simulações foi o *Load Following*, no qual, sempre que um gerador convencional opera, apenas produz energia suficiente para fornecer à carga, sendo que os objetivos de menor prioridade, como carregar o sistema de armazenamento, são deixados para as fontes de energia renovável [41].

5. Resultados de estudos de caso

Nesta fase serão feitos seis estudos de caso, três para cada ilha em estudo, sendo que os sistemas dimensionados anteriormente servirão como base. Após isto, serão introduzidos sistemas de armazenamento em ambas as simulações, de forma a avaliar o impacto deste novo componente no sistema. De referir que o sistema de armazenamento dimensionado para a ilha da Graciosa foi feito com base no sistema de armazenamento real já instalado na região. Por último, será testada a capacidade destes sistemas funcionarem apenas com energia renovável, retirando os geradores convencionais e reforçando a produção renovável e o sistema de armazenamento.

5.1. Estudo de caso 1: Graciosa, caso base

5.1.1. Resultados e discussão

Após a simulação do sistema híbrido implementado para a ilha da Graciosa no capítulo anterior, foram obtidos os valores referentes ao funcionamento do sistema, apresentados na Tabela 8:

Tabela 8 - Funcionamento do sistema.

Energia produzida	19 611 408 kWh/ano
Energia consumida	14 050 225 kWh/ano
Energia produzida em excesso	5 495 024 kWh/ano
Percentagem de energia em excesso	28 %
Penetração de energia renovável	56.1 %
Combustível consumido	1 636 823 L/ano

Podemos ver que 28% da energia produzida não é utilizada. Isto acontece porque os geradores eólicos e o sistema fotovoltaico, quando em funcionamento, fornecem a potência máxima, dependendo da disponibilidade dos recursos naturais, ou seja, não têm

capacidade de variar a sua potência de saída de forma a produzir apenas o suficiente para alimentar as cargas.

Na Figura 24, podemos ver a representação da energia produzida em percentagem, enquanto na Tabela 9 podemos ver os valores de energia produzida por ano, para cada tipo de geração.

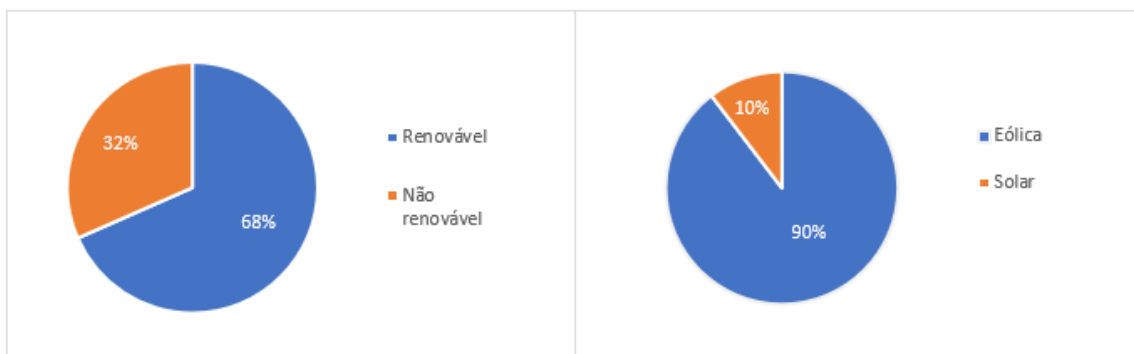


Figura 24 - Produção de energia: (1) Renovável vs Não Renovável e (2) Geração Eólica vs Solar

Tabela 9 - Produção de energia anual por tipo de geração.

Tipo de geração	Energia produzida
Termoelétrica	6 186 865 kWh/ano
Eólica	12 029 244 kWh/ano
Solar	1 395 299 kWh/ano

Os custos do sistema estão apresentados na Tabela 10. O custo total de operação é a soma do custo de operação e manutenção dos geradores e do custo do combustível dos geradores termoelétricos.

Tabela 10 – Custos gerais do sistema.

Custo da energia	0.08642 €/kWh
Investimento inicial	0 €
Custo total de operação	1 217 351 €/ano

Quanto ao comportamento geral do sistema, verificamos que os geradores eólicos contribuem em grande parte para o fornecimento de energia à carga durante o ano, porém durante o período do verão a sua contribuição diminui, devido a menor intensidade de vento durante essa estação do ano, como podemos ver na Figura 25. Por outro lado, o sistema

fotovoltaico apresenta o comportamento contrário, em que durante a primavera e o verão aumenta a sua produção, como era de prever, pois durante estas estações o recurso solar é maior, não apenas em intensidade, mas também se encontra disponível durante mais horas, como podemos ver na Figura 26.

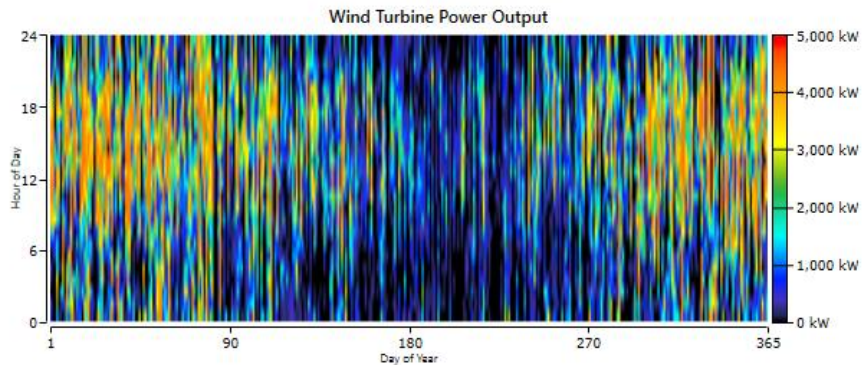


Figura 25 – Mapa térmico da geração eólica.

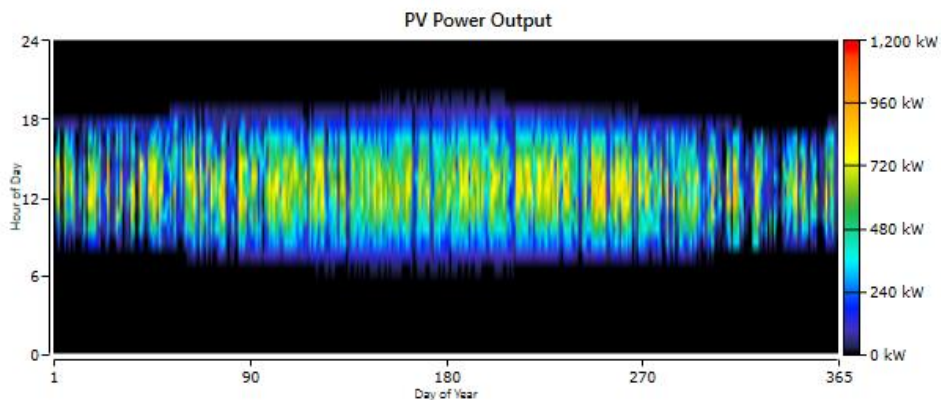


Figura 26 – Mapa térmico da geração fotovoltaica.

Quanto ao comportamento dos geradores termoelétricos, pela análise do mapa térmico do consumo de combustível apresentado na Figura 27, podemos ver que, em vários espaços de tempo, o consumo de combustível foi nulo, o que quer dizer que nesses instantes o sistema estava a ser alimentado por energia 100% renovável.

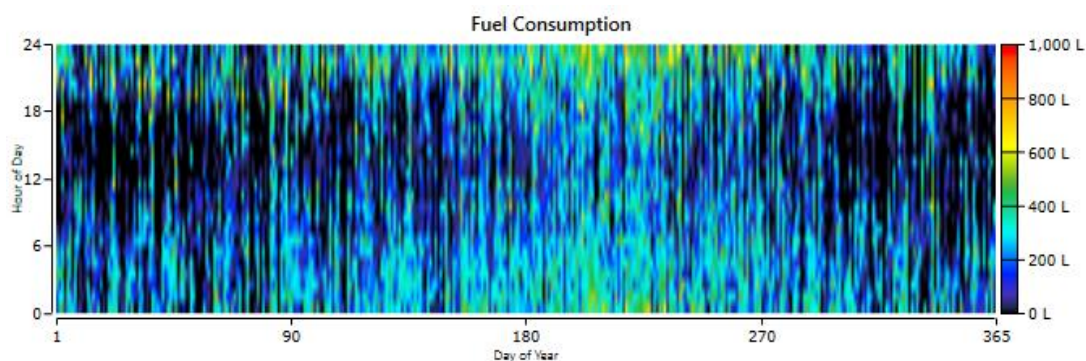


Figura 27 - Mapa térmico do consumo de combustível pelos geradores termoeletrônicos.

Todavia, o consumo de combustível é mais acentuado na época do verão. Isto é justificado pelo facto de a produção de energia eólica diminuir consideravelmente, enquanto que o sistema fotovoltaico, devido a pequena capacidade instalada, não conseguir ter o mesmo impacto que a geração eólica, mas também devido ao maior consumo registado na época de verão.

Por último, podemos assumir que este sistema não necessita de uma central termoeletrica com a potência instalada atualmente, pois, por exemplo, um dos geradores CAT 725 kVA apenas entrou em funcionamento durante uma hora nesta simulação. Os mapas térmicos de potência de saída, os valores de energia produzida de cada gerador e a emissão de gases pelo sistema estão apresentados no Anexo E.

5.2. Estudo de caso 2: Graciosa, introdução de sistemas de armazenamento

O novo sistema elétrico da ilha da Graciosa possui um sistema de armazenamento de energia a baterias, do fabricante *Leclanché*, com 3,2 MWh de capacidade, divididos por 45.600 células. Este sistema terá a função de operar a reserva do sistema e manter o equilíbrio entre a geração e a procura de energia, enquanto os geradores a *diesel* existentes apenas entrarão em funcionamento quando não for possível alimentar a carga, direta ou indiretamente, pela geração de eletricidade a partir de fontes renováveis [36].

Este novo componente deverá aumentar o nível de penetração de energia renovável no sistema, armazenando a energia produzida em excesso pelos geradores de energia renovável e utiliza-la mais tarde, quando necessário.

5.2.1. Dimensionamento do sistema de armazenamento

A introdução de baterias no *Homer Pro* é semelhante aos restantes componentes. Temos acesso a uma longa lista de baterias de vários fabricantes e com diferentes níveis e potência. Como o tipo de baterias instalado na ilha da Graciosa não existe no catálogo, foram introduzidas três baterias de íões de lítio de 1 MWh na simulação. Este componente foi parametrizado com os dados apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Dados para o dimensionamento do sistema de armazenamento da ilha da Graciosa.

Investimento inicial	2 100 000 €
Custo de operação e manutenção	30 000 €/ano
Tempo de vida	20 anos
Estado de carga inicial	100 %
Estado de carga mínima	20 %

5.2.2. Resultados e discussão

Após a introdução do sistema de armazenamento de 3 MWh, foram obtidos os seguintes valores, referentes ao funcionamento do sistema, apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Funcionamento do sistema após a introdução de baterias.

Energia produzida	18 683 750 kWh/ano
Energia consumida	14 080 225 kWh/ano
Energia produzida em excesso	4 401 948 kWh/ano
Percentagem de energia em excesso	23 %
Penetração de energia renovável	62,6 %
Combustível consumido	1 382 963 L/ano

Verificamos que, em comparação ao caso 1, houve uma diminuição da energia produzida, aproximadamente 1 GWh por ano, diminuindo assim a percentagem de energia em excesso 5%. Pelo aproveitamento da energia em excesso produzida pelas fontes de energia renovável, através das baterias, 62,6 % de toda a energia consumida pela carga teve

origem em recursos renováveis, mais 6,5 % do que no caso anterior. O consumo de combustível também diminuiu, em cerca de 250 mil litros, isto porque o sistema utiliza a energia armazenada na bateria antes de fazer uso dos geradores a *diesel*.

Na Figura 28 podemos ver a representação da energia produzida em percentagem, enquanto na Tabela 13 estão apresentados os valores de energia produzida por ano, para cada tipo de geração.

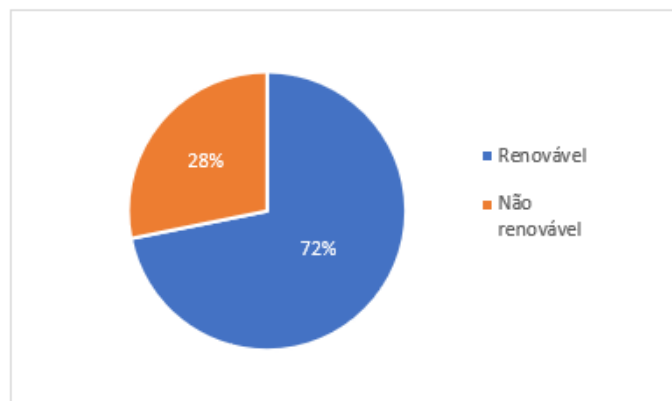


Figura 28 - Produção de energia renovável vs não renovável.

Tabela 13 - Energia produzida anual por tipo de geração.

Tipo de geração	Energia produzida
Termoelétrica	5 259 206 kWh/ano
Eólica	12 029 244 kWh/ano
Solar	1 395 299 kWh/ano

Os custos do sistema estão apresentados na Tabela 14. O aumento do custo da energia é praticamente desprezável.

Tabela 14 - Custos gerais do sistema

Custo da energia	0,08699 €/kWh
Investimento	2 100 000 €
Custo total de operação	1 062 934 €/ano

Após a análise destes valores, obtivemos uma poupança anual de 154 415,75 € por ano, o que significa que serão necessários perto de 14 anos e 7 meses para ter retorno no investimento feito no sistema de armazenamento.

Quanto ao comportamento do sistema de armazenamento, o mapa térmico do seu estado de carga esta apresentado na Figura 29.

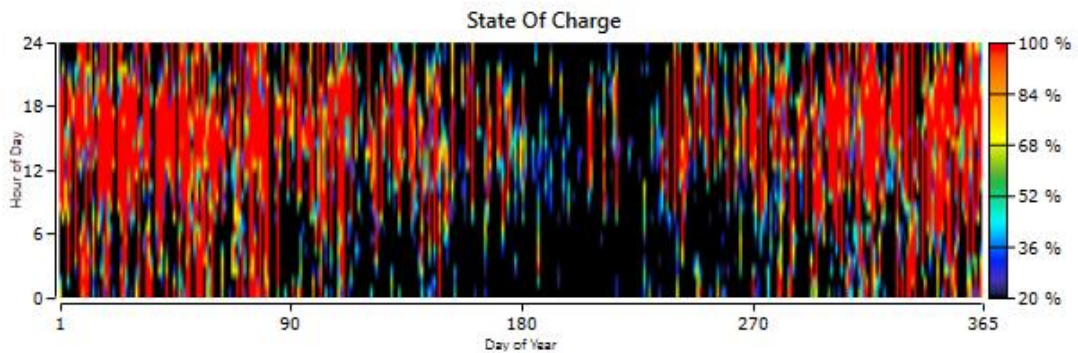


Figura 29 - Mapa térmico do estado de carga do sistema de armazenamento.

Podemos ver que este tem uma utilização regular durante a noite, onde a produção de energia solar é nula, enquanto durante as horas de sol, a sua carga encontra-se regularmente a 100%. A zona mais crítica é durante os meses de verão, onde as baterias encontram-se normalmente descarregadas. Isto acontece porque a produção de energia eólica diminui bastante durante esta estação do ano, o que significa que, na maior parte do tempo, toda a energia produzida pelas fontes de energia renovável está a ser utilizada para alimentar as cargas, não havendo energia em excesso para o carregamento das baterias. Na Tabela 15 estão apresentados os valores de toda a energia que passou pelo sistema de armazenamento. As perdas estão associadas a ineficiência deste componente.

Tabela 15 - Dados de operação do sistema de armazenamento.

Energia armazenada	896 970 kWh/ano
Energia fornecida	808 694 kWh/ano
Perdas	89 774 kWh/ano

No Anexo F encontram-se os mapas térmicos de cada um das fontes de produção de energia, tal como alguns valores relevantes.

5.3. Estudo de caso 3: Graciosa, sistema 100% renovável

Neste caso de estudo iremos testar a capacidade de implementação de um sistema 100% renovável, a partir daquele parametrizado no caso de estudo anterior. Um sistema elétrico alimentado totalmente a partir de fontes de energia renovável não será implementado no futuro próximo, mas o objetivo é analisar o comportamento do sistema com a tecnologia existente hoje e o quanto próxima está de acabar a dependência nos combustíveis fósseis na produção de energia elétrica.

De forma a fazer esta análise, foi utilizada a simulação do caso de estudo anterior, eliminando todos os geradores a *diesel* e reforçando a capacidade de geração e de armazenamento instalada, de acordo com a Tabela 16. Devido a ser irreal implementar um sistema com esta configuração, não será feita uma análise económica nesta simulação.

Tabela 16 - Dados do reforço do sistema.

	Capacidade introduzida	Capacidade total no sistema
Sistema eólico	8 MW	12.5 MW
Sistema fotovoltaico	7 MW	8 MW
Baterias	7 MWh	10 MWh

5.3.1. Resultados e discussão

Após a simulação do sistema 100 % renovável, descrito anteriormente, foram obtidos os seguintes resultados, apresentados na Tabela 17, indicativos do funcionamento do sistema.

Tabela 17 - Funcionamento do sistema 100% renovável da ilha da Graciosa.

Energia produzida	53 713 703 kWh/ano	
Energia consumida	13 376 641 kWh/ano	
Excesso de produção	39 960 509 kWh/ano	74,4 %
Escassez de capacidade	851 186 kWh/ano	6,05 %
Carga não alimentada	703 614 kWh/ano	5 %

Em primeiro lugar, podemos afirmar que o sistema está sobredimensionado, sendo que praticamente 75% de toda a energia produzida não é utilizada. Ainda assim, 5 % da

carga não foi alimentada, o que significa que não houve geração suficiente em certos espaços de tempo, pela diminuição da potência gerada devido a variabilidade das fontes renováveis ou por ter acontecido um pico de carga que a geração não conseguiu suportar. Na Figura 30, podemos ver as quantidades de carga não alimentada de escassez de capacidade ao longo do ano.

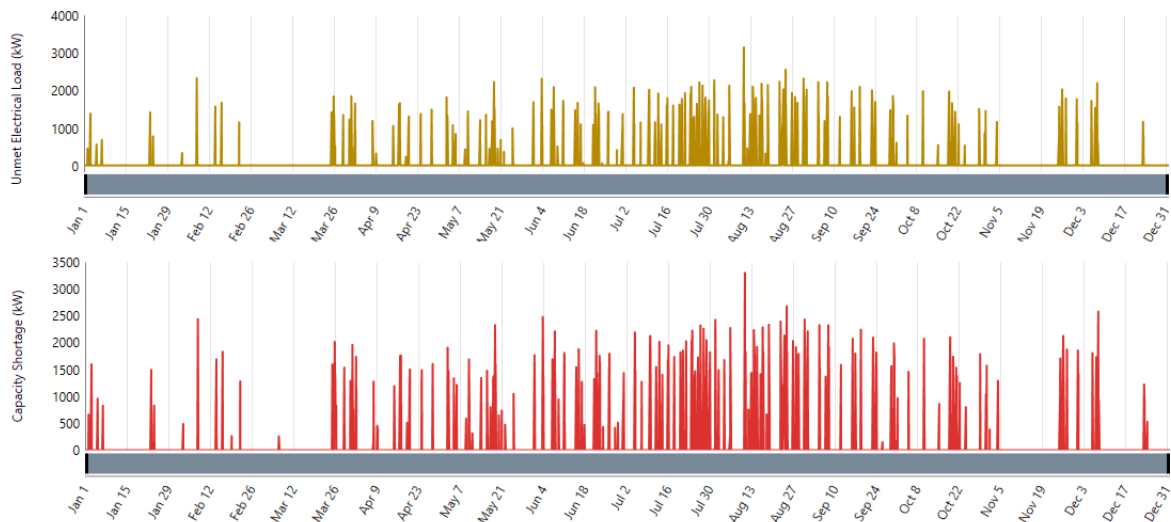


Figura 30 - Representação gráfica da carga não alimentada (1) e da escassez de capacidade (2).

Há soluções simples para o problema de excesso de energia produzida no sistema aqui implementado, como desligar aerogeradores quando for atingido o equilíbrio entre a geração e a procura. Devido a forma como o *Homer Pro* opera este tipo de gerador elétrico, o utilizador não tem capacidade controlar o número de unidades em funcionamento em cada espaço de tempo, logo, os geradores eólicos quando em operação, fornecem todos a mesma potência, dependendo da velocidade do vento. A opção de agendar paragens para, por exemplo, efetuar manutenção dos geradores também não é solução, pois esta paragem será feita em bloco, desligando todas as unidades do mesmo tipo durante as mesmas horas.

Quanto à carga não alimentada, a única solução será introduzir mais componentes geradores e/ou capacidade de armazenamento no sistema, tornando a implementação deste ainda mais irreal.

5.4. Estudo de caso 4: Porto Santo, caso base

5.4.1. Resultados e discussão

Após a simulação do sistema implementado para a ilha do Porto Santo no capítulo anterior, foram obtidos os valores referentes ao funcionamento do sistema, apresentados na Tabela 8:

Tabela 18 - Funcionamento do sistema

Energia produzida	36 056 185 kWh/ano
Energia consumida	35 504 386 kWh/ano
Energia produzida em excesso	361 900 kWh/ano
Percentagem de energia em excesso	1 %
Penetração de energia renovável	16,60 %
Combustível consumido	7 946 788 L/ano

Podemos ver que praticamente toda energia produzida é utilizada, o que não acontece no caso de estudo 1, pois os sistemas de geração instalados são completamente diferentes. Neste caso, capacidade instalada de energia renovável é bastante menor, logo sempre que a energia produzida esteja disponível será despachada e o desperdício, se existir, será sempre menor. Também o número de geradores termoelétricos é menor e têm uma potência instalada muito maior em comparação aos da Graciosa, o que aumenta a capacidade de adequar a geração à procura, já que um único gerador consegue variar a sua potência entregue num intervalo de valores muito maior.

Na Figura 31. podemos ver a representação de energia produzida no sistema em percentagem, enquanto na Tabela 19 podemos ver os valores de energia produzida por ano, para cada tipo de geração.

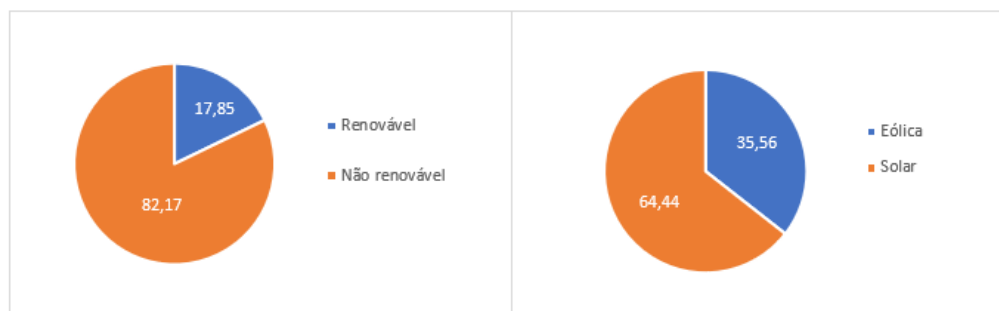


Figura 31 - Produção de energia: (1) Renovável vs Não Renovável e (2) Geração Eólica vs Solar

Tabela 19 - Produção de energia anual por tipo de geração.

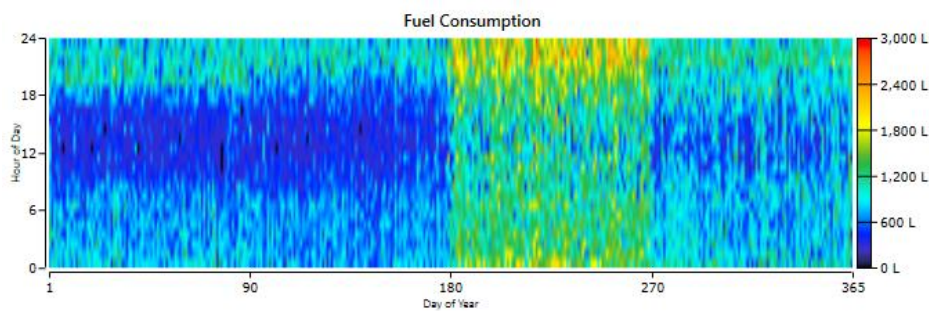
Tipo de geração	Energia produzida
Termoelétrica	29 620 383 kWh/ano
Eólica	2 288 487 kWh/ano
Solar	4 147 315 kWh/ano

Os custos gerais do sistema estão apresentados na Tabela 20. Podemos ver desde já o impacto da geração termoelétrica. O consumo de energia também é quase duas vezes maior ao caso da ilha da Graciosa, mas o custo total de operação é mais do que cinco vezes superior, devido ao grande consumo de combustíveis fósseis.

Tabela 20 – Custos gerais do sistema.

Custo da energia	0,161 €/kWh
Investimento inicial	0 €
Custo total de operação	5 730 696 €/ano

Quanto ao comportamento do sistema elétrico do Porto Santo, podemos ver que é altamente dependente da geração a *diesel*, com mais de 80% de toda a energia produzida, sendo que a capacidade instalada de energias renováveis é muito pequena para a quantidade de procura de energia na região. Contudo, pela a análise do mapa térmico do consumo de combustível, mostrado na Figura 32, podemos verificar que em alguns períodos de tempo, 8 horas no total, o consumo é nulo, o que significa que durante essas horas a energia consumida provém apenas de recursos renováveis.

**Figura 32 - Mapa térmico do consumo de combustível pelos geradores termoelétricos.**

O consumo de combustível é menos acentuado durante o dia, devido a maior produção de energia solar durante esse espaço de tempo, como podemos ver na Figura 33. No entanto, o consumo de *diesel* aumenta drasticamente durante o verão, mesmo onde o recurso solar é mais intenso, devido ao aumento do consumo durante esse período do ano, devido a forte atividade turística neste local.

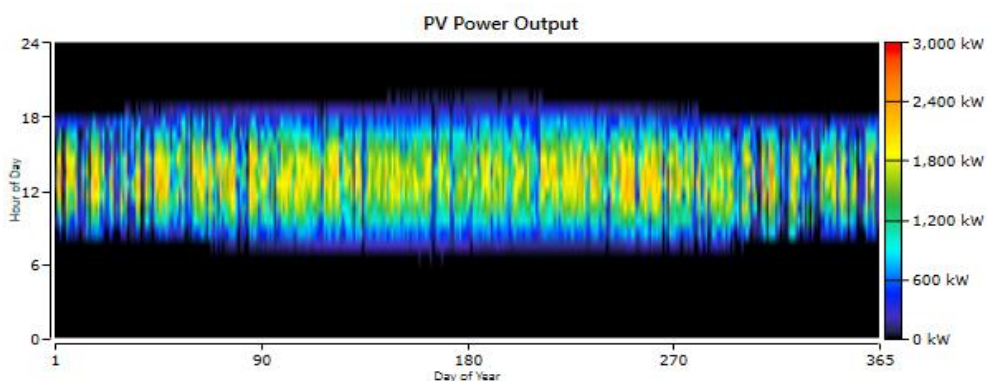


Figura 33 - Mapa térmico da geração fotovoltaica.

Quanto a componente eólica, analisada através do mapa térmico da geração eólica do gerador Vestas V47, mostrado na Figura 34, podemos ver que entram em funcionamento de uma forma mais uniforme em comparação com os geradores eólicos da ilha da Graciosa, isto é, não se nota uma queda de produção acentuada em nenhuma estação do ano, isto porque a velocidade média do vento durante o ano não varia significativamente e este facto devia ser aproveitado, aumentando a capacidade instalada de produção de energia eólica. O mapa térmico da geração eólica pelos geradores Vestas V29 encontram-se no Anexo H.

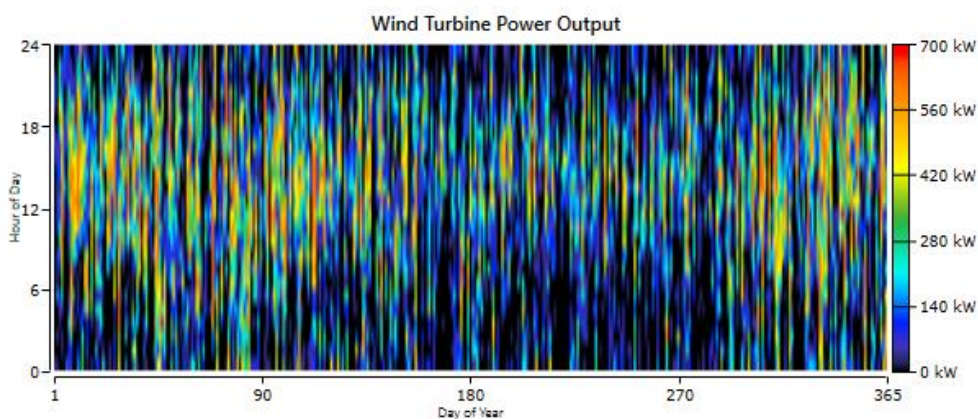


Figura 34 - Mapa térmico da geração de energia eólica do gerador Vestas V47.

5.5. Estudo de caso 5: Porto Santo, introdução de sistemas de armazenamento a baterias

Neste estudo de caso iremos analisar o impacto da introdução de sistemas de armazenamento no sistema elétrico do Porto Santo, a partir dos resultados obtidos no caso de estudo 4. Este sistema é muito diferente daquele analisado nos primeiros 3 casos de estudo, por ser muito dependente do consumo de combustíveis fósseis na produção de energia. A potência instalada total dos geradores de energia renovável também é mais pequena, em que apenas 16.6 % da energia total consumida pela carga foi produzida a partir de fontes renováveis.

5.5.1. Dimensionamento do sistema de armazenamento

Foram introduzidas duas baterias de íões de lítio de 1 MWh à simulação, menos uma que o parametrizado no caso da ilha Graciosa, devido a capacidade instalada neste caso ser menor. Este componente foi parametrizado com os dados apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 – Dados para o dimensionamento do sistema de armazenamento da ilha do Porto Santo.

Investimento inicial	1 400 000 €
Custo de operação e manutenção	20 000 €/ano
Tempo de vida	20 anos
Estado de carga inicial	100 %
Estado de carga mínima	20 %

5.5.2. Resultados e discussão

Após a introdução de um sistema de armazenamento no sistema dimensionado para a ilha do Porto Santo no caso de estudo 4, foram obtidos os valores referentes ao funcionamento do sistema, apresentados na Tabela 22:

Tabela 22 - Funcionamento do sistema.

Energia produzida	35 764 252 kWh/ano
Energia consumida	35 504 386 kWh/ano
Energia produzida em excesso	31 687 kWh/ano
Porcentagem de energia em excesso	0,09 %
Penetração de energia renovável	17,4 %
Combustível consumido	7 869 459 L/ano

Em comparação com o estudo de caso 4, verificamos que o total de energia produzida diminuiu aproximadamente 300 MWh por ano, fazendo com que o excesso de energia seja praticamente desprezável. Também o total de combustível consumido diminuiu em cerca de 80 mil litros por ano. O aproveitamento dos recursos renováveis foi maior, sendo que a penetração de energia renovável no sistema aumentou ligeiramente. Contudo, não vemos um grande impacto do sistema de armazenamento, pois as variações apontadas são muito pequenas em relação ao caso inicial.

Na Figura 35 podemos ver a representação de energia produzida no sistema em porcentagem. Os resultados mantêm-se iguais ao caso anterior, o que prova que impacto do sistema de armazenamento foi mínimo. Na Tabela 23 podemos ver os valores de energia produzida por ano, para cada tipo de geração.

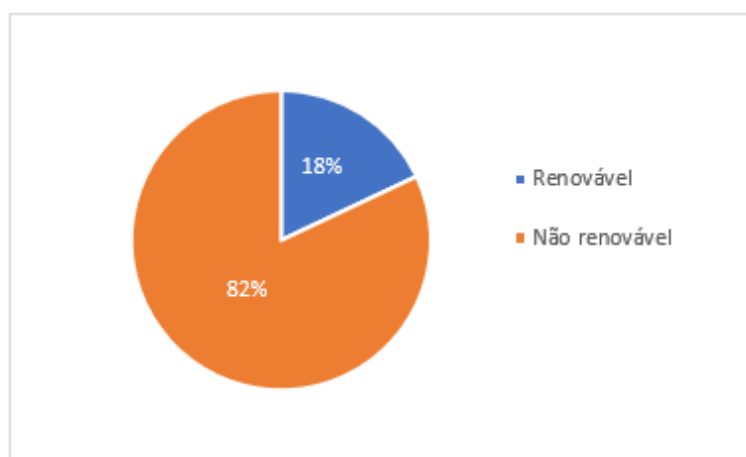
**Figura 35 - Produção de energia renovável vs não renovável.**

Tabela 23 - Produção de energia anual por tipo de geração.

Tipo de geração	Energia produzida
Termoelétrica	29 328 33 kWh/ano
Eólica	2 288 487 kWh/ano
Solar	4 150 260 kWh/ano

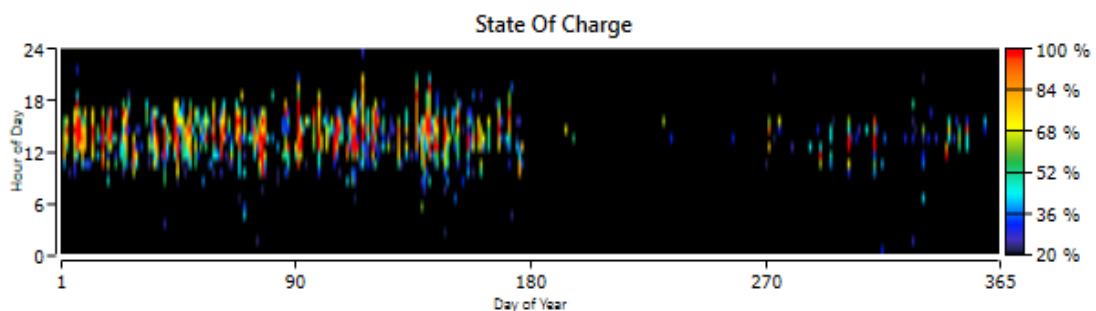
Os custos associados ao funcionamento do sistema estão apresentados na Tabela 24. De referir que o custo da energia aumentou ligeiramente.

Tabela 24 - Custos gerais do sistema.

Custo da energia	0,1634 €/kWh
Investimento inicial	1 400 000 €
Custo total de operação	5 694 550 €/ano

Após a análise destes valores, obtivemos uma poupança anual de 36 146,09 € por ano, o que significa que serão necessários mais de 38 anos para ter retorno no investimento feito no sistema de armazenamento. Sendo assim, do ponto de vista económico, a introdução de baterias no sistema elétrico não se justifica.

Quanto ao comportamento do sistema de armazenamento, o mapa térmico do seu estado de carga esta apresentado na Figura 36.

**Figura 36 - Mapa térmico do estado de carga do sistema de armazenamento.**

É bastante evidente a diferença no funcionamento entre o sistema de armazenamento analisado no estudo de caso 2 e este. Neste caso, as baterias encontram-se descarregadas durante a maior parte do tempo, sendo que nos meses de verão, a sua utilidade é praticamente nula. Isto acontece porque na maior parte do tempo não existe energia produzida em excesso através dos sistemas fotovoltaico e eólico instalados, usado para carregar a bateria. A prioridade é entregar energia a carga, que por sua vez é bastante maior em comparação com o caso da ilha da Graciosa, e só depois carregar a bateria, mas a capacidade instalada de energia renovável no sistema não é suficiente para cumprir estas duas tarefas de forma regular. Todavia, podemos ver pela Figura 37, que o número de vezes que o consumo de combustível foi nulo aumentou, aumentando o número de horas que o sistema foi alimentado a partir de fontes de energia 100 % renovável.

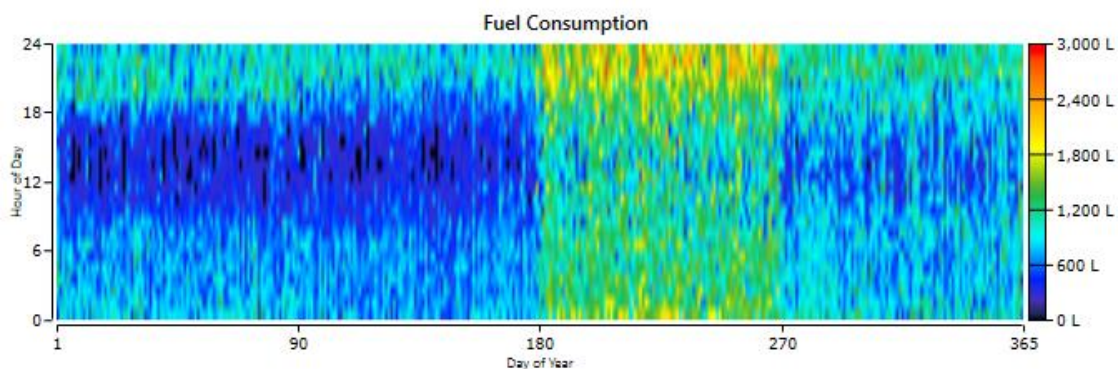


Figura 37 - Mapa térmico do consumo de combustível.

Por último, na Tabela 25 estão apresentados os valores de toda a energia que passou pelo sistema de armazenamento. Novamente, as perdas estão associadas a ineficiência das baterias.

Tabela 25 - Dados de operação do sistema de armazenamento.

Energia armazenada	239 495 kWh/ano
Energia fornecida	217 064 kWh/ano
Perdas	24 032 kWh/ano

5.6. Estudo de caso 6: Porto Santo, sistema 100% renovável

Neste último caso de estudo iremos testar a capacidade de implementação de um sistema 100% renovável na ilha do Porto Santo, a partir daquele parametrizado no caso anterior. A implementação de um sistema deste tipo na ilha do Porto Santo prevê-se muito mais complicada, pois a contribuição das fontes de energia renovável é bastante reduzida, especialmente a energia eólica.

Partindo da simulação do caso de estudo anterior, foram removidos os geradores a *diesel* e foi reforçada a capacidade de geração e de armazenamento instalada, de forma semelhante ao feito no caso de estudo 3 e de acordo com a Tabela 26. No *Homer Pro* não podemos introduzir três conjuntos de geração eólica diferentes, por isso foram também removidos os dois geradores Vestas V29 para fazer o reforço da capacidade com outro tipo de aerogerador com uma potência superior.

Tabela 26 - Dados do reforço do sistema.

	Capacidade introduzida	Capacidade total no sistema
Sistema eólico	17.98 MW	18.66 MW
Sistema fotovoltaico	5 MW	7.62 MW
Baterias	7 MWh	10 MWh

5.6.1. Resultados e discussão

Após a simulação do sistema 100 % renovável na ilha do Porto Santo, descrito anteriormente, foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 27, indicativos do funcionamento do sistema.

Tabela 27 - Funcionamento do sistema 100% renovável da ilha da Graciosa.

Energia produzida	60 834 441 kWh/ano	
Energia consumida	26 560 319 kWh/ano	
Excesso de produção	33 575 595 kWh/ano	55,2 %
Escassez de capacidade	11 149 181 kWh/ano	31,4 %
Carga não alimentada	8 944 067 kWh/ano	25,2 %

Como podemos ver, neste caso o problema de produção em excesso também acontece, ainda assim com uma percentagem menor em comparação ao caso de estudo 3. Porém, o sistema ainda se encontra subdimensionado, pois não há geração de energia suficiente para atender totalmente a procura, sendo que 25% da carga total não é alimentada.

Na Figura 38, podemos ver a representação gráfica de carga não alimentada e de escassez de capacidade ao longo do ano.

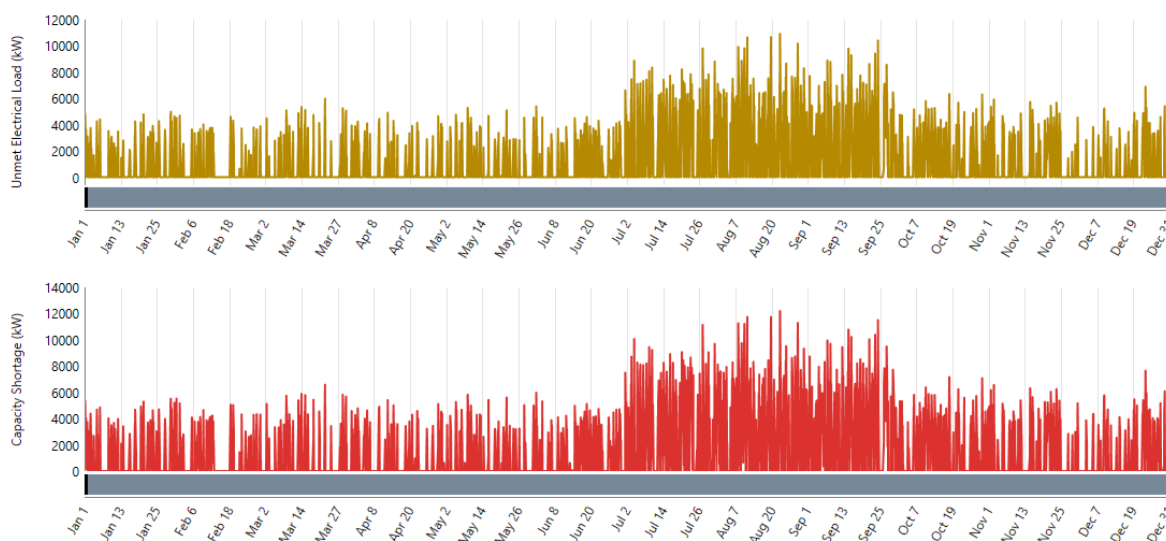


Figura 38 - Representação gráfica da carga não alimentada (1) e da escassez de capacidade (2).

A produção inconstante de energia afeta o sistema regularmente ao longo do ano, sendo que nos meses de verão este problema intensifica-se, fase ao aumento de carga que acontece durante esta época. Este drástico aumento de carga, devido a grande atividade turística na ilha durante a época de verão, é um desafio para o setor elétrico da região. Mesmo atualmente, com o uso de geradores a *diesel*, podemos admitir que o sistema elétrico está sobredimensionado durante maior parte do ano, pois existem geradores que apenas entram em funcionamento durante três meses, o que torna a tarefa implementar um sistema 100 % renovável, com os componentes e técnicas usadas nesta simulação, ainda mais complicada.

6. Conclusão

Esta dissertação teve como objetivo analisar o comportamento de sistemas eletricamente isolados da rede convencional e avaliar o impacto da introdução de sistemas de armazenamento de grande escala. Para isso foram avaliadas duas ilhas portuguesas: a ilha da Graciosa, do arquipélago dos Açores, e a ilha do Porto Santo, do arquipélago da Madeira. Estas duas ilhas, embora tenham características semelhantes, possuem sistemas elétricos muito distintos.

Em termos de procura de energia, a ilha da Graciosa possui um perfil de carga praticamente constante ao longo do ano, enquanto na ilha do Porto Santo, o perfil de carga sofre uma variação drástica durante os meses de verão, em que a procura de energia aumenta consideravelmente, devido a grande atividade turística do local durante essa época. Em termos de geração, a ilha da Graciosa possui um sistema único, devido ao investimento feito região por parte de empresas internacionais, em parceria com o operador da rede local. Com isto, nos próximos anos mais de 60 % de toda a energia produzida terá origem em fontes renováveis. Quanto à ilha do Porto Santo, a geração de energia é ainda muito dependente dos combustíveis fósseis, sendo que a penetração de energia renovável no sistema é de 17%.

A análise dos sistemas elétricos mencionados anteriormente foi feita em três fases: (1) análise técnica e económica do caso base, onde se incluem todas as fontes de produção de energia presentes atualmente em cada sistema, (2) análise técnica e económica da introdução de baterias à escala do sistema elétrico para os dois sistemas, e (3) implementação e análise de sistemas 100% renováveis nos locais em estudo.

Na primeira fase e em relação ao caso da ilha da Graciosa, os resultados obtidos mostram que a energia produzida em excesso é um problema derivado da alta penetração de energias renováveis no sistema, mas menor o consumo de combustível associado trás vantagens económicas e ambientais. Em relação a ilha do Porto Santo, o excesso de energia é bastante baixo, devido a ter uma capacidade instalada de energia renovável menor e a capacidade de os geradores termoelétricos variarem a sua potência entregue. Por outro lado, os altos custos gerais do sistema registados mostram claramente o impacto do elevado consumo de combustíveis fósseis.

Na segunda fase, no caso da ilha da Graciosa, a introdução de baterias teve um impacto positivo no sistema, técnica e economicamente, dado que este novo componente conseguiu aproveitar parte da energia produzida em excesso e utilizá-la mais tarde, aumentando a utilização da energia renovável e diminuindo o consumo de combustível. No caso da ilha do Porto Santo, o impacto da introdução de baterias não teve o mesmo efeito, sendo que estas encontravam-se descarregadas durante a maior parte do tempo, não contribuindo assim para o funcionamento do sistema. Isto aconteceu devido a produção de energia renovável não ser suficiente para fornecer a carga, não havendo excedente para carregar a bateria, tornando inviável o investimento na instalação e operação desde componente.

Por último, na terceira fase foi avaliada a capacidade de os sistemas operarem totalmente com energias renováveis, sendo que, no caso da ilha da Graciosa, 5% da carga total anual não foi alimentada, mesmo havendo um excesso de produção de 75%. No caso da ilha do Porto Santo, os resultados foram menos favoráveis, onde 30% da carga não foi alimentada. Com isto podemos concluir que a implementação de sistemas suportados apenas em energias renováveis ainda são impraticáveis, devido a imprevisibilidade na geração de energia através deste tipo de componentes, a ausência destes recursos durante várias horas do dia e a baixa eficiência destas tecnologias atualmente.

Referências Bibliográficas

- [1] European Commission, 2010. *Europe 2020, A strategy for smart, sustainable and inclusive growth*.
- [2] Article, R. (2015). Towards greener and more sustainable batteries for electrical energy storage, 7(January). <https://doi.org/10.1038/NCHEM.2085>
- [3] United Nations (1987), “Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future” Acedido em 30 de outubro 2018 em <http://www.un-documents.net/wced-ocf.htm>
- [4] Ashton, T. S. (1997). The industrial revolution 1760-1830. *OUP Catalogue*.
- [5] Bhowmik, C., Bhowmik, S., Ray, A., & Pandey, K. M. (2017). Optimal green energy planning for sustainable development: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71(December 2015), 796–813. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.105>
- [6] Dincer I. & Acar C. (2015). A review on clean energy solutions for better sustainability. *International Journal of Energy Research*, 39, 585-606.
- [7] U.S. Energy Information Administration, *Renewable Energy Explained*. Acedido à 6 novembro 2018 em: https://www.eia.gov/energyexplained/?page=renewable_home.
- [8] REN21, *Renewables Global Status Report*. Acedido à 6 de novembro de 2018 em: <http://www.ren21.net/status-of-renewables/global-status-report/~>
- [9] Hussain, A., Arif, S. M., & Aslam, M. (2017). Emerging renewable and sustainable energy technologies: State of the art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71(June 2015), 12–28. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.033>
- [10] Bhowmik, C., Bhowmik, S., Ray, A., & Pandey, K. M. (2017). Optimal green energy planning for sustainable development: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71(December 2015), 796–813. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.105>
- [11] Kumar, Y., Ringenberg, J., Depuru, S. S., Devabhaktuni, V. K., Lee, J. W., Nikolaidis, E., ... Afjeh, A. (2016). Wind energy: Trends and enabling technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 209–224. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.200>
- [12] Kabir, E., Kumar, P., Kumar, S., Adelodun, A. A., & Kim, K. H. (2018). Solar energy: Potential and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82(September 2016), 894–900. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.094>
- [13] EEM, 2018. Evolução mensal do mix de produção e das emissões de CO₂. Novembro de 2018.
- [14] APREN, 2018. Produção de eletricidade na Região Autónoma da Madeira por fonte de janeiro a junho de 2018.
- [15] EDA, 2018. Produção e Consumo, dados históricos.
- [16] Aneke, M., & Wang, M. (2016). Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review. *Applied Energy*, 179, 350–377. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.097>

- [17] Palizban, O., & Kauhaniemi, K. (2016). Energy storage systems in modern grids—Matrix of technologies and applications. *Journal of Energy Storage*, 6(2015), 248–259. <https://doi.org/10.1016/j.est.2016.02.001>
- [18] Yang, C.-J. (2016). *Chapter 2 - Pumped Hydroelectric Storage. Storing Energy*. Elsevier Inc. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-803440-8.00002-6>
- [19] Liu, Y., Yu, S., Zhu, Y., Wang, D., & Liu, J. (2018). Modeling, planning, application and management of energy systems for isolated areas: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82(October 2017), 460–470. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.063>
- [20] Kuang, Y., Zhang, Y., Zhou, B., Li, C., Cao, Y., Li, L., & Zeng, L. (2016). A review of renewable energy utilization in islands. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 504–513. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.014>
- [21] Kim, Y., Kim, E., & Moon, S. (2016). Frequency and Voltage Control Strategy of Standalone Microgrids With High Penetration of Intermittent Renewable Generation Systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 31(1), 718–728. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2015.2407392>
- [22] Liang, X. (2017). Emerging Power Quality Challenges Due to Integration of Renewable Energy Sources. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53(2), 855–866. <https://doi.org/10.1109/TIA.2016.2626253>
- [23] Dreidy, M., Mokhlis, H., & Mekhilef, S. (2017). Inertia response and frequency control techniques for renewable energy sources: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69(November 2015), 144–155. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.170>
- [24] Tielens, P., & Van Hertem, D. (2016). The relevance of inertia in power systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 999–1009. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.016>
- [25] Tielens, P., & van Hertem, D. (2012). Grid Inertia and Frequency Control in Power Systems with High Penetration of Renewables. *Electrical Energy Computer Architectures*, 0(2), 1–6. Retrieved from <https://lirias.kuleuven.be/handle/123456789/345286>
- [26] ERSE, 2014. Manual de procedimentos da gestão global do sistema do setor elétrico.
- [27] Reddy, S. S., Di, P., & Di, Q. (2017). Multi-Objective Based Congestion Management Using Generation Rescheduling and Load Shedding. *IEEE Transactions on Power Systems*, 32(2), 852–863. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2016.2569603>
- [28] Qi, Z., Gao, Q., Liu, Y., Yan, Y. Y., & Spitler, J. D. (2014). Status and development of hybrid energy systems from hybrid ground source heat pump in China and other countries, 29, 37–51. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.059>
- [29] Sinha, S., & Chandel, S. S. (2015). Review of recent trends in optimization techniques for solar photovoltaic – wind based hybrid energy systems, 50, 755–769. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.040>
- [30] Ramli, M. A. M., Bouchevara, H. R. E. H., & Alghamdi, A. S. (2018). Optimal sizing of PV / wind / diesel hybrid microgrid system using multi-objective self-adaptive differential evolution algorithm. *Renewable Energy*, 121, 400–411. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.058>

-
- [31] Ahadi, A., Kang, S., & Lee, J. (2016). A novel approach for optimal combinations of wind , PV , and energy storage system in diesel-free isolated communities. *Applied Energy*, 170, 101–115. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.110>
- [32] Bahramara, S., Moghaddam, M. P., & Haghifam, M. R. (2016). Optimal planning of hybrid renewable energy systems using HOMER: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 609–620. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.039>
- [33] EDA, 2018. Caracterização das Redes de Transporte e Distribuição de Energia Elétrica em 2017.
- [34] e2p, 2017. Parques Eólicos em Portugal. http://e2p.inegi.up.pt/relatorios/Wind_power_2017.pdf
- [35] SREA, 2018. Produção de Energia Electrica (KWh). https://srea.azores.gov.pt/ReportServer/Pages/ReportViewer.aspx?%2fRelatoriosVarios%2fEnergia-Produ%C3%A7%C3%A3o¶m_27=Graciosa&rc:Section=2
- [36] Stenzel, P., Schreiber, A., Marx, J., Wulf, C., Schreieder, M., & Stephan, L. (2017). Renewable energies for Graciosa Island, Azores-Life Cycle Assessment of electricity generation. *Energy Procedia*, 135, 62–74. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.487>
- [37] ENERCON, 2015. *ENERCON product overview*. https://www.enercon.de/fileadmin/Redakteur/Medien-Portal/broschueren/pdf/en/ENERCON_Produnkt_en_06_2015.pdf
- [38] EEM, 2018. Caracterização das Redes de Transporte e Distribuição de Energia Elétrica em AT e MT para 2017.
- [39] Wind Turbine Models, 2018. Vestas V29 Datasheet. <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/273-vestas-v29#datasheet>
- [40] Wind Turbine Models, 2018. Vestas V47 Datasheet. <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/13-vestas-v47#datasheet>
- [41] Lambert, T., Gilman, P., & Lilienthal, P. (2006). Micropower System Modeling with Homer. *Integration of Alternative Sources of Energy*, 379–418. <https://doi.org/10.1002/0471755621.ch15>

Anexo A: Dimensionamento das cargas

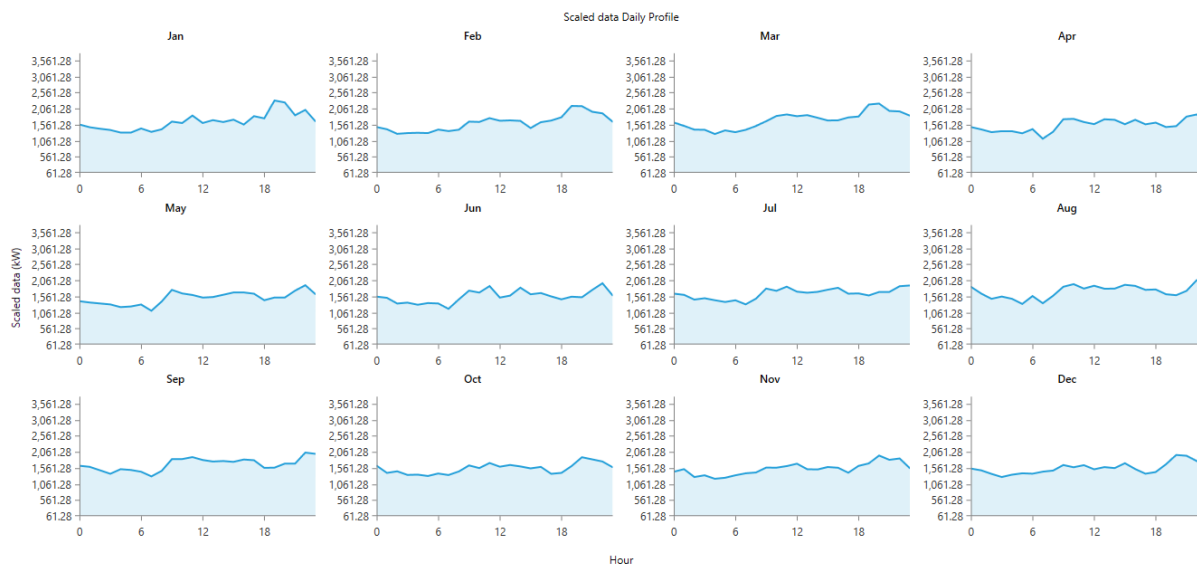


Figura 39 - Perfil de carga diária por mês da ilha da Graciosa.

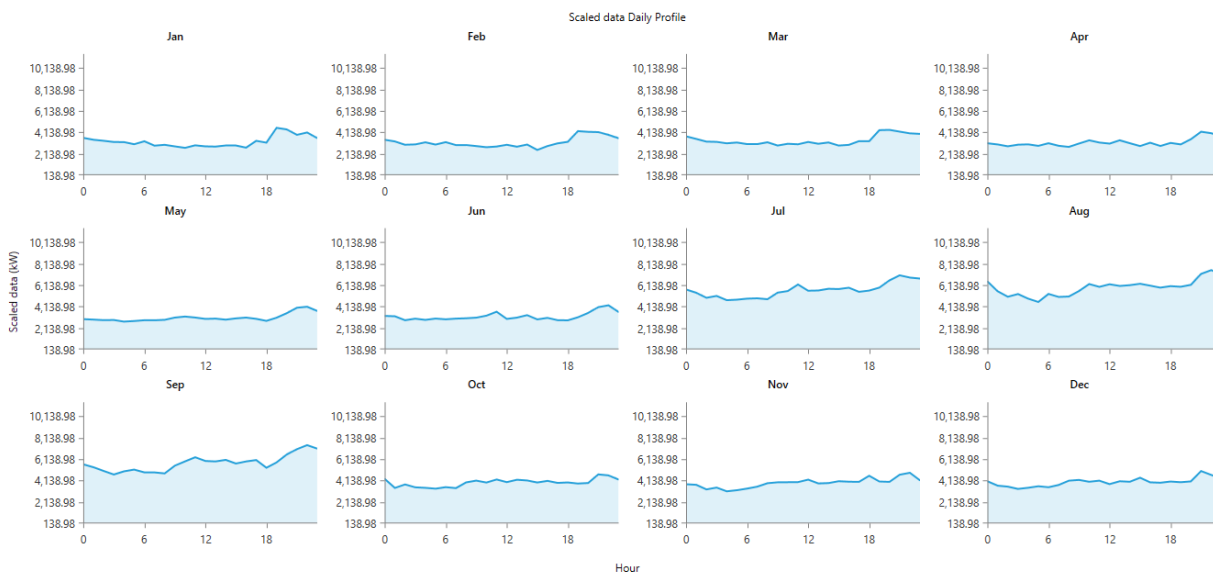


Figura 40 - Perfil de carga diária por mês da ilha do Porto Santo.

Anexo B: Dimensionamento da geração térmica na ilha da Graciosa

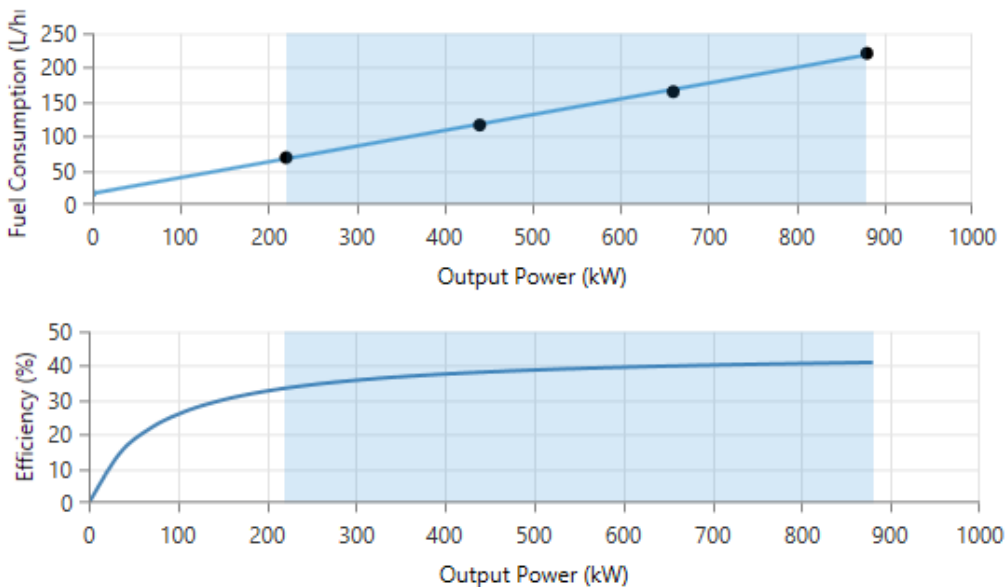


Figura 41 - Curvas características do gerador CAT 1275 kVA.

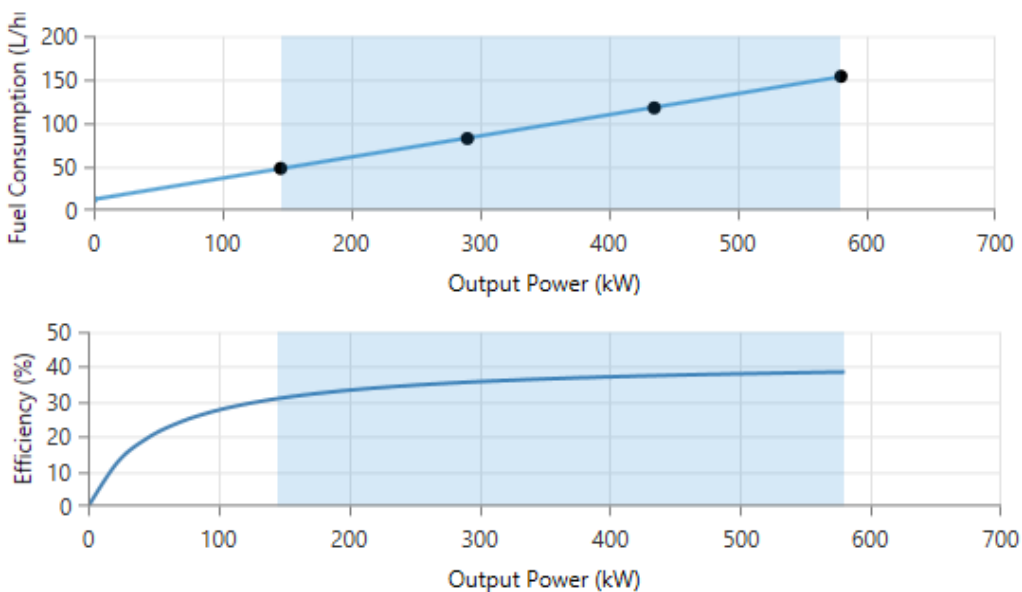


Figura 42 - Curvas características do gerador CAT 725 kVA.

Anexo C: Recurso eólico da ilha da Graciosa

Tabela 28 - Dados da velocidade média do vento na ilha da Graciosa.

Mês	Velocidade média do vento
Janeiro	9.54 m/s
Fevereiro	9.29 m/s
Março	8.64 m/s
Abril	7.76 m/s
Maio	6.84 m/s
Junho	5.77 m/s
Julho	4.86 m/s
Agosto	5.11 m/s
Setembro	6.28 m/s
Outubro	7.35 m/s
Novembro	8.91 m/s
Dezembro	9.43 m/s

Tabela 29 - Recurso eólico da ilha da Graciosa.

Mês	Velocidade média do vento
Janeiro	6.69 m/s
Fevereiro	6.77 m/s
Março	6.88 m/s
Abril	6.93 m/s
Maio	6.05 m/s
Junho	5.48 m/s
Julho	5.73 m/s
Agosto	5.24 m/s
Setembro	5.29 m/s
Outubro	5.50 m/s
Novembro	6.67 m/s
Dezembro	7.14 m/s

Anexo D: Recurso Solar da ilha da Graciosa

Tabela 30 - Recurso Solar da ilha da Graciosa.

Mês	Índice de claridade	Radiação diária (kWh/m ² /dia)
Janeiro	0.430	1.89
Fevereiro	0.472	2.73
Março	0.500	3.87
Abril	0.524	5.25
Maio	0.548	6.05
Junho	0.564	6.53
Julho	0.604	6.82
Agosto	0.615	6.25
Setembro	0.577	4.84
Outubro	0.514	3.26
Novembro	0.458	2.15
Dezembro	0.415	1.65

Tabela 31 - Recurso Solar da ilha da Graciosa.

Mês	Índice de claridade	Radiação diária (kWh/m ² /dia)
Janeiro	0.495	2.68
Fevereiro	0.528	3.54
Março	0.565	4.77
Abril	0.595	5.99
Maio	0.606	6.73
Junho	0.583	6.70
Julho	0.598	6.74
Agosto	0.645	6.72
Setembro	0.632	5.67
Outubro	0.574	7.13
Novembro	0.526	2.99
Dezembro	0.497	2.49

Anexo E: Estudo de caso 1

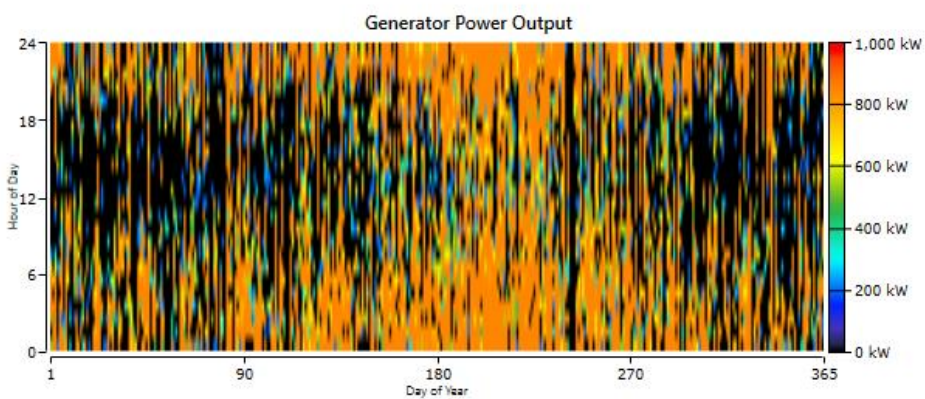


Figura 43 – Caso 1: Potência de saída do gerador CAT 1100 kVA.

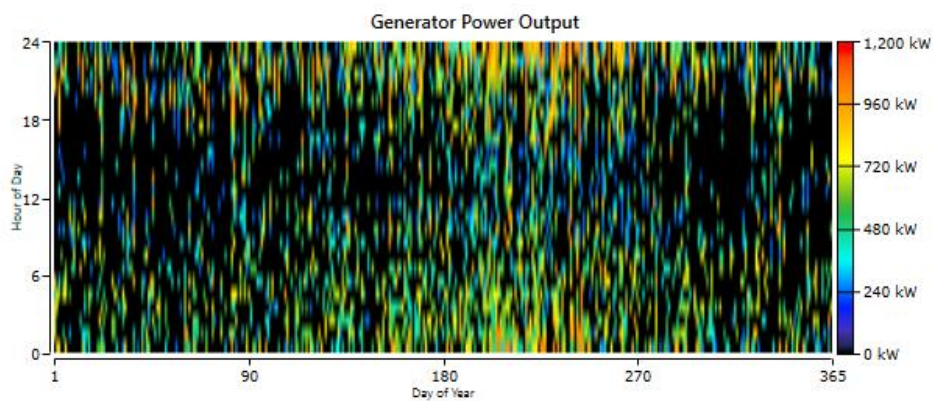


Figura 44 – Caso 1: Potência de saída do gerador CAT 1275 kVA número 1.

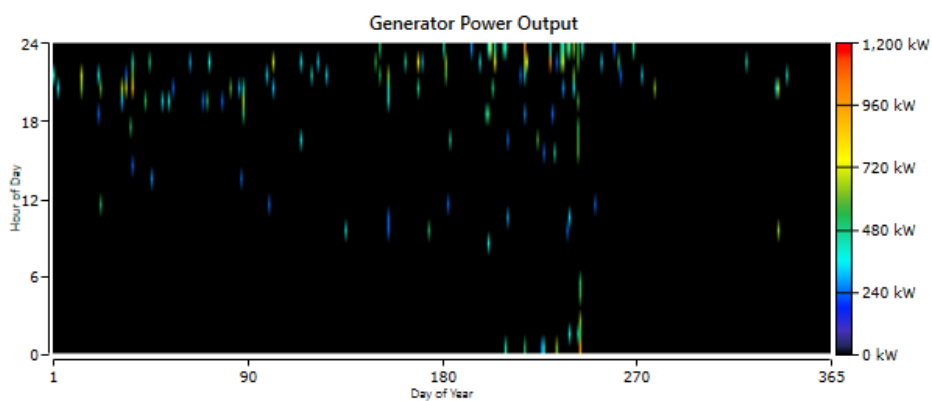


Figura 45 – Caso 1: Potência de saída do gerador CAT 1275 kVA número 2.

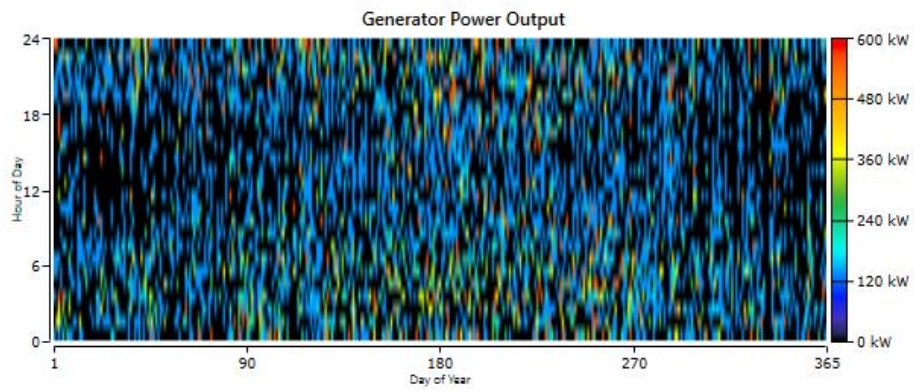


Figura 46 – Caso 1: Potência de saída do gerador CAT 725 kVA número 1.

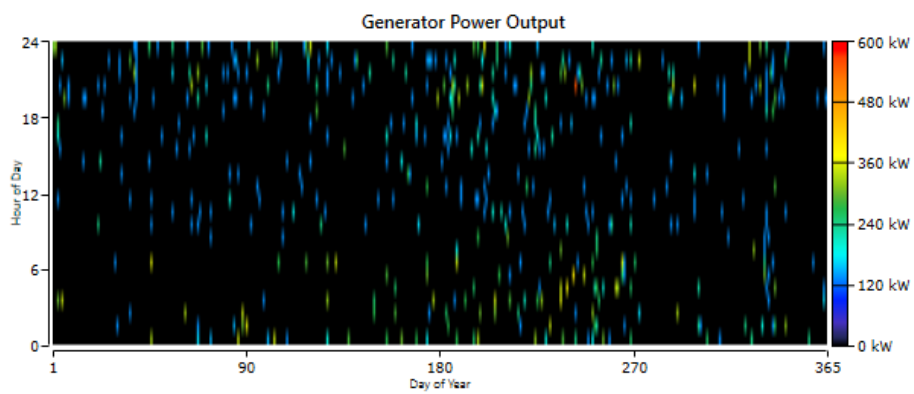


Figura 47 – Caso 1: Potência de saída do gerador CAT 725 kVA número 2.

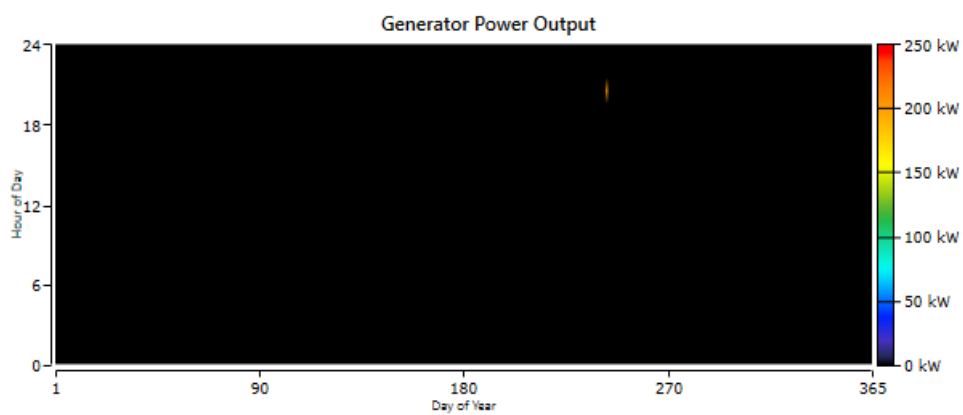


Figura 48 - Caso 1: Potência de saída do gerador CAT 725 kVA número 3.

Tabela 32 - Caso 1: Produção de energia por gerador.

Gerador	Energia produzida [kWh/ano]	%
CAT 1100 kVA	3 642 741	18.62
CAT 1275 kVA n1	1 618 515	8.25
CAT 1275 kVA n2	64 414	0.328
CAT 725 kVA n1	766 987	3.91
CAT 725 kVA n2	93 992	0.479
CAT 725 kVA n3	216	0.0011
Enercon E-44 (5)	12 029 244	61.3
Fotovoltaico	1 395 299	7.11
Total	19 611 408	100

Tabela 33 - Caso 1: Emissão de gases pelo sistema.

Dióxido de Carbono	4 322 561 kg/ano
Monóxido de Carbono	4 390 kg/ano
Hidrocarbonetos não queimados	420 kg/ano
Matéria particulada	611 kg/ano
Dióxido de Enxofre	10 734 kg/ano
Óxido de Nitrogénio	32 644 kg/ano

Anexo F: Estudo de caso 2

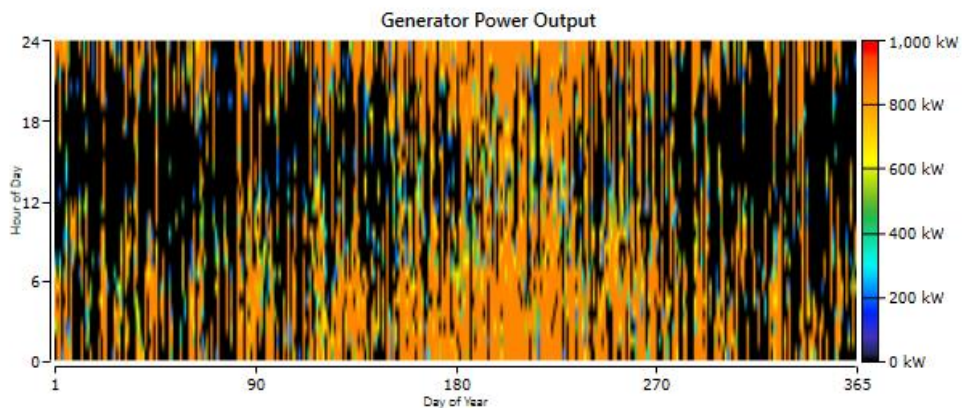


Figura 49 – Caso 2: Potência de saída do gerador CAT 1100 kVA.

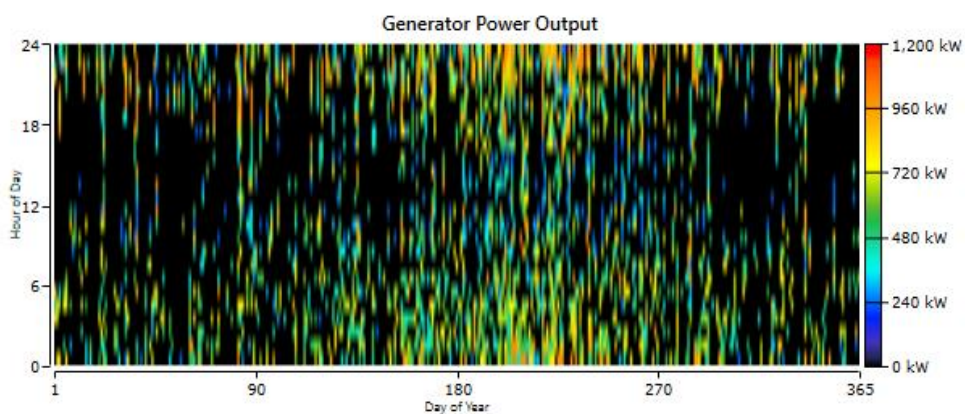


Figura 50 - Caso 2: Potência de saída do gerador CAT 1275 kVA número 1.

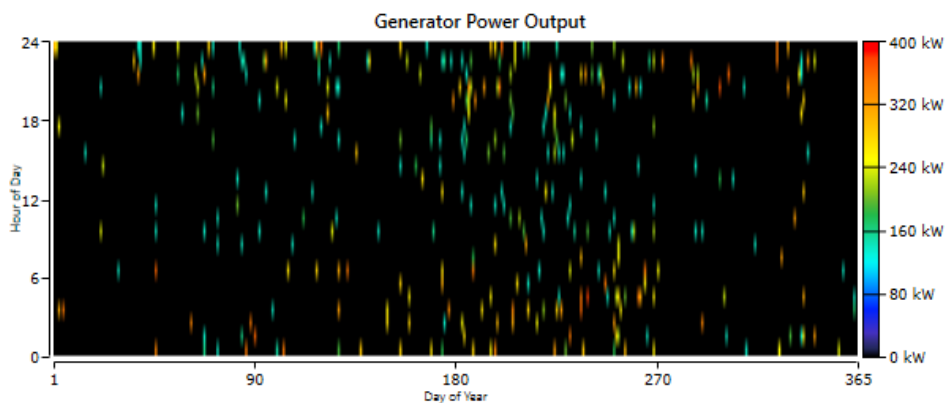


Figura 51 - Caso 2: Potência de saída do gerador CAT 1275 kVA número 2.

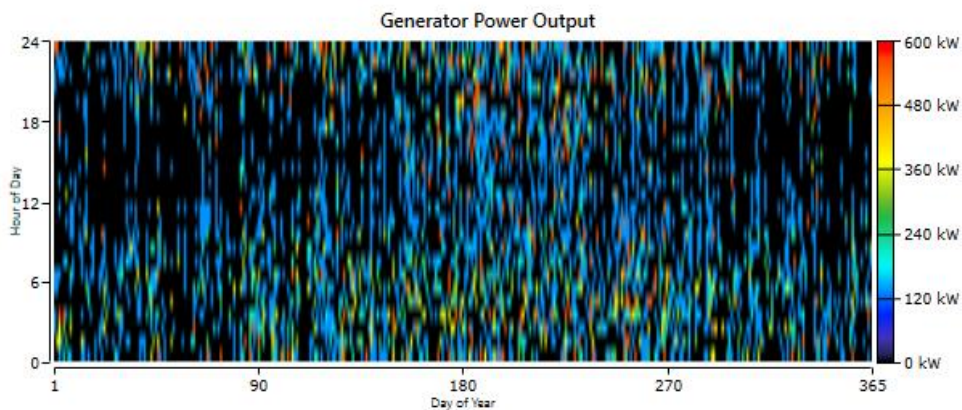


Figura 52 - Caso 2: Potência de saída do gerador CAT 725 kVA número 1.

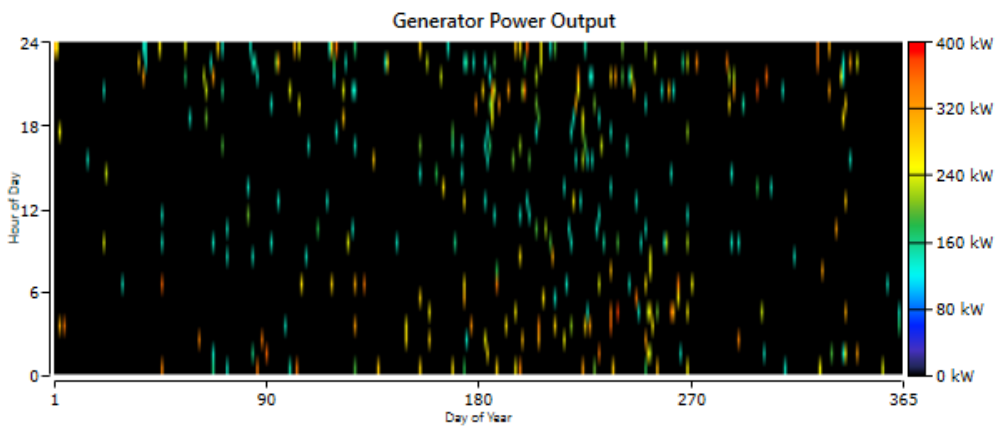


Figura 53 - Caso 2: Potência de saída do gerador CAT 725 kVA número 2.

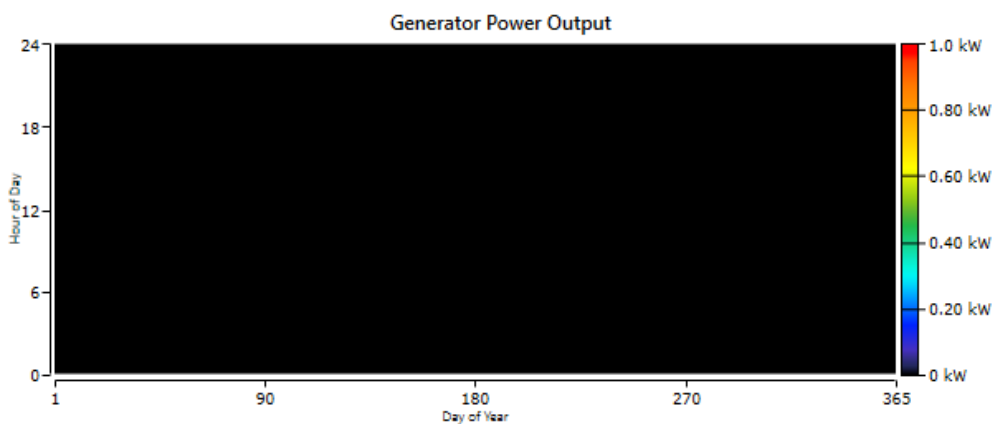


Figura 54 - Caso 2: Potência de saída do gerador CAT 725 kVA número 3.

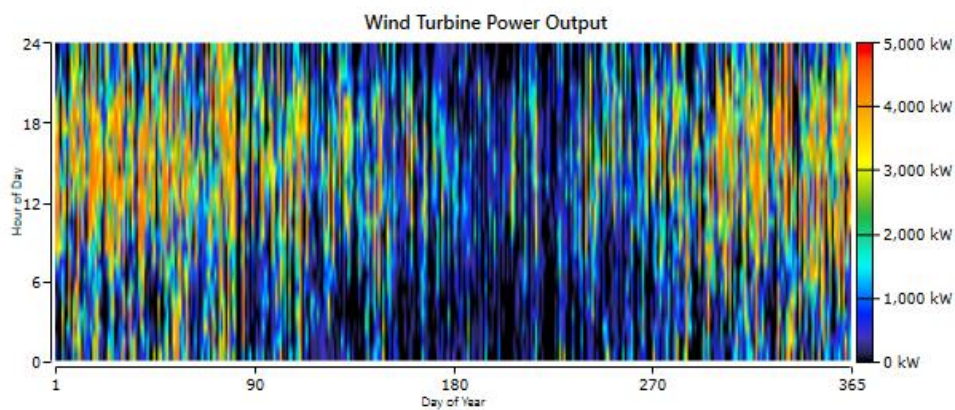


Figura 55 - Caso 2: Geração eólica.

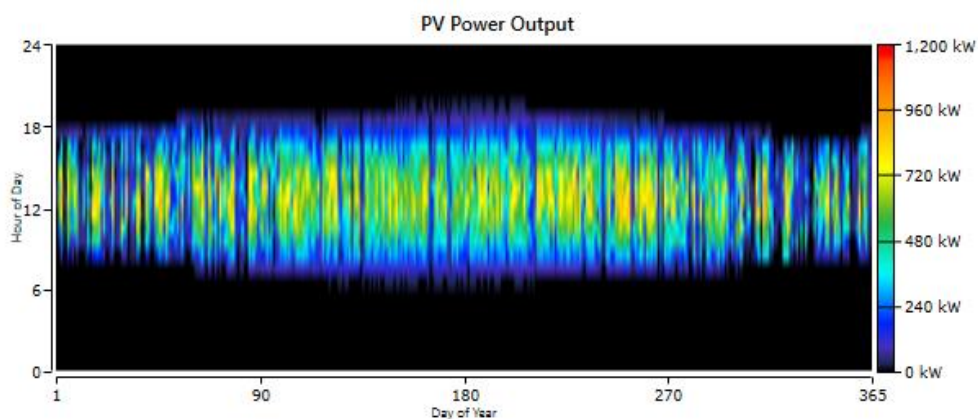


Figura 56 - Caso 2: Geração fotovoltaica.

Tabela 34 - Caso 2: Produção de energia por gerador.

Gerador	Energia produzida [kWh/ano]	%
CAT 1100 kVA	3 642 741	18.62
CAT 1275 kVA n1	1 618 515	8.25
CAT 1275 kVA n2	64 414	0.328
CAT 725 kVA n1	766 987	3.91
CAT 725 kVA n2	93 992	0.479
CAT 725 kVA n3	216	0.0011
Enercon E-44 (5)	12 029 244	61.3
Fotovoltaico	1 395 299	7.11
Total	19 611 408	100

Tabela 35 - Caso 2: Emissão de gases pelo sistema.

Dióxido de Carbono	3 652 122 kg/ano
Monóxido de Carbono	3 744 kg/ano
Hidrocarbonetos não queimados	351 kg/ano
Matéria particulada	520 kg/ano
Dióxido de Enxofre	9 069 kg/ano
Óxido de Nitrogénio	27 633 kg/ano

Anexo G: Estudo de caso 3

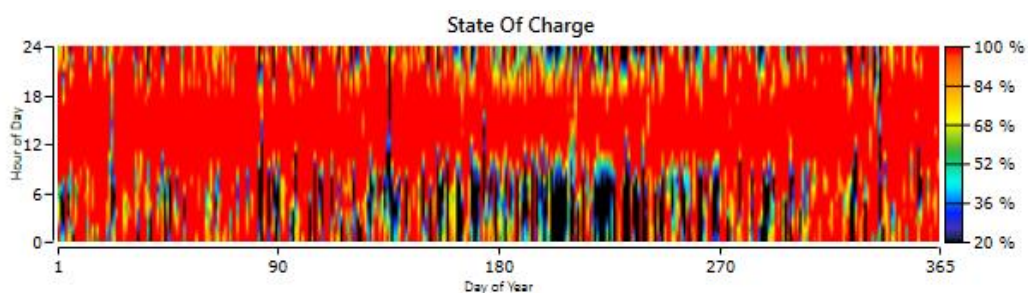


Figura 57 - Caso 3: Estado de carga do sistema de armazenamento.

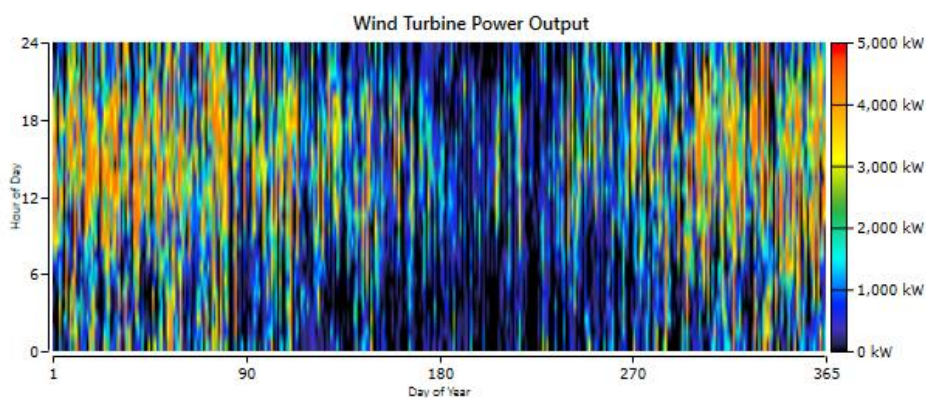


Figura 58 - Caso 3: Geração eólica (instalação atual).

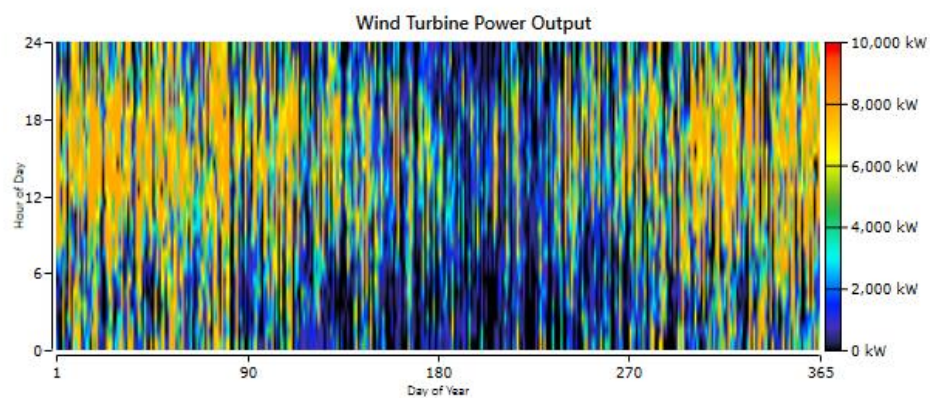


Figura 59 - Caso 3: Geração eólica (reforço).

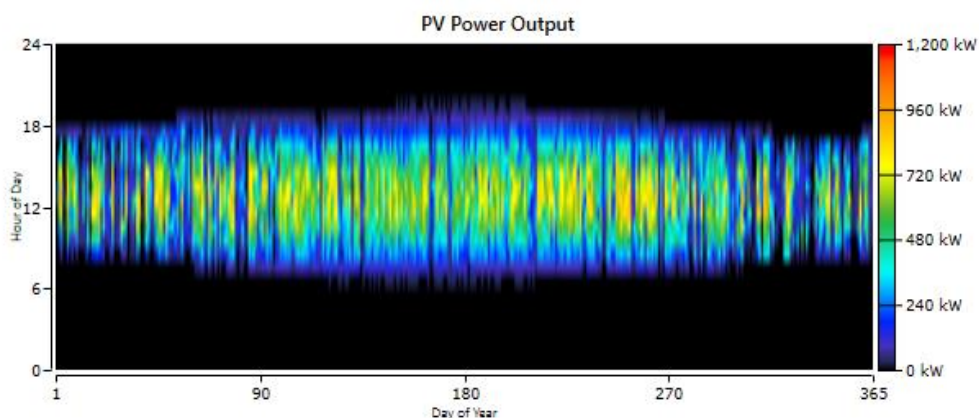


Figura 60 - Caso 3: Geração fotovoltaica (instalação atual).

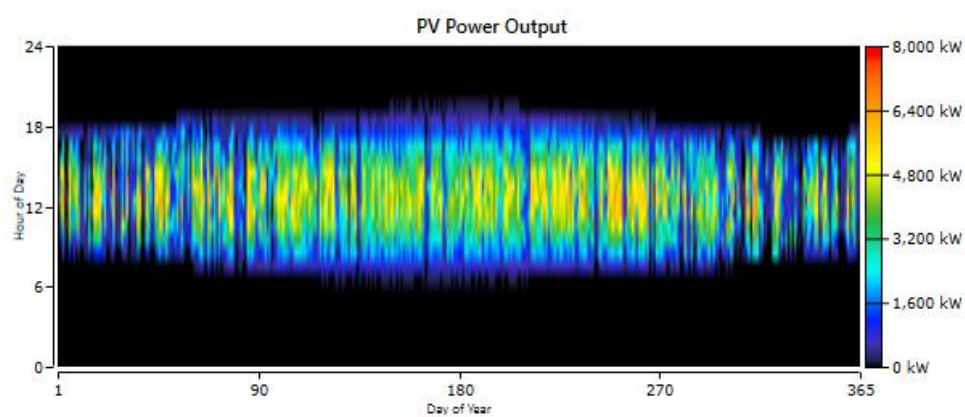


Figura 61 - Caso 3: Geração fotovoltaica (reforço).

Tabela 36 - Caso 2: Produção de energia por gerador.

Gerador	Energia produzida [kWh/ano]	%
Enercon E-44 (5)	12 029 244	2.6
Reforço eólico	30 521 703	18.2
Fotovoltaico	1 395 299	22.4
Reforço Fotovoltaico	9 395 096	56.8
Total	53 713 342	100

Tabela 37 - Dados de operação do sistema de armazenamento.

Energia armazenada	1 858 731 kWh/ano
Energia fornecida	1 672 858 kWh/ano
Perdas	185 873 kWh/ano

Anexo H: Estudo de caso 4

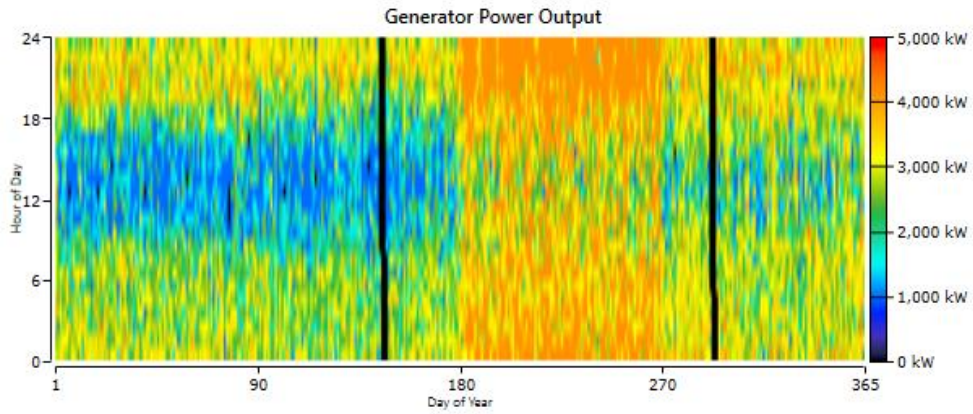


Figura 62 – Caso 4: Potência de saída do gerador G4250 kVA (1).

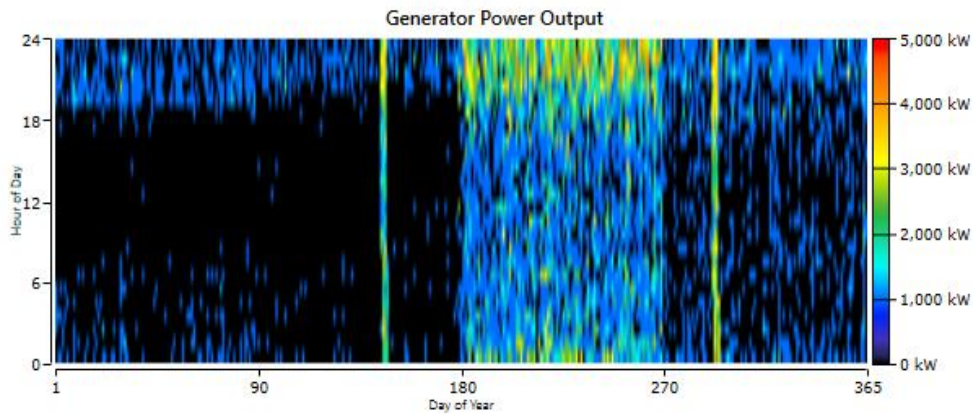


Figura 63 - Caso 4: Potência de saída do gerador G4250 kVA (2).

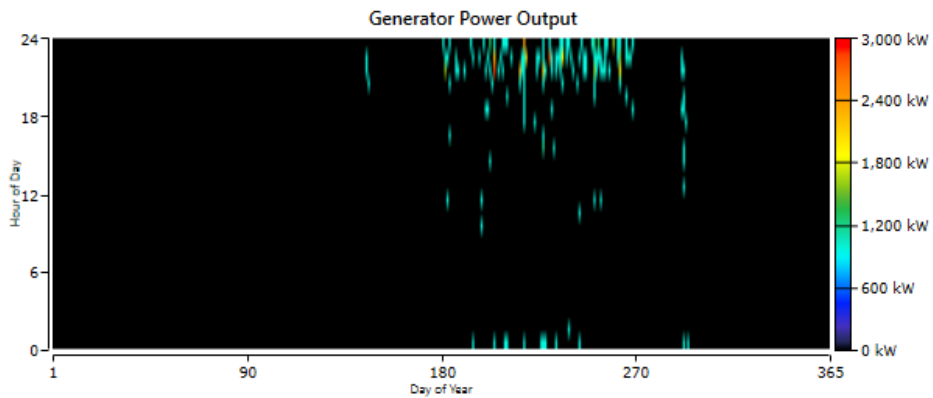


Figura 64 - Caso 4: Potência de saída do gerador G4250 kVA (3).

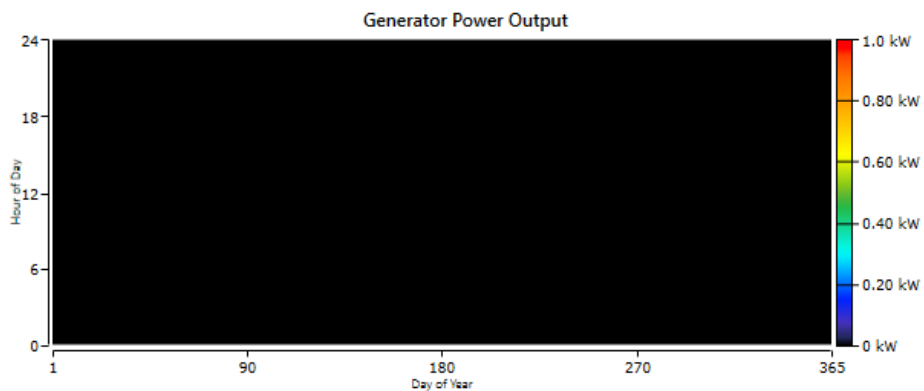


Figura 65 - Caso 4: Potência de saída do gerador G4250 kVA (4).

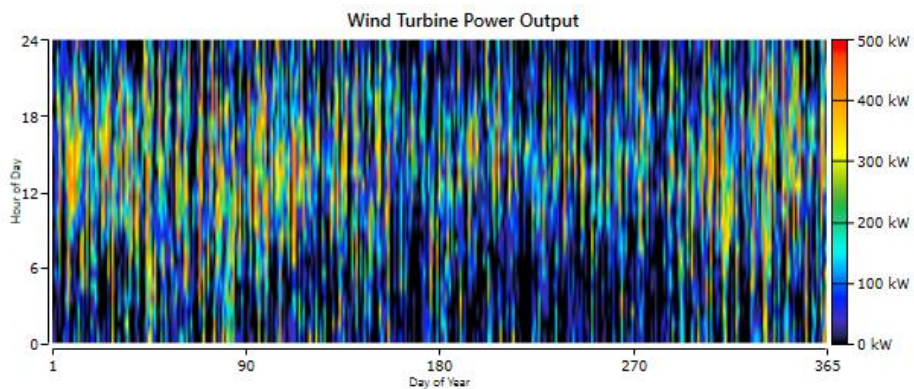


Figura 66 - Caso 4: Geração de energia dos geradores Vestas V27.

Tabela 38 - Caso 4: Produção de energia por gerador.

Gerador	Energia produzida [kWh/ano]	%
G4250 kVA (1)	24 653 922	68.4
G4250 kVA (2)	4 793 713	13.3
G4250 kVA (3)	172 748	0.479
G4250 kVA (4)	0	0
Vestas V47	1 327 367	3.68
Vestas V27	961 120	2.67
Fotovoltaico	4 147 315	11.5
Total	36 056 185	100

Tabela 39 - Caso 4: Emissão de gases pelo sistema.

Dióxido de Carbono	20 838 270 kg/ano
Monóxido de Carbono	107 806 kg/ano
Hidrocarbonetos não queimados	5 722 kg/ano
Matéria particulada	922 kg/ano
Dióxido de Enxofre	50 938 kg/ano
Óxido de Nitrogénio	20 662 kg/ano

Anexo I: Estudo de caso 5

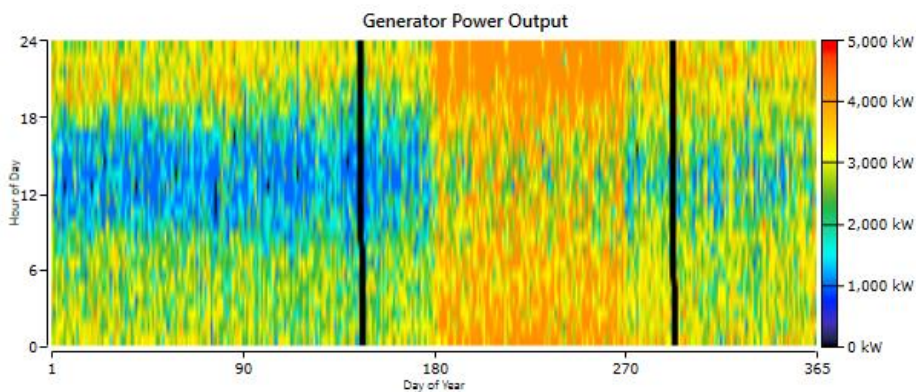


Figura 67 - Caso 5: Potência de saída do gerador G4250 kVA (1).

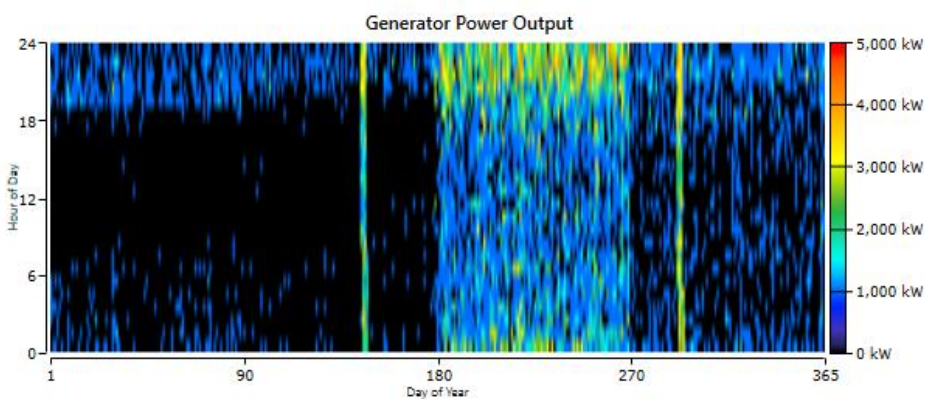


Figura 68 - Caso 5: Potência de saída do gerador G4250 kVA (2).

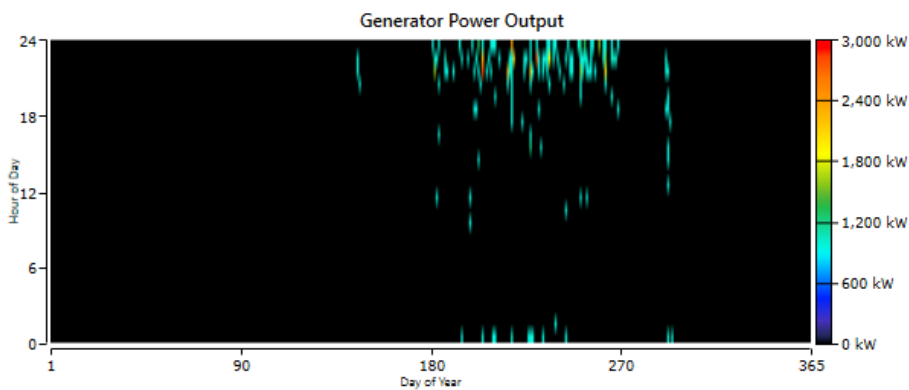


Figura 69 - Caso 5: Potência de saída do gerador G4250 kVA (3).

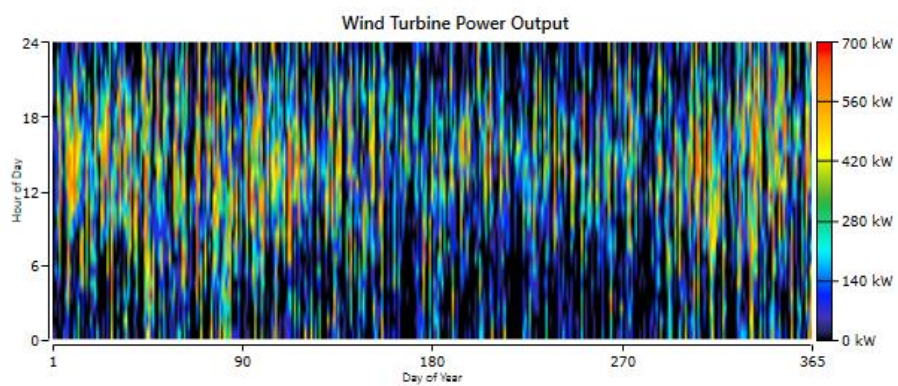


Figura 70 - Caso 5: Geração de energia do gerador Vestas V49.

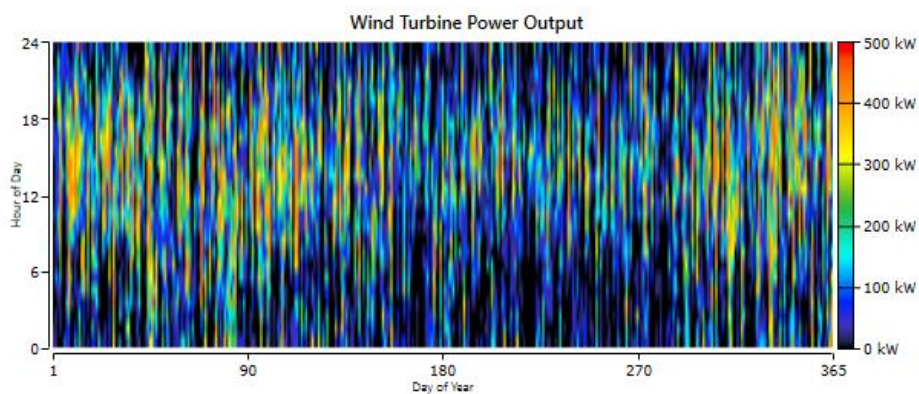


Figura 71 - Caso 5: Geração de energia dos geradores Vestas V27.

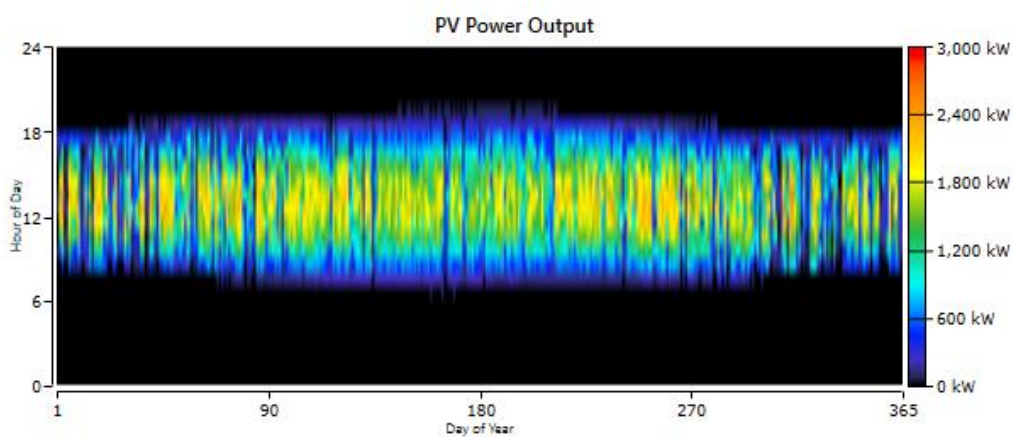


Figura 72 – Caso 5: Geração fotovoltaica.

Tabela 40 - Caso 5: Produção de energia por gerador.

Gerador	Energia produzida [kWh/ano]	%
G4250 kVA (1)	24 345 764	68.1
G4250 kVA (2)	4 788 645	13.4
G4250 kVA (3)	191 328	0.535
G4250 kVA (4)	0	0
Vestas V47	1 327 367	3.71
Vestas V27	961 120	2.69
Fotovoltaico	4 150 260	11.6
Total	36 056 185	100

Tabela 41 - Caso 5: Emissão de gases pelo sistema.

Dióxido de Carbono	20 633 522 kg/ano
Monóxido de Carbono	106 747 kg/ano
Hidrocarbonetos não queimados	5 665 kg/ano
Matéria particulada	913 kg/ano
Dióxido de Enxofre	50 438 kg/ano
Óxido de Nitrogénio	20 459 kg/ano

Anexo J: Estudo de caso 6

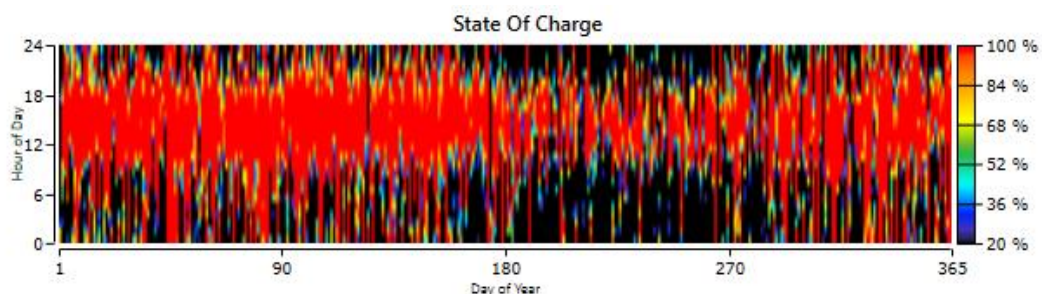


Figura 73 - Caso 6: Estado de carga do sistema de armazenamento.

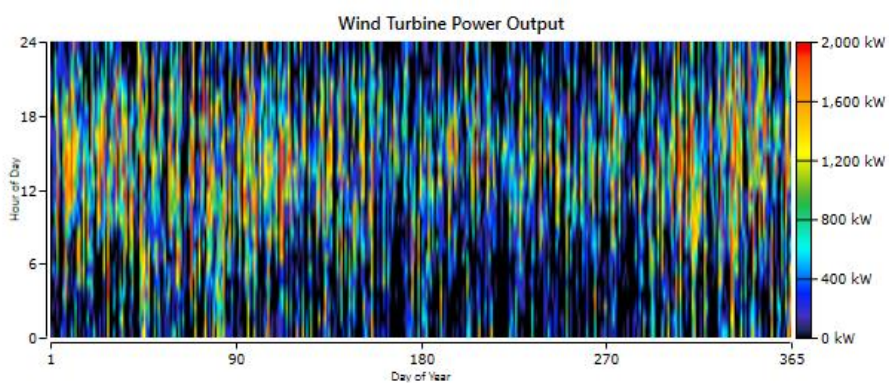


Figura 74 - Caso 6: Geração eólica (instalação atual).

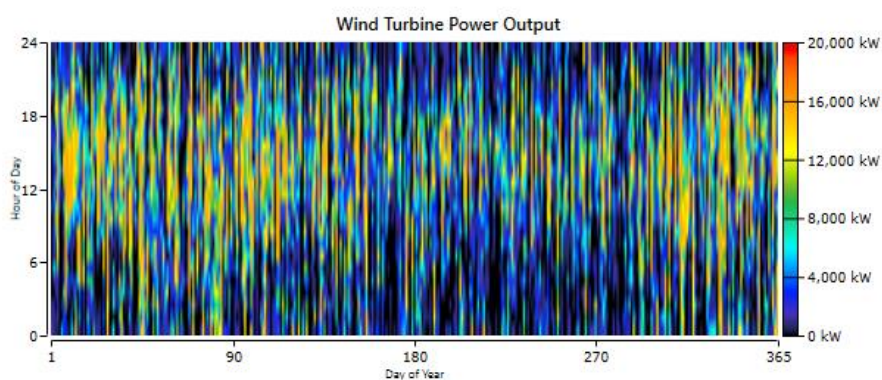


Figura 75 - Caso 6: Geração eólica (reforço).

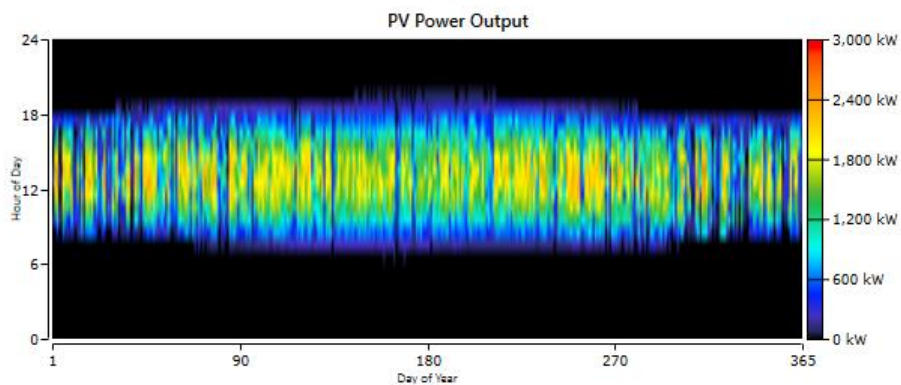


Figura 77 - Caso 6: Geração fotovoltaica (instalação atual).

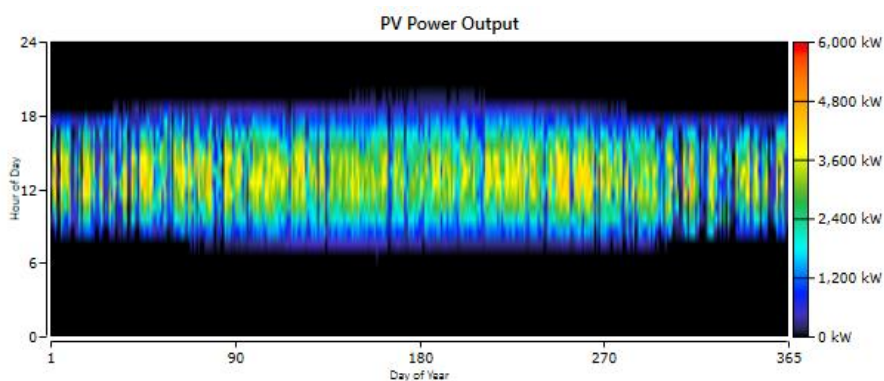


Figura 76 - Caso 6: Geração fotovoltaica (reforço).

Tabela 42 - Caso 6: Produção de energia por gerador.

Gerador	Energia produzida [kWh/ano]	%
Enercon E-44 (5)	12 029 244	2.6
Reforço eólico	30 521 703	18.2
Fotovoltaico	1 395 299	22.4
Reforço Fotovoltaico	9 395 096	56.8
Total	53 713 342	100

Tabela 43 -Caso 6 Dados de operação do sistema de armazenamento.

Energia armazenada	1 858 731 kWh/ano
Energia fornecida	1 672 858 kWh/ano
Perdas	185 873 kWh/ano