

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



**Simulação de Sistemas Híbridos Insulares com
Elevada Penetração de Energias Renováveis**

Guilherme Ferreira Abreu Fonseca

Dissertação realizada no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Major Energia

Orientador: Prof. Dr. Cláudio Domingos Martins Monteiro

Fevereiro de 2009

A Dissertação intitulada

**“SIMULAÇÃO DE SISTEMAS HÍBRIDOS INSULARES COM ELEVADA PENETRAÇÃO
DE ENERGIAS RENOVÁVEIS”**

foi aprovada em provas realizadas em 27/Fevereiro/2009

o júri



Presidente Professor Doutor Vladimiro Henrique Barrosa Pinto de Miranda
Professor Catedrático da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



Professor Doutor Amadeu Duarte da Silva Borges
professor Auxiliar da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro



Professor Doutor Claudio Domingos Martins Monteiro
Professor Auxiliar da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

O autor declara que a presente dissertação (ou relatório de projecto) é da sua exclusiva autoria e foi escrita sem qualquer apoio externo não explicitamente autorizado. Os resultados, ideias, parágrafos, ou outros extractos tomados de ou inspirados em trabalhos de outros autores, e demais referências bibliográficas usadas, são correctamente citados

Autor Guilherme Ferreira Abreu Fonseca



Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Resumo

Nos sistemas insulares, a sustentabilidade energética é de extrema importância, sendo necessário integrar no processo de planeamento dos sistemas de produção o máximo de recursos endógenos, e simultaneamente, gerir da melhor forma a interacção entre consumos e produções recorrendo a soluções de armazenamento de energia em grande escala.

Nesta dissertação pretende-se planear a expansão de um sistema de produção insular com elevada penetração de energia eólica e hídrica, apoiada por armazenamento baseado em bombagem hídrica. A abordagem metodológica baseia-se na simulação temporal da operação de múltiplas soluções de dimensionamento, seguindo um processo de optimização económica sujeito a restrições de fiabilidade e operação.

Implementou-se um modelo de simulação de operação e optimização do dimensionamento capaz de integrar sistemas de armazenamento com bombagem, ultrapassando as dificuldades sentidas na modelização deste tipo de soluções com outros modelos disponíveis no estado da arte (ex. HOMER e HOGA).

A metodologia é aplicada na ilha das Flores, em que são planeados dois tipos de cenários futuros, tendo como base o sistema actual. No primeiro, é acrescentada ao longo do tempo a fracção de capacidade eólica, e no segundo é incrementada a capacidade hídrica, eólica e armazenamento com bombagem. Como resultado optimizado, encontrou-se um cenário misto em que o incremento exclusivamente em produção eólica é economicamente interessante num futuro próximo e a integração da hídrica com bombagem apenas é viável para um cenário futuro de crescimento de consumo.

São atingidos resultados que demonstram a integração de diferentes sistemas de produção renovável com armazenamento de energia como soluções interessantes de um ponto de vista económico, técnico e ambiental.

Palavras-chave:

Desenvolvimento energético sustentável; sistemas híbridos; sistemas de bombagem; optimização de dimensionamento de sistemas híbridos; simulação da operação.

Abstract

Energetic sustainability in island systems is extremely important. It is necessary to plan the production system, integrating as much renewable resources as possible, and simultaneously manage efficiently the distribution between demand and production solutions using large scale storage of energy.

This work aims to plan the expansion of a production system with high penetration of wind and water energy, supported by storage based on pumped water. The approach is based on simulating the operation of multiple sizing solutions, following a process of economic optimization under constraints of reliability and operation.

A simulation model that optimizes the design and operation of a system capable of integrating storage of pumped water was implemented, overcoming the difficulties encountered in the modeling of such solutions with other models available in the state of the art (e.g. HOMER and HOGA).

The methodology is applied in Flores Island and planned for two different types of future scenarios based on the current system. In the first one, the amount of wind power capacity is improved over time and on the second one, the hydropower, wind power and storage capacity with pumping is increased. The result reached is a mixed situation in which the increase in wind power production is economically attractive in a near future and the integration of hydropower with a pumping system is only feasible for a future scenario of consumption growth.

The results achieved show that the integration of different systems of production and storage of renewable energy is an interesting method from an economic, technical and environmental point of view.

Keywords:

Sustainable energy development; hybrid systems, pumping systems, hybrid system optimization, operating simulation.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a todos que de algum modo estiveram ligados ao meu trabalho.

Ao meu orientador Prof. Dr. Cláudio Monteiro pela ajuda e disponibilidade oferecida.

À minha família e aos colegas com quem convivi durante a realização desta dissertação.

Ao Engenheiro Rui Azevedo pela ajuda prestada.

À Engenheira Bárbara Arruda pelo apoio e informações disponibilizadas.

Ao INESC Porto pelos dados disponibilizados.

Índice

Resumo	iii
Abstract.....	v
Agradecimentos	vii
Índice.....	ix
Lista de figuras	xii
Lista de tabelas	xiv
Abreviaturas e Símbolos	xv
Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Motivação	2
1.3. Objectivos.....	3
1.4. Estrutura da Dissertação.....	3
Capítulo 2	5
Estado da Arte.....	5
2.1. Sistemas Híbridos	5
2.2. Dimensionamento de um sistema híbrido	5
2.3. Programas Existentes	7
2.3.1. HOMER.....	8
2.3.2. HOGA	9
2.3.2.1. Funcionamento do simulador	9
2.4. Problemas nos Simuladores	10
2.4.1. Consumo	10
2.4.2. Custo do Combustível	10
2.4.3. Dimensionamento	10

Capítulo 3	11
A Ilha das Flores	11
3.1. Introdução à Ilha	11
3.2. Panorama Energético	12
3.2.1. Produção de Energia.....	12
3.2.2. Transporte e distribuição.....	15
3.2.3. Consumo	16
Capítulo 4	17
Simulador de Sistemas Híbridos	17
4.1. Funcionamento do Sistema Eólico-Hidro-Bombagem.....	17
4.2. Local	19
4.3. Descrição do Problema	19
4.3.1. Variáveis a Analisar	19
4.3.1.1. Número de aerogeradores	20
4.3.1.2. Volume do Reservatório	20
4.3.1.3. Potência da Hidro2	20
4.3.2. Influências Futuras.....	21
4.4. Descrição do Simulador.....	22
4.4.1. Suposições.....	22
4.4.2. Estratégia de Operação	23
4.4.2.1. Sistema de Produção Base	23
4.4.2.2. Consumo Superior à Produção Base	25
4.4.2.3. Consumo Inferior à Produção Base	28
4.5. Simulação das Características e Variáveis do Sistema	29
4.5.1. Simulação do Consumo Horário.....	29
4.5.2. Simulação da Velocidade do Vento	30
4.5.3. Modelização do Aerogerador	30
4.5.4. Simulação da produção anual da central hidroeléctrica de Além Fazenda	32
4.5.5. Modelização do consumo da produção Diesel	33
4.5.6. Simulação da Hidro2.....	35
4.6. Descrição detalhada do simulador.....	36
4.6.1. Simulação de Sistemas	36
4.7. Automatização com Visual Basic	41
Capítulo 5	43
Simulações e Análise de Resultados	43
5.1. Descrição da Análise	43
5.2. Custos de Investimento.....	44
5.2.1. Aerogeradores	45
5.2.2. Hidro2 e Volume do Reservatório	45

5.3. Sistema Actual	45
5.4. Sistema Híbrido Expansão-Eólica	46
5.5. Sistema Híbrido Eólico-Hidro-Bombagem.....	49
5.5.1. Eólico-Hidro-Bombagem com Reservatório de 30.000.000 Litros.....	49
5.5.2. Eólico-Hidro-Bombagem com Reservatório de 60.000.000 Litros.....	51
5.5.3. Eólico-Hidro-Bombagem com Reservatório de 90.000.000 Litros.....	52
5.5.4. Eólico-Hidro-Bombagem com Reservatório de 120.000.000 Litros	53
5.6. Solução Óptima	54
5.7. Solução Ideal	56
5.8. Solução Real	59
Capítulo 6	63
Conclusões e Trabalhos Futuros.....	63
Referências	67
Anexo A.....	69
Distribuição do CNE.....	69
A.1 - Sistema Expansão-Eólica	69
A.2 - Sistema Eólico-Hidro-Bombagem Óptimo.....	70
A.3 - Solução Ideal	70
A.4 - Solução Real	71

Lista de figuras

Figura 2.1 - Interdependência entre dimensionamento do sistema e estratégia óptima.	6
Figura 2.2 - Algoritmo convencional de dimensionamento de um sistema híbrido.	7
Figura 3.1 - Ilha das Flores.	11
Figura 3.2 - Central da Ribeira de Além Fazenda.	12
Figura 3.3 - Parque Eólico de Boca da Vereda.	13
Figura 3.4 - Potência Instalada na Ilha.	13
Figura 3.5 - Distribuição da Produção de Energia.	14
Figura 3.6 - Produção Anual e Previsão EDA.	15
Figura 3.7 - Rede de distribuição média tensão.	15
Figura 3.8 - Distribuição do consumo de energia.	16
Figura 4.1 – Introdução da Hidro2 no sistema electroprodutor.	18
Figura 4.2 - Funcionamento do Sistema Eólico-Hidro-Bombagem.	18
Figura 4.3 - Variáveis do sistema EHB e impacto de cada.	20
Figura 4.4 - Influências futuras que afectam dimensionamento.	21
Figura 4.5 - Comparação horária entre consumo e produção base.	24
Figura 4.6 - Exemplo com produção base suficiente.	24
Figura 4.7 - Procedimento quando consumo superior a produção base.	25
Figura 4.8 – Exemplo de produção Base insuficiente e compensação com Hidro2.	26
Figura 4.9 – Exemplo de produção Base insuficiente e aumento da produção da máquina de 830kW. ..	26
Figura 4.10 – Exemplo de produção Base insuficiente, aumento da produção da máquina de 830kW e necessidade de utilização de uma de 500kW.	27
Figura 4.11 – Exemplo de produção Base insuficiente, aumento da produção da máquina de 830kW e necessidade do uso da segunda máquina de 500kW.	27
Figura 4.12 - Procedimento quando consumo inferior a produção base.	28
Figura 4.13 – Exemplo de produção Base suficiente para consumo e bombagem.	29
Figura 4.14 - Curva de potência Enercon E30.	31
Figura 4.15 - Modelização da curva de potência.	31
Figura 4.16 - Potência na central hídrica de Além Fazenda.	33
Figura 4.17 - Consumo gerador Diesel 830kW.	33
Figura 4.18 - Consumo gerador 500kW.	34
Figura 4.19 - Caudal turbinado em função da potência da Hidro2.	35
Figura 4.20 – Exemplo de dados e cálculos iniciais.	37
Figura 4.21 - Exemplo do cálculo da produção base.	37
Figura 4.22 – Procedimento da entrada em serviço da Hidro2.	38

Figura 4.23 - Exemplo de funcionamento dos grupos Diesel.	39
Figura 4.24 – Procedimento para a produção dos grupos Diesel.	39
Figura 4.25 - Procedimento para a bombagem de água.	40
Figura 4.26 - Exemplo de funcionamento da Hidro2.	40
Figura 4.27 - Algoritmo do código Visual Basic.	42
Figura 5.1 – Evolução do CNE com o sistema actual (€/kWh).	46
Figura 5.2 - Comparação entre sistema actual e Expansão-Eólica.	47
Figura 5.3 – Comparação do somatório do CNE entre sistema actual e Expansão-Eólica.	48
Figura 5.4 - Somatório CNE com Reservatório de 30.000.000 L.	49
Figura 5.5 - Somatório CNE com Reservatório de 60.000.000 L.	51
Figura 5.6 - Somatório CNE com Reservatório de 90.000.000 L.	52
Figura 5.7 - Somatório CNE com Reservatório de 120.000.000 L.	53
Figura 5.8 - Comparação do somatório do CNE entre o sistema actual, EE e EHB.	55
Figura 5.9 - Evolução do CNE do sistema actual, EE e EHB.	56
Figura 5.10 - Comparação do somatório do CNE entre o sistema EHB e o ideal.	58
Figura 5.11 - Comparação do somatório do CNE entre o sistema ideal e o real.	60
Figura 5.12 - Evolução do CNE do sistema real.	61
Figura 5.13 - Comparação da evolução do consumo de combustível entre o sistema actual e o real.	61

Lista de tabelas

Tabela 3.1 - Produção de energia da ilha.	12
Tabela 3.2 - Distribuição da Produção de Energia.	Error! Bookmark not defined.
Tabela 3.3 - Produção Anual e Previsão EDA.	14
Tabela 4.1 - Caudal e potência mensal na central hídrica de Além Fazenda.	32
Tabela 4.2 - Variação do consumo com a carga da máquina de 830kW.	33
Tabela 4.3 - Variação do consumo com a carga da máquina de 500kW.	34
Tabela 4.4 - Rendimento das máquinas da Hidro2.	35
Tabela 4.5 - Controlo das Variáveis.	36
Tabela 4.6 - Grupos geradores.	36
Tabela 4.7 - Exemplo de resultados de cada simulação.	37
Tabela 5.1 - Custos de investimento da Hidro2.	45
Tabela 5.2 - Valores nos próximos 20 anos com sistema actual.	46
Tabela 5.3 - Distribuição óptima da construção de aerogeradores no sistema Expansão-Eólica.	47
Tabela 5.4 - Variação do somatório do CNE entre sistema actual e Expansão-Eólica (€/kWh).	48
Tabela 5.5 - Valores nos próximos 20 anos com sistema EE.	48
Tabela 5.6 - Intervalos utilizados para a simulação do EHB.	49
Tabela 5.7 - Somatório CNE com Reservatório de 30.000.000 L (€/kWh).	50
Tabela 5.8 - Somatório CNE com Reservatório de 60.000.000 L (€/kWh).	51
Tabela 5.9 - Somatório CNE com Reservatório de 90.000.000 L (€/kWh).	52
Tabela 5.10 - Somatório CNE com Reservatório de 120.000.000 L (€/kWh).	53
Tabela 5.11 - Distribuição óptima da construção de aerogeradores no sistema EHB.	54
Tabela 5.12 - Valores nos próximos 20 anos com sistema EHB.	55
Tabela 5.13 - Distribuição óptima da construção de aerogeradores com a junção dos dois sistemas.	57
Tabela 5.14 - Valores nos próximos 20 anos com a junção dos dois sistemas.	58
Tabela 5.15 - Distribuição dos parques eólicos a construir.	59
Tabela 5.16 - Valores nos próximos 20 anos com o sistema real.	60
Tabela A.1 - Distribuição do CNE com o sistema EE (€/kWh).	69
Tabela A.2 - Distribuição CNE sistema EHB (€/kWh).	70
Tabela A.3 - Distribuição do CNE com o sistema ideal (€/kWh).	70
Tabela A.4 - Distribuição do CNE com o sistema ideal e demonstração do real (€/kWh).	71

Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas

AG	Aerogerador
Bbg	Bombagem
CNE	Custo Nivelado de Electricidade
CTHA	Central Térmica/Hídrica Além Fazenda
E	Energia
EE	Expansão-Eólica
EDA	Electricidade dos Açores
ENF	Energia Não Fornecida
EHB	Eólico-Hidro-Bombagem
HOGA	<i>Hybrid Optimization by Genetic Algorithms</i>
HOMER	<i>Hybrid Optimization Model for Electric Renewables</i>
INESC	Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores
MT	Média Tensão
P Base	Produção Base
PEBV	Parque Eólico Boca da Vereda
VAL	Valor actual líquido

Capítulo 1

Introdução

1.1. Enquadramento

A procura de um modelo mais sustentável de evolução da sociedade tem constituído preocupação dominante nas últimas décadas face ao conjunto de oportunidades, mas também de ameaças, que afectam o conjunto do tecido social, a estrutura das actividades económicas e o equilíbrio ambiental [1].

Um desenvolvimento sustentável pressupõe a preocupação não só com o presente mas com a qualidade de vida das gerações futuras, protegendo recursos vitais, garantindo um crescimento económico amigo do ambiente e das pessoas.

A electricidade está no centro do desafio energético mundial. É uma necessidade da vida moderna e um requisito base para o desenvolvimento. Este sector está a passar por uma fase de crescimento sustentado, mas ao mesmo tempo a lutar por questões fundamentais de segurança, fiabilidade, acessibilidade no custo, impactes ambientais e acesso básico. O sector eléctrico produz aproximadamente 40% das emissões globais de CO₂ através da queima de combustíveis. As preocupações relativas ao abastecimento de gás e combustíveis líquidos e os constrangimentos a alternativas estão a promover a utilização do carvão, apesar do impacto global no clima. A dependência das redes antigas e sobreutilizadas aumenta o risco de *blackouts*. Ao mesmo tempo, mais de 1,5 mil milhões de pessoas no mundo ainda não têm acesso a electricidade. Estas tendências não são sustentáveis, é necessária uma acção urgente [2].

A energia eléctrica está também no centro dos desafios energéticos globais porque oferece algumas das melhores soluções, tem o potencial de equilibrar o mix de energia mundial porque pode ser produzida a partir de qualquer fonte de energia primária, desde fósil, nuclear, hídrica e outras fontes de energia renováveis. Hoje temos muitas tecnologias que podem fazer a diferença na garantia de um abastecimento eléctrico seguro, acessível e ambientalmente responsável [2].

2 Motivação

Precisamos de novas linhas políticas que atendam as preocupações com a preservação do ambiente e que reconheçam o valor da segurança, fiabilidade e acessibilidade de custo, enquanto se garante o retorno adequado do investimento através de um mercado de electricidade robusto [2].

A escolha de energia primária requer compromissos entre custos, desempenho e impacto. O facto das infra-estruturas eléctricas necessitarem de investimentos intensos e terem longa duração, é importante, levar as escolhas energéticas muito além no futuro. As decisões do mix energético têm de ser feitas a curto prazo uma vez que nos vão afectar nas décadas que se aproximam [2].

Devido ao aumento da procura em grande escala e face aos desafios que enfrentamos, torna-se urgente inovar, desenvolver e utilizar rapidamente novas tecnologias de produção e armazenamento de energia. É necessário criar uma visão clara do futuro das infra-estruturas eléctricas, adoptando diversos caminhos com base na natureza geográfica e cultural de cada país/região.

1.2. Motivação

As pequenas ilhas geralmente necessitam de grandes importações de combustível. Hoje em dia nunca existe a certeza de um fornecimento constante e ocorre uma grande volatilidade nos preços. O combustível é transportado de grandes distâncias o que se torna muito dispendioso.

Esta dependência torna-se numa ameaça enorme para a economia e torna o preço de produção de electricidade bastante elevado.

Torna-se importante para estas ilhas, o incentivo à produção de energia renovável e a redução da emissão de gases poluentes, já que, ao encontrarem-se pouco acima do nível do mar, são dos locais mais vulneráveis quanto às alterações climáticas como a subida do nível das águas dos oceanos e condições meteorológicas extremas. Estas ilhas emitem geralmente, uma quantidade mínima de gases poluentes contribuindo muito pouco para o fenómeno do aquecimento global e, no entanto, são as mais prejudicadas [3].

Esta necessidade de mudar o panorama energético veio numa altura em que o custo das energias renováveis baixou.

Muitas ilhas dispõem de excelentes recursos endógenos podendo assim obter excelentes resultados combinando diferentes tipos de aproveitamentos energéticos. É possível reduzir drasticamente a importação de combustível utilizando esses recursos. Estão assim, numa excelente posição para adquirir independência energética estabelecendo um exemplo para o resto do mundo.

A ilha das Flores, no arquipélago dos Açores irá ser o caso teste. Esta ilha pode ser considerada como um laboratório real onde se poderá desenvolver novas metodologias para uma transformação económica e ambientalmente sustentável de soluções inovadoras no domínio energético. A ideia parte do projecto “Green Islands” - projecto bandeira do programa MIT - Portugal para a área dos sistemas sustentáveis de energia a ser desenvolvido

conjuntamente com a Unidade de Sistemas de Energia do INESC Porto [4]. Trata-se de um projecto pioneiro no âmbito da autonomia energética que teve em consideração o enorme potencial das energias renováveis do arquipélago dos açores.

1.3. Objectivos

A presente dissertação tem como objectivo provar a diminuição da dependência energética de pequenas ilhas com a introdução de sistemas híbridos de energia de modo a contribuir para um desenvolvimento energético sustentável.

Pretende-se também neste estudo, abordar a estratégia do dimensionamento dos sistemas híbridos de forma inovadora, ultrapassando as dificuldades sentidas na modelização deste tipo de soluções com outros modelos disponíveis no estado da arte.

Pretende-se analisar num primeiro cenário o incremento ao longo do tempo da fracção de capacidade eólica, denominado sistema Expansão-Eólica (EE), e no segundo incrementando a capacidade hídrica, eólica e de armazenamento com bombagem, denominado sistema Eólico-Hidro-Bombagem (EHB). Será analisada a implementação destes sistemas, obtendo resultados que permitam servir de indicadores fiáveis para analisar a viabilidade do investimento.

As características da central hidroeléctrica a instalar no segundo cenário serão dimensionadas bem como a quantidade de aerogeradores a construir ao longo do tempo.

1.4. Estrutura da Dissertação

A presente dissertação é constituído por 5 capítulos em que no primeiro, a introdução, é exposta a necessidade do desenvolvimento sustentável energético, o problema energético das pequenas ilhas, a motivação, os objectivos e a estrutura deste trabalho.

No capítulo 2 é apresentada a temática dos sistemas híbridos de energia. São expostos em pormenor dois dos mais importantes programas de simulação deste tipo de sistemas de modo a retirar ideias em como tratar o nosso problema.

No capítulo 3 é feita uma análise ao panorama energético da ilha das Flores.

No capítulo 4 é descrito o procedimento das simulações efectuadas com a implementação do sistema híbrido Expansão-Eólica e Eólico-Hidro-Bombagem.

No capítulo 5 são analisados os resultados de implementação dos diferentes sistemas. Serão comparados resultados entre eles e com o presente sistema electroprodutor.

No capítulo 6 são apresentadas todas as conclusões da presente dissertação, assim como se dão sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Estado da Arte

2.1. Sistemas Híbridos

Uma promissora aplicação no mundo das tecnologias de conversão de energia que utilizam os recursos renováveis é a instalação de sistemas híbridos de energia [5].

Por sistema híbrido entende-se qualquer sistema de produção de energia eléctrica que englobe mais do que um tipo de tecnologia. Combinam várias fontes de energia renovável (eólica, solar, hídrica, biogás) com produção térmica não renovável (Diesel ou gasolina).

Geralmente destinam-se a alimentar pequenos sistemas autónomos, mas poderão ser sistemas isolados de grande dimensão (dezenas de MW) a alimentar ilhas [3].

Os sistemas híbridos são geralmente utilizados para aplicação em sistemas isolados, no entanto num paradigma de produção descentralizada e de tecnologia de micro-redes também se pode considerar sistemas híbridos ligados à rede eléctrica.

Geralmente, os sistemas híbridos têm uma componente de armazenamento de energia baseada em baterias, o que permite otimizar o equilíbrio entre produção e consumo com algum desfasamento temporal. Também existe a possibilidade de armazenar energia na forma de hidrogénio ou água em reservatórios. Deste modo, é possível armazenar a energia em excesso e posteriormente, quando existir insuficiência de produção para alimentar as cargas, reconverter em energia eléctrica [5].

2.2. Dimensionamento de um sistema híbrido

O dimensionamento de um sistema híbrido torna-se complexo devido à incerteza dos recursos renováveis e da procura de energia. O facto das características de alguns componentes serem não lineares e o ponto óptimo de estratégia de operação e de dimensionamento serem interdependentes também complica o processo [6].

6 Dimensionamento de um sistema híbrido

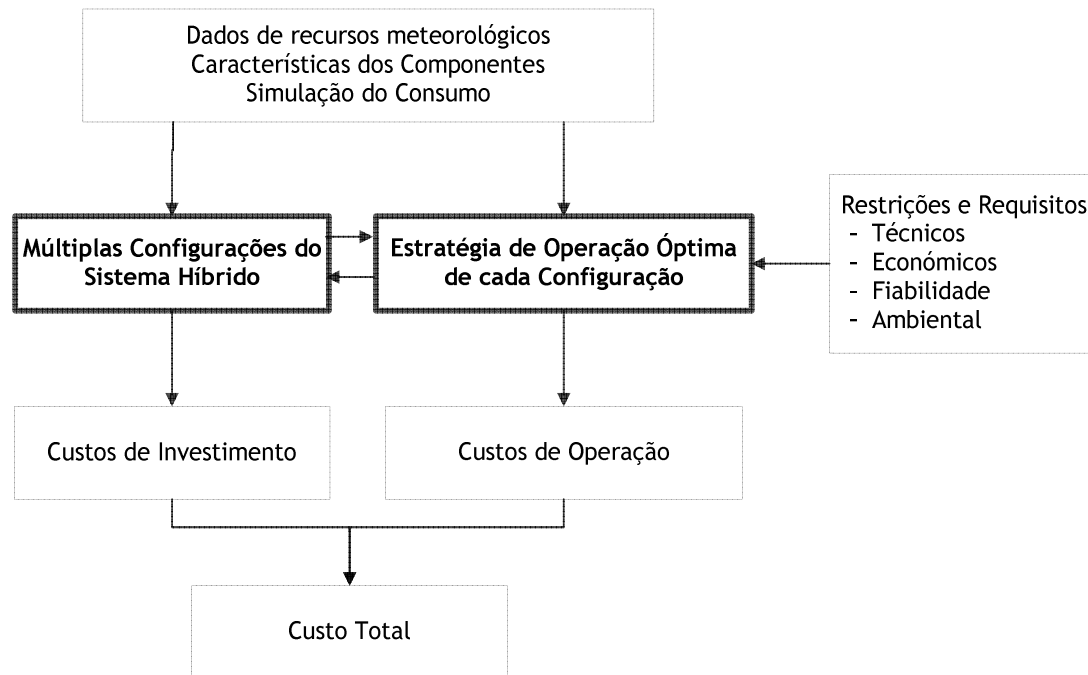


Figura 2.1 - Interdependência entre dimensionamento do sistema e estratégia ótima.

A optimização é alcançada minimizando os custos totais do sistema durante o seu tempo de vida, tratando-se assim de uma optimização uni-objectivo. Porém, é possível utilizar diferentes variáveis a optimizar transformando-a num problema multi-objectivo. Para além do objectivo financeiro poderá ser efectuada uma análise de modo a minimizar emissões de gases poluentes, energia não fornecida ou a maximizar a fiabilidade de um sistema e quantidade de produção renovável. Como estes objectivos costumam contradizer-se, são apresentadas muitas vezes várias soluções ideais aperfeiçoando cada um dos objectivos. A minimização das emissões de gases poluentes e maximização de recursos renováveis raramente são benéficas tanto financeiramente como para a fiabilidade do sistema [6].

A solução ótima para o sistema híbrido não se resume apenas à escolha da configuração ideal mas também atingir uma estratégia de operação adequada, considerando restrições e requisitos de cada componente. A estratégia escolhida afecta tanto a performance, como a degradação e tempo de vida dos elementos de cada configuração.

O dimensionamento do sistema híbrido é incluído num algoritmo principal que modela as configurações conforme a quantidade e características dos componentes existentes. Quando é iniciado um processo de dimensionamento, a configuração inicial é introduzida aleatoriamente [6]. Este processo é demonstrado na figura 2.2.

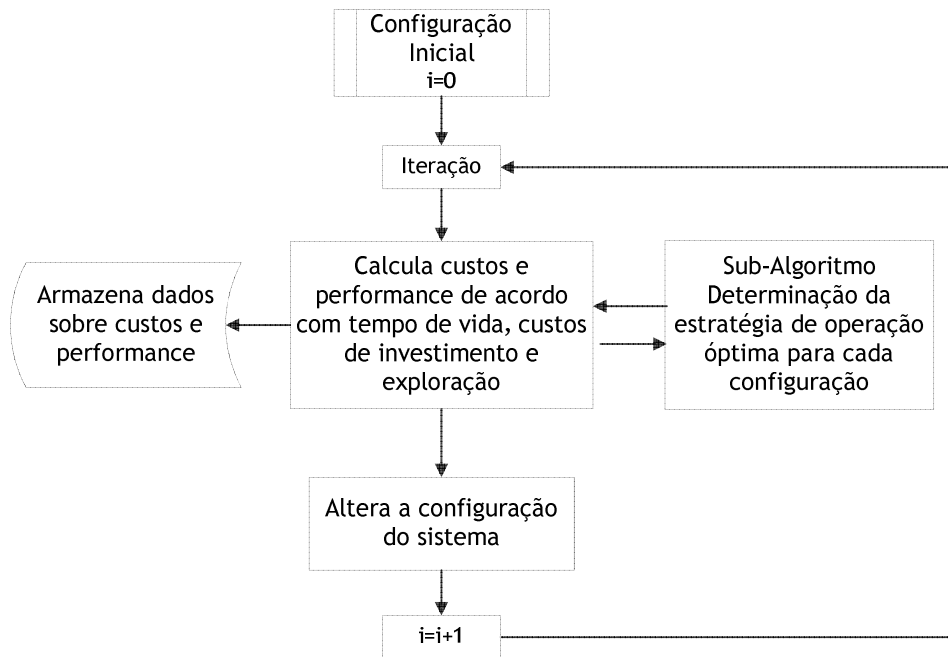


Figura 2.2 - Algoritmo convencional de dimensionamento de um sistema híbrido.

O sub-algoritmo determina a melhor estratégia de controlo do sistema, considerando custos ao longo dos tempos de vida e transmite para o algoritmo principal. Diferentes estratégias de operação podem ser utilizadas, algumas utilizam fontes renováveis e energia armazenada para satisfazer o consumo, ligando a produção Diesel apenas quando necessário. Noutras o Diesel é sempre usado durante um mínimo de tempo ou mesmo constantemente ligado. Este tipo de produção também poderá ser só utilizado a partir de um determinado valor de carga. Outras estratégias determinam se o armazenamento de energia é efectuado apenas com energia renovável ou se existe a possibilidade de usar o Diesel [6].

A qualidade de performance e os resultados de cada sistema são analisados e o óptimo é seleccionado.

2.3. Programas Existentes

Como aparecimento das vantagens de utilização dos sistemas híbridos, foram desenvolvidos programas que efectuam o dimensionamento automaticamente. Alguns são comercializados e outros são de distribuição livre. Uns são mais genéricos e completos nas aplicações possíveis e outros são mais específicos para determinado tipo de produção.

Os que mais se destacam são o HOMER [7] e o HOGA [8].

2.3.1. HOMER

O *Hybrid Optimization Model for Electric Renewables* (HOMER), desenvolvido desde 1994 pela NREL (*National Renewable Energy Laboratory*), é um modelo de optimização de sistemas híbridos que simula todo o tipo de configurações possíveis. Isto é, conforme a quantidade e características dos componentes, o programa testa todas as combinações existentes e determina a estratégia de operação para cada.

Este programa optimiza sistemas híbridos compostos por geradores fotovoltaicos, aerogeradores, centrais hídricas, geradores Diesel, baterias, pilhas de combustível, produção e armazenamento de hidrogénio.

A simulação é realizada em intervalos de uma hora e em cada um destes intervalos, os parâmetros relativos ao consumo e produção são constantes. A estratégia ideal de funcionamento será determinada dentro das seguintes opções:

- *Load Following Strategy*: esta estratégia permite o carregamento das baterias apenas por recursos renováveis e nunca por geradores Diesel. Quando as baterias conseguem satisfazer o consumo, não existe produção Diesel. Caso contrário, é o gerador Diesel que entra em funcionamento;
- *Cycle Charging Strategy*: enquanto as baterias puderem fornecer o consumo total, o gerador Diesel está desligado. Quando não for possível, o gerador Diesel funciona à potência nominal e carrega as baterias com a restante energia;
- *Combined Strategy*: Esta estratégia é uma combinação das duas anteriores. Para valores de consumo inferiores à potência crítica (ponto de intersecção das duas estratégias que determina qual a mais económica), aplica-se a estratégia “*Cycle Charging Strategy*”. Para valores superiores utiliza-se a “*Load Following Strategy*”.

Para as estratégias *Cycle Charging* e *Combined Strategy* é possível estabelecer um *setpoint* de capacidade de bateria de modo a que, quando esta desce a um valor inferior ao definido, o gerador as carregará [9].

O HOMER decide a estratégia óptima a utilizar entre estas três opções e determina o *setpoint* ideal das baterias caso este não tenha sido seleccionado pelo utilizador [9].

Surge um problema porque este programa, ao simular todas as possibilidades existentes na gama de componentes definidos pelo utilizador, provoca tempos de cálculo muito elevados. As estratégias de optimização são demasiado simples e não oferece nenhum algoritmo inteligente que permita diminuir o tempo de convergência da solução óptima. Se optarmos por um largo espectro de componentes e potências diferentes seremos deparados com dias ou mesmo meses de tempo de simulação. As estratégias de controlo também são bastante limitadas.

Contudo, o programa é bastante completo quanto à variedade de componentes e principalmente na análise de resultados permitindo efectuar uma optimização não só financeira mas com outras variáveis (emissões CO₂, fiabilidade, fracção renovável...).

2.3.2. HOGA

O HOGA (*Hybrid Optimization by Genetic Algorithms*), desenvolvido em 2007 pelo Departamento de Engenharia Electrotécnica da Faculdade de Engenharia da Universidade de Saragoça, é um programa de optimização de sistemas híbridos com recurso a algoritmos genéticos [9].

Estes algoritmos têm-se tornado, ferramentas de optimização muito interessantes, produzindo soluções em problemas complexos mais rapidamente do que um modelo convencional [10].

Um algoritmo genético tem como competência encontrar a solução óptima de um problema. Para isso, constitui-se uma população, ou conjunto de soluções possíveis (indivíduos) para o problema. Cada indivíduo é avaliado por uma função a optimizar e os melhores ficam seleccionados. Segue-se um procedimento que produz novos indivíduos a partir dos seleccionados, constituindo-se uma nova geração (reprodução). Esses indivíduos são avaliados de modo a eliminar os de pior desempenho seguindo-se nova fase de reprodução que origina uma geração subsequente. Este processo repete-se geração após geração, e a população deverá melhorar o seu desempenho devido aos indivíduos com melhor avaliação, até que um certo critério de paragem fique satisfeito. O melhor indivíduo encontrado no processo é tomado, como a solução do problema de optimização em causa [10].

2.3.2.1. Funcionamento do simulador

Este programa também oferece a possibilidade de usar um método semelhante ao HOMER, em que são testados todas as configurações possíveis.

Com a utilização dos algoritmos genéticos, o HOGA utiliza um algoritmo principal para optimizar a configuração dos sistemas e um secundário para optimizar a estratégia de operação.

O algoritmo principal fornece a configuração óptima do sistema, considerando os componentes possíveis, minimizando o custo total. Este custo é calculado para todo o tempo de vida do sistema e transportado para o presente.

O sistema óptimo é obtido analisando o sistema com o menor valor actual líquido (VAL), no caso de uma análise uni-objectivo. Se optarmos por uma análise multi-objectivo, o VAL será considerado juntamente com as restantes características a minimizar (emissões CO₂ e energia não fornecida) [9].

2.4. Problemas nos Simuladores

Os programas mencionados produzem excelentes resultados. Contudo, alguns aspectos de elevada relevância, que vão ser abordados de seguida, não foram considerados.

2.4.1. Consumo

O HOMER e o HOGA são programas orientados para pequenos sistemas de produção e os valores de consumo são considerados constantes durante o tempo de vida do sistema. Isto não introduz um grande erro quando se dimensiona um sistema de potência reduzida em que não exista grande progressão nos valores de consumo.

No caso em análise, como está em causa uma pequena ilha com valores de produção anuais na ordem dos 10GWh, já se vai tornar um problema. Os consumos aumentam consideravelmente de ano para ano afectando tanto a estratégia de operação como a de configuração do sistema óptimo. Os programas existentes fazem um estudo horário durante um ano inteiro e consideram-no idêntico aos restantes anos do tempo de vida do sistema. Como um sistema híbrido é dimensionado para operar entre 20 a 30 anos, ocorrendo um aumento significativo nos consumos anuais, afecta o correcto dimensionamento do sistema. Com o aumento do consumo, os componentes de produção de energia serão mais utilizados e as estratégias de operação são alteradas podendo resultar em configurações óptimas diferentes.

2.4.2. Custo do Combustível

No caso do HOMER o aumento do custo do combustível não é referenciado. Apenas é possível atribuir um aumento de taxa de inflação nos custos de operação e manutenção. Considerando a volatilidade nos preços dos combustíveis fósseis e a importância que estes têm nas despesas de operação de um sistema produtor, deveria existir um maior cuidado com este parâmetro.

No HOGA, este aspecto já toma uma atenção especial, é um parâmetro considerado muito importante e identificado com clareza em local separado. Os combustíveis são afectados por uma taxa de inflação muito superior daquela que atinge os custos dos componentes e manutenção.

2.4.3. Dimensionamento

O plano convencional de dimensionamento de um sistema híbrido centra-se em otimizar um sistema produtor para ser instalado inicialmente. Nesta dissertação será imposta a possibilidade de criar um plano de investimentos ao longo do tempo em vez de um único investimento inicial. Deste modo, vai ser necessário otimizar o sistema anualmente, dimensionando a quantidade de produção eólica a introduzir.

Este facto permite encaminhar o sistema óptimo de acordo com as necessidades de consumo, progredindo sempre para a solução mais económica.

Capítulo 3

A Ilha das Flores

3.1. Introdução à Ilha

A ilha das Flores está situada no grupo ocidental do arquipélago dos Açores constituindo o ponto mais ocidental da Europa.

Trata-se de uma ilha vulcânica constituída por terreno montanhoso, caracterizado por grandes ravinas e gigantescas falésias.

Tem uma população constituída por 4099 habitantes e abrange uma área de 141,0 km² com uma forma trapezoidal. Tem uma altitude máxima de 914 m, ocorrida em Morro Alto, e um comprimento máximo Este/Oeste de 11 km e de Norte/Sul 13 km [11].

A ilha tem um clima temperado por influência da corrente do Golfo [12], oferecendo valores médios de temperatura na ordem dos 17,7°C e humidade de 78,5% [13].

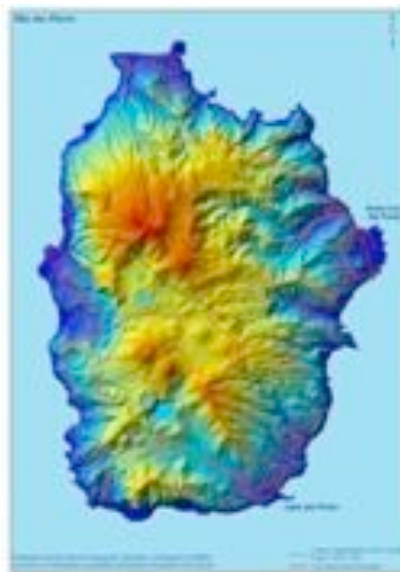


Figura 3.1 - Ilha das Flores.

3.2. Panorama Energético

3.2.1. Produção de Energia

O sistema eléctrico da ilha das flores é composto por duas centrais de produção de energia eléctrica, duas subestações e uma rede de distribuição de média tensão (MT) de 15 kV [14].

O sistema electroprodutor da ilha é constituído pela central termoeléctrica/hídrica de Além Fazenda e pelo parque eólico da Boca da Vereda, cujos dados são apresentados na tabela 3.1 [14].

Tabela 3.1 - Produção de energia da ilha.

Local	Fonte	Nº Grupos	Potência Instalada (kW)	Energia Produzida (MWh/ano)
Além Fazenda	Hídrica	4	1.484	4.422
	Diesel	4	2.327	5.254,58
Boca da Vereda	Eólica	2	600	1.684
Total			4.411	11.360,58

A Central da Ribeira de Além Fazenda, indicada na figura 3.2, é o principal centro electroprodutor da Ilha das Flores. Trata-se de uma central mista que contém uma componente de produção hídrica e outra térmica.

Inicialmente existiam três grupos hídricos de 296 kW cada. Em 1983 foi instalado um quarto grupo hídrico de 592 kW.

A componente térmica está preparada para queimar gasóleo tendo sido alvo, ao longo dos anos, de diversos investimentos, sendo composta actualmente por quatro grupos geradores de pequena potência (três de 500 kW e um de 830 kW), tendo estes sido instalados em 1991, 1995, 2001 e 2005 [15].



Figura 3.2 - Central da Ribeira de Além Fazenda.

O parque eólico de Boca da Vereda é constituído por dois aerogeradores Enercon E30 com uma potência de 300kW cada. Possuem um diâmetro de rotor de 30m, 3 pás e uma superfície de varrimento de 707 m² [16].

Integrado na primeira fase do Plano de Desenvolvimento de Energia Eólica dos Açores em 2002, o parque trabalha em regime de abandono e controlado e monitorizado remotamente [17]. Este centro produtor tem uma contribuição de 13% do consumo em energia eléctrica da ilha [14].



Figura 3.3 - Parque Eólico de Boca da Vereda.

A ilha é dotada de uma potência instalada de 4,4 MW [14]. A sua distribuição é descrita na figura 3.4. onde se verifica uma grande influência da produção térmica.

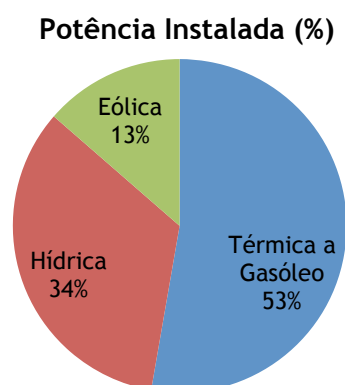
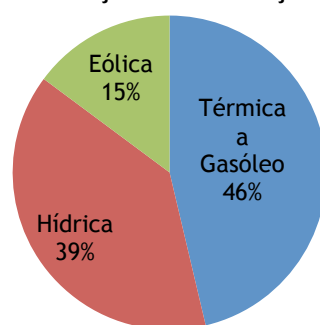


Figura 3.4 - Potência Instalada na Ilha.

A produção de energia é demonstrada na figura 3.5. Actualmente, 54% da energia eléctrica produzida nas Flores é de origem renovável [18].

Distribuição de Produção (%)**Figura 3.5 - Distribuição da Produção de Energia.**

Ao longo dos anos foi observado um aumento linear de produção de cerca de 3,5% ao ano [19]. A previsão efectuada pela Electricidade dos Açores (EDA) é apresentada na tabela 3.2 e na figura 3.6.

Tabela 3.2 - Produção Anual e Previsão EDA.

Produção Anual		
	Ano	MWh
	2003	9.159
	2004	9.880
	2005	10.266
	2006	10.938
	2007	11.368
Previsão EDA	2008	11.938
	2009	12.388
	2010	12.838
	2011	13.288
	2012	13.739
	2013	14.189

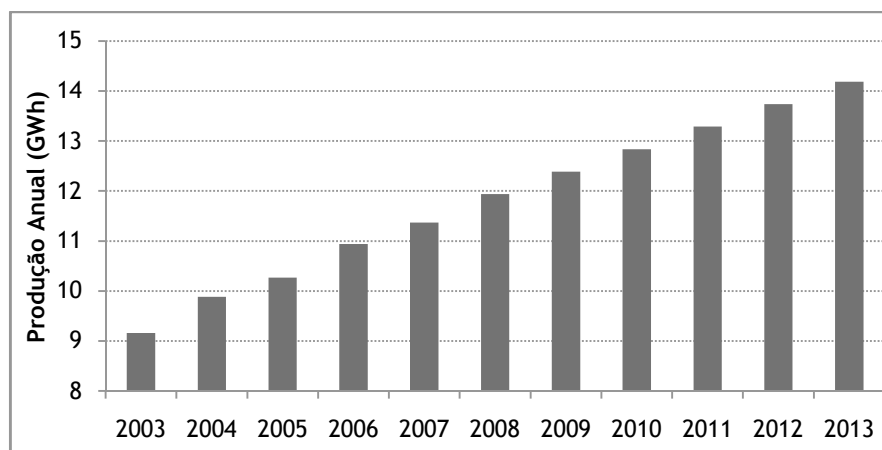


Figura 3.6 - Produção Anual e Previsão EDA.

3.2.2. Transporte e distribuição

A Rede de distribuição MT da ilha das Flores tem origem na única subestação afectada à central de Além Fazenda e é explorada com o nível de tensão de 15 kV. Esta rede possui uma extensão aproximada de 70 km, abastecendo 39 Postos de Transformação com uma Potência Instalada de cerca de 6 MVA [20]. A figura 3.7 indica a rede de distribuição MT.



Figura 3.7 - Rede de distribuição média tensão.

3.2.3. Consumo

O consumo anual da ilha no ano 2007 foi de 10.689 MWh, afectando essencialmente o uso doméstico e comercial [18]. Na figura 3.8 podem visualizar-se o consumo eléctrico distribuído pelos vários tipos de consumidores. Pode-se constatar que são os sectores domésticos e de comercio e serviços que utilizam mais energia, 42% e 36% respectivamente.

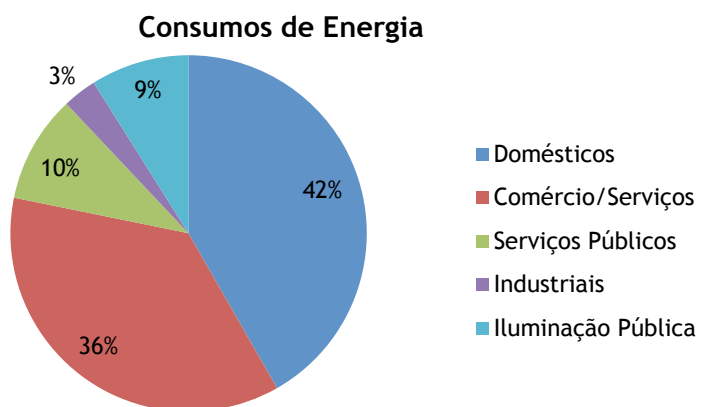


Figura 3.8 - Distribuição do consumo de energia.

Capítulo 4

Simulador de Sistemas Híbridos

Neste capítulo é explicada a simulação do sistema eléctrico actual da ilha das Flores, o sistema Expansão-Eólica e o Eólico-Hidro-Bombagem. O capítulo centra-se no estudo deste último sistema e, após obter o modelo de simulação, analisar-se-á o sistema Expansão-Eólica retirando a componente hídrica. O processo de produção de energia com os componentes actuais também será analisado para comparação de resultados.

Este simulador terá de analisar todo o tipo de possibilidades de sistemas electroprodutores e demonstrar resultados finais com uma precisão aceitável. A ferramenta desenvolvida permite obter os valores de volume de combustível utilizado em cada sistema simulado. A partir desses dados, será efectuada uma análise económica para cada sistema híbrido, considerando também os seus custos de investimento, de modo a verificar o sistema ideal.

Os programas de simulação de sistemas híbridos HOMER ou HOGA seriam uma excelente escolha para a implementação deste modelo. Contudo, estes programas estão limitados ao uso de apenas um aproveitamento hidroeléctrico, não permitem o uso de bombagem e, devido às falhas indicadas em 2.4, não são exemplares para a análise em questão.

Atendendo a estes problemas, foi desenvolvido uma metodologia de simulação semelhante, implementada na ferramenta desenvolvida. O dimensionamento será efectuado anualmente de modo a considerar o acréscimo dos valores de consumo e custos de combustível.

4.1. Funcionamento do Sistema Eólico-Hidro-Bombagem

Pretende-se aproveitar o excesso de energia obtido pelos aerogeradores eólicos e utilizá-lo na bombagem de água para um reservatório colocado em local elevado.

O novo aproveitamento hidroeléctrico denominado “Hidro2”, será dotado de um grupo reversível que permite tanto a produção de energia eléctrica como a bombagem de água.

A bombagem de água é ocorrida em alturas de excesso de energia obtido pela abundância de recursos renováveis ou consumos baixos. A água será armazenada para ser utilizada em alturas que permitam diminuir o consumo de combustíveis fósseis.

O parque eólico passa a contribuir tanto para a satisfação do consumo como para a bombagem de água, como indica a figura 4.1.

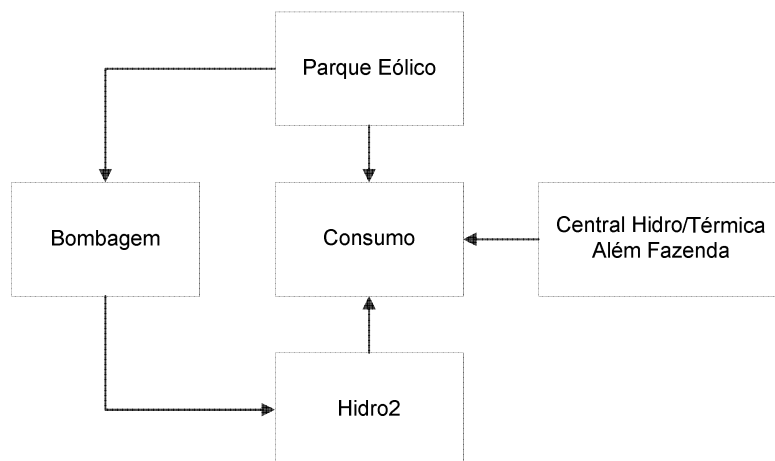


Figura 4.1 - Introdução da Hidro2 no sistema electroprodutor.

A figura 4.2 indica o funcionamento do sistema para alturas de velocidades de vento reduzidas ou elevadas.

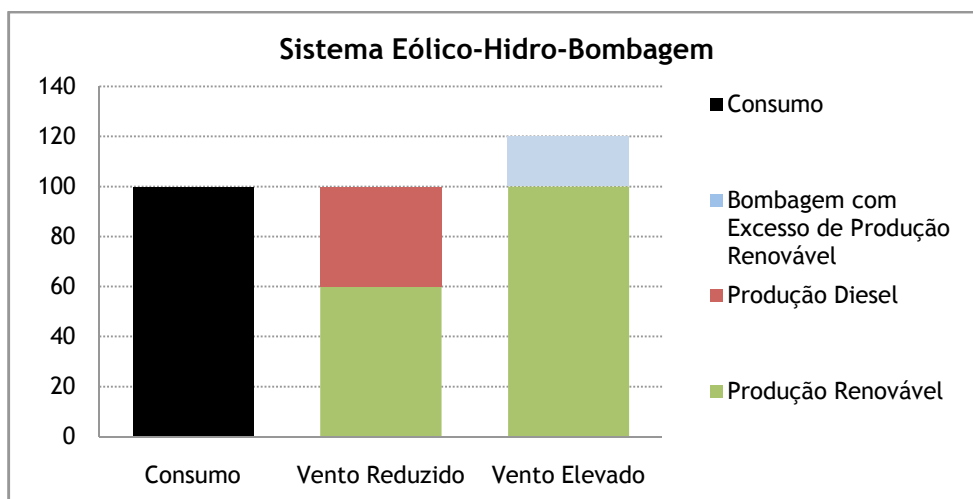


Figura 4.2 - Funcionamento do Sistema Eólico-Hidro-Bombagem.

4.2. Local

A ilha das Flores tem dimensões reduzidas e possui como uma das principais atracções turísticas, a beleza natural das cascatas e cursos de água a serpentear pelas encostas e falésias. Ao aproveitar um rio para construir a central irá causar um grande impacte ambiental e afectar os percursos do rio da ilha. Este torna-se num dos grandes inconvenientes desta hipótese.

Sendo a ilha pequena, outro problema que surge é a aquisição de um local viável para a instalação de uma hidroeléctrica e consequente albufeira.

Se não for possível encontrar um local propício para uma albufeira ampla toma-se como alternativa a construção de um reservatório artificial junto da costa a bombear água directamente do mar. Neste caso, evitamos ao máximo o impacte ambiental e não se alteram as condições dos rios existentes.

Com esta possibilidade é possível obter mais alternativas de controlo sobre o local onde instalar o reservatório tanto para efeitos económicos, minimizando distâncias à rede existente, como ambientais, escolhendo um local com menos impacte ambiental e social. Adquire-se também um recurso inesgotável para poder bombear.

No entanto, esta opção torna o investimento muito superior devido às implicações da construção do reservatório e a questões de salinidade da água a ser utilizada na central. De modo a aproveitar ao máximo este cenário tem que existir uma disposição política para construir um reservatório artificial de grandes dimensões, esta vai ser a possibilidade definida para o dimensionamento em questão.

4.3. Descrição do Problema

4.3.1. Variáveis a Analisar

Para dimensionar o sistema óptimo a implementar é necessário considerar todas as possíveis variáveis que influenciam o funcionamento do sistema electroprodutor ao longo dos anos. Terá de ser dimensionado a quantidade de energia eólica a incrementar, a potência do grupo gerador da nova central hidroeléctrica e o volume do reservatório desta.

A introdução da Hidro2 será imediata, mas a construção dos aerogeradores vai ser efectuada gradualmente ao longo dos anos de modo a seguir o sistema óptimo. Isto é, o aumento ideal de produção eólica será necessário à medida que aumentam os níveis de consumo.

Para cada uma destas variáveis é necessário considerar as variações nos custos de investimento e exploração, o impacte ambiental e social.

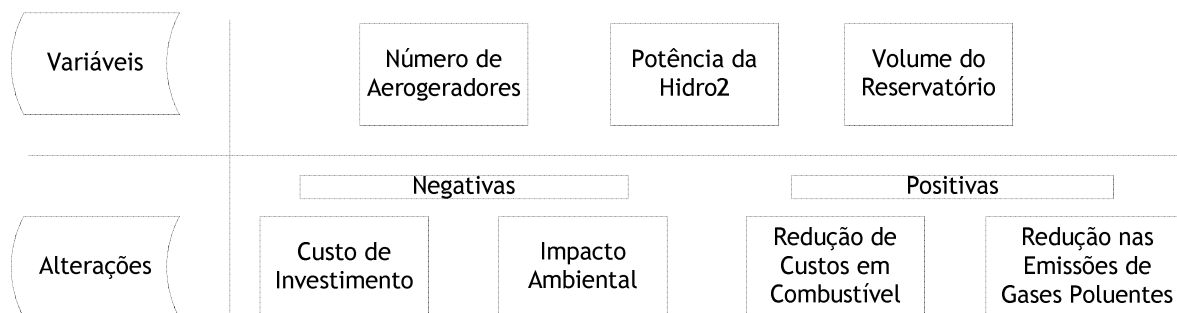


Figura 4.3 - Variáveis do sistema EHB e impacto de cada.

Cada uma das variáveis indicadas na figura 4.3 tem consequências em todos os aspectos indicados em baixo. Estando todas interligadas obtemos um problema não linear e torna-se necessário analisar o desenvolvimento dos resultados conforme o impacto de cada variável.

Para tal, terão de ser simulados todos os cenários possíveis alterando as variáveis existentes.

4.3.1.1. Número de aerogeradores

A principal causa de excesso de energia surge na produção eólica, em regimes de abundância de vento. Essas máquinas serão a principal origem da energia para bombear água. O aumento do número de aerogeradores permite um aumento de produção renovável diminuindo as despesas de combustível e possibilitando a bombagem de água, mas também implica um investimento grande que necessita de ser rentabilizado.

4.3.1.2. Volume do Reservatório

O volume do reservatório torna-se um dos maiores problemas quanto ao impacto ambiental e custo de investimento. No entanto, um volume considerável é muito importante para obter uma possibilidade de armazenar mais energia. Para que o sistema híbrido funcione o mais eficientemente possível é necessário ter uma boa capacidade de reserva de água.

Torna-se importante considerar limites estéticos para o tamanho do reservatório, visto que a beleza da ilha é uma atracção turística.

4.3.1.3. Potência da Hidro2

A potência do grupo hidroeléctrico a instalar define tanto a quantidade de produção como a de bombagem. Está ligada tanto à produção que vai ser incumbida como ao excesso de energia existente que será necessário aproveitar.

Um aspecto que condiciona esta simulação é o requisito mínimo da máquina hidroeléctrica que será admitido 25% da sua potência nominal. Quando se opta por um grupo gerador, este, sendo obrigado a utilizar 25% da sua capacidade, tem benefícios diferentes

conforme a energia que é chamado e produzir ao longo do ano. Em alturas que os consumos horários sejam ligeiramente superiores à produção renovável, ou seja, quando apenas é necessário um pequeno acréscimo de produção, convém ter um grupo gerador de pouca potência. Quando esse ajuste necessário for elevado, a máquina deverá ter grande potência. Prevê-se que esta opção surja mais durante o inverno, quando obtemos um caudal de grande capacidade na hidroeléctrica de Além Fazenda possibilitando maiores excessos de energia renovável e consequente bombagem de água na nova central.

4.3.2. Influências Futuras

Após a análise focada nas características do sistema electroprodutor, é necessário ter em conta que o consumo da ilha não vai ser constante ao longo dos anos. Como já foi observado em 3.2, existe uma previsão de um aumento praticamente linear da produção de energia de 3,5%. Isto vai influenciar o dimensionamento do sistema. Com o aumento do consumo, diminui o excesso de energia existente e aumenta a necessidade do uso de combustível, resultando no aumento da dependência deste. Ora, isto é exactamente o que se pretende evitar.

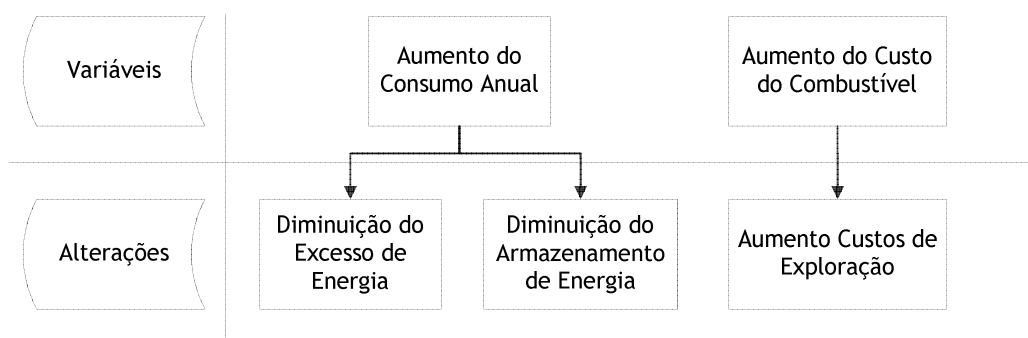


Figura 4.4 - Influências futuras que afectam dimensionamento.

Para contrariar este desenvolvimento será necessário recorrer ao aumento do número de aerogeradores, tanto para satisfazer o consumo como para proporcionar armazenamento de energia para alturas em que o vento seja escasso. Logo, será necessário efectuar o dimensionamento do sistema a implementar para cada ano, e analisar o desenvolvimento da melhor solução culminando num plano de investimento em energia eólica ao longo dos anos.

Quanto ao dimensionamento da central hidroeléctrica, este deve ser realizado considerando o aumento posterior de energia eólica, já que este se trata de um investimento único, ou seja, não será viável incrementar a potência do grupo gerador ou da albufeira sem obter despesas intoleráveis. A construção inicial deste aproveitamento tem de ser realizada conhecendo as alterações energéticas futuras.

Outro aspecto a ter em consideração, é o aumento constante do preço dos combustíveis fósseis. Esta variação pode ser o principal facto que pode incentivar a um investimento num sistema deste tipo. Foi considerado um incremento anual de 5% neste custo.

Foi devido a estas alterações futuras que se introduziu a possibilidade de seguir um plano de investimentos em energia eólica.

4.4. Descrição do Simulador

Sendo uma rede eléctrica relativamente pequena, o dimensionamento das características do sistema deverá ser minucioso. Em redes de dimensão superior e mais malhadas, obtemos uma margem de manobra mais elevada, na medida em que excessos de energia poderão ser aproveitados noutros centros de consumo. Neste caso, o incremento da capacidade eólica poderá levar a grandes desperdícios de energia, assim como um dimensionamento deficiente da potência do grupo hídrico a instalar pode trazer dificuldade a este fornecer a energia necessária. Se não possuir potência suficiente, não conseguirá dar o contributo necessário. Se possuir demasiada potência, pode não ser importante para alturas em que é exigido pouca energia, já que ela tem de entrar em funcionamento com um caudal mínimo.

O simulador desenvolvido utiliza a mesma técnica dos programas descritos no ponto 2.3 analisando o consumo hora a hora de modo a determinar pormenorizadamente a energia necessária para o sistema. Contudo, serão introduzidas modificações que resolvam os problemas indicados em 2.4.

O programa de simulação consiste numa folha de cálculo em Excel em que cada linha corresponde a uma hora do ano. Incluindo a energia necessária nessa hora, ao longo das colunas será seguido um determinado procedimento que vai ser descrito posteriormente, concluindo num despacho óptimo.

Após introduzir o consumo horário em durante o ano todo, é possível observar na globalidade, a porção de uso cada máquina diferente assim como os recursos utilizados. O resultado essencial será retirar o consumo anual de combustível em cada simulação.

O simulador foi desenvolvido deixando a possibilidade de alterar facilmente as variáveis descritas anteriormente. Assim, recorrendo a fórmulas, alterando o número de aerogeradores, a potência da nova hidroeléctrica e o volume do reservatório, modifica-se imediatamente todo o despacho anual.

Este ficheiro contém um pequeno programa em Visual Basic para auxiliar as diversas simulações.

4.4.1. Suposições

Para cada hora do ano é efectuado um cálculo que determina o despacho, tendo em conta a quantidade de recursos endógenos existentes na altura. Isto é possível supondo que a cada hora é permissível alterar o despacho, ou seja, alterar o funcionamento de cada máquina. Como apenas queremos observar o funcionamento geral do sistema electroprodutor, esta suposição é viável. No domínio da operação do sistema isto não é possível visto que compromete o rendimento das máquinas e não se torna economicamente viável ligar e desligar os grupos Diesel sucessivamente. Deverá ser realizado um plano de

operação otimizado que determina o melhor despacho económico tendo em conta estas variáveis. Como apenas se está a analisar o dimensionamento do sistema, não se opta por incluir este plano de operação e decidiu-se não ter em conta estes factores e possibilitar a alteração livre do despacho a cada hora. O problema estaria em ocorrer demasiados accionamentos da mesma máquina em diferentes horas de um dia quando o plano de operação óptimo seria mantê-los ligados durante várias horas consecutivas. Na realidade, como o consumo não varia bruscamente de hora para hora, isto não acontece e, quando uma máquina é chamada a funcionar costuma ser mantida em operação durante algumas horas, portanto, o simulador aproxima-se da realidade.

O grupo gerador a instalar na nova hidroeléctrica é considerado com as mesmas características tanto a bombear como a turbinar. Em ambos os casos foi considerado um mínimo técnico de 25%.

Para os grupos Diesel poderem entrar em funcionamento, é necessário operarem com valores superiores a 30%.

No aproveitamento hidroeléctrico, supõe-se que é possível instalar uma central com aproximadamente 100 metros de queda útil.

4.4.2. Estratégia de Operação

A estratégia utilizada é semelhante aos programas referenciados em 2.3, no entanto, como estes são específicos para pequenos sistemas de produção, serão efectuadas algumas alterações. Terão de ser tomadas medidas que introduzam uma maior margem de erro na produção necessária, visto que se trata de um sistema eléctrico de maior importância.

Como a variação de consumo dos geradores Diesel utilizados é aproximadamente linear, a estratégia a utilizar será muito semelhante ao *Load Following*. Não existirá um processo de optimização de custos da geração Diesel, porque, sendo esta praticamente linear, não ocorreria muita diferença nos custos. O armazenamento apenas servirá para aproveitar o excesso de energia.

A produção de energia a partir de recursos renováveis será sempre valorizada e utilizada ao máximo, no entanto, terá de ser mantido sempre um grau de fiabilidade para o sistema eléctrico deixando um grupo Diesel a funcionar constantemente. Este aspecto torna-se importante para o controlo de frequência do sistema.

4.4.2.1. Sistema de Produção Base

O sistema de produção base é constituído pela produção eólica no parque da Boca de Vereda, hídrica na central de Além Fazenda e o mínimo técnico do gerador de 830kW.

Optou-se por usar sempre um grupo gerador ligado para obter uma possível produção de energia estável e fiável para garantir sempre a satisfação das cargas mesmo com variações repentinas. Para efeitos de dimensionamento, como se trata esta análise, o gerador de 830kW irá operar durante o ano todo. Na prática, os 4 grupos Diesel deverão ser alternados constantemente entre si para não ocorrer tanto desgaste. Esta máquina de 830kW deverá ser

mais utilizada em alturas críticas como nos meses de verão em que existem menores recursos renováveis e será necessário utilizar mais combustíveis fósseis. Fica-se assim com uma maior potência de emergência.

Com esta estratégia, a energia usada para bombear água não é totalmente renovável. Existe uma pequena componente de produção térmica correspondente ao mínimo técnico.

A primeira análise efectuada em cada hora ocorre comparando a energia consumida com a energia produzida pelo sistema base. Conforme a quantidade existente de recursos endógenos em cada hora, este sistema poderá satisfazer o consumo ou não. Esta comparação é observada na figura 4.5 e conforme o resultado é possível seguir dois procedimentos.

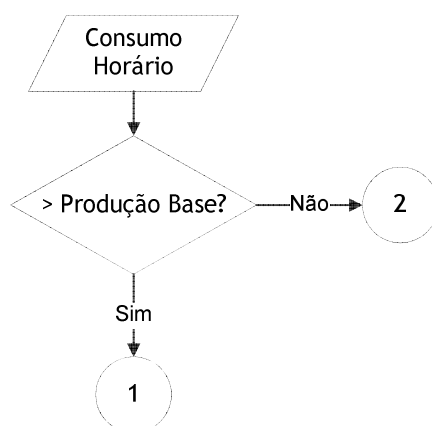


Figura 4.5 - Comparação horária entre consumo e produção base.

Quando não é possível garantir a quantidade de energia necessária, é seguido um procedimento que utiliza a água armazenada ou, quando isto não é possível, aumenta a produção Diesel.

Na figura 4.6 visualiza-se um exemplo em que a produção base é suficiente para alimentar as cargas.

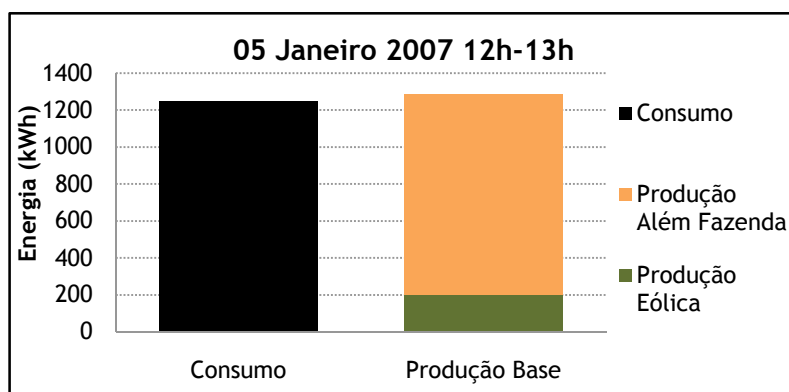


Figura 4.6 - Exemplo com produção base suficiente.

4.4.2.2. Consumo Superior à Produção Base

Em alturas que o consumo é superior à produção base, segue-se procedimento descrito na figura 4.7.

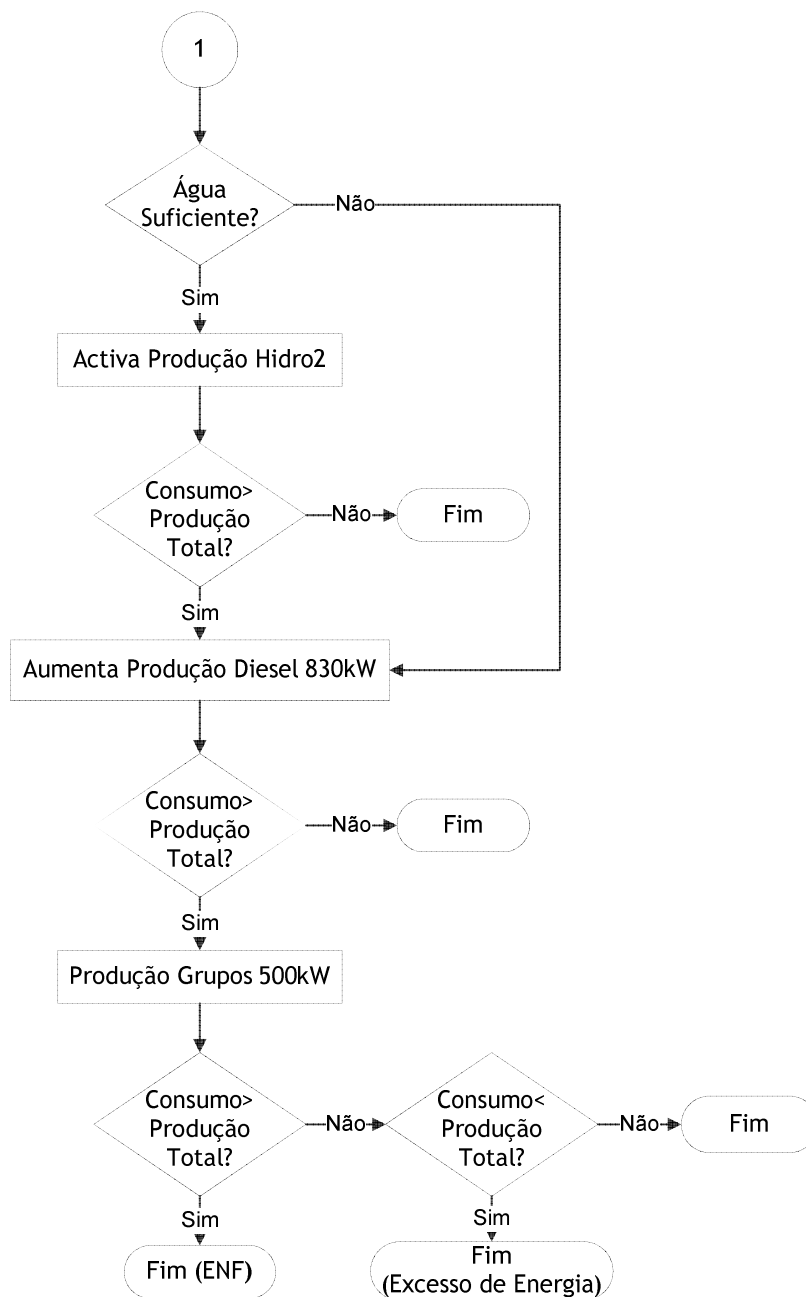


Figura 4.7 - Procedimento quando consumo superior a produção base.

Quando a produção base não consegue satisfazer o consumo necessário, recorre-se de imediato à água contida no reservatório de modo a aumentar o uso da produção renovável e a evitar custos em combustível. A figura 4.8 refere um exemplo deste procedimento.

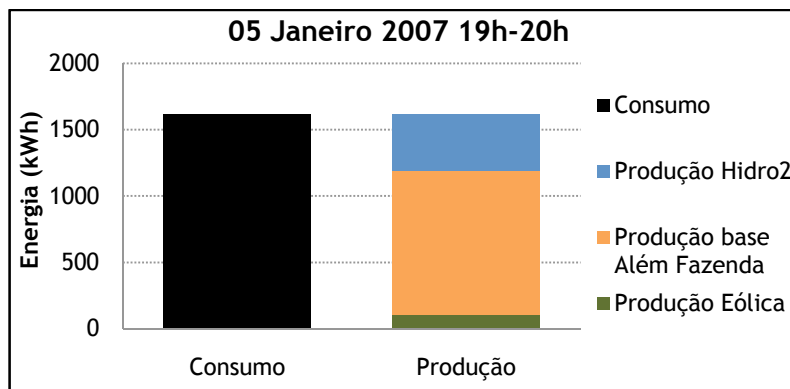


Figura 4.8 - Exemplo de produção Base insuficiente e compensação com Hidro2.

Existindo água suficiente para garantir o mínimo técnico da central, é iniciado o processo de produção de energia pela Hidro2. Se a água existente for suficiente para produzir a energia necessária para atingir o consumo horário, o processo acaba aqui, caso contrário, é aumentada a produção da máquina de 830kW. Quando este acréscimo é inferior ao mínimo técnico, opta-se por não utilizar a Hidro2 e acrescenta-se a produção Diesel. Se este facto não acontecesse adquiria-se um desperdício de energia por parte da nova central por ser obrigada a produzir mais do que o necessário, o que seria indesejado visto que a água armazenada é considerada preciosa.

Se a máquina Diesel não conseguir atingir os valores de produção necessários, entram em funcionamento as máquinas de 500 kW sequencialmente, isto é, uma máquina só entra em funcionamento quando as outras estão à carga nominal. A figura 4.9 indica um exemplo em que a produção base é insuficiente e ocorre um aumento da produção da máquina de 830 kW. A figura 4.10 demonstra outro exemplo em que o gerador de 830 kW atinge o seu máximo e é necessário a entrada em serviço da máquina de 500 kW.

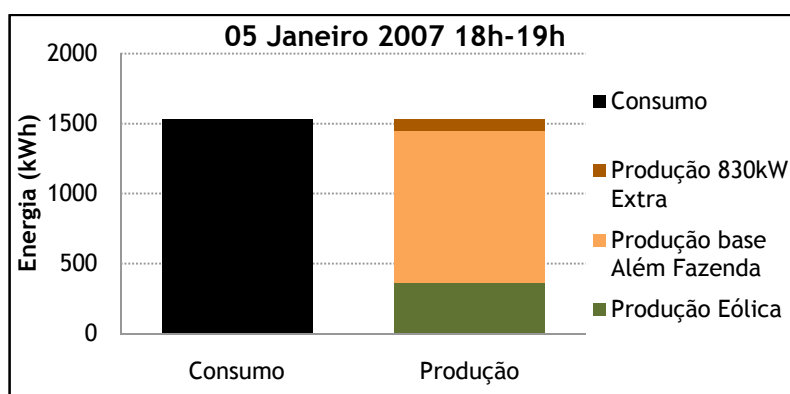


Figura 4.9 - Exemplo de produção Base insuficiente e aumento da produção da máquina de 830kW.

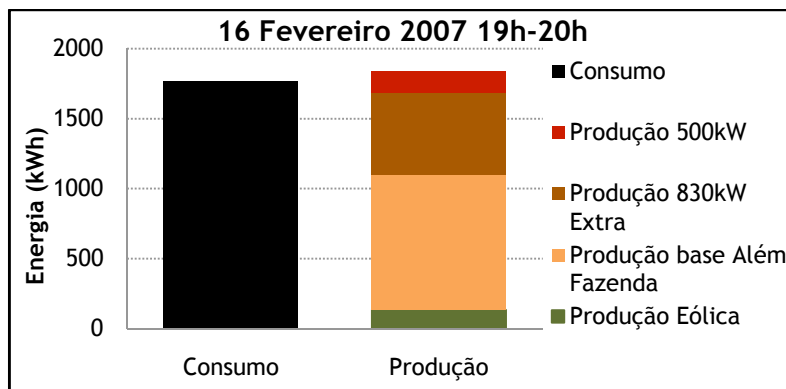


Figura 4.10 - Exemplo de produção Base insuficiente, aumento da produção da máquina de 830kW e necessidade de utilização de uma de 500kW.

Cada vez que entra uma máquina de 500kW em funcionamento é possível que exista um excesso de energia, como é possível verificar no exemplo anterior. Se uma máquina entrar no regime de despacho, tem que iniciar a sua produção com uma quantidade mínima de carga. Caso aconteça que este mínimo seja superior ao valor que a máquina tem que produzir, ocorre um pequeno excesso de energia. Este excesso nunca é aproveitado para bombagem por se tratar de valores muito reduzidos (no máximo 30% da potência da máquina - 150kWh).

Durante o Verão torna-se mais complicado armazenar água devido à escassez de recursos renováveis, principalmente na hídrica de Além Fazenda. Nestas alturas haverá uma maior necessidade de utilizar várias máquinas de 500kW.

A figura 4.11 demonstra um dia de Verão em que existe a necessidade da utilização da segunda máquina de 500 kW.

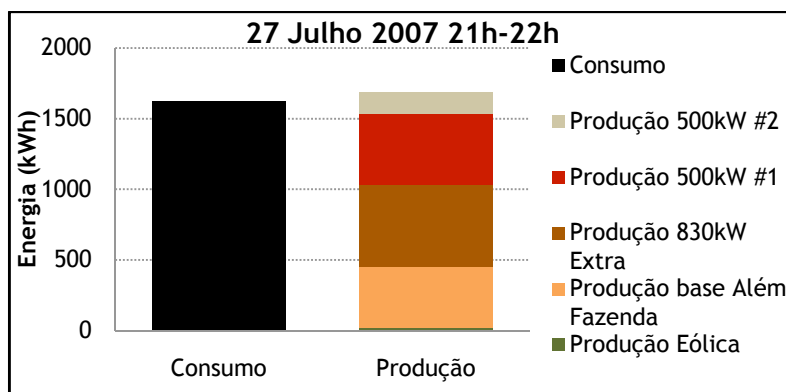


Figura 4.11 - Exemplo de produção Base insuficiente, aumento da produção da máquina de 830kW e necessidade do uso da segunda máquina de 500kW.

Se este processo não conseguir abastecer todo o consumo entramos num estado crítico em que existe energia não fornecida. Isto é muito improvável que aconteça visto que, nesta altura todos os grupos geradores da ilha estão a produzir energia. Mesmo que, na possibilidade de não existir recursos renováveis (vento, caudal turbinável no rio, água no

reservatório), a produção Diesel por si só conseguiria aprovisionar o consumo. Apenas com o recurso ao combustível fóssil, obtém-se uma potência instalada de 2330kW. Como a potência de ponta habitual da ilha ronda os 2000 kW, apenas surgiria problemas se ocorresse alguma falha nos sistemas de produção.

4.4.2.3. Consumo Inferior à Produção Base

Em alturas que o consumo é inferior à produção base, é seguido o procedimento descrito na Figura 4.12.

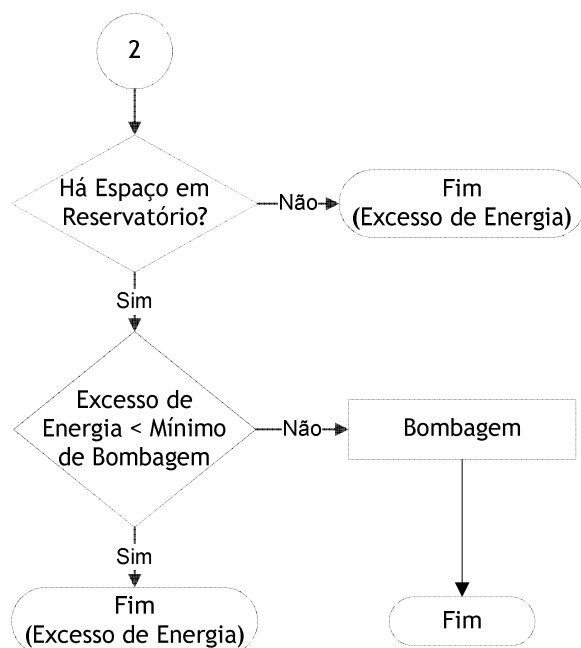


Figura 4.12 - Procedimento quando consumo inferior a produção base.

Nas situações em que a energia produzida pelo sistema base é superior ao que é necessário para o consumo, esta irá ser aproveitada para bombear água para o reservatório e deste modo, armazenar energia.

A figura 4.13 exemplifica uma situação em que a produção base é utilizada para satisfazer as cargas e bombear água.

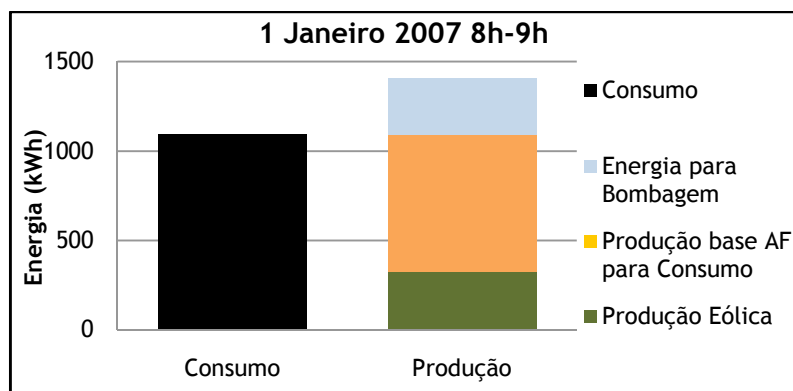


Figura 4.13 - Exemplo de produção Base suficiente para consumo e bombagem.

Ocorrem apenas duas restrições a este procedimento. A possibilidade de o reservatório já se encontrar no seu limite máximo e caso a energia em excesso não for suficiente para bombear. Se qualquer uma destas limitações acontecer, desperdiça-se energia. O pior cenário acontece quando o reservatório está saturado, aí, poderá ser desaproveitada grandes quantidades de energia. Esta possibilidade é mais provável que aconteça na época do Inverno, quando se adquire grandes quantidades de água na hídrica de Além Fazenda.

4.5. Simulação das Características e Variáveis do Sistema

Pretende-se um simulador dinâmico na medida em que os resultados finais terão de se modificar conforme a alteração das possíveis variáveis. Para tal, as variáveis terão de ser modelizadas em equações de modo a serem usadas como fórmulas no *Excel*.

O HOMER vai possibilitar uma distribuição horária do consumo e dos recursos endógenos ao longo do ano. Este programa incorpora modelos matemáticos que modificam os dados de entrada de modo a fornecer informação para uma análise horária durante o ano todo.

Como não foi possível obter todos os dados necessários para modelizar o sistema de produção de energia actual, foi necessário representá-lo neste programa e retirar os necessários.

4.5.1. Simulação do Consumo Horário

A distribuição anual do consumo horário foi determinada a partir de dados fornecidos pelo INESC Porto. Foi apenas possível adquirir dados de dois meses do ano, Janeiro e Junho. O facto de se tratar de informação de meses distantes entre si, nomeadamente na altura do Verão e Inverno, torna-se importante para atingir uma distribuição e padrão de consumo mais preciso.

O HOMER tornou-se uma excelente ferramenta neste ponto, na medida em que apenas a partir da distribuição do consumo de duas alturas do ano e do consumo total conhecido pelo

relatório anual da Electricidade dos Açores [14], calcula automaticamente o consumo horário durante o ano todo.

Para obter o consumo dos próximos anos foi inserida uma taxa de 3,5% ao ano do consumo total [19] e recalculado no HOMER o consumo anual. Esta percentagem corresponde ao aumento anual previsto, como já foi descrito no capítulo 3.2.1.

4.5.2. Simulação da Velocidade do Vento

Foram disponibilizados dados da velocidade do vento por parte da EDA. Esta informação foi obtida através de um anemómetro que se encontra por detrás do rotor de um aerogerador do parque eólico da Boca de Vereda.

No caso da modelização da velocidade do vento, o HOMER disponibiliza como entradas:

- Valor médio mensal da velocidade do vento;
- Parâmetro de Weibull;
- Factor de auto correlação;
- Padrão diurno;
- Hora da ponta da velocidade do vento.

A partir destes parâmetros, foram obtidos valores da velocidade do vento que, com a modelização do aerogerador traduzem a potência idêntica ao sistema real. Deste modo poderão ser utilizados estes valores no *Excel* e obter a mesma produção de energia quando se usa a equação modelizada, permitindo o acréscimo de aerogeradores para diferentes sistemas.

4.5.3. Modelização do Aerogerador

Os aerogeradores a modelizar são do mesmo modelo dos existentes no parque de Boca da Vereda, ou seja, o E30 da Enercon.

Estas máquinas têm uma curva de potência descrita na figura 4.14 [21].

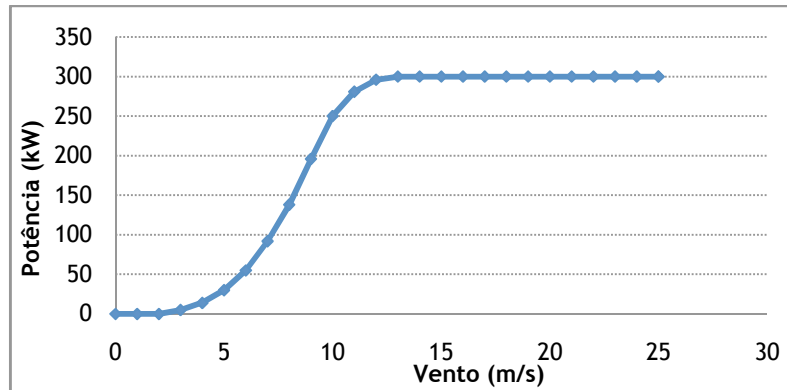


Figura 4.14 - Curva de potência Enercon E30.

De modo a obter uma modelização desta curva, foi utilizado o método dos mínimos quadrados com uma aproximação por uma função sigmóide com a expressão demonstrada em 4.1.

$$P(v) = \frac{M}{1 + e^{-\delta v + b}} \quad (4.1)$$

Onde P é a potência em função do vento (kW), v a velocidade do vento (m/s), M corresponde ao máximo da função, δ equivale a uma taxa que traduz a capacidade de crescimento do sistema e b é uma constante para ajudar no processo do tempo.

Esta expressão simula a variação da potência da máquina em função da velocidade do vento. Analisando a curva de potência, considerou-se o valor M como 300. Usando o método dos mínimos quadrados estimou-se os parâmetros δ e b , obtendo a aproximação descrita na figura 4.15.

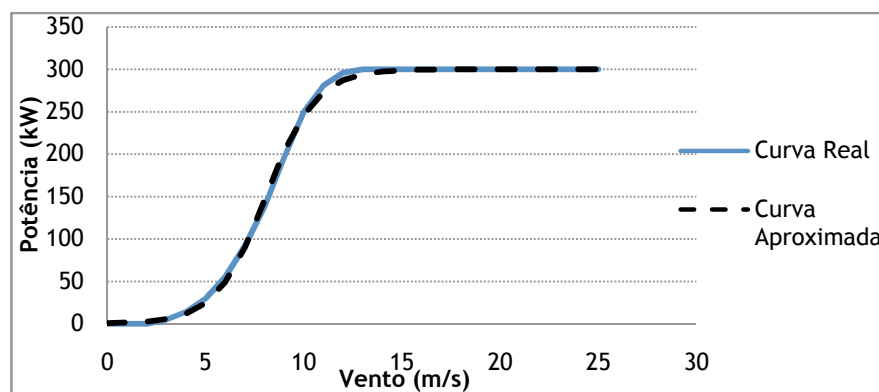


Figura 4.15 - Modelização da curva de potência.

A expressão 4.2 modeliza a curva de potência.

$$P(v) = \frac{300}{1 + e^{-0,792v+6,392}} \quad (4.2)$$

A partir desta equação é possível determinar a produção eólica de cada aerogerador com a variação da velocidade do vento.

4.5.4. Simulação da produção anual da central hidroeléctrica de Além Fazenda

A produção hidroeléctrica da central de Além Fazenda foi determinada a partir dos resultados provenientes da simulação do sistema actual no HOMER.

A EDA disponibilizou dados do caudal existente na central de Além Fazenda e a partir destes valores foram modificados os parâmetros da central hidroeléctrica até se obter a quantidade de produção real.

Ao contrário da modelização da potência do parque eólico e da Hidro2, não foi possível obter uma distribuição horária da potência desta central. A produção hidroeléctrica que o HOMER fornece é mensal, no entanto, a quantidade de produção anual é semelhante ao real.

Na tabela 4.1 e na figura 4.16 é demonstrada a potência produzida na central hídrica de Além Fazenda em função do caudal existente.

Tabela 4.1 - Caudal e potência mensal na central hídrica de Além Fazenda.

Mês	Caudal (L/s)	Potência (kW)
Janeiro	352,0	835,0
Fevereiro	304,0	721,1
Março	227,2	538,9
Abril	233,6	554,1
Maio	150,4	356,8
Junho	102,4	242,9
Julho	76,8	182,2
Agosto	124,8	296,0
Setembro	208,0	493,4
Outubro	249,6	592,1
Novembro	259,2	614,8
Dezembro	275,2	652,8

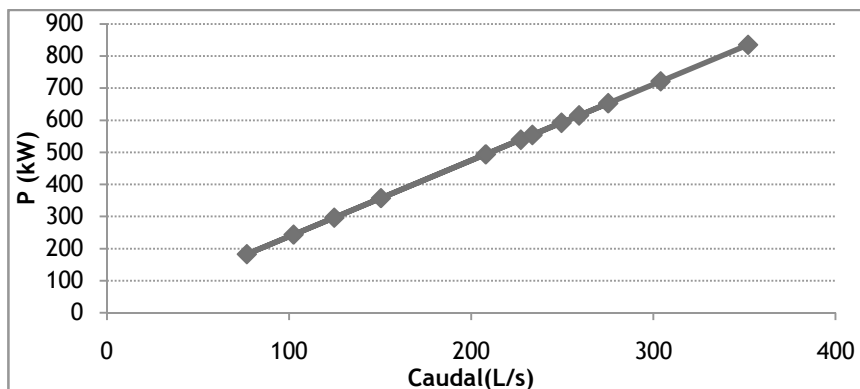


Figura 4.16 - Potência na central hídrica de Além Fazenda.

4.5.5. Modelização do consumo da produção Diesel

A produção Diesel vai ser necessária sempre que a renovável não consiga igualar o consumo. Para este caso, é essencial modelizar o consumo em função da potência de cada tipo de máquina.

Não foi possível obter as características dos geradores existentes na central térmica, logo, serão usadas folhas de características de máquinas de parâmetros equivalentes.

Para o gerador de 830kW foi usado o modelo Standby 800 kW 1000 kVA da Caterpillar [22] com a distribuição de consumo indicada na tabela 4.2 e na figura 4.17.

Tabela 4.2 - Variação do consumo com a carga da máquina de 830kW.

Carga	L/h
100%	213,6
75%	163,5
50%	116,0
30%	79,9

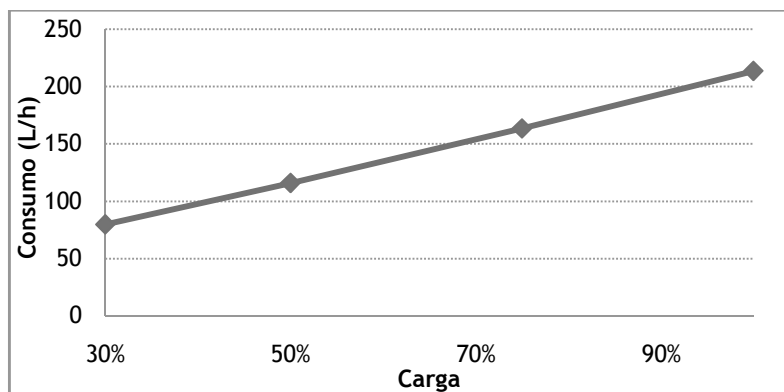


Figura 4.17 - Consumo gerador Diesel 830kW.

Adquire-se a equação de consumo em função da carga demonstrada em 4.3.

$$C(l) = 20,8 \times l^2 + 164 \times l + 28,8 \quad (4.3)$$

Onde C é o consumo (L/h) e l é a carga (%).

O mesmo será efectuado para os grupos geradores de 500kW. Para essas máquinas utiliza-se como modelo comparativo o Prime 508 kW 635 kVA [23] da Caterpillar com a distribuição de consumo indicada na tabela 4.3 e na figura 4.18.

Tabela 4.3 - Variação do consumo com a carga da máquina de 500kW.

Carga	L/h
100%	131,6
75%	96,2
50%	67,4
30%	49,1

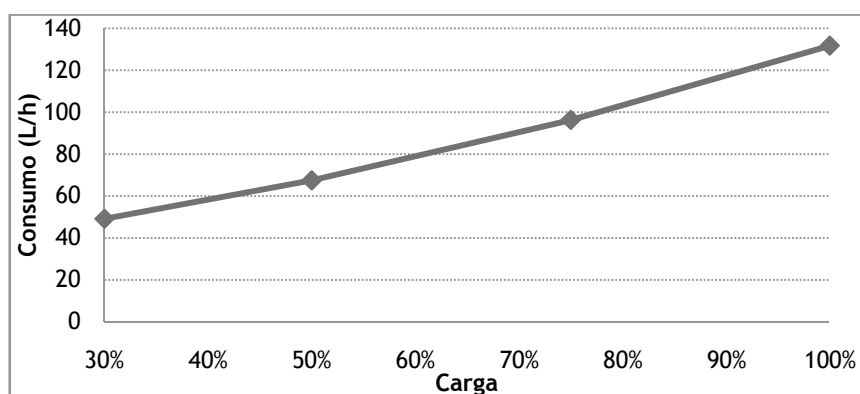


Figura 4.18 - Consumo gerador 500kW.

Obtém-se a seguinte equação de consumo em função da carga descrita em 4.4.

$$C(l) = 52,8 \times l^2 + 49,2 \times l + 29,6 \quad (4.4)$$

Onde C é o consumo (L/h) e l é a carga (%).

4.5.6. Simulação da Hidro2

Para a nova central hidroeléctrica é dado como adquirido o rendimento de cada máquina apontado na tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Rendimento das máquinas da Hidro2.

Máquina	Rendimento (%)
Turbina	80
Gerador	90
Transformador	99

A simulação da potência desta central será efectuada com a fórmula descrita em 4.5.

$$P_{\text{hidro}} = \rho \times g \times h \times \eta_{\text{Turbina}} \times \eta_{\text{Gerador}} \times \eta_{\text{Transformador}} \times Q \quad (4.5)$$

Onde P_{hidro} é a potência do grupo (MW), ρ é a massa volúmica da água do mar (1020 kg/m^3), g é a aceleração gravítica ($9,8 \text{ m/s}^2$), h é a altura da queda útil (100 m), η é o rendimento (%) e Q é o caudal (m^3/s).

A potência de cada máquina simulada influencia directamente o caudal de água para produzir ou bombear.

A figura 4.19 indica o caudal turbinado em função da potência da Hidro2.

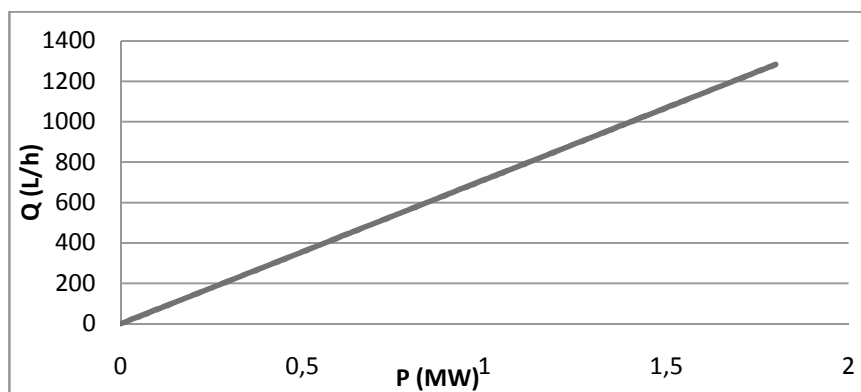


Figura 4.19 - Caudal turbinado em função da potência da Hidro2.

4.6. Descrição detalhada do simulador

4.6.1. Simulação de Sistemas

O simulador é constituído por uma folha “Início” onde se introduzem os intervalos das variáveis a simular, uma folha “Cálculo” onde se encontra o despacho anual, as variáveis e os resultados a tirar de cada simulação. As simulações da função de potência do aerogerador, da hidro2 e a função de consumo dos geradores Diesel encontram-se nas folhas “Eólico”, “Diesel” e “Hidro”, respectivamente. Por fim temos a folha “Resultados” onde são colocados os dados de todas as simulações.

O procedimento que determina o despacho consiste na comparação entre energia produzida e consumida em cada etapa à medida que se acrescentam grupos geradores.

A tabela intitulada de “Variáveis”, indicada na tabela 4.5, é o centro de controlo da folha. Alterando o valor de qualquer uma das três variáveis, modifica todo o despacho anual.

Tabela 4.5 - Controlo das Variáveis.

Variáveis		
Nº de Aerogeradores	2	
Potência Hidro2	800	kW
Vol Água Maximo	30.000.000	L

Na tabela “Grupos Geradores”, indicada em 4.6, encontram-se as características das máquinas de produção.

Tabela 4.6 - Grupos geradores.

Grupos Geradores		
Hidro2		
Caudal Hidro	4.032.000	L/h
Minimo Técnico	25%	
	200	kW
Diesel 830kW		
Mínimo Técnico	30%	
P min	249	kW
P max	830	kW
Diesel 500kW		
Mínimo Técnico	30%	
P min	150	kW
P max	500	kW

A tabela “Resultados”, indicada em 4.7, dispõe as consequências das variáveis escolhidas. É determinado o volume máximo do reservatório, já que em simulações com a potência da Hidro2 baixa é possível que ao longo do ano não seja atingido o volume total do reservatório devido a caudais reduzidos de bombagem.

Tabela 4.7 - Exemplo de resultados de cada simulação.

Resultados		
Volume Reservatório	29.879.455	L
Excesso de Energia	331.330	kW
Combustível Usado	1.317.095	L

A produção de cada aerogerador é calculada a partir da velocidade do vento e utilizando a fórmula modelizada no capítulo 4.5.3. O valor da energia total obtido é multiplicando pelo número de aerogeradores a ser simulado actualmente (tabela 4.5).

Inicialmente também é calculada a produção de energia da hidroeléctrica conforme o mês em questão (capítulo 4.5.4).

		HOMER		Parque Eólico BV		CHAF
		Vento	Consumo	P Cada AG	P Total AG	P Hidro
Data	Hora Final	m/s	kW	kW	kW	kW
Jan-01	01:00	4,57	1217,25	17,68	35,37	834,96
Jan-01	02:00	4,07	1099,47	12,13	24,25	834,96

Figura 4.20 - Exemplo de dados e cálculos iniciais.

Com estes valores, é possível obter a energia produzida pelo sistema de produção base. Será a soma da produção proveniente do parque eólico, da hidroeléctrica de Além Fazenda e o mínimo técnico do gerador de 830 kW (tabela 4.6).

Produção Base	
P Base	ENF1
kW	kW
1119,33	97,9
1108,21	0,0

Figura 4.21 - Exemplo do cálculo da produção base.

Neste momento é efectuada a primeira comparação entre energia consumida e produzida. Na coluna ENF1 é calculada a energia não fornecida subtraindo a produção base ao consumo horário. Se esta for inferior a zero, a produção base é suficiente para satisfazer o consumo e é iniciada a análise da possibilidade de bombagem. Se não for suficiente, o passo seguinte é acrescentar a produção da Hidro2. A adição desta central é possível se existir água no reservatório e se o acréscimo necessário for superior ao mínimo técnico da Hidro2.

As fórmulas introduzidas nas células desta coluna traduzem o procedimento demonstrado na figura 4.22.

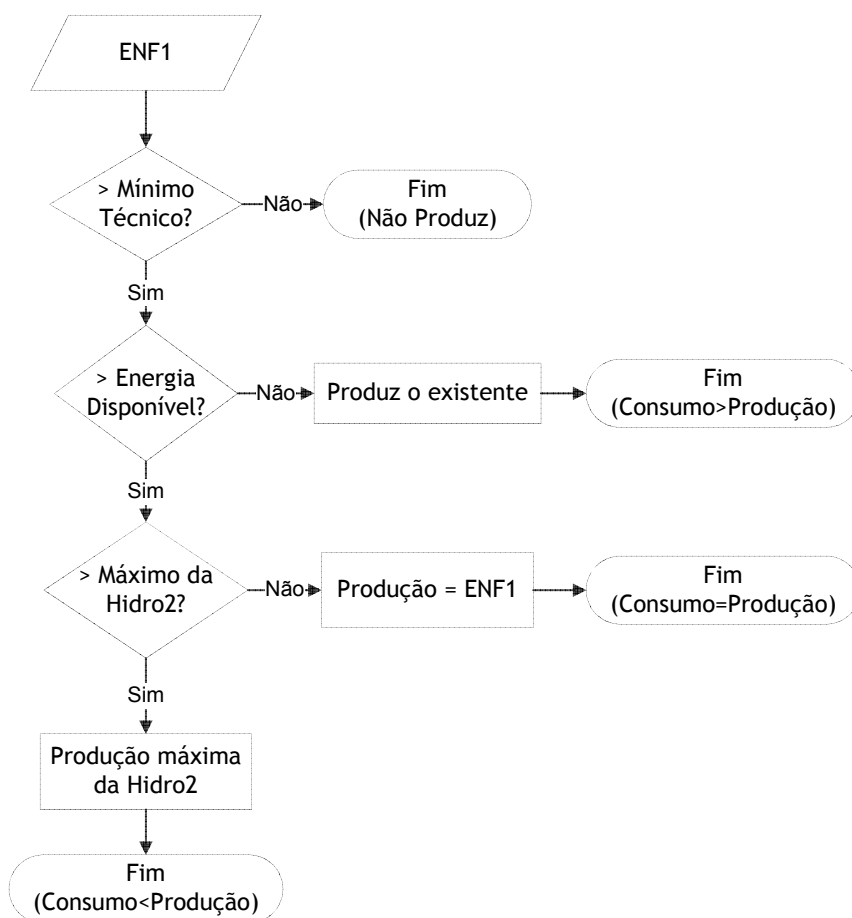


Figura 4.22 - Procedimento da entrada em serviço da Hidro2.

Se estas condições não se verificarem ou a produção imposta pela Hidro2 não for suficiente é aumentada potência da máquina Diesel de 830kW. Se a produção da Hidro2 for suficiente o processo acaba e o despacho é resolvido com produção renovável.

A energia disponível é observada numa coluna que calcula ao longo do ano a energia existente no reservatório tendo em conta a água existente e a potência da Hidro2.

A produção extra do gerador Diesel de 830kW vai ser calculada subtraindo ao consumo a produção base e a da Hidro2.

Se este não for suficiente para atingir os valores necessários, inicia-se uma série de comparações da energia produzida e consumida à medida que entram no despacho os grupos geradores de 500kW. Depois de se verificar a incapacidade da máquina de 830kW é calculada a energia não fornecida com esta no seu máximo (ENF2). O primeiro grupo de 500kW é incluído no despacho com esse valor. Se esse valor foi superior a 500kW é recalculada a energia não fornecida com esta máquina no máximo (ENF3) e entra o segundo grupo de 500kW. O mesmo procedimento é efectuado caso seja exigido o terceiro grupo.

Geradores Diesel											
Diesel 830 kW			Diesel 1: 500kW			Diesel 2: 500kW			Diesel 3: 500kW		
P (kW)	% Uso	L/h	P (kW)	% Uso	L/h	P (kW)	% Uso	L/h	P (kW)	% Uso	L/h
346,9	42%	101,0	0,0	0%	0,0	0,0	0%	0,0	0,0	0%	0,0
249,0	30%	79,9	0,0	0%	0,0	0,0	0%	0,0	0,0	0%	0,0

Figura 4.23 - Exemplo de funcionamento dos grupos Diesel.

A fórmula introduzida na célula traduz o procedimento descrito na figura 4.24.

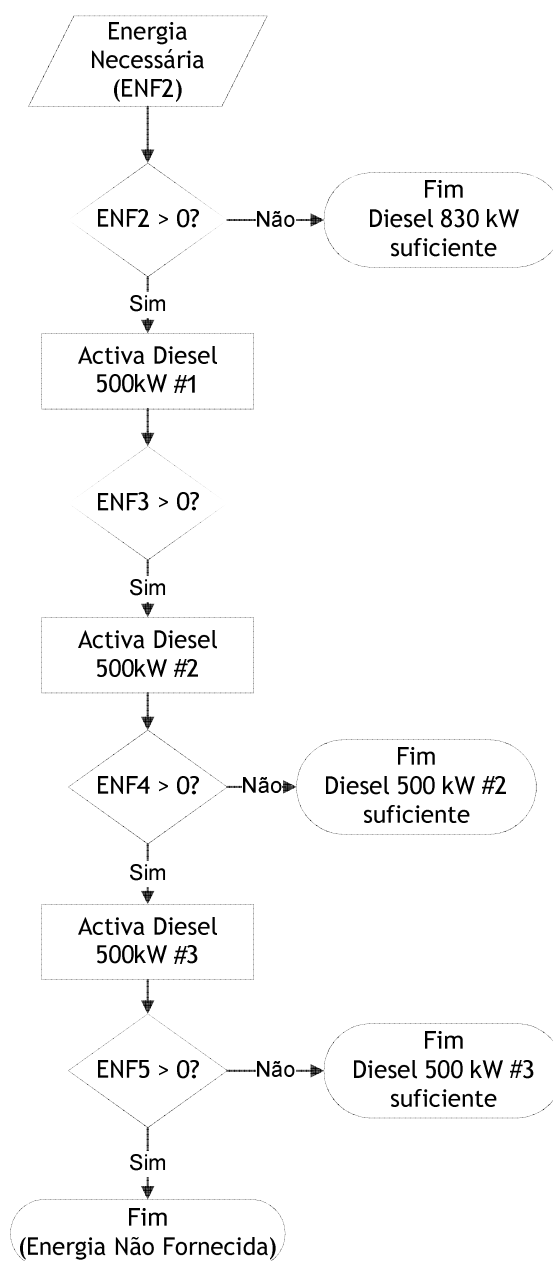


Figura 4.24 - Procedimento para a produção dos grupos Diesel.

Quando ocorre excesso de energia, é iniciado um procedimento que analisa a possibilidade de bombagem. Como a Hidro2 necessita de funcionar com um mínimo de 25% da sua capacidade, o excesso de energia terá de ser superior a esse valor. Este grupo também não entrará em funcionamento se o volume da água a bombear pela energia em causa provocar a ultrapassagem do limite do reservatório.

A análise da possibilidade de bombagem é descrita na figura 4.25.

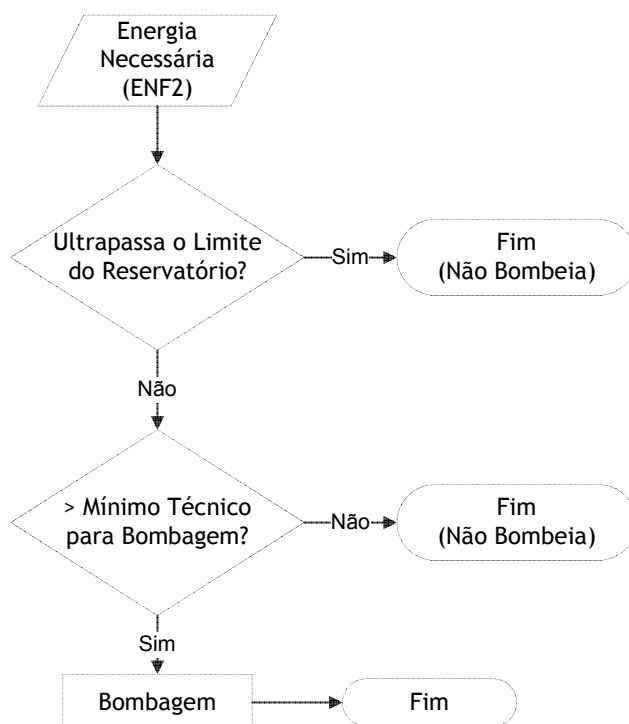


Figura 4.25 - Procedimento para a bombagem de água.

Quando é atingido o estado de bombagem é efectuado um cálculo que determina o volume de água que a central consegue bombear conforme a energia obtida. Este valor é adicionado na coluna “Água Acumulada” que calcula o volume de água existente no reservatório ao longo do ano.

Hidro 2						
Excesso Pre-Bomb	Produção	Bbg Possível	Bombear	Bombagem	Água acumulada	E disp no reservat
kW	kW	L	Sim/Não	L	L (no final da h)	kWh
0,0	0,0	0	Não	0	0	0,0
8,7	0,0	44.060	Não	0	0	0,0

Figura 4.26 - Exemplo de funcionamento da Hidro2.

No fundo da folha de cálculo, é possível observar a produção anual de cada grupo gerador, bem como o seu consumo.

4.7. Automatização com Visual Basic

Especificando as possíveis variáveis atingimos diferentes simulações e chega-se aos valores anuais desejados. Para obter as variações de resultados em função das variáveis seria necessário executar o mesmo procedimento várias vezes com diferentes variáveis. Deste modo é possível tratar os dados de modo a executar uma análise de sensibilidades.

O objectivo é testar todo um espectro de potências, número de aerogeradores e volume de reservatórios para obter todos os cenários possíveis.

Para efectuar este procedimento automaticamente, foi desenvolvido um pequeno programa em *Visual Basic* de auxílio que retira os resultados finais e incrementa sucessivamente cada uma das variáveis de modo a obter todas as combinações possíveis.

Na folha inicial do ficheiro *Excel* poderemos especificar qual o intervalo de cada variável que desejamos analisar. Indicando os valores iniciais, finais e passo de iteração do intervalo de cada variável, o programa simula todas as combinações possíveis entre elas.

Trata-se de um pequeno código que incrementa cada variável sucessivamente. As células correspondentes na folha “Cálculo” são alteradas e assim altera o despacho anual. Por fim são retirados os resultados finais nessa mesma folha e copiados para a folha “Resultados”.

O programa efectua o procedimento descrito na figura 4.27.

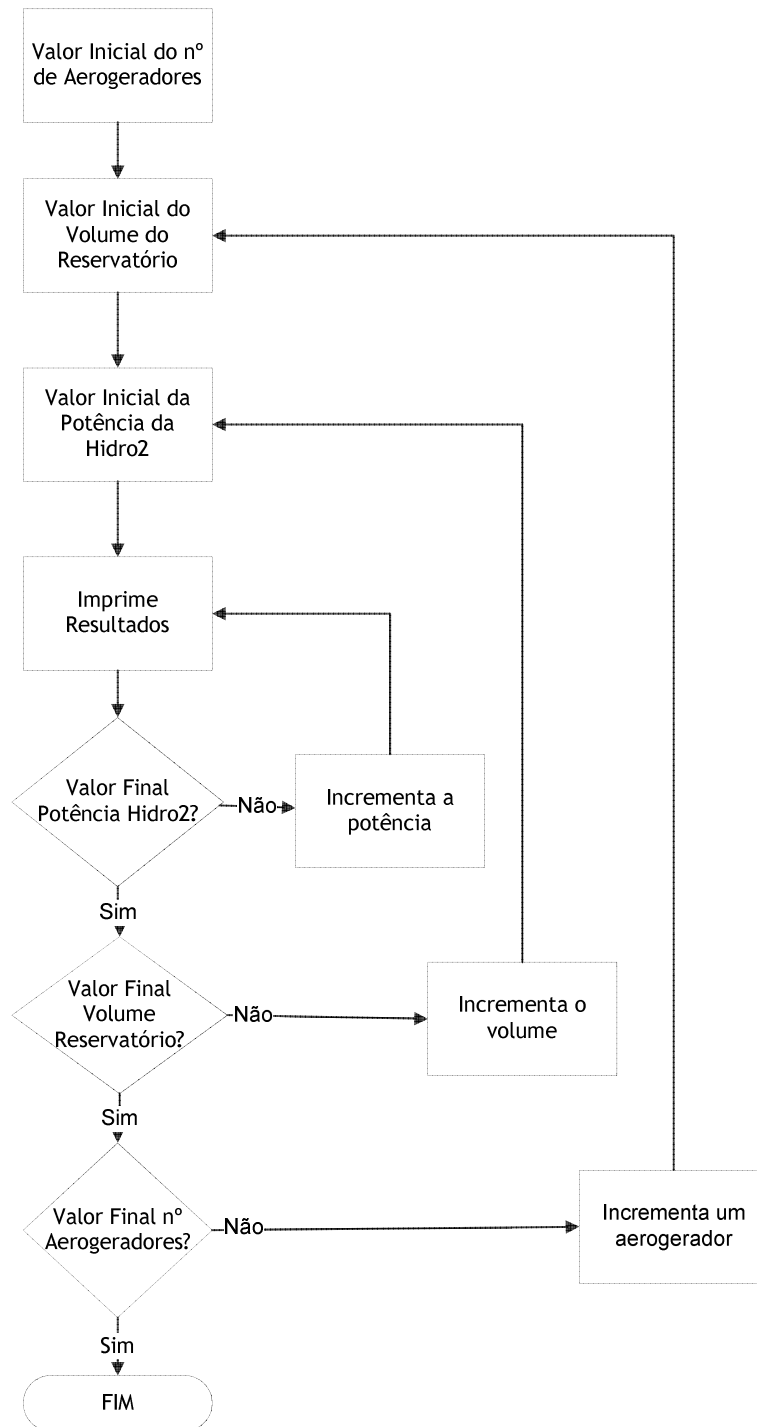


Figura 4.27 - Algoritmo do código Visual Basic.

Após analisar o cenário inicial e retirar resultados, a rotina implementada vai aumentar a potência da Hidro2 conforme o passo indicado, e mantém as outras inalteradas. Após chegar ao valor final suposto, inicia-se o mesmo processo mas com o valor do volume do reservatório acrescentado do passo. Depois de chegar ao valor limite do volume, adiciona-se um aerogerador e reinicia-se o processo.

Capítulo 5

Simulações e Análise de Resultados

Neste capítulo serão tratados os resultados provenientes do simulador de modo a otimizar os sistemas Expansão-Eólica e Eólico-Hidro-Bombagem. Estes sistemas serão comparados com o actual.

O horizonte temporal da análise efectuada coincidirá com o tempo de vida dos aproveitamentos a construir. O estudo será feito durante 20 anos em que, durante esse tempo, cada ano será analisado individualmente de modo a decidir o sistema híbrido ideal. Para cada ano serão analisados todos os sistemas possíveis alterando as três variáveis de acordo com os intervalos especificados.

Por fim, serão identificadas as características da Hidro2 a instalar bem como o investimento progressivo de aerogeradores ao longo do tempo.

5.1. Descrição da Análise

O principal indicador para retirar conclusões acerca de cada sistema será o custo nivelado de electricidade. Trata-se de um cálculo que contempla os custos de investimento e operação e a quantidade anual de energia consumida. Este valor indica o custo necessário para um sistema produtor por kWh consumido.

Este valor será calculado com a formulação indicada nas equações 5.1 e 5.2.

$$CNE = \frac{\sum_e (\tau_e \times I_e + OM_e)}{EAC} \quad (5.1)$$

$$\tau_e = \frac{t \times (1 + t)^{ne}}{(1 + t)^{ne} - 1} \quad (5.2)$$

Onde CNE representa o custo nivelado de electricidade (€/kWh), I_e o custo de investimento total do sistema (€/ano), OM_e o custo anual de operação e manutenção (€/ano), EAC é a energia anual consumida (kWh/ano), τ_e o factor de anualização para o equipamento e, t a taxa de anualização e n_e o tempo de vida do equipamento.

O custo de manutenção será desprezado por se tratar de valores muito reduzidos em comparação com os restantes. A despesa a considerar será o custo de combustível anual e a anualização dos custos de investimento.

Os valores do CNE calculados apenas contemplam os investimentos a efectuar com os sistemas híbridos a dimensionar. Os valores de anualização dos aproveitamentos que já estão construídos não serão considerados. Obtemos assim um CNE que não corresponde à realidade mas é uma forma excelente de comparar resultados.

A taxa de anualização considerada neste estudo foi 9%.

A solução utilizada para determinar a viabilidade económica de cada sistema foi calcular o somatório de todos os custos nivelados de electricidade anuais do sistema óptimo durante o espectro temporal analisado. Para este somatório foi utilizado o CNE mínimo de cada ano, ou seja, para cada simulação de em que se fixam os valores do reservatório e potência da Hidro2 é verificado qual o número ideal de aerogeradores.

$$\sum_i^k \min CNE \quad (5.3)$$

Onde CNE representa o custo nivelado de electricidade de cada sistema num determinado ano (€/kWh), i o ano em que se inicia o estudo e k o ano final do tempo de vida do sistema.

Por fim, foram comparados todos os somatórios de modo a identificar o valor mínimo que corresponde ao sistema híbrido óptimo. Cada somatório corresponde à progressão óptima de cada sistema simulado. O mínimo observado será o sistema que consegue progredir no sentido do menor valor do CNE ao longo de 20 anos.

Inicialmente pressupõe-se a possibilidade de aumentar anualmente o número de aerogeradores no sistema produtor. Posteriormente, a solução obtida terá de ser modelada para uma hipótese mais real. Não serão acrescentadas máquinas individualmente mas em grupo formando parques eólicos.

Para este caso foi considerado um aumento de 5% ao ano do custo do combustível.

5.2. Custos de Investimento

Os custos de investimento das diferentes variáveis são extremamente importantes pois são essenciais para analisar a viabilidade da implementação de cada sistema.

É complicado prever custos de investimento de centrais hidroeléctricas e eólicas quando não se reconhece bem os terrenos envolventes e acessos ao local. O facto da construção

destes componentes ser feita na ilha das Flores encarece o investimento, devido a despesas extra de transporte e construção.

5.2.1. Aerogeradores

As máquinas a serem acrescentadas são do mesmo modelo das existentes na ilha, ou seja, o E30 da Enercon.

É possível existir a necessidade de renovação das máquinas do parque eólico para suportar as alterações de potência.

Tendo em conta estes inconvenientes, o valor de investimento proposto de cada aerogerador será de 500.000€.

5.2.2. Hidro2 e Volume do Reservatório

Torna-se bastante complicado prever um investimento deste tipo sem conhecer o local exacto para a sua instalação. Dificulta assim a possibilidade de antever custos de obras civis, nomeadamente, a limpeza do terreno, escavação e movimentação de terras, construção do reservatório, canal de alimentação.

As despesas consideradas para a construção das centrais simuladas estão disponibilizadas na tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Custos de investimento da Hidro2

Potência	Volume do Reservatório			
	30.000.000 L	60.000.000 L	90.000.000 L	120.000.000 L
600kW	2.500.000 €	3.000.000 €	3.500.000 €	4.000.000 €
800kW	2.700.000 €	3.200.000 €	3.700.000 €	4.200.000 €
1000kW	2.900.000 €	3.400.000 €	3.900.000 €	4.400.000 €
1200kW	3.100.000 €	3.600.000 €	4.100.000 €	4.600.000 €
1400kW	3.300.000 €	3.800.000 €	4.300.000 €	4.800.000 €
1600kW	3.500.000 €	4.000.000 €	4.500.000 €	5.000.000 €

5.3. Sistema Actual

Inicialmente reproduziu-se o sistema energético actual para comparar resultados. Foi utilizado o simulador descrito anteriormente mas sem a componente da nova central hidroeléctrica e sem introduzir novos aerogeradores. Será analisado o desenvolvimento económico mantendo o sistema electroprodutor actual com uma política de não investir em novos elementos de produção.

O cálculo do custo nivelado de electricidade transforma-se em apenas uma fracção entre despesas de combustível anuais e energia consumida. A evolução deste indicador está disponível na figura 5.1.

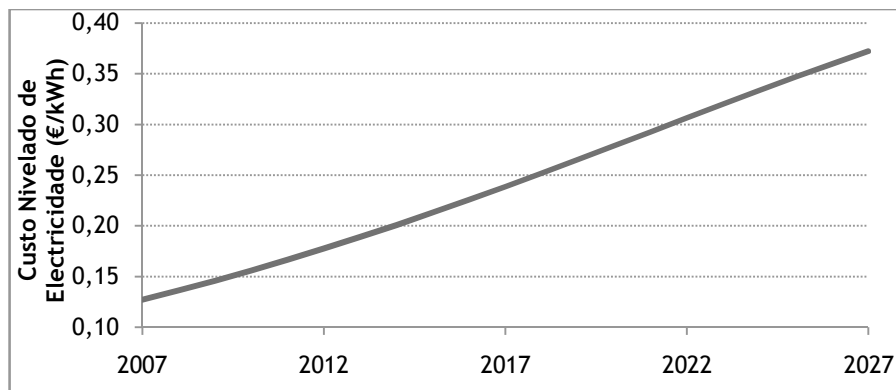


Figura 5.1 - Evolução do CNE com o sistema actual (€/kWh).

Observa-se um aumento quase linear do CNE devido ao aumento do custo do combustível e à necessidade crescente da utilização dos grupos Diesel face ao acréscimo do consumo.

A tabela 5.2 indica os valores de volume e despesa em combustível utilizado durante os próximos 20 anos.

Tabela 5.2 - Valores nos próximos 20 anos com sistema actual.

Resultados	
Volume Combustível Usado (L)	52.464.937
Despesa em Combustível (€)	83.759.596

5.4. Sistema Híbrido Expansão-Eólica

Para cada ano foi simulado o aumento de produção eólica no sistema actual. Os resultados retornam um percurso óptimo de aerogeradores a construir ao longo do tempo de modo a seguir o CNE mínimo. Esta distribuição do CNE em função dos aerogeradores e anos encontra-se no anexo A.1. O sistema óptimo obtido, ou seja, o percurso do mínimo do CNE, segue a construção de aerogeradores ao longo dos anos descrita na tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Distribuição óptima da construção de aerogeradores no sistema Expansão-Eólica.

Ano	AG a Construir
2007	2
2008	0
2009	0
2010	1
2011	1
2012	0
2013	1
2014	1
2015	0
2016	1
2017	2
2018	0
2019	1
2020	1
2021	1
2022	1
2023	2
2024	1
2025	2
2026	2
2027	1
Total	21

Verifica-se que, para seguir o CNE mínimo, logo em 2007 deveriam estar instaladas mais duas máquinas para além das duas existentes. Durante o tempo de vida analisado, a progressão óptima indica a inserção no sistema de 21 aerogeradores.

Seguindo esta distribuição obtém-se o seguinte desenvolvimento do CNE indicado na figura 5.2. Também se observa a evolução deste valor para o sistema actual de modo a comparar resultados.

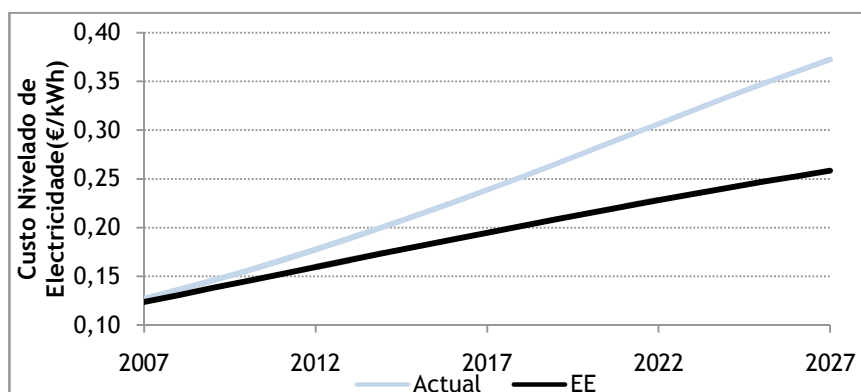


Figura 5.2 - Comparação entre sistema actual e Expansão-Eólica.

Observa-se que, logo desde o início, o sistema Expansão-Eólica tem um CNE mais reduzido e ao longo dos anos esta diferença torna-se mais evidente.

A comparação entre os somatórios do CNE do sistema actual e o Expansão-Eólica é demonstrada na tabela 5.4 e na figura 5.3.

Tabela 5.4 - Variação do somatório do CNE entre sistema actual e Expansão-Eólica (€/kWh).

Resultados	
Sistema actual	5,11
Sistema híbrido Expansão-Eólico	4,06

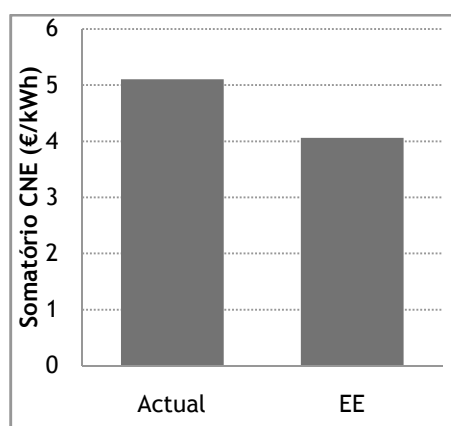


Figura 5.3 - Comparação do somatório do CNE entre sistema actual e Expansão-Eólica.

Analisando a figura 5.3 constata-se que a instalação gradual de aerogeradores diminui a progressão do CNE, obtendo um somatório inferior.

A tabela 5.5 indica os valores de volume e despesa de combustível utilizado durante os próximos 20 anos assim como a poupança em relação ao sistema actual.

Tabela 5.5 - Valores nos próximos 20 anos com sistema EE.

Resultados	
Volume combustível usado (L)	35.218.891
Despesa em combustível (€)	54.645.253
Poupança de combustível em relação ao sistema actual (L)	17.246.046
Poupança económica em relação ao sistema actual (€)	29.114.343

Verifica-se que o investimento apenas em aerogeradores é economicamente atractivo permitindo uma poupança em combustível de 29,1 milhões de euros em 20 anos. Este processo de investimentos proporciona uma diminuição de aproximadamente 20% na dependência de combustíveis fósseis.

5.5. Sistema Híbrido Eólico-Hidro-Bombagem

Introduzindo a nova central hidroelétrica, perfaz-se assim o sistema híbrido Eólico-Hidro-Bombagem.

As simulações foram efectuadas de modo a permitir analisar anualmente, sistemas híbridos com variações nos parâmetros indicados na tabela 5.6.

Tabela 5.6 - Intervalos utilizados para a simulação do EHB.

Parâmetros da Simulação		
Valor inicial de aerogeradores	2	
Valor final de aerogeradores	25	
Potência inicial	600	kW
Passo da potência da Hidro2	200	kW
Valor máximo da potência a simular	1600	kW
Volume inicial do reservatório	30.000.000	L
Passo do volume do reservatório	30.000.000	L
Volume máximo do reservatório	120.000.000	L

Para cada valor de volume de reservatório vão ser apresentados os resultados dos somatórios do CNE para cada potência.

5.5.1. Eólico-Hidro-Bombagem com Reservatório de 30.000.000 Litros

A figura 5.4 e a tabela 5.7 indicam os resultados obtidos para os diferentes sistemas com um reservatório de 30.000.000 litros.

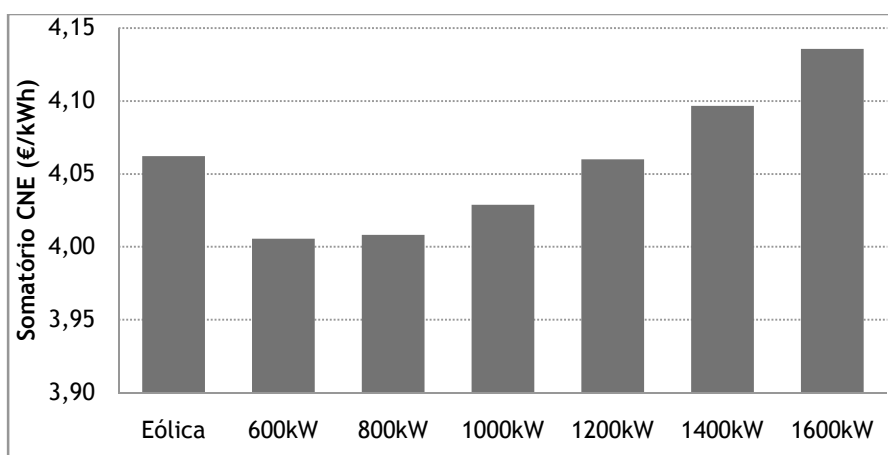


Figura 5.4 - Somatório CNE com Reservatório de 30.000.000 L.

Tabela 5.7 - Somatório CNE com Reservatório de 30.000.000 L (€/kWh).

Resultados	
Sistema	€/kWh
EE	4,062
600kW	4,005
800kW	4,008
1000kW	4,029
1200kW	4,060
1400kW	4,097
1600kW	4,136

Neste tipo de sistema híbrido, obtém-se melhores resultados do que o Expansão-Eólica para potências inferiores a 1400 kW. O volume de reservatório é demasiado pequeno, não permitindo o armazenamento de grandes quantidades de água, logo não é viável instalar um grupo gerador de elevada potência. A potência ideal para este caso é 600 kW porque com um reservatório tão reduzido não vale a pena inserir grupos geradores superiores que envolvam elevados caudais de água.

A potência ideal para este valor de reservatório é a mínima simulada. É possível que a potência ideal se encontre abaixo deste valor, no entanto, analisando a progressão de valores na figura 5.4, os resultados para uma potência de 800 kW são semelhantes aos da de 600 kW. Logo, o valor do somatório não deverá variar muito para potências inferiores e não será necessário simular para esses valores. É mais importante analisar o aumento do tamanho do reservatório para garantir uma armazenagem de energia mais elevada.

Verifica-se que o CNE do sistema Expansão-Eólica é mais elevado. O aumento constante de aerogeradores provoca um aumento de produção eólica e também altos valores de excesso de energia. Com a introdução de um aproveitamento hídrico com bombagem, mesmo que este seja bastante dispendioso, torna-se rentável aproveitar esse excesso de energia. Isto é verificado pela redução do somatório do CNE.

5.5.2. Eólico-Hidro-Bombagem com Reservatório de 60.000.000 Litros

A figura 5.5 e a tabela 5.8 indicam os resultados obtidos para os diferentes sistemas com um reservatório de 60.000.000 litros.

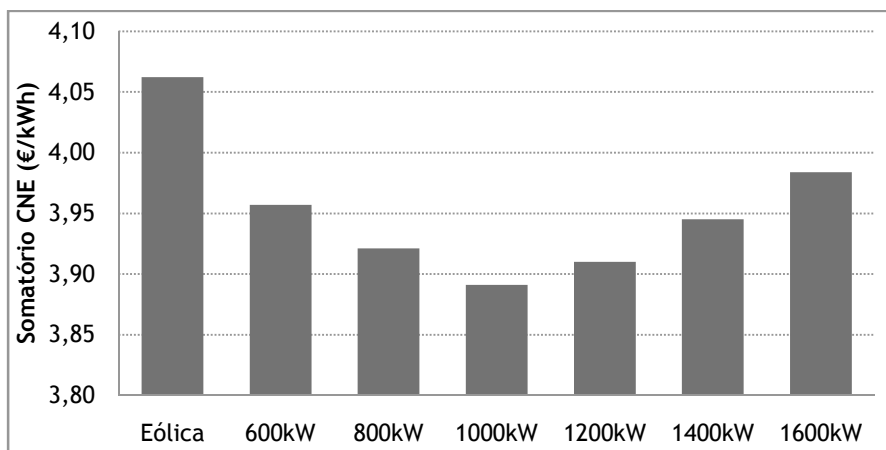


Figura 5.5 - Somatório CNE com Reservatório de 60.000.000 L.

Tabela 5.8 - Somatório CNE com Reservatório de 60.000.000 L (€/kWh).

Resultados	
Sistema	€/kWh
EE	4,062
600kW	3,957
800kW	3,921
1000kW	3,891
1200kW	3,910
1400kW	3,945
1600kW	3,984

O aumento do volume do reservatório diminui o CNE devido à utilização de maiores reservas de água. Verifica-se que, aumentando o reservatório também se torna viável a utilização de grupos de maior potência. Neste caso, a potência ideal a instalar é 1MW.

5.5.3. Eólico-Hidro-Bombagem com Reservatório de 90.000.000 Litros

A figura 5.6 e a tabela 5.9 indicam os resultados obtidos para os diferentes sistemas com um reservatório de 90.000.000 litros.

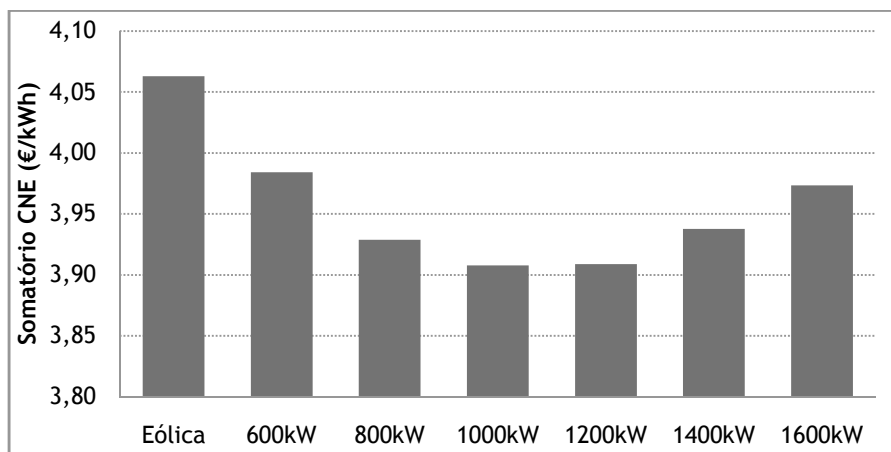


Figura 5.6 - Somatório CNE com Reservatório de 90.000.000 L.

Tabela 5.9 - Somatório CNE com Reservatório de 90.000.000 L (€/kWh).

Resultados	
Sistema	€/kWh
EE	4,062
600kW	3,984
800kW	3,929
1000kW	3,908
1200kW	3,909
1400kW	3,938
1600kW	3,973

Neste caso, o aumento do volume de reservatório piora os resultados. O investimento num depósito deste tamanho não se torna viável em comparação com o de 60.000.000 litros.

Verifica-se também que embora a potência ótima seria de 1 MW, os valores do CNE da de 1,2 MW não diferem muito. Com o aumento do reservatório aumenta também a potência ótima a instalar.

5.5.4. Eólico-Hidro-Bombagem com Reservatório de 120.000.000 Litros

Embora os resultados com 90.000.000 de litros tenham piorado em relação ao de 60.000.000 litros, existe uma possibilidade de que a instalação de um grupo com potência elevada combinado com um reservatório de grande capacidade, traduza melhores resultados. A figura 5.7 e a tabela 5.10 indicam os resultados obtidos para os diferentes sistemas com um reservatório de 120.000.000 litros.

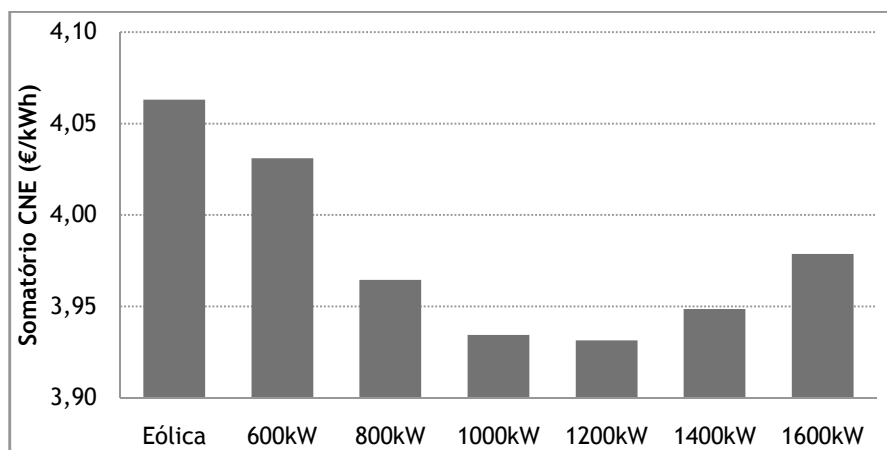


Figura 5.7 - Somatório CNE com Reservatório de 120.000.000 L.

Tabela 5.10 - Somatório CNE com Reservatório de 120.000.000 L (€/kWh).

Resultados	
Sistema	€/kWh
EE	4,062
600kW	4,031
800kW	3,965
1000kW	3,935
1200kW	3,932
1400kW	3,949
1600kW	3,979

O aumento do reservatório para 120 milhões de litros influencia negativamente os resultados. O excesso de energia obtido ao longo do tempo de vida deste sistema não é suficiente para justificar um investimento desta magnitude.

O aumento do tamanho do reservatório já indica que a instalação ótima seria de 1,2 MW, permitindo assim trabalhar com elevados caudais e reservas de água. Contudo o melhor sistema continua a ser o de 60.000.000 litros.

5.6. Solução Óptima

O sistema híbrido com o valor mínimo do somatório dos CNE encontrado foi o Eólico-Hidro-Bombagem com uma central hidroeléctrica de 1MW e um reservatório de 60.000.000 litros.

A distribuição de investimento nos aerogeradores a seguir ao longo dos anos é descrita na tabela 5.11. A variação do CNE encontra-se no anexo A.2.

Tabela 5.11 - Distribuição óptima da construção de aerogeradores no sistema EHB.

Ano	AG a Construir
2007	3
2008	1
2009	0
2010	1
2011	0
2012	1
2013	1
2014	0
2015	1
2016	1
2017	1
2018	1
2019	1
2020	1
2021	1
2022	1
2023	1
2024	2
2025	1
2026	1
2027	2
Total	22

Para atingir o sistema óptimo é necessário acrescentar 22 aerogeradores ao sistema eléctrico nos próximos 20 anos.

Na figura 5.8 é possível observar a comparação entre o sistema actual, o Expansão-Eólica e o Eólico-Hidro-Bombagem.

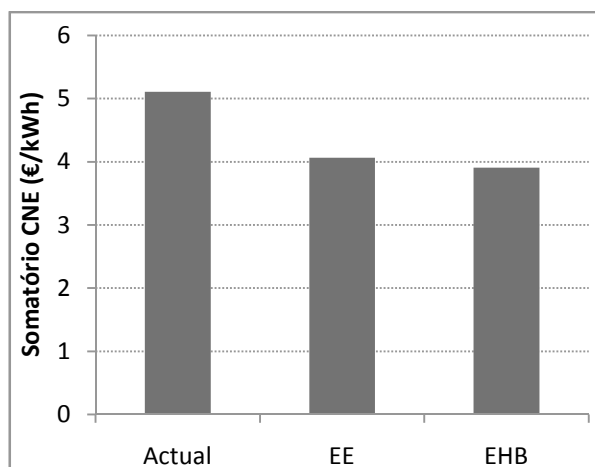


Figura 5.8 - Comparação do somatório do CNE entre o sistema actual, EE e EHB.

Verifica-se que o sistema óptimo EHB apenas introduz uma ligeira melhoria em relação ao EE.

A tabela 5.12 indica os valores de volume e despesa em combustível utilizado durante os próximos 20 anos assim como a poupança em relação ao sistema actual.

Tabela 5.12 - Valores nos próximos 20 anos com sistema EHB.

Resultados	
Volume combustível usado (L)	27.427.551
Despesa em combustível (€)	42.468.118
Poupança de combustível em relação ao sistema actual (L)	25.037.386
Poupança económica em relação ao sistema actual (€)	41.291.478

Em termos de análise por CNE, ou seja, considerando custos de investimento, o sistema Eólico-Hidro-Bombagem não introduz grande melhoria perante o Expansão-Eólica. Contudo, este sistema permite diminuir a dependência de combustíveis fósseis em 31% enquanto que o Expansão-Eólica só atinge os 20%. Com um objectivo de minimizar esta dependência, este sistema é preferível.

5.7. Solução Ideal

Considerando a análise pelo CNE, a diferença entre os sistemas Expansão-Eólica e Eólico-Hidro-Bombagem não é muito significativa. A figura 5.9 retrata a evolução do CNE ao longo dos anos.

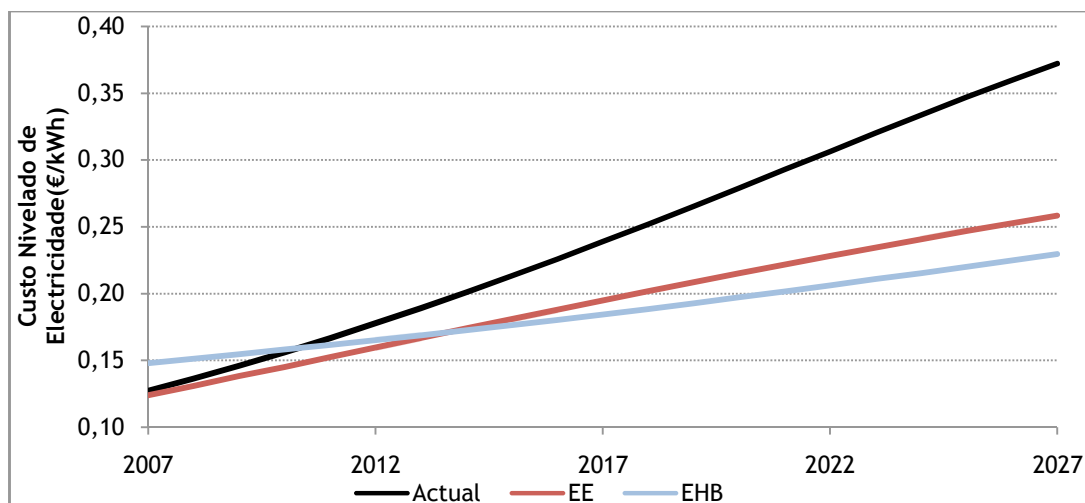


Figura 5.9 - Evolução do CNE do sistema actual, EE e EHB.

Verifica-se pela comparação na figura 5.9 que o Eólico-Hidro-Bombagem apenas se torna rentável num futuro longínquo. Para um futuro próximo o Expansão-Eólica é o ideal.

Analisando o desenvolvimento nos CNE de cada sistema, verifica-se que se torna essencial investir imediatamente em produção eólica.

Quanto à possibilidade de instalar um sistema híbrido Eólico-Hidro-Bombagem, apenas é necessário a partir de 2013. Por essa altura, os consumos serão mais elevados, incitando maiores níveis de produção e permitindo a necessidade de um investimento num sistema deste tipo.

A solução óptima passa então pela conjugação de dois sistemas híbridos. Até 2013 opta-se pela progressão oferecida pelo sistema Expansão-Eólica e a partir dessa altura entra em vigor o sistema Eólico-Hidro-Bombagem.

A progressão final da construção de aerogeradores desta solução tem a distribuição demonstrada na tabela 5.13.

Tabela 5.13 - Distribuição óptima da construção de aerogeradores com a junção dos dois sistemas.

Ano	AG a Construir
2007	2
2008	0
2009	0
2010	1
2011	1
2012	0
2013	1
2014	3
2015	0
2016	1
2017	2
2018	0
2019	1
2020	1
2021	1
2022	2
2023	1
2024	1
2025	1
2026	2
2027	1
Total	22

A junção dos dois sistemas traduz uma necessidade de instalar 22 aerogeradores.

Na figura 5.10 é possível observar a comparação entre o sistema Eólico-Hidro-Bombagem e o sistema ideal que corresponde à junção dos dois sistemas.

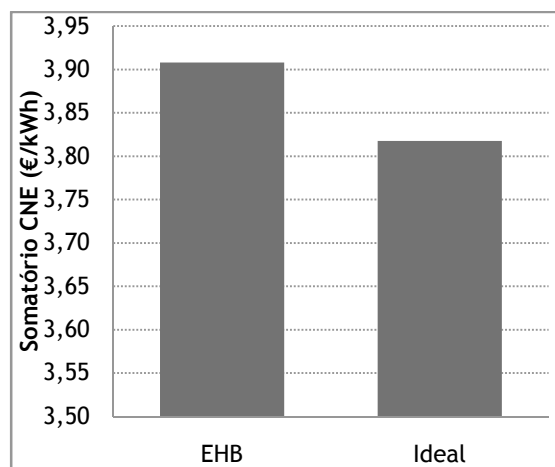


Figura 5.10 - Comparação do somatório do CNE entre o sistema EHB e o ideal.

Verifica-se uma descida no somatório do CNE ao juntar os dois sistemas.

A tabela 5.14 indica os valores de volume e despesa em combustível utilizado durante os próximos 20 anos assim como a poupança em relação ao sistema actual.

Tabela 5.14 - Valores nos próximos 20 anos com a junção dos dois sistemas.

Resultados	
Volume combustível usado (L)	29.008.335
Despesa em combustível (€)	44.265.125
Poupança de combustível em relação ao sistema actual (L)	23.456.602
Poupança económica em relação ao sistema actual (€)	39.494.471

Instalar a Hidro2 em 2013 obriga o sistema a consumir mais combustível, no entanto, num ponto de vista económico, é preferível. Se o objectivo for a minimização do consumo de combustível ou das emissões de gases de estufa, optava-se por construir a central hidroeléctrica imediatamente. Contudo, tomando uma perspectiva económica, o ideal passa por construir o sistema EHB apenas em 2013.

A potência ideal otimizada por este estudo foi atingida utilizando um espectro temporal entre 2007 e 2027. No ano 2013, quando deverá ser instalada a nova central hidroeléctrica, o processo de dimensionamento da potência deverá ser efectuado outra vez considerando uma janela temporal de 2013 a 2033 (ocupando o tempo de vida da central). Nessa altura, como os consumos estarão inflacionados, prevê-se que a potência óptima a instalar será superior à obtida neste estudo. Este cálculo não foi contemplado neste momento porque estaríamos a usar uma previsão de valores de consumo muito longínqua e já com um erro inaceitável. Em 2013, deverá ser efectuada uma previsão para os seguintes 20 anos, como neste estudo, para determinar o sistema ideal.

5.8. Solução Real

A conclusão apresentada no ponto anterior é considerada a ideal se for viável o aumento de produção eólica em cada ano. Na realidade, a construção de aerogeradores tão dispersa torna-se inviável devido à necessidade de alterações nas máquinas de ligação à rede o que traduz custos inaceitáveis.

A solução a tomar é aglomerar um número de aerogeradores obtidos na distribuição óptima obtida e construir parques eólicos ao longo dos anos. A solução ideal determinada foi a construção de 4 parques nas alturas demonstradas na tabela 5.15.

Tabela 5.15 - Distribuição dos parques eólicos a construir.

Ano	AG a Construir
2007	3
2013	5
2018	5
2023	6
Total	19

Durante os 6 anos iniciais que se pretende utilizar o sistema Expansão-Eólica, o parque a construir é constituído por 3 aerogeradores.

O segundo e terceiro parque deverão ser constituídos por 5 aerogeradores cada um e instalados em 2013 e 2018 respectivamente.

Por fim dimensionou-se a construção de um parque eólico de 6 aerogeradores a ser instalado em 2023.

Esta distribuição foi atingida utilizando a variação do CNE da junção dos dois sistemas. A distribuição dos parques eólicos encontra-se no anexo B.4.

Na figura 5.11 é possível verificar a variação do somatório do CNE entre o sistema ideal e real.

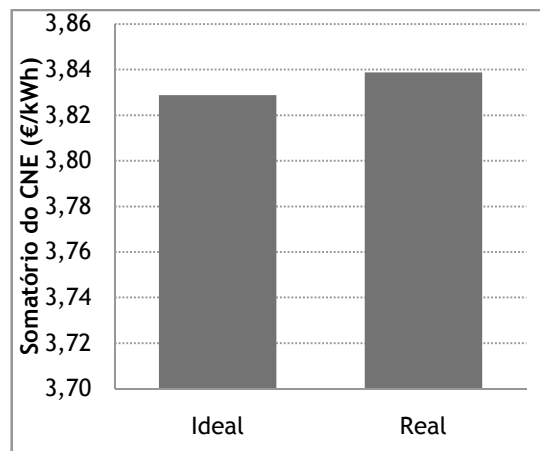


Figura 5.11 - Comparação do somatório do CNE entre o sistema ideal e o real.

Esta necessidade de aglomerar aerogeradores em parques eólicos piora ligeiramente os resultados por se afastar do percurso do óptimo.

A tabela 5.16 indica os valores de quantidade e despesa em combustível utilizado durante os próximos 20 anos assim como a poupança em relação ao sistema actual.

Tabela 5.16 - Valores nos próximos 20 anos com o sistema real.

Resultados	
Volume Combustível Usado (L)	29.050.262
Despesa em Combustível (€)	44.414.548
Poupança de Combustível em relação ao sistema actual (L)	23.414.674
Poupança Económica em relação ao sistema actual (€)	39.345.047

O sistema final a implementar permite poupar aproximadamente 23,4 milhões de litros de combustível e consequentemente 39,3 milhões de euros ao longo de 20 anos. A dependência dos combustíveis fósseis é diminuída em 29%.

A figura 5.12 demonstra a evolução do CNE do sistema real.

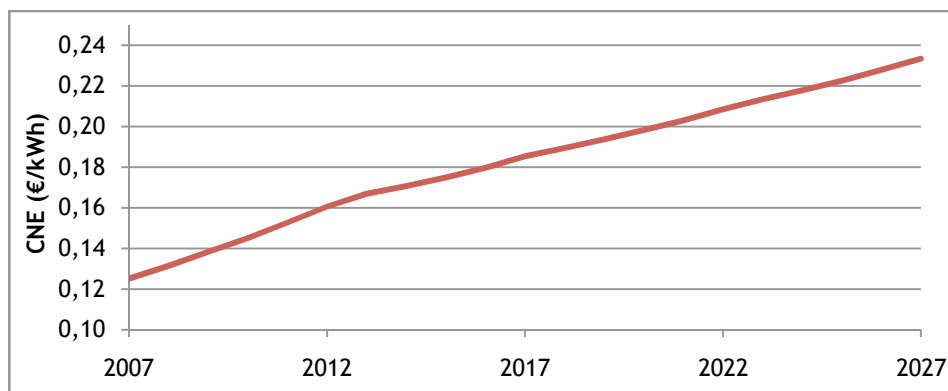


Figura 5.12 - Evolução do CNE do sistema real.

Na figura 5.12 verifica-se que o aumento do CNE ao fim de 20 anos não atinge os 0,24 €/kWh enquanto que com o sistema actual, por esta altura o CNE estaria em 0,37 €/kWh.

Na figura 5.13 é possível verificar a comparação da evolução do consumo de combustível entre o sistema actual e o real.

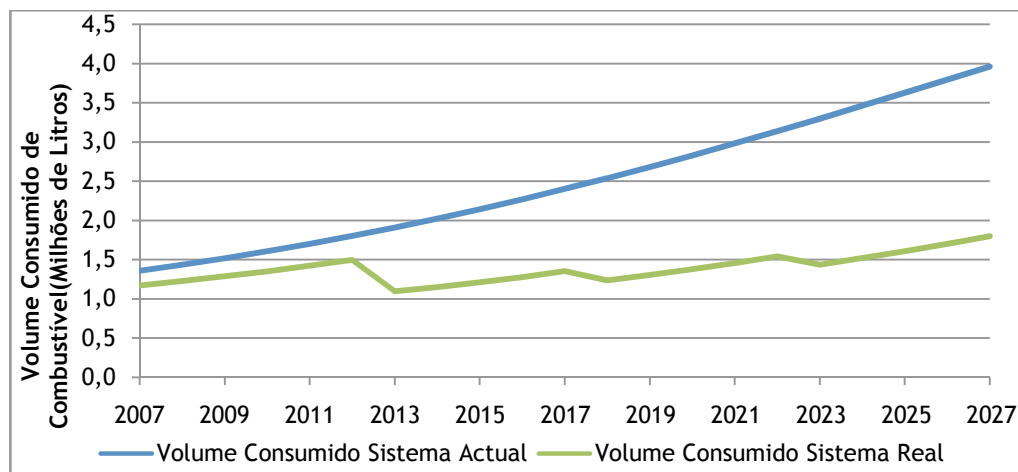


Figura 5.13 - Comparação da evolução do consumo de combustível entre o sistema actual e o real.

Por fim, verifica-se que com a implementação deste plano de investimentos é possível reduzir drasticamente o consumo futuro de combustíveis fósseis. A queda no ano 2013 representa a introdução da central hidroeléctrica no sistema.

Capítulo 6

Conclusões e Trabalhos Futuros

A presente dissertação prova a diminuição da dependência energética de pequenas ilhas com a introdução de sistemas híbridos de energia.

O simulador implementado permitiu a introdução de novos aerogeradores (sistema híbrido Expansão-Eólica) e adicionar a esse sistema, uma central hidroeléctrica (sistema híbrido Eólico-Hidro-Bombagem).

Foi efectuado um dimensionamento que colmata as falhas existentes nos simuladores do mercado quando estes são utilizados para sistemas de elevada produção, nomeadamente os valores estacionários dos níveis de consumo e preços de combustível.

A análise de resultados anual durante o tempo de vida dos componentes a simular verificou-se interessante de modo a permitir a planificação do investimento do sistema a instalar. Foi possível observar para cada sistema a progressão óptima ao longo do tempo do número de aerogeradores a instalar.

O sistema eléctrico actual provoca um aumento insustentável nas despesas de exploração devido ao aumento do custo do combustível e à necessidade crescente da utilização dos grupos Diesel face ao acréscimo do consumo. Esta situação estimula uma necessidade de desenvolver novas soluções.

Concluiu-se que, o investimento imediato no sistema Expansão-Eólica é viável e ao longo dos anos esta diferença torna-se mais evidente. O investimento neste sistema permite uma poupança em combustível de 29,1 milhões de euros em 20 anos. Este processo de investimentos proporciona uma diminuição de aproximadamente 20% na dependência de combustíveis fósseis.

A simulação de um Eólico-Hidro-Bombagem demonstrou ainda melhores resultado do que o Expansão-Eólica. Mesmo sendo um investimento intensivo na nova central hidroeléctrica e reservatório artificial, a possibilidade de armazenar o excesso de energia proveniente da produção eólica provou-se economicamente viável.

Em termos de análise por CNE, o sistema Eólico-Hidro-Bombagem não introduz grande melhoria perante o Expansão-Eólica. Contudo, este sistema permite diminuir a dependência

de combustíveis fósseis em 31% enquanto que a Expansão-Eólica só atinge os 20%. Com um objectivo de minimizar esta dependência, este sistema é preferível.

As simulações com reservatórios reduzidos, permitiram verificar que não é necessário inserir grupos geradores de potência elevada que envolvam grandes caudais de água. Com o aumento do reservatório aumenta também a potência ótima a instalar. No entanto, aumentando estas características também aumenta o custo de investimento e afecta a viabilidade económica do sistema.

As características dimensionadas para o Eólico-Hidro-Bombagem ótimo incluem um grupo gerador de 1MW e um reservatório de 60.000.000 litros.

A análise da evolução do CNE para cada sistema ao longo dos anos tornou-se muito importante. Isto possibilitou verificar que um investimento no Eólico-Hidro-Bombagem não é necessário de imediato. Um investimento desta magnitude apenas é viável a partir de 2013 onde tanto o consumo como o preço dos combustíveis serão mais elevados. Esta conclusão foi determinada pelo ponto de intersecção do CNE entre a Expansão-Eólica e o Eólico-Hidro-Bombagem.

Concluiu-se que a solução ótima obtida passa pela conjugação de dois sistemas híbridos. Até 2013 optou-se pela progressão oferecida pelo sistema Expansão-Eólica e a partir dessa altura entra em vigor o sistema Eólico-Hidro-Bombagem.

Instalar a Hidro2 em 2013 obriga o sistema a consumir mais combustível, aumentando os custos variáveis, no entanto, num ponto de vista económico, ou seja, incluindo os custos fixos, esta hipótese é preferível. Se o objectivo for a minimização do consumo de combustível ou das emissões de gases de estufa, optava-se por construir a central hidroelétrica imediatamente. Contudo, tomando uma perspectiva económica, o ideal passa por construir o sistema Eólico-Hidro-Bombagem apenas em 2013.

Deste modo a central Hidro2 é construída numa altura em que pode ser mais importante. Se esta fosse instalada no início, estaria a ser subaproveitada e durante esse tempo estaria a degradar-se.

Como a construção individual de aerogeradores não é viável, estes, foram agrupados em parques eólicos de modo a serem construídos ao longo de 20 anos. A solução ideal determinada foi a construção de 4 parques, em que o primeiro deverá ser instalado imediatamente e os outros 3 em 2013, 2018 e 2023, respectivamente.

O sistema final dimensionado permite uma redução da utilização de 23,4 milhões de litros de combustível e consequentemente 39,3 milhões de euros ao longo de 20 anos. A dependência dos combustíveis fósseis é diminuída em 29%.

Estes resultados demonstram que a coligação entre diferentes sistemas de produção renovável e armazenamento de energia são um método interessante de um ponto de vista económico, energético e ambiental. Exemplificam medidas que têm de ser tomadas para desenvolver um fornecimento de energia seguro, acessível e ambientalmente consciente.

O dimensionamento dos sistemas híbridos foi atingido com a enumeração das diferentes possibilidades de configurações. Isto provocou uma elevada quantidade de tempo para atingir o sistema óptimo. Seria interessante, como trabalhos futuros, utilizar inteligência computacional, para diminuir a tempo de optimização. Deste modo é possível considerar um intervalo de parâmetros a simular muito superior resultando num espectro de resultados mais abrangente.

Outra alteração a fazer a esta ferramenta é a análise do despacho para uma janela de operação, admitindo que existem custos não lineares nos geradores Diesel. Assim, é possibilitada a optimização de custos na geração Diesel com o armazenamento de água e não apenas para aproveitar o excesso de energia.

A integração da análise de fiabilidade do sistema e a inclusão da rede eléctrica introduziam um progresso considerável. Atribuindo taxas de avarias aos componentes é possível efectuar um cálculo da energia não fornecida enriquecendo a análise global.

Referências

- [1] Estratégia Nacional de Desenvolvimento Sustentável, disponível em: <http://www.desenvolvimentosustentavel.pt>, último acesso em Dezembro de 2008.
- [2] Conselho Empresarial para o Desenvolvimento Sustentável - BCSD Portugal, “*Energia para um futuro sustentável*”, 2008.
- [3] Global Sustainable Energy Islands Initiative, disponível em: <http://www.gseii.org>, último acesso em Fevereiro de 2009.
- [4] Massachusetts Institute of Technology - Portugal, disponível em <http://www.mitportugal.org/event-news/mit-portugal-energy-faculty-promote-green-islands-project-at-azores-conference.html>, último acesso em Fevereiro de 2009.
- [5] C. Monteiro, “*Sistemas Híbridos*”, apontamentos de Produção Dispersa, 2008
- [6] G. C. Seeling-Hochmuth, “*A combined optimisation concept for the design and operation strategy of hybrid-PV energy systems*”, Janeiro 1997.
- [7] Hybrid Optimization Model for Electric Renewables (HOMER) - The optimization model for distributed power, disponível em: www.nrel.gov/homer, último acesso em Dezembro de 2008.
- [8] Hybrid Optimization by Genetic Algorithms (HOGA), disponível em: <http://www.hidrogenoaragon.org>, último acesso em Dezembro de 2008.
- [9] R. Dufo-López, J. Bernal-Agustín, “*HOGA User Manual Version 1.92*”, Department of Electrical Engineering University of Saragossa, Maio 2007.
- [10] V. Miranda, “*Computação Evolucionária - Uma Introdução*”, Março 2005.
- [11] Instituto nacional de estatística, disponível em <http://www.ine.pt>, último acesso em Dezembro de 2008.

- [12] Instituto de meteorologia, disponível em <http://www.meteo.pt>, último acesso em Dezembro de 2008.
- [13] RETScreen International, disponível em <http://www.etscreen.net>, último acesso em Dezembro de 2008.
- [14] Caracterização das redes de transporte e distribuição de energia eléctrica da região autónoma dos Açores, situação em 31 de Dezembro de 2007, disponível em <http://www.eda.pt>, último acesso em Outubro de 2008.
- [15] Electricidade dos Açores, disponível em <http://www.eda.pt/producao.php>, último acesso em Dezembro de 2008.
- [16] Wind turbines and wind farms database, disponível em <http://www.thewindpower.net/wind-turbine-datasheet-technical-216-enercon-e30.php>, último acesso em Dezembro de 2008.
- [17] Portal das Energias Renováveis, disponível em <http://www.energiasrenovaveis.com>, último acesso em Dezembro de 2008.
- [18] Relatório e Contas 2007, Electricidade dos Açores, disponível em <http://www.eda.pt/imprensa.php>, último acesso em Outubro de 2008.
- [19] Informação Estatística 2007, Electricidade dos Açores, disponível em <http://www.eda.pt/imprensa.php>, último acesso em Outubro de 2008.
- [20] Electricidade dos Açores, disponível em <http://www.eda.pt/transporte.php>, último acesso em Dezembro de 2008.
- [21] Base de dados de Hybrid Optimization Model for Electric Renewables (HOMER), disponível em: www.nrel.gov/homer, último acesso em Dezembro de 2008.
- [22] Caterpillar, disponível em: <http://www.cat.com/cda/components/securedFile/displaySecuredFileServletJSP?x=7&fileId=699079>, último acesso em Fevereiro de 2009.
- [23] Caterpillar, <http://www.cat.com/cda/components/securedFile/displaySecuredFileServletJSP?x=7&fileId=698730>, último acesso em Fevereiro de 2009.

Anexo A

Distribuição do CNE

Este anexo contém os resultados dos custos nivelados de electricidade para cada sistema. Verifica-se a alteração deste valor em função do tempo e número de aerogeradores implementados. No fundo de cada tabela encontra-se o valor mínimo de cada ano conforme o número de aerogeradores instalados. Este valor indica o percurso óptimo a seguir.

Para facilitar a observação dos resultados, quanto menor é o valor em cada coluna, a célula passa de escura para clara. A progressão óptima é indicada pelo caminho branco.

A.1 - Sistema Expansão-Eólica

Tabela A.1 - Distribuição do CNE com o sistema EE (€/kWh).

AG	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
2	0,1272	0,1364	0,1459	0,1559	0,1666	0,1778	0,1891	0,2009	0,2132	0,2257	0,2388	0,2520	0,2653	0,2790	0,2928	0,3064	0,3201	0,3337	0,3470	0,3598	0,3722
3	0,1240	0,1319	0,1402	0,1490	0,1584	0,1681	0,1781	0,1886	0,1998	0,2113	0,2231	0,2354	0,2482	0,2611	0,2746	0,2878	0,3014	0,3152	0,3286	0,3419	0,3546
4	0,1238	0,1308	0,1381	0,1460	0,1543	0,1629	0,1720	0,1813	0,1910	0,2012	0,2121	0,2231	0,2348	0,2469	0,2592	0,2718	0,2844	0,2977	0,3107	0,3240	0,3371
5	0,1251	0,1315	0,1381	0,1450	0,1527	0,1606	0,1687	0,1771	0,1859	0,1953	0,2051	0,2150	0,2255	0,2363	0,2477	0,2594	0,2712	0,2833	0,2956	0,3078	0,3205
6	0,1272	0,1331	0,1392	0,1456	0,1525	0,1596	0,1673	0,1750	0,1832	0,1916	0,2007	0,2099	0,2194	0,2294	0,2396	0,2503	0,2613	0,2723	0,2839	0,2952	0,3066
7	0,1298	0,1353	0,1409	0,1468	0,1532	0,1598	0,1667	0,1741	0,1815	0,1896	0,1978	0,2064	0,2154	0,2245	0,2341	0,2439	0,2542	0,2645	0,2750	0,2857	0,2963
8	0,1328	0,1378	0,1430	0,1485	0,1544	0,1606	0,1670	0,1739	0,1809	0,1883	0,1962	0,2043	0,2126	0,2212	0,2301	0,2393	0,2488	0,2585	0,2685	0,2784	0,2885
9	0,1361	0,1407	0,1455	0,1506	0,1561	0,1618	0,1679	0,1742	0,1810	0,1878	0,1952	0,2029	0,2108	0,2188	0,2273	0,2360	0,2449	0,2540	0,2634	0,2728	0,2823
10	0,1395	0,1438	0,1483	0,1530	0,1581	0,1634	0,1691	0,1750	0,1813	0,1878	0,1949	0,2019	0,2095	0,2172	0,2252	0,2335	0,2420	0,2507	0,2596	0,2684	0,2774
11	0,1432	0,1471	0,1512	0,1557	0,1603	0,1653	0,1706	0,1762	0,1822	0,1883	0,1948	0,2017	0,2087	0,2161	0,2237	0,2316	0,2397	0,2479	0,2564	0,2649	0,2735
12	0,1470	0,1506	0,1544	0,1585	0,1628	0,1675	0,1724	0,1776	0,1832	0,1890	0,1953	0,2018	0,2085	0,2154	0,2227	0,2302	0,2379	0,2459	0,2540	0,2620	0,2703
13	0,1510	0,1542	0,1577	0,1614	0,1656	0,1699	0,1744	0,1793	0,1847	0,1900	0,1959	0,2021	0,2087	0,2152	0,2219	0,2292	0,2367	0,2443	0,2520	0,2597	0,2675
14	0,1550	0,1579	0,1612	0,1646	0,1684	0,1724	0,1766	0,1811	0,1862	0,1913	0,1968	0,2028	0,2090	0,2152	0,2216	0,2285	0,2358	0,2430	0,2505	0,2579	0,2654
15	0,1591	0,1618	0,1647	0,1679	0,1713	0,1751	0,1789	0,1832	0,1879	0,1927	0,1980	0,2036	0,2095	0,2156	0,2216	0,2281	0,2350	0,2421	0,2493	0,2565	0,2637
16	0,1633	0,1657	0,1684	0,1713	0,1744	0,1779	0,1815	0,1855	0,1899	0,1943	0,1993	0,2046	0,2102	0,2160	0,2218	0,2281	0,2346	0,2414	0,2483	0,2554	0,2622
17	0,1676	0,1697	0,1721	0,1747	0,1776	0,1808	0,1841	0,1878	0,1919	0,1962	0,2008	0,2058	0,2112	0,2168	0,2222	0,2282	0,2345	0,2409	0,2476	0,2545	0,2611
18	0,1720	0,1738	0,1759	0,1782	0,1808	0,1838	0,1869	0,1903	0,1941	0,1981	0,2024	0,2072	0,2122	0,2176	0,2229	0,2285	0,2345	0,2406	0,2472	0,2537	0,2603
19	0,1764	0,1779	0,1797	0,1818	0,1841	0,1869	0,1897	0,1929	0,1963	0,2001	0,2042	0,2086	0,2135	0,2186	0,2236	0,2290	0,2348	0,2406	0,2469	0,2532	0,2595
20	0,1808	0,1820	0,1836	0,1854	0,1876	0,1900	0,1926	0,1955	0,1987	0,2022	0,2061	0,2102	0,2148	0,2197	0,2245	0,2297	0,2351	0,2408	0,2468	0,2529	0,2590
21	0,1853	0,1863	0,1876	0,1891	0,1910	0,1932	0,1956	0,1982	0,2011	0,2045	0,2080	0,2119	0,2163	0,2210	0,2256	0,2305	0,2356	0,2412	0,2469	0,2528	0,2587
22	0,1898	0,1905	0,1916	0,1929	0,1945	0,1965	0,1987	0,2010	0,2037	0,2068	0,2101	0,2137	0,2179	0,2223	0,2269	0,2314	0,2363	0,2415	0,2471	0,2526	0,2585
23	0,1943	0,1948	0,1957	0,1967	0,1980	0,1998	0,2018	0,2039	0,2063	0,2092	0,2123	0,2157	0,2196	0,2237	0,2281	0,2325	0,2372	0,2420	0,2475	0,2528	0,2584
24	0,1989	0,1992	0,1997	0,2005	0,2017	0,2032	0,2049	0,2069	0,2090	0,2117	0,2145	0,2177	0,2213	0,2253	0,2294	0,2336	0,2381	0,2427	0,2479	0,2531	0,2585
25	0,2035	0,2036	0,2038	0,2044	0,2053	0,2066	0,2081	0,2099	0,2117	0,2142	0,2168	0,2198	0,2231	0,2269	0,2308	0,2348	0,2392	0,2435	0,2485	0,2535	0,2586
Min	0,1238	0,1308	0,1381	0,1450	0,1525	0,1596	0,1667	0,1739	0,1809	0,1878	0,1948	0,2017	0,2085	0,2152	0,2216	0,2281	0,2345	0,2406	0,2468	0,2526	0,2584

A.2 - Sistema Eólico-Hidro-Bombagem Ótimo

Tabela A.2 - Distribuição CNE sistema EHB (€/kWh).

AG	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
2	0,1541	0,1623	0,1714	0,1814	0,1919	0,2027	0,2135	0,2246	0,2363	0,2481	0,2604	0,2728	0,2855	0,2985	0,3116	0,3246	0,3377	0,3507	0,3634	0,3756	0,3875
3	0,1471	0,1538	0,1610	0,1693	0,1781	0,1876	0,1977	0,2086	0,2200	0,2317	0,2436	0,2557	0,2680	0,2804	0,2933	0,3059	0,3189	0,3322	0,3450	0,3578	0,3699
4	0,1434	0,1487	0,1548	0,1613	0,1689	0,1770	0,1854	0,1947	0,2047	0,2152	0,2266	0,2385	0,2509	0,2634	0,2761	0,2889	0,3015	0,3144	0,3270	0,3398	0,3524
5	0,1422	0,1464	0,1513	0,1566	0,1628	0,1696	0,1768	0,1847	0,1931	0,2024	0,2127	0,2233	0,2346	0,2461	0,2585	0,2714	0,2841	0,2969	0,3099	0,3224	0,3352
6	0,1426	0,1463	0,1500	0,1543	0,1592	0,1649	0,1714	0,1781	0,1855	0,1935	0,2021	0,2113	0,2214	0,2321	0,2434	0,2554	0,2676	0,2796	0,2924	0,3052	0,3177
7	0,1445	0,1475	0,1506	0,1540	0,1579	0,1625	0,1678	0,1736	0,1801	0,1874	0,1950	0,2032	0,2121	0,2215	0,2313	0,2419	0,2534	0,2651	0,2770	0,2892	0,3010
8	0,1473	0,1496	0,1521	0,1550	0,1582	0,1620	0,1664	0,1713	0,1769	0,1831	0,1901	0,1975	0,2052	0,2138	0,2229	0,2325	0,2424	0,2530	0,2638	0,2753	0,2869
9	0,1502	0,1521	0,1543	0,1567	0,1593	0,1625	0,1663	0,1706	0,1755	0,1808	0,1870	0,1936	0,2007	0,2081	0,2163	0,2252	0,2345	0,2441	0,2541	0,2644	0,2750
10	0,1536	0,1551	0,1568	0,1588	0,1612	0,1637	0,1669	0,1706	0,1749	0,1797	0,1854	0,1912	0,1975	0,2045	0,2119	0,2198	0,2282	0,2373	0,2466	0,2562	0,2660
11	0,1571	0,1583	0,1596	0,1613	0,1632	0,1655	0,1682	0,1713	0,1751	0,1792	0,1843	0,1899	0,1957	0,2020	0,2087	0,2162	0,2238	0,2320	0,2407	0,2495	0,2587
12	0,1609	0,1617	0,1627	0,1640	0,1656	0,1674	0,1697	0,1725	0,1757	0,1795	0,1839	0,1889	0,1944	0,2002	0,2065	0,2133	0,2205	0,2282	0,2362	0,2445	0,2531
13	0,1649	0,1654	0,1662	0,1670	0,1683	0,1698	0,1716	0,1739	0,1769	0,1802	0,1842	0,1885	0,1937	0,1990	0,2048	0,2112	0,2181	0,2252	0,2328	0,2405	0,2487
14	0,1689	0,1692	0,1696	0,1703	0,1712	0,1724	0,1738	0,1757	0,1783	0,1811	0,1848	0,1890	0,1935	0,1984	0,2036	0,2097	0,2162	0,2227	0,2299	0,2374	0,2449
15	0,1731	0,1730	0,1732	0,1736	0,1743	0,1752	0,1762	0,1779	0,1799	0,1824	0,1857	0,1894	0,1938	0,1983	0,2030	0,2085	0,2145	0,2209	0,2277	0,2347	0,2420
16	0,1774	0,1769	0,1769	0,1771	0,1774	0,1781	0,1789	0,1802	0,1820	0,1840	0,1868	0,1902	0,1941	0,1985	0,2029	0,2081	0,2136	0,2197	0,2260	0,2327	0,2394
17	0,1820	0,1811	0,1807	0,1805	0,1807	0,1811	0,1816	0,1826	0,1841	0,1860	0,1883	0,1914	0,1949	0,1989	0,2031	0,2077	0,2130	0,2186	0,2247	0,2311	0,2375
18	0,1866	0,1853	0,1846	0,1842	0,1840	0,1842	0,1845	0,1852	0,1865	0,1881	0,1900	0,1927	0,1959	0,1995	0,2034	0,2079	0,2128	0,2179	0,2238	0,2299	0,2361
19	0,1912	0,1897	0,1886	0,1880	0,1875	0,1874	0,1875	0,1879	0,1887	0,1901	0,1919	0,1941	0,1970	0,2004	0,2040	0,2081	0,2129	0,2177	0,2231	0,2288	0,2348
20	0,1959	0,1942	0,1927	0,1917	0,1911	0,1907	0,1905	0,1908	0,1913	0,1924	0,1939	0,1959	0,1983	0,2015	0,2048	0,2087	0,2129	0,2175	0,2230	0,2283	0,2340
21	0,2006	0,1987	0,1969	0,1955	0,1947	0,1940	0,1937	0,1936	0,1939	0,1948	0,1960	0,1979	0,2001	0,2027	0,2059	0,2095	0,2133	0,2179	0,2226	0,2279	0,2334
22	0,2054	0,2032	0,2013	0,1996	0,1984	0,1975	0,1968	0,1966	0,1966	0,1972	0,1982	0,1997	0,2018	0,2043	0,2070	0,2103	0,2140	0,2182	0,2228	0,2276	0,2330
23	0,2103	0,2077	0,2055	0,2037	0,2021	0,2010	0,2003	0,1996	0,1995	0,1998	0,2005	0,2019	0,2037	0,2057	0,2084	0,2113	0,2148	0,2186	0,2231	0,2277	0,2329
24	0,2151	0,2124	0,2099	0,2077	0,2060	0,2046	0,2035	0,2027	0,2024	0,2024	0,2028	0,2040	0,2056	0,2075	0,2096	0,2126	0,2157	0,2193	0,2234	0,2279	0,2327
25	0,2200	0,2170	0,2144	0,2119	0,2099	0,2082	0,2069	0,2060	0,2052	0,2051	0,2052	0,2063	0,2075	0,2092	0,2112	0,2138	0,2170	0,2202	0,2241	0,2283	0,2329
Min	0,1422	0,1463	0,1500	0,1540	0,1579	0,1620	0,1663	0,1706	0,1749	0,1792	0,1839	0,1885	0,1935	0,1983	0,2029	0,2077	0,2128	0,2175	0,2226	0,2276	0,2327

A.3 - Solução Ideal

Tabela A.3 - Distribuição do CNE com o sistema ideal (€/kWh).

AG	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
2	0,1272	0,1364	0,1459	0,1559	0,1666	0,1778	0,2135	0,2246	0,2363	0,2481	0,2604	0,2728	0,2855	0,2985	0,3116	0,3246	0,3377	0,3507	0,3634	0,3756	0,3875
3	0,1240	0,1319	0,1402	0,1490	0,1584	0,1681	0,1977	0,2086	0,2200	0,2317	0,2436	0,2557	0,2680	0,2804	0,2933	0,3059	0,3189	0,3322	0,3450	0,3578	0,3699
4	0,1238	0,1308	0,1381	0,1460	0,1543	0,1629	0,1854	0,1947	0,2047	0,2152	0,2266	0,2385	0,2509	0,2634	0,2761	0,2889	0,3015	0,3144	0,3270	0,3398	0,3524
5	0,1251	0,1315	0,1381	0,1450	0,1527	0,1606	0,1768	0,1847	0,1931	0,2024	0,2127	0,2233	0,2346	0,2461	0,2585	0,2714	0,2841	0,2969	0,3099	0,3224	0,3352
6	0,1272	0,1331	0,1392	0,1456	0,1525	0,1596	0,1714	0,1781	0,1855	0,1935	0,2021	0,2113	0,2214	0,2321	0,2434	0,2554	0,2676	0,2796	0,2924	0,3052	0,3177
7	0,1298	0,1353	0,1409	0,1468	0,1532	0,1598	0,1678	0,1736	0,1801	0,1874	0,1950	0,2032	0,2121	0,2215	0,2313	0,2419	0,2534	0,2651	0,2770	0,2892	0,3010
8	0,1328	0,1378	0,1430	0,1485	0,1544	0,1606	0,1664	0,1713	0,1769	0,1831	0,1901	0,1975	0,2052	0,2138	0,2229	0,2325	0,2424	0,2530	0,2638	0,2753	0,2869
9	0,1361	0,1407	0,1455	0,1506	0,1561	0,1618	0,1663	0,1706	0,1755	0,1808	0,1870	0,1936	0,2007	0,2081	0,2163	0,2252	0,2345	0,2441	0,2541	0,2644	0,2750
10	0,1395	0,1438	0,1483	0,1530	0,1581	0,1634	0,1669	0,1706	0,1749	0,1797	0,1854	0,1912	0,1975	0,2045	0,2119	0,2198	0,2282	0,2373	0,2466	0,2562	0,2660
11	0,1432	0,1471	0,1512	0,1557	0,1603	0,1653	0,1682	0,1713	0,1751	0,1792	0,1843	0,1899	0,1957	0,2020	0,2087	0,2162	0,2238	0,2320	0,2407	0,2495	0,2587
12	0,1470	0,1506	0,1544	0,1585	0,1628	0,1675	0,1697	0,1725	0,1757	0,1795	0,1839	0,1889	0,1944	0,2002	0,2065	0,2133	0,2205	0,2282	0,2362	0,2445	0,2531
13	0,1510	0,1542	0,1577	0,1614	0,1656	0,1699	0,1716	0,1739	0,1769	0,1802	0,1842	0,1885	0,1937	0,1990	0,2048	0,2112	0,2181	0,2252	0,2328	0,2405	0,2487
14	0,1550	0,1579	0,1612	0,1646	0,1684	0,1724	0,1738	0,1757	0,1783	0,1811	0,1848	0,1890	0,1935	0,1984	0,2036	0,2097	0,2162	0,2227	0,2299	0,2374	0,2449
15	0,1591	0,1618	0,1647	0,1679	0,1713	0,1751	0,1762	0,1779	0,1799	0,1824	0,1857	0,1894	0,1938	0,1983	0,2030	0,2085	0,2145	0,2209	0,2277	0,2347	0,2420
16	0,1633	0,1657	0,1684	0,1713	0,1744	0,1779	0,1789	0,1802	0,1820	0,1840	0,1868	0,1902	0,1941	0,1985	0,2029	0,2081	0,2136	0,2197	0,2260	0,2327	0,2394
17	0,1676	0,1697	0,1721	0,1747	0,1776	0,1808	0,1816	0,1826	0,1841	0,1860	0,1883	0,1914	0,1949	0,1989	0,2031	0,2077	0,2130	0,2186	0,2247	0,2311	0,2375
18	0,1720	0,1738	0,1759	0,1782	0,1808	0,1838	0,1845	0,1852	0,1865	0,1881	0,1900	0,1927	0,1959	0,1995	0,2034	0,2079	0,2128	0,2179	0,2238	0,2299	0,2361
19	0,1764	0,1779	0,1797	0,1818	0,1841	0,1869	0,1875	0,1879	0,1887	0,1901	0,1919	0,1941	0,1970	0,2004	0,2040	0,2081	0,2129	0,2177	0,2231	0,2288	0,2348
20	0,1808	0,1820	0,1836	0,1854	0,1876	0,1900	0,1905	0,1908	0,1913	0,1924	0,1939	0,1959	0,1983	0,2015	0,2048	0,2087	0,2129	0,2175	0,2230	0,2283	0,2340
21	0,1853	0,1863	0,1876	0,1891	0,1910	0,1932	0,1937	0,1936	0,1939	0,1948	0,1960	0,1979	0,2001	0,2027	0,2059	0,2095	0,2133	0,2179	0,2226	0,2279	0,2334
22	0,1898	0,1905	0,1916	0,1929	0,1945	0,1965	0,1968	0,1966	0,1966	0,1972	0,1982	0,1997	0,2018	0,2043	0,2070	0,2103	0,2140	0,2182	0,2228	0,2276	0,2330
23	0,1943	0,1948	0,1957	0,1967	0,1980	0,1998	0,2003	0,1996	0,1995	0,1998	0,2005	0,2019	0,2037	0,2057	0,2084	0,2113	0,2148	0,2186	0,2231	0,2277	0,2329
24	0,1989	0,1992	0,1997	0,2005	0,2017	0,2032	0,2035	0,2027	0,2024	0,2024	0,2028	0,2040	0,2056	0,2075	0,2096	0,2126	0,2157	0,2193	0,2234	0,2279	0,2327
25	0,2035	0,2036	0,2038	0,2044	0,2053	0,2062	0,2069	0,2060	0,2052	0,2051	0,2052	0,2063	0,2075	0,2092	0,2112	0,2138	0,2170	0,2202	0,2241	0,2283	0,2329

A.4 - Solução Real

Nesta anexo é indicado a progressão ideal obtida no ponto anterior a vermelho (escuro) e a progressão seguida com a construção dos 4 parques eólicos a verde (claro).

Tabela A.4 - Distribuição do CNE com o sistema ideal e demonstração do real (€/kWh).

AG	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
2	0,1272	0,1364	0,1459	0,1559	0,1666	0,1778	0,2135	0,2246	0,2363	0,2481	0,2604	0,2728	0,2855	0,2985	0,3116	0,3246	0,3377	0,3507	0,3634	0,3756	0,3875
3	0,1240	0,1319	0,1402	0,1490	0,1584	0,1681	0,1977	0,2086	0,2200	0,2317	0,2436	0,2557	0,2680	0,2804	0,2933	0,3059	0,3189	0,3322	0,3450	0,3578	0,3699
4	0,1238	0,1308	0,1381	0,1460	0,1543	0,1629	0,1854	0,1947	0,2047	0,2152	0,2266	0,2385	0,2509	0,2634	0,2761	0,2889	0,3015	0,3144	0,3270	0,3398	0,3524
5	0,1251	0,1315	0,1381	0,1450	0,1527	0,1606	0,1768	0,1847	0,1931	0,2024	0,2127	0,2233	0,2346	0,2461	0,2585	0,2714	0,2841	0,2969	0,3099	0,3224	0,3352
6	0,1272	0,1331	0,1392	0,1456	0,1525	0,1596	0,1714	0,1781	0,1855	0,1935	0,2021	0,2113	0,2214	0,2321	0,2434	0,2554	0,2676	0,2796	0,2924	0,3052	0,3177
7	0,1298	0,1353	0,1409	0,1468	0,1532	0,1598	0,1678	0,1736	0,1801	0,1874	0,1950	0,2032	0,2121	0,2215	0,2313	0,2419	0,2534	0,2651	0,2770	0,2892	0,3010
8	0,1328	0,1378	0,1430	0,1485	0,1544	0,1606	0,1664	0,1713	0,1769	0,1831	0,1901	0,1975	0,2052	0,2138	0,2229	0,2325	0,2424	0,2530	0,2638	0,2753	0,2869
9	0,1361	0,1407	0,1455	0,1506	0,1561	0,1618	0,1663	0,1706	0,1755	0,1808	0,1870	0,1936	0,2007	0,2081	0,2163	0,2252	0,2345	0,2441	0,2541	0,2644	0,2750
10	0,1395	0,1438	0,1483	0,1530	0,1581	0,1634	0,1669	0,1706	0,1749	0,1797	0,1854	0,1912	0,1975	0,2045	0,2119	0,2198	0,2282	0,2373	0,2466	0,2562	0,2660
11	0,1432	0,1471	0,1512	0,1557	0,1603	0,1653	0,1682	0,1713	0,1751	0,1792	0,1843	0,1899	0,1957	0,2020	0,2087	0,2162	0,2238	0,2320	0,2407	0,2495	0,2587
12	0,1470	0,1506	0,1544	0,1585	0,1628	0,1675	0,1697	0,1725	0,1757	0,1795	0,1839	0,1889	0,1944	0,2002	0,2065	0,2133	0,2205	0,2282	0,2362	0,2445	0,2531
13	0,1510	0,1542	0,1577	0,1614	0,1656	0,1699	0,1716	0,1739	0,1769	0,1802	0,1842	0,1885	0,1937	0,1990	0,2048	0,2112	0,2181	0,2252	0,2328	0,2405	0,2487
14	0,1550	0,1579	0,1612	0,1646	0,1684	0,1724	0,1738	0,1757	0,1783	0,1811	0,1848	0,1890	0,1935	0,1984	0,2036	0,2097	0,2162	0,2227	0,2299	0,2374	0,2449
15	0,1591	0,1618	0,1647	0,1679	0,1713	0,1751	0,1762	0,1779	0,1799	0,1824	0,1857	0,1894	0,1938	0,1983	0,2030	0,2085	0,2145	0,2209	0,2277	0,2347	0,2420
16	0,1633	0,1657	0,1684	0,1713	0,1744	0,1779	0,1789	0,1802	0,1820	0,1840	0,1868	0,1902	0,1941	0,1985	0,2029	0,2081	0,2136	0,2197	0,2260	0,2327	0,2394
17	0,1676	0,1697	0,1721	0,1747	0,1776	0,1808	0,1816	0,1826	0,1841	0,1860	0,1883	0,1914	0,1949	0,1989	0,2031	0,2077	0,2130	0,2186	0,2247	0,2311	0,2375
18	0,1720	0,1738	0,1759	0,1782	0,1808	0,1838	0,1845	0,1852	0,1865	0,1881	0,1900	0,1927	0,1959	0,1995	0,2034	0,2079	0,2128	0,2179	0,2238	0,2299	0,2361
19	0,1764	0,1779	0,1797	0,1818	0,1841	0,1869	0,1875	0,1879	0,1887	0,1901	0,1919	0,1941	0,1970	0,2004	0,2040	0,2081	0,2129	0,2177	0,2231	0,2288	0,2348
20	0,1808	0,1820	0,1836	0,1854	0,1876	0,1900	0,1905	0,1908	0,1913	0,1924	0,1939	0,1959	0,1983	0,2015	0,2048	0,2087	0,2129	0,2175	0,2230	0,2283	0,2340
21	0,1853	0,1863	0,1876	0,1891	0,1910	0,1932	0,1937	0,1936	0,1939	0,1948	0,1960	0,1979	0,2001	0,2027	0,2059	0,2095	0,2133	0,2179	0,2226	0,2279	0,2334
22	0,1898	0,1905	0,1916	0,1929	0,1945	0,1965	0,1968	0,1966	0,1966	0,1972	0,1982	0,1997	0,2018	0,2043	0,2070	0,2103	0,2140	0,2182	0,2228	0,2276	0,2330
23	0,1943	0,1948	0,1957	0,1967	0,1980	0,1998	0,2003	0,1996	0,1995	0,1998	0,2005	0,2019	0,2037	0,2057	0,2084	0,2113	0,2148	0,2186	0,2231	0,2277	0,2329
24	0,1989	0,1992	0,1997	0,2005	0,2017	0,2032	0,2035	0,2027	0,2024	0,2024	0,2028	0,2040	0,2056	0,2075	0,2096	0,2126	0,2157	0,2193	0,2234	0,2279	0,2327
25	0,2035	0,2036	0,2038	0,2044	0,2053	0,2066	0,2069	0,2060	0,2052	0,2051	0,2052	0,2063	0,2075	0,2092	0,2112	0,2138	0,2170	0,2202	0,2241	0,2283	0,2329