

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO



Gestão a curto prazo de aproveitamentos hídricos em ambiente de mercado

Joana Filipa de Faria Marrucho

Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Prof. Doutor João Paulo Tomé Saraiva

Co-orientador: Eng. José Carlos Vieira Sousa

30 de Junho de 2014

A Dissertação intitulada

“Gestão a Curto Prazo de Aproveitamentos Hídricos em Ambiente de Mercado”

foi aprovada em provas realizadas em 14-07-2014

o júri



Presidente Professor Doutor Carlos Coelho Leal Monteiro Moreira
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



Professor Doutor Humberto Manuel Matos Jorge
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra



Professor Doutor João Paulo Tomé Saraiva
Professor Associado do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de
Computadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

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



Autor - Joana Filipa de Faria Marrucho

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Resumo

A introdução dos mercados de eletricidade levou a uma reestruturação do setor elétrico, acabando com as empresas verticalizadas e transformando-as numa estrutura desagregada. Empresas que outrora exerciam monopólio neste setor, foram obrigadas a alterar a sua estratégia e modo de operação para sobressaírem num regime de livre concorrência. Desta forma, surgiu a necessidade de desenvolver novas ferramentas de apoio à decisão e otimização para aumentar a eficiência económica das empresas e atingir uma vantagem competitiva.

Apesar do potencial hídrico que Portugal apresenta, apenas cerca de metade está a ser explorado. Isto, aliado à dependência energética exterior e ao facto da água ter um custo nulo, tem vindo a impulsionar o investimento na exploração de aproveitamentos hídricos. Como tal, o planeamento da exploração deste tipo de aproveitamentos tem sido cada vez mais alvo de estudo. No entanto, trata-se de um problema de otimização realmente complexo, já que tem de se ter em conta a relação não linear entre a potência, o caudal e a altura da queda e a interligação hidráulica de várias centrais na mesma cascata. Existem ainda outros fatores que podem dificultar a sua resolução como a dimensão do sistema produtor, a possibilidade de reverter os grupos produtores, a necessidade de realizar a previsão do preço de mercado e das afluências naturais e as restrições de balanço de água. Posto isto, é necessária a consideração de algumas simplificações para diminuir a complexidade do problema.

Este trabalho pretende contribuir de alguma forma para solucionar os problemas acima referidos. Desta forma, foi criado e implementado um modelo de otimização baseado no método de programação linear, que visa o planeamento horário de aproveitamentos hídricos, encontrando uma solução ótima entre caudais turbinados e bombados de forma a maximizar o lucro obtido. Também foi analisada a possibilidade de resolver o problema de otimização para um número elevado de centrais. Neste sentido, foram criados quatro modelos distintos por forma a analisar os diferentes comportamentos dos sistemas e a sua viabilidade.

Através dos resultados obtidos verifica-se que se trata de uma ferramenta computacional eficaz na resolução do problema em questão e com boas perspetivas de desenvolvimento futuro.

Abstract

The introduction of electricity markets led to a restructuring of the electricity sector, putting an end to vertically integrated companies and transforming them into a disaggregated structure. Companies that once exercised a monopoly in this sector were forced to alter their strategy and operating mode to stand out in a freely competitive environment. Thus, the need to develop new decision support and optimization tools to increase the economic efficiency of companies and achieve a competitive advantage arose.

Despite the hydroelectric potential that Portugal possesses, only about half of it is being explored. All this, combined with its foreign energy dependence and the fact that water has a zero cost, has been boosting the investment on hydroelectric power plants exploitation. As such, studies concerning its operational planning have been increasing. However, it is a really complex optimization problem since the non-linear relationship between the electric power, the turbine discharge and the net head, as well as the interdependency between hydro plants in cascades have to be taken into account. There are other factors that can hamper its resolution such as the production system dimension, the possibility of reversing the generation groups, the need to predict the market price and the natural inflows, and the water balance constraints. That being said, it is necessary to consider some simplifications in order to reduce the problem's complexity.

This work aims to contribute in any way to solve the problems mentioned above. Hence, an optimization model based on linear programming was created and implemented, concerning the hourly planning of hydroelectric plants, to determine the most adequate periods for water usage to generate electricity and for the usage of electricity to pump water upstream, in order to maximize the profit. The possibility of solving the optimization problem including a high number of hydro plants was also analyzed. Therefore, four distinct models were created to analyze the systems' different behaviors and its feasibility.

From the obtained results, it is seen that the computer tool is effective in solving the problems in question and has good prospects for future development.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, ao Professor Doutor João Paulo Tomé Saraiva, orientador desta dissertação, agradeço todo o apoio, conhecimento, paciência e rigor. Servirá sempre de exemplo para a minha vida profissional pela competência com que exerce as suas funções.

À EDP Produção, pela oportunidade oferecida, especialmente nas pessoas dos Engenheiros Virgílio Mendes e José Carlos Sousa pelo acompanhamento, disponibilização de dados e discussão de resultados. Espero sinceramente ter correspondido às expectativas e que o trabalho realizado possa contribuir de alguma forma para o sucesso da empresa.

A todos os meus amigos, pelo carinho e confiança que sempre demonstraram. À Rosinha, amiga e companheira de estudo, pela ajuda e pela motivação que incutiu em mim. Ao Miguel, que mais de perto me acompanhou nestes últimos tempos, pelo apoio incondicional e pela paciência.

Finalmente, à minha família, aos meus Pais e Irmão, por sempre acreditarem em mim e pelo esforço que dedicaram para que esta etapa da minha vida fosse concluída com sucesso.

Joana Filipa de Faria Marrucho

*“The tragedy of life doesn’t lie in not reaching your goal.
The tragedy lies in having no goal to reach.”*

Benjamin E. Mays

Conteúdo

Resumo	i
Abstract	iii
Agradecimentos	v
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Estrutura da Dissertação	2
2 Estado da Arte	5
2.1 Enquadramento Geral	5
2.1.1 A Energia Elétrica	5
2.1.2 A Energia Hidroelétrica	6
2.2 Organização do Setor Elétrico	6
2.2.1 O Passado	6
2.2.2 A Estrutura Atual	8
2.3 Mercados de Eletricidade	9
2.3.1 MIBEL	11
3 Gestão de Aproveitamentos Hidroelétricos	15
3.1 Aproveitamentos Hidroelétricos	15
3.1.1 Situação em Portugal	18
3.2 Exploração de Aproveitamentos Hidroelétricos	20
3.2.1 Caraterísticas Gerais	20
3.2.2 Métodos Existentes	21
3.3 <i>Hydro Scheduling Problem</i>	22
3.4 Formulação Geral do Problema	27
3.4.1 Variáveis	27
3.4.2 Restrições	28
3.4.3 Formulação Completa do Problema	29
4 Descrição da Metodologia	33
4.1 Programação Linear	33
4.2 Formulação do Problema Simplificado	33
4.3 Modelos Desenvolvidos	34
4.3.1 Considerações Gerais	34
4.3.2 Modelo Exemplo	35

4.3.3	Modelo 1 - Sistema com 2 reservatórios	37
4.3.4	Modelo 2 - Sistema com 3 reservatórios	39
4.3.5	Modelo 3 - Sistema com 8 reservatórios	40
4.3.6	Modelo 4 - Sistema com n reservatórios	42
5	Apresentação e Análise dos Resultados	45
5.1	Considerações Gerais	45
5.2	Modelo 1	47
5.2.1	Caso 1	47
5.2.2	Caso 2	50
5.2.3	Caso 3	52
5.3	Modelo 2	54
5.3.1	Caso 1	55
5.3.2	Caso 2	58
5.3.3	Caso 3	62
5.4	Modelo 3	65
5.5	Modelo 4	75
6	Conclusões e Trabalhos Futuros	77
6.1	Conclusões Finais	77
6.2	Propostas de Desenvolvimento Futuro	78
A	Anexos	81
A.1	Anexo A - Características das Centrais	81
A.2	Anexo B - Preço de Mercado e Afluências	82
A.3	Anexo C - Resultados das Potências Turbinada e Bombada	85
	Referências	125

Lista de Figuras

2.1	Estrutura verticalmente integrada do setor elétrico [1]	7
2.2	Modelo desagregado do setor elétrico [1]	8
2.3	Funcionamento de um <i>Pool</i> simétrico [1]	10
2.4	Funcionamento de um <i>Pool</i> assimétrico [1]	11
2.5	Modelo misto de exploração do setor elétrico [1]	12
3.1	1 Importação da energia primária/procura nacional total. 2 Capacidade instalada hídrica total/potencial hídrico teórico [2]	19
3.2	Potência gerada por uma central hídrica em função da queda e caudal.	24
3.3	Potência gerada por uma central hídrica em função do caudal, para diferentes valores da queda.	25
3.4	Impacto da perda de carga na potência para caudais elevados.	26
3.5	Sistema de reservatórios em cascata. [3]	28
4.1	Sistema hídrico com um reservatório.	35
4.2	Balço de fluxos de água (Lei dos nós).	36
4.3	Relação linear entre a potência gerada e o caudal turbinado.	37
4.4	Esquema da cascata com dois reservatórios.	38
4.5	Esquema da cascata com três reservatórios.	39
4.6	Esquema da cascata com oito reservatórios adaptada do Douro Nacional.	41
4.7	Esquema da cascata com n reservatórios.	42
5.1	Preços de Mercado.	46
5.2	Afluência natural da central 1.	46
5.3	Afluência natural da central 2.	46
5.4	Resultados para os caudais turbinado, bombado e descarregado da central 1 do Modelo 1 - Caso 1.	48
5.5	Varição do volume da central 1 do Modelo 1 - Caso 1.	48
5.6	Resultados para os caudais turbinado, bombado e descarregado da central 2 do Modelo 1 - Caso 1.	49
5.7	Varição do volume da central 2 do Modelo 1 - Caso 1.	49
5.8	Resultados para os caudais turbinado, bombado e descarregado da central 1 do Modelo 1 - Caso 2.	50
5.9	Varição do volume da central 1 do Modelo 1 - Caso 2.	50
5.10	Resultados para os caudais turbinado, bombado e descarregado da central 2 do Modelo 1 - Caso 2.	51
5.11	Varição do volume da central 2 do Modelo 1 - Caso 2.	51
5.12	Resultados para os caudais turbinado, bombado e descarregado da central 1 do Modelo 1 - Caso 3.	52

5.13	Variação do volume da central 1 do Modelo 1 - Caso 3.	53
5.14	Resultados para os caudais turbinado, bombado e descarregado da central 2 do Modelo 1 - Caso 3.	53
5.15	Variação do volume da central 2 do Modelo 1 - Caso 3.	54
5.16	Resultados para os caudais turbinado, bombado e descarregado da central 1 do Modelo 2 - Caso 1.	55
5.17	Variação do volume da central 1 do Modelo 2 - Caso 1.	56
5.18	Resultados para os caudais turbinado, bombado e descarregado da central 2 do Modelo 2 - Caso 1.	56
5.19	Variação do volume da central 2 do Modelo 2 - Caso 1.	57
5.20	Resultados para os caudais turbinado, bombado e descarregado da central 3 do Modelo 2 - Caso 1.	57
5.21	Variação do volume da central 3 do Modelo 2 - Caso 1.	58
5.22	Resultados para os caudais turbinado, bombado e descarregado da central 1 do Modelo 2 - Caso 2.	59
5.23	Variação do volume da central 1 do Modelo 2 - Caso 2.	59
5.24	Resultados para os caudais turbinado, bombado e descarregado da central 2 do Modelo 2 - Caso 2.	60
5.25	Variação do volume da central 2 do Modelo 2 - Caso 2.	60
5.26	Resultados para os caudais turbinado, bombado e descarregado da central 3 do Modelo 2 - Caso 2.	61
5.27	Variação do volume da central 3 do Modelo 2 - Caso 2.	61
5.28	Resultados para os caudais turbinado, bombado e descarregado da central 1 do Modelo 2 - Caso 3.	62
5.29	Variação do volume da central 1 do Modelo 2 - Caso 3.	63
5.30	Resultados para os caudais turbinado, bombado e descarregado da central 2 do Modelo 2 - Caso 3.	63
5.31	Variação do volume da central 2 do Modelo 2 - Caso 3.	64
5.32	Resultados para os caudais turbinado, bombado e descarregado da central 3 do Modelo 2 - Caso 3.	64
5.33	Variação do volume da central 3 do Modelo 2 - Caso 3.	65
5.34	Resultados para os caudais turbinado, bombado e descarregado da central A do Modelo 3.	67
5.35	Variação do volume da central A do Modelo 3.	67
5.36	Resultados para os caudais turbinado, bombado e descarregado da central B do Modelo 3.	68
5.37	Variação do volume da central B do Modelo 3.	68
5.38	Resultados para os caudais turbinado, bombado e descarregado da central C do Modelo 3.	69
5.39	Variação do volume da central C do Modelo 3.	69
5.40	Resultados para os caudais turbinado, bombado e descarregado da central D do Modelo 3.	70
5.41	Variação do volume da central D do Modelo 3.	70
5.42	Resultados para os caudais turbinado, bombado e descarregado da central E do Modelo 3.	71
5.43	Variação do volume da central E do Modelo 3.	71
5.44	Resultados para os caudais turbinado, bombado e descarregado da central F do Modelo 3.	72

5.45	Variação do volume da central F do Modelo 3.	72
5.46	Resultados para os caudais turbinado, bombado e descarregado da central G do Modelo 3.	73
5.47	Variação do volume da central G do Modelo 3.	73
5.48	Resultados para os caudais turbinado, bombado e descarregado da central H do Modelo 3.	74
5.49	Variação do volume da central H do Modelo 3.	74
5.50	Variação do tempo de computação com o nº de centrais.	76
A.1	Caraterísticas das centrais 1, 2 e 3 utilizadas nos Modelos 1, 2 e 4.	81
A.2	Caraterísticas das centrais do DNA utilizadas no Modelo 3.	81
A.3	Preço de Mercado.	82
A.4	Afluência da central 1.	83
A.5	Afluência da central 2.	84
A.6	Potência horária turbinada pela central 1 do Modelo 1 - Caso 1.	85
A.7	Potência horária bombada pela central 1 do Modelo 1 - Caso 1.	86
A.8	Potência horária turbinada pela central 2 do Modelo 1 - Caso 1.	87
A.9	Potência horária bombada pela central 2 do Modelo 1 - Caso 1.	88
A.10	Potência horária turbinada pela central 1 do Modelo 1 - Caso 2.	89
A.11	Potência horária bombada pela central 1 do Modelo 1 - Caso 2.	90
A.12	Potência horária turbinada pela central 2 do Modelo 1 - Caso 2.	91
A.13	Potência horária bombada pela central 2 do Modelo 1 - Caso 2.	92
A.14	Potência horária turbinada pela central 1 do Modelo 1 - Caso 3.	93
A.15	Potência horária bombada pela central 1 do Modelo 1 - Caso 3.	94
A.16	Potência horária turbinada pela central 2 do Modelo 1 - Caso 3.	95
A.17	Potência horária bombada pela central 2 do Modelo 1 - Caso 3.	96
A.18	Potência horária turbinada pela central 1 do Modelo 2 - Caso 1.	97
A.19	Potência horária bombada pela central 1 do Modelo 2 - Caso 1.	98
A.20	Potência horária turbinada pela central 2 do Modelo 2 - Caso 1.	99
A.21	Potência horária bombada pela central 2 do Modelo 2 - Caso 1.	100
A.22	Potência horária turbinada pela central 3 do Modelo 2 - Caso 1.	101
A.23	Potência horária bombada pela central 3 do Modelo 2 - Caso 1.	102
A.24	Potência horária turbinada pela central 1 do Modelo 2 - Caso 2.	103
A.25	Potência horária bombada pela central 1 do Modelo 2 - Caso 2.	104
A.26	Potência horária turbinada pela central 2 do Modelo 2 - Caso 2.	105
A.27	Potência horária bombada pela central 2 do Modelo 2 - Caso 2.	106
A.28	Potência horária turbinada pela central 3 do Modelo 2 - Caso 2.	107
A.29	Potência horária bombada pela central 3 do Modelo 2 - Caso 2.	108
A.30	Potência horária turbinada pela central 1 do Modelo 2 - Caso 3.	109
A.31	Potência horária bombada pela central 1 do Modelo 2 - Caso 3.	110
A.32	Potência horária turbinada pela central 2 do Modelo 2 - Caso 3.	111
A.33	Potência horária bombada pela central 2 do Modelo 2 - Caso 3.	112
A.34	Potência horária turbinada pela central 3 do Modelo 2 - Caso 3.	113
A.35	Potência horária bombada pela central 3 do Modelo 2 - Caso 3.	114
A.36	Potência horária turbinada pela central A do Modelo 3.	115
A.37	Potência horária turbinada pela central B do Modelo 3.	116
A.38	Potência horária turbinada pela central C do Modelo 3.	117
A.39	Potência horária turbinada pela central D do Modelo 3.	118
A.40	Potência horária turbinada pela central E do Modelo 3.	119

A.41 Potência horária turbinada pela central F do Modelo 3.	120
A.42 Potência horária turbinada pela central G do Modelo 3.	121
A.43 Potência horária bombada pela central G do Modelo 3.	122
A.44 Potência horária turbinada pela central H do Modelo 3.	123
A.45 Potência horária bombada pela central H do Modelo 3.	124

Lista de Tabelas

3.1	Situação atual das principais bacias hidrográficas [4]	19
3.2	Reforços de potência em aproveitamentos da EDP [4]	19
3.3	Variáveis de decisão, de estado e parâmetros para o HSP	28
4.1	Variáveis de decisão, de estado e parâmetros para o modelo simplificado	34
5.1	Caraterísticas dos modelos criados.	45
5.2	Caraterísticas das centrais utilizadas no Modelo 1.	47
5.3	Dados das centrais utilizados no Caso 1	47
5.4	Dados das centrais utilizados no Caso 2	50
5.5	Dados das centrais utilizados no Caso 3	52
5.6	Caraterísticas das centrais utilizadas no Modelo 2.	54
5.7	Dados das centrais utilizados no Caso 1	55
5.8	Dados das centrais utilizados no Caso 2	58
5.9	Dados das centrais utilizados no Caso 3	62
5.10	Caraterísticas das centrais utilizadas no Modelo 3.	66
5.11	Dados das centrais utilizados no Modelo 3.	66
5.12	Dados das centrais utilizadas no Modelo 4.	75

Abreviaturas e Símbolos

CB	Contratos Bilaterais
DNA	Douro Nacional Adaptado
EDP	Energias de Portugal
ERSE	Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
HSP	<i>Hydro Scheduling Problem</i>
ISO	<i>Independent System Operator</i>
MC	Mercados Centralizados
MIBEL	Mercado Ibérico de Eletricidade
NWE	<i>North-Western Europe</i>
OM	Operador de Mercado
OMIP	Operador de Mercado Ibérico - Pólo Português
PCR	<i>Price Coupling of Regions</i>
PNBEPH	Plano Nacional Barragens com Elevado Potencial Hidroelétrico
RD	Rede de Distribuição
REN	Rede Elétrica Nacional
RT	Rede de Transporte
SA	Serviços Auxiliares
SWE	<i>South-Western Europe</i>
TSO	<i>Transmission System Operator</i>

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

“Portugal importa todos os anos 7 a 10 mil milhões de euros de recursos energéticos, temos uma dependência energética demasiado elevada e essa dependência não afeta apenas as questões energéticas ou ambientais. Tem um impacto na nossa economia e nas nossas contas.”

Ministro do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia (Outubro de 2013). [5]

Uma grande aposta de Portugal para diminuir a dependência energética exterior tem sido a energia hidroelétrica, em grande parte impulsionada pela EDP. O nosso país tem um potencial hídrico bastante elevado, sendo que cerca de 50% desse potencial ainda não foi aproveitado, embora alguns projetos já estejam em curso por parte da EDP, como a construção de novas barragens. Tratando-se de uma fonte de energia limpa e a única com capacidade de transferir de forma eficiente quantidades de energia de períodos com excedente de produção para períodos com défice, surge a necessidade de investir cada vez mais na sua exploração.

Com a liberalização do setor elétrico e abertura de portas a novos produtores e comercializadores em regime de livre concorrência, têm-se procurado novas formas de otimização da exploração de aproveitamentos hídricos. Este problema é bastante complexo, já que implica tomar decisões de operação relativamente à turbinagem e bombagem, influenciando as condições de operação em instantes futuros. Por outro lado, existem interdependências entre centrais hídricas que se encontram instaladas no mesmo curso de água e as decisões de operação afetam a altura de queda dos aproveitamentos traduzindo-se numa relação não linear entre a potência, o caudal e a queda. Tendo em conta estes fatores, a resolução deste problema exige a utilização de ferramentas computacionais.

Estas ferramentas de otimização permitem auxiliar no planeamento operacional da central hídrica evitando situações de excesso de turbinagem e escassez de afluências que impeçam operações de turbinagem no futuro ou, por outro lado, excesso de bombagem ou de armazenamento de água que obriguem à realização de descarregamentos, desperdiçando energia.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objectivo a implementação de uma ferramenta computacional que permita realizar o planeamento operacional horário de uma cascata de aproveitamentos hidroelétricos, em ambiente de mercado. O problema de otimização da exploração de aproveitamentos hídricos é não linear tendo, neste trabalho, sido consideradas algumas simplificações de modo a ser obtida uma formulação linear. Neste sentido, o efeito não linear da queda é desprezado, assumindo a queda um valor constante. Por outro lado, o modelo desenvolvido possibilita a consideração de ações de bombagem dada a relevância que a bombagem tem vindo a assumir nos anos mais recentes. Através da aplicação, é possível verificar em que períodos se deve turbinar e bombar de forma a obter uma maior remuneração. Esta ferramenta destina-se ao planeamento da operação de curto prazo, sendo o período de teste de uma semana. A aplicação desenvolvida permite realizar a otimização de uma cascata de centrais hídricas, tendo em conta a influência da interligação das centrais na mesma cascata, a inclusão de grupos reversíveis com bombagem e assumindo as centrais hídricas como “price takers” considerando-se que os preços de mercado são dados de entrada.

Outro objectivo desta dissertação consistiu em avaliar a possibilidade de resolver o problema de otimização referido considerando um elevado número de centrais, ou seja, verificar o comportamento do programa para um grande número de variáveis. Neste caso, pretendeu-se identificar se a ferramenta computacional utilizada, função *linprog* do MATLAB, poderia ser adotada para resolver problemas considerando até 150 aproveitamentos cuja exploração se pretende otimizar ao longo de uma semana. Além disso, foi também analisada a variação do tempo de computação com o aumento do número de variáveis.

1.3 Estrutura da Dissertação

Este documento está organizado em seis capítulos.

No presente capítulo, Introdução, descreve-se de uma forma sucinta a motivação do desenvolvimento desta dissertação, os objetivos e, finalmente, a estruturação da tese.

No segundo capítulo, Estado da Arte, apresenta-se um enquadramento geral sobre energia elétrica e hidroelétrica, o passado e reestruturação do sector eléctrico e a sua organização atual e por fim, os mercados de eletricidade e o MIBEL.

No terceiro capítulo, Gestão de Aproveitamentos Hidroelétricos, são caracterizados os tipos de aproveitamentos hídricos existentes, a sua constituição e a situação em Portugal. Neste capítulo é igualmente, abordado o problema da exploração de aproveitamentos hidroelétricos e as formulações já existentes, explicam-se as condições do problema de gestão dos aproveitamentos e a formulação geral do problema, definindo-se as suas variáveis e restrições.

No quarto capítulo, Descrição da Metodologia, descreve-se o problema de otimização da exploração de centrais hidroelétricas, bem como a formulação linearizada do problema e apresentam-se os quatro modelos criados detalhando a configuração hidráulica de cada um e as equações de

estado características de cada modelo.

No quinto capítulo, apresentação e Análise de Resultados, são expostos os resultados dos testes efetuados considerando cada um dos quatro modelos, para diferentes casos, ilustrando e analisando criticamente o seu comportamento.

No sexto capítulo, Conclusões e Trabalhos Futuros, são apresentadas as principais conclusões retiradas do trabalho e as perspectivas para futuros desenvolvimentos do mesmo.

Finalmente, o trabalho inclui ainda três anexos que contêm dados referentes às centrais hidro-elétricas testadas, o valor do preço de mercado e as afluências naturais utilizadas e, por fim, os resultados obtidos das potências turbinada e bombada.

Capítulo 2

Estado da Arte

2.1 Enquadramento Geral

2.1.1 A Energia Elétrica

A energia elétrica é um produto essencial na nossa sociedade, tendo-se tornado a principal fonte de luz, calor e força utilizada no mundo moderno. Fazendo parte do nosso quotidiano, encontra-se sempre presente ao nosso redor, desde nas nossas habitações a indústrias e transportes. Dada a sua importância, é necessário que o sector elétrico providencie um elevado nível de segurança, qualidade e fiabilidade.

A eletricidade apresenta um conjunto de características próprias que não devem ser desprezadas:

- A impossibilidade de ser diretamente armazenada, pelo que a oferta deve igualar exatamente a procura, em cada instante;
- A circulação nas linhas e noutros componentes elétricos respeitando leis físicas rígidas, as Leis de Kirchoff;
- As flutuações na procura que podem ser expressas diariamente, semanalmente, mensalmente e até de ano para ano;
- Os problemas de exploração causados pela sub-utilização da potência instalada (quer de produção, quer de transmissão) em períodos de menor consumo (vazio), sendo que esta está preparada para responder aos períodos de maior consumo (ponta);
- A utilização de serviços auxiliares necessários para assegurar a regulação de frequência e controlo de tensão, bem como diversos níveis de reservas para o correto funcionamento do sistema;
- A necessidade de possuir potência excedentária para compensar quer aumentos do lado da procura, quer flutuações do lado da produção, como por exemplo, energias renováveis sujeitas a uma volatilidade do recurso primário ou saídas de serviço de grupos produtores.

2.1.2 A Energia Hidroelétrica

A energia hidroelétrica é produzida através da transformação da energia proveniente do movimento e queda de água em energia elétrica. É o tipo de energia renovável mais utilizado a nível mundial, sendo responsável por, aproximadamente, um quinto da geração global de eletricidade. O funcionamento da produção hidroelétrica consiste, numa primeira fase, no armazenamento da água de um rio numa albufeira, através de uma barragem. Essa água é depois encaminhada, por efeito da gravidade (queda de água), através de um circuito hidráulico para a central elétrica onde estão instaladas uma ou mais turbinas, cujas pás serão impulsionadas pelo movimento da água. Devido à velocidade que a água atinge na queda, a sua energia potencial transforma-se em energia cinética. As turbinas transformarão essa energia cinética em energia mecânica que, atuando sobre um gerador elétrico, irá converter a energia mecânica em energia elétrica.

A utilização da água para fins que não o seu consumo direto remonta às primeiras civilizações da antiguidade, desde a sua utilização para produção de força motriz à proteção contra cheias. No entanto, apenas em meados do século XIX se inicia a produção de energia elétrica através da água, a nível mundial, e na última década do mesmo século, em Portugal. Até à década de 30, a eletricidade proveniente da produção hidroelétrica teria como fim satisfazer consumos locais, como pequenas instalações de iluminação pública e pequenas indústrias. A partir dessa data e visando o desenvolvimento industrial e económico do país, surge uma maior necessidade de aproveitar os recursos hídricos existentes, direcionada para a industrialização. A partir de 1950, começam a ser construídos os grandes aproveitamentos hidroelétricos, que se foram desenvolvendo até à década de 90. Em 2007, surge o Plano Nacional de Barragens com Elevado Potencial Hidroelétrico (PNBEPH) que visa identificar e definir quais os investimentos mais apropriados em termos de aproveitamentos hidroelétricos entre esta data e 2020, com o objetivo de atingir, para este tipo de produção, uma capacidade instalada superior a 7000 MW. [2]

Além da vantagem dos recursos hídricos serem uma fonte de energia renovável para a produção de energia elétrica, também têm como benefício o seu uso no controlo de cheias e uma melhor gestão deste recurso. Contudo, na construção de aproveitamentos hidroelétricos há que ter em conta os impactos ambientais que poderão advir, como a interrupção de cursos de água e inundação de grandes áreas de terreno.

2.2 Organização do Setor Elétrico

2.2.1 O Passado

Foi no final do século XIX que se iniciaram as atividades de produção, transporte e distribuição de eletricidade até aos consumidores e, nessa época, o sector elétrico era constituído por redes elétricas de pequena potência e com pouca abrangência geográfica. O sector foi sofrendo cada vez mais alterações com o aumento da potência de carga e à medida que as tecnologias foram evoluindo, passando a aumentar o seu valor de potência e a ocupar uma maior extensão geográfica. Este desenvolvimento deu-se juntamente com a necessidade de aproveitar recursos hídricos muitas

vezes situados a grandes distâncias dos pontos de carga, aumentando cada vez mais os níveis de tensão das redes elétricas e o seu alcance. Com investimentos cada vez mais elevados, o crescimento dos sistemas elétricos foi significativo, dando origem à crescente interligação dos sistemas elétricos nacionais, de forma a alcançar uma maior segurança de exploração e estabilidade. [6]

Até 1975, em Portugal, o setor elétrico encontrava-se organizado através de concessões atribuídas a entidades privadas. Foi nesse ano que ocorreu a nacionalização e integração vertical do setor elétrico com a criação da EDP, sendo que apenas nos anos 80 se completou o esforço da eletrificação rural. [1]

A estrutura verticalmente integrada adotada pelas empresas, ilustrada pela Figura 2.1, era caracterizada por abranger toda a cadeia de valor da energia elétrica, desde a produção à distribuição. O setor elétrico era então explorado através de um monopólio pois, mesmo existindo mais do que uma empresa no mesmo país, cada uma possuía a concessão de uma área geográfica, não havendo competição entre estas e detendo um conjunto de clientes fixo.

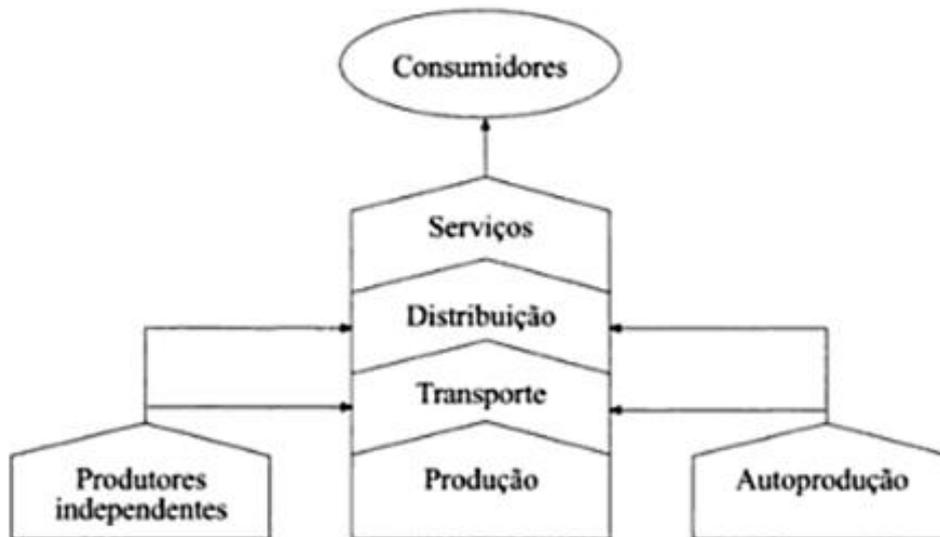


Figura 2.1: Estrutura verticalmente integrada do setor elétrico [1]

Esta estrutura manteve-se durante vários anos, mas tinha diversas implicações [1]:

- Os consumidores não tinham a liberdade de escolher a empresa fornecedora;
- Carácter pouco claro nos processos de regulação tarifária que determinavam o preço do produto final;
- Este relacionamento pouco claro fazia com que o setor elétrico assumisse, com frequência, o papel de elemento amortecedor de períodos de maior crise económica, dado o seu peso muito significativo em termos de emprego, investimento e contribuição para o produto interno bruto;

- As atividades de planeamento eram realizadas de forma centralizada e de forma pouco complexa.

As implicações mencionadas juntamente com o choque petrolífero de 1973, que perturbou o ambiente económico estável em que o país se encontrava, despoletaram a necessidade da reestruturação do sector elétrico, surgindo assim os mercados de eletricidade.

2.2.2 A Estrutura Atual

A reestruturação do sector elétrico acabou com as empresas verticalizadas, transformando-as numa estrutura desagregada e aberta a inúmeros agentes. Com esta nova estrutura, nos extremos da cadeia de valor do sector, nomeadamente a produção e a comercialização, encontram-se os mercados concorrenciais, enquanto as atividades de transporte e distribuição são concessionadas pelo governo, funcionando em monopólio. Estas últimas estão sujeitas a regulação praticada pela ERSE, Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos, que tem como missão a proteção dos interesses dos consumidores, o funcionamento eficiente dos mercados, garantir a qualidade de serviço e o acesso à informação. A ERSE foi criada primeiramente como agência reguladora do setor elétrico, sendo posteriormente incluído o gás natural.

Além das entidades reguladoras, a nova estrutura introduziu novos intervenientes no mercado de eletricidade, os Operadores Independentes do Sistema (ISO) e os Operadores de Mercado (OM), com vista num correto funcionamento do sistema. O novo modelo desagregado encontra-se representado na Figura 2.2:

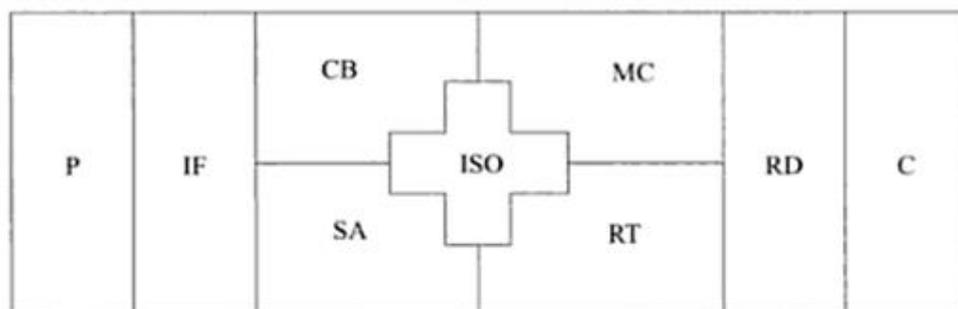


Figura 2.2: Modelo desagregado do setor elétrico [1]

Como já referido anteriormente, verifica-se a localização das atividades de produção (P) e comercialização (C) nas extremidades, caracterizadas pela sua forte competitividade, seguidas da intermediação financeira (IF) e de uma atividade de rede de distribuição (RD), exclusiva de empresas concessionárias. No centro do esquema, encontram-se as funções anteriormente incluídas na atividade de transporte, estando indicados os Contratos Bilaterais (CB), os Mercados Centralizados (MC), o Operador Independente do Sistema (ISO), a Rede de Transporte (RT) e os Serviços Auxiliares (SA).

Os Contratos Bilaterais caracterizam-se pelo estabelecimento de acordos bilaterais físicos ou financeiros, supondo o relacionamento direto entre as entidades produtoras e os comercializadores ou consumidores elegíveis. Estes contratos englobam o preço e a modulação da energia a produzir e consumir ao longo de um determinado período de tempo. [1]

Os Mercados Centralizados recebem as propostas de compra e venda de energia, tipicamente para cada hora ou meia hora do dia seguinte (*Day-Ahead Markets*). Estas propostas incluem normalmente os valores da potência e do preço (mínimo a receber no caso das propostas de venda, máximo a pagar no caso das propostas de compra). Estes mercados cruzam estas propostas construindo um despacho puramente económico para cada intervalo de tempo do dia seguinte. [1]

O *Independent System Operator* (ISO) é a entidade que tem as funções de coordenação técnica da exploração do sistema elétrico. Para esse efeito, deverá receber informação sobre os despachos económicos resultantes da atividade dos Mercados Centralizados, bem como a informação relacionada com os Contratos Bilaterais em termos de nós da rede e potências envolvidas. O ISO deverá assim avaliar a viabilidade técnica do conjunto despacho/contratos tendo em atenção especial os congestionamentos. Existindo congestionamentos, o despacho não é viável e terão de ser realizados ajustes. Se não existirem congestionamentos a exploração do sistema é viável do ponto de vista técnico, seguindo-se a contratação dos serviços auxiliares. Em alguns casos, o ISO incorpora as funções da Rede de Transporte (RT), tendo a designação de TSO (*Transmission System Operator*), tal como ocorre por exemplo com a REN em Portugal. [3]

A Rede de Transporte (RT) é a entidade que detém os ativos da rede de transporte e que, por razões económicas, funciona em regime de monopólio natural nas áreas em que se encontra implementada. Estas empresas, tal como as detentoras da rede de distribuição, são remuneradas através de Tarifas de Uso de Rede e a sua atividade é regulada por Entidades Reguladoras. [1]

Os serviços auxiliares (SA) representam entidades contratadas para ajudar num correto funcionamento do sistema, nomeadamente em termos de reservas, regulação de frequência/telerregulação, produção de potência reativa e controlo de tensão. As entidades que fornecem estes serviços não são necessariamente entidades produtoras. Poderão corresponder, por exemplo, a empresas de rede que tenham bancos de condensadores ou transformadores com tomadas de regulação em carga. Os serviços auxiliares poderão ser contratados em mercados específicos, ou podem ser definidos através de mínimos obrigatórios que as empresas devem respeitar para participar no mercado. [1]

Este modelo corresponde à visão mais desagregada das atividades associadas à produção, transporte, distribuição e comercialização de energia elétrica. Em diversos países, é comum várias destas atividades estarem englobadas na mesma entidade, nomeadamente a nível do transporte de energia elétrica e da operação do sistema, como se verifica em Portugal por parte da REN.

2.3 Mercados de Eletricidade

Com a reestruturação do sector elétrico, os mercados *spot*, também conhecidos como mercados em *Pool*, passaram a ser uma forma de relacionamento entre empresas produtoras e os comercializadores ou clientes elegíveis. Estes mercados integram ou administram mecanismos a curto prazo

nos quais se pretende equilibrar a produção e o consumo, através de propostas comunicadas pelas entidades produtoras e pelos comercializadores ou clientes elegíveis. Estas propostas são submetidas no dia anterior àquele em que será implementado o resultado das compras de venda/compra que tiverem sido aceites, sendo assim denominados em literatura de língua inglesa como *Day Ahead Markets* ou Mercados *Spot* de energia elétrica. [1] Estes mercados podem ser simétricos ou assimétricos e voluntários ou obrigatórios.

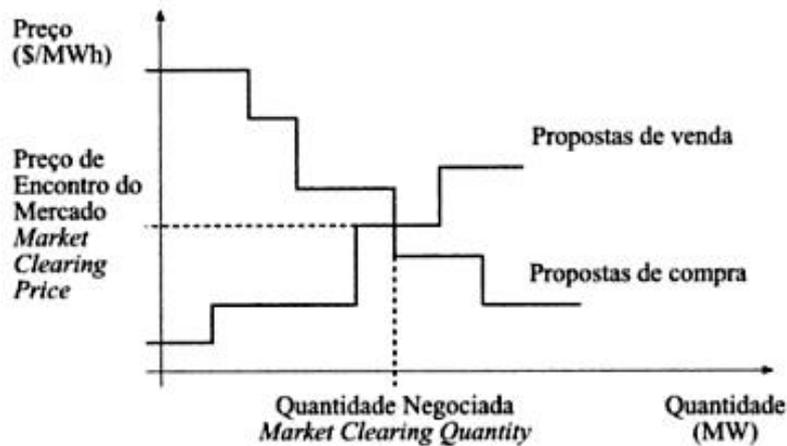


Figura 2.3: Funcionamento de um *Pool* simétrico [1]

O modelo simétrico permite a realização de propostas de venda e compra de energia elétrica. As empresas produtoras transmitem a sua oferta ao Operador de Mercado, especificando a disponibilidade de produção para cada período do dia seguinte em que o intervalo de um dia se encontra dividido, juntamente com a remuneração mínima que pretendem do serviço oferecido. Os comercializadores ou consumidores elegíveis, por outro lado, propõe uma oferta de compra com a potência pretendida para cada um dos intervalos do dia e valor máximo que estão dispostos a pagar em cada um dos intervalos.

O Operador de Mercado organiza as propostas relativamente a cada intervalo de tempo (uma hora ou trinta minutos), construindo as curvas de ofertas de compra (por ordem decrescente de preço) e venda (por ordem crescente de preço), como se pode verificar na Figura 2.3. Cada segmento das curvas ilustradas no gráfico representa uma proposta de compra ou venda, caracterizada pelo preço e quantidade envolvida. O ponto de intersecção das duas curvas dá origem ao Preço de Encontro de Mercado (*Market Clearing Price*) e a energia elétrica respetiva corresponde à Quantidade Negociada (*Market Clearing Quantity*). Ofertas de venda com preço superior ao preço de mercado e ofertas de compra com preço inferior, não serão consideradas.

Um outro modelo de mercado é o mercado *Pool* assimétrico, caracterizado por apenas permitir a apresentação de ofertas de venda de energia elétrica. Do lado da procura, estas implementações utilizam, geralmente, previsões de cargas comunicadas para cada intervalo de negociação por parte das entidades consumidoras ou comercializadoras. Neste modelo, a carga assume-se como

inelástica, ou seja, encontra-se disposta a pagar qualquer valor que resulte do funcionamento do mercado para ser alimentada.

Os preços deste tipo de mercados são muito voláteis e os preços finais fortemente influenciados pelos preços de venda oferecidos, pelo nível de procura e pela ocorrência ou não de saídas de serviço, programadas ou por avaria.

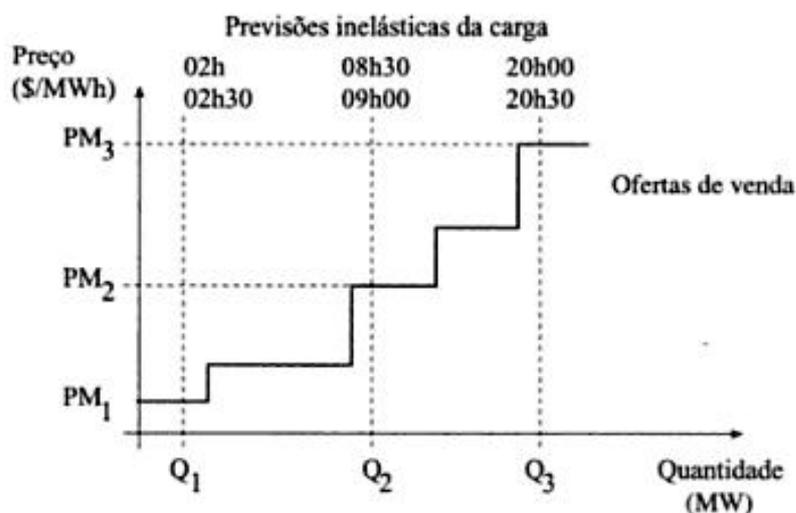


Figura 2.4: Funcionamento de um *Pool* assimétrico [1]

Na Figura 2.4 encontra-se ilustrado um exemplo do funcionamento de um *Pool* assimétrico, onde apenas se encontra a curva relativa às ofertas de venda. A cada intervalo de tempo verifica-se o preço associado a cada quantidade que, neste tipo de mercado, pode ser mais elevado, aumentando também o preço de mercado no dado instante.

Os mercados em *Pool* podem também ser descritos como voluntários ou obrigatórios, consoante a existência de disposições legais, tornando obrigatória a apresentação de ofertas de venda e/ou de compra a todas as entidades produtoras, comercializadoras e consumidores elegíveis.

2.3.1 MIBEL

Em 1998, as administrações portuguesa e espanhola iniciaram conversações e estudos para, progressivamente, eliminarem obstáculos e favorecerem a criação do Mercado Ibérico de Eletricidade. A partir dessa data, ocorreram um conjunto de acontecimentos que, de forma gradual, foram consolidando a construção e o desenvolvimento do que, nos dias de hoje, é o Mercado Ibérico de Eletricidade cujo arranque, em toda a dimensão, ocorreu em 1 de julho de 2007. [7]

Este processo de cooperação, com o objetivo de promover a interligação dos sistemas elétricos dos dois países, contribuiu significativamente não só para a concretização do mercado de energia elétrica a nível Ibérico, mas também, a nível europeu, como um passo significativo para a construção do Mercado Interno de Energia. [8]

O MIBEL permite que qualquer consumidor do espaço Ibérico adquira energia elétrica num regime de livre concorrência a qualquer produtor que atue tanto em Portugal como em Espanha. Os seus principais objetivos são [9]:

- Beneficiar os consumidores de eletricidade dos dois países, através do processo de integração dos respetivos sistemas elétricos;
- Estruturar o funcionamento do mercado com base nos princípios da transparência, livre concorrência, objetividade, liquidez, auto-financiamento e auto-organização;
- Favorecer o desenvolvimento do mercado de eletricidade de ambos os países, com a existência de uma metodologia única e integrada, para toda a Península Ibérica, de definição dos preços de referência;
- Permitir a todos os participantes o livre acesso ao mercado, em condições de igualdade de direitos e obrigações, transparência e objetividade;
- Favorecer a eficiência económica das empresas do sector elétrico, promovendo a livre concorrência entre as mesmas.

Este mercado possui uma estrutura mista, existindo um mercado diário e ainda a possibilidade de se estabelecerem contratos bilaterais físicos e financeiros. Trata-se, também, de um modelo voluntário já que existe alternativa nas relações entre entidades produtoras e consumidoras. A estrutura mista do MIBEL está ilustrada na Figura 2.5.

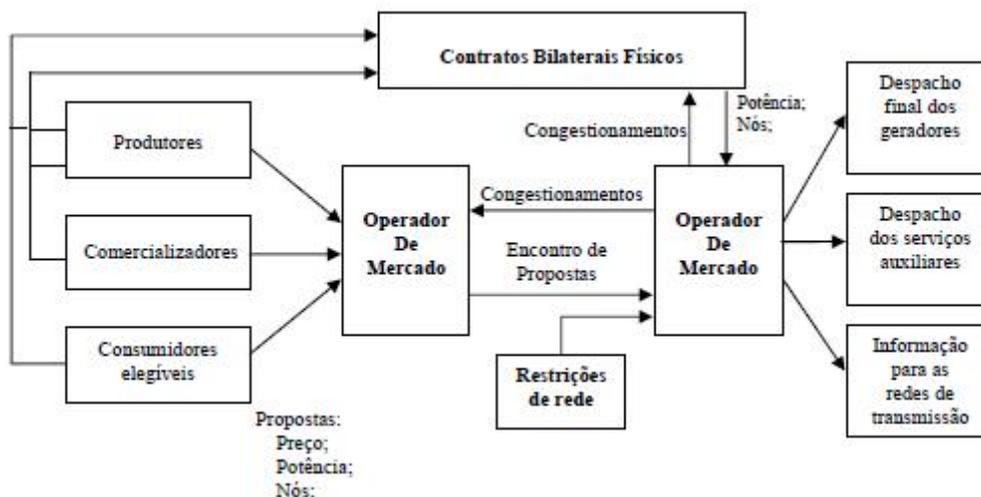


Figura 2.5: Modelo misto de exploração do setor elétrico [1]

Mais recentemente, a 4 de Fevereiro de 2014, deu-se o acoplamento do MIBEL com os mercados do noroeste europeu. A sincronização entre mercados realizou-se no dia 4 para o programa de mercado do dia 5, aplicando-se os procedimentos previstos na iniciativa europeia *Price Coupling*

of Regions (PCR) no processo de encontro das ofertas em mercado diário no MIBEL. Considerada uma alteração histórica para o futuro dos mercados de eletricidade europeus e contando com as quatro Bolsas de Energia e os treze Operadores da Rede de Transporte (TSOs), a região NWE (Nordeste da Europa), que se estende da França à Finlândia, passou a operar com um cálculo comum de preços para o mercado diário. O PCR foi desenvolvido pelas Bolsas Europeias de Energia para fornecer um algoritmo único e procedimentos harmonizados para o cálculo do preço da eletricidade e para o uso das capacidades de interligação, calculadas e oferecidas ao mercado de forma coordenada pelos TSOs. É também utilizado na região do Sudoeste de Europa (SWE) de modo comum e sincronizado. [10]

Desde 4 de Fevereiro, que as Bolsas de Energia de países que representam 75% (mais de 2000 TWh) do consumo de eletricidade europeu estão a calcular os preços da eletricidade ao mesmo tempo e da mesma maneira – um passo revolucionário em direção ao mercado comum de eletricidade Europeu. Os consumidores de eletricidade Europeus beneficiarão de uma utilização mais eficiente do sistema elétrico da região, resultado de um mercado mais proximamente ligado. [10]

Capítulo 3

Gestão de Aproveitamentos Hidroelétricos

3.1 Aproveitamentos Hidroelétricos

Tem sido cada vez mais notório o investimento na produção de energia elétrica através de fontes renováveis. Devido ao potencial hidroelétrico existente no território nacional, Portugal tem apostado na construção ou reforço de aproveitamentos hidroelétricos. A garantia de fiabilidade e capacidade rápida de resposta, tornam este tipo de produção de energia uma solução viável e alvo de grandes investimentos. Embora possua algumas desvantagens no que toca ao impacto ambiental, são inúmeras as vantagens que advêm da construção destes aproveitamentos, sendo as principais [11]:

- Fonte de energia renovável, limpa e inesgotável;
- Capacidade de responder a variações rápidas de carga;
- Capacidade de racionalização de matéria-prima, através de armazenamento de água;
- Nível de disponibilidade e fiabilidade muito elevado, possuindo a capacidade de funcionar como reserva em caso de avarias ou falhas de outros grupos geradores, ou erros de previsão de consumos, principalmente na ponta do diagrama de cargas;
- Custo operacional baixo;
- Tempo de vida útil elevado, se realizada a devida manutenção;
- Possibilidade de integrar outras fontes renováveis, devido à sua capacidade de responder à intermitência da eólica, tanto a turbinar, em caso de défice de produção como a bombar, em caso de excesso desta fonte;
- Contribuição para o aumento da eficiência energética dos países;

- Amortecimento de cheias, através do controlo do caudal;
- Abastecimento de água para consumo humano, industrial e agro-pecuário;
- Garantia de caudais mínimos em períodos críticos;
- Diminuição da emissão de gases poluentes para a atmosfera;
- Tecnologia altamente eficiente, com rendimentos próximos dos 90%.

Relativamente ao tipo de funcionamento das centrais hídricas, estas podem ser classificadas da seguinte maneira [12]:

- Centrais de base – destinadas a fornecer a maior parte da energia elétrica de forma contínua. Centrais de grande potência;
- Centrais de ponta – exclusivamente projetadas para cobrir a procura de energia nas horas de ponta. Devem poder ser colocadas em serviço rapidamente e também responder rapidamente às variações de carga;
- Centrais de reserva – têm por objetivo substituir total ou parcialmente as centrais de base em caso de avaria ou beneficiação destas;
- Central de Emergência ou Socorro – destinadas a abastecer consumidores que inesperadamente deixam de ser alimentados pela fonte de energia habitual;
- Centrais de bombagem ou armazenamento – são aproveitamentos hidroelétricos que utilizam a energia das horas de vazio para efetuar bombagem. Fornecem energia nas horas de ponta.

Quanto à queda, classificamos as centrais em três tipos [12]:

- Centrais de Alta Queda – alturas de queda superiores a 200 metros;
- Centrais de Média Queda – alturas de queda entre os 20 e os 200 metros;
- Centrais de Pequena Queda – alturas de queda inferiores a 20 metros

A classificação dos aproveitamentos hidroelétricos, segundo as características das centrais hídricas e a sua capacidade de armazenamento, é realizada normalmente da seguinte forma [3]:

- Aproveitamentos a fio-de-água – centrais hídricas com pequena capacidade de armazenamento, que aproveitam a afluência natural dos cursos de água para produzir energia;
- Aproveitamento de albufeira – este tipo de centrais permite o armazenamento das afluências naturais, para posteriormente colocar a sua potência em horas mais favoráveis. Estes aproveitamentos apresentam maior capacidade de valorização da sua energia, quando comparados com as centrais a fio-de-água;

- Aproveitamentos de albufeira com bombagem – estas são as centrais hídricas mais rentáveis, pois permitem enviar ou reenviar água para a sua albufeira, de forma a ter sempre capacidade de produção disponível. Uma central com bombagem, desde que disponha de água a jusante, não precisa de afluências naturais para funcionar. Normalmente, estes aproveitamentos são denominados de centrais com grupos reversíveis.

Tendo em conta a configuração hidráulica do sistema produtor, pode também ser considerada a classificação seguinte [3]:

- Cascata – quando os aproveitamentos estão instalados no mesmo curso de água, sendo o caudal turbinado, bombado e o descarregado afluências do aproveitamento imediatamente a jusante;
- Independentes – quando estão isolados hidráulicamente, apenas interligados do ponto de vista elétrico.

O circuito hidráulico de uma central hídrica é constituído por [13]:

- Câmara de carga ou de pressão – quando a diferença de cota entre a tomada de água e as turbinas é superior a 15 metros convém que a entrada de água nas turbinas seja feita por meio de condutas forçadas e, para isso, deve ser prevista uma câmara de carga ou de pressão entre o canal de adução e as condutas forçadas; Este elemento tem como funções distribuir a água às condutas forçadas, deter os últimos corpos flutuantes, impedir a entrada de pedras e areias nas condutas forçadas, criar ondas de translação no caso de fecho das turbinas e ter um volume suficiente para satisfazer solicitações rápidas;
- Chaminé de equilíbrio – depósito de compensação para evitar os choques hidráulicos. É, basicamente, um poço vertical ou inclinado, aberto na parte superior e situado na conduta forçada o mais perto possível das turbinas;
- Condutas forçadas;
- Câmara das turbinas – espaço destinado, numa central hidroelétrica, ao alojamento das turbinas hidráulicas. Pode ser aberta (pequenas quedas até 15 metros) ou fechada (quedas maiores que 15 metros);
- Tubo de aspiração ou difusor – serve de ligação entre a turbina e o canal de descarga da água turbinada (importante nas turbinas Francis e Kaplan);
- Canal de descarga – recolhe a água do tubo de aspiração e devolve-a ao rio a jusante em sítio conveniente;
- Comportas e outros órgãos de obturação;
- Central – local onde se montam as turbinas e os geradores assim como a restante maquinaria e demais aparelhagem auxiliar necessária ao seu funcionamento. As centrais podem ser a

céu aberto (central pé de barragem ou central longe da barragem) ou subterrâneas ou de caverna;

- Turbina - Elemento primário de um sistema de produção de energia elétrica que, em conjunto com um gerador, utiliza a energia contida num fluido (água):
 - Turbina de ação – a água incide sobre a roda móvel através de jatos individualizados (máquinas de injeção parcial). Não funcionam imersas na água turbinada nem possuem tubo de aspiração ou difusor (tipo Pelton usada em aproveitamentos de alta queda e baixo caudal);
 - Turbina de reação – trabalham no seio do fluido turbinado sendo que a água penetra na roda móvel por toda a periferia (máquinas de injeção total). Podem ser do tipo:
 - * Turbina Francis – a câmara de entrada (voluta em forma de espiral) encaminha a água para o distribuidor, onde é orientada da periferia para o eixo da turbina, caindo, a seguir sobre as pás da roda dando origem à sua rotação por um fenómeno de reação (usada em aproveitamentos de média ou baixa queda);
 - * Turbina Kaplan – também é uma turbina de reação que se diferencia da Francis por apresentar menor número de pás, com inclinação regulável e em forma de hélice (usada em aproveitamentos de baixa queda e grande caudal: correspondendo normalmente a aproveitamentos a fio de água);
 - * Grupos bolbo – são constituídos por uma cuba em forma de bolbo, totalmente submersa na água onde se aloja a turbina-tipo Kaplan de eixo horizontal e o alternador (são instalados muitas vezes em aproveitamentos de muito baixa queda).

3.1.1 Situação em Portugal

O nosso país necessita de diminuir a dependência energética do exterior e com os recursos que Portugal disponibiliza, principalmente a nível das energias renováveis, é possível atingir este objetivo. Nos últimos dez anos, Portugal viu diminuir a sua dependência energética de 90% para 80% [14] e no primeiro semestre do ano passado a produção das centrais hídricas alimentou 36% do consumo nacional [15].

Com este objetivo em vista, foi criado o Programa Nacional de Barragens com Elevado Potencial Hidroelétrico (PNBEPH) que pretende realizar um conjunto de investimentos em aproveitamentos hidroelétricos. Este projeto pretende diminuir o potencial hídrico por explorar, que ronda os 54% no território português, para 33% até 2020 e atingir os 7000 MW de potência hídrica instalada até ao mesmo ano (Figura 3.1). [2]

Atualmente, as principais bacias hidrográficas são as do Cávado-Lima, Douro e Tejo-Mondego, destacando-se a segunda pela elevada potência hidroelétrica, em grande parte devido às centrais hidroelétricas da EDP, como se pode verificar na Tabela 3.1:



Figura 3.1: 1 Importação da energia primária/procura nacional total. 2 Capacidade instalada hídrica total/potencial hídrico teórico [2]

Tabela 3.1: Situação atual das principais bacias hidrográficas [4]

Novas Barragens	Situação	Início de Construção	Entrada em Serviço	Potência a Instalar (MW)
Baixo Sabor	Em construção	2008	2015	171
Riberadio Ermida	Em construção	2010	2015	81
Foz Tua	Em construção	2011	2016	252
Fridão	Em licenciamento	-	2022	238

Por outro lado, a EDP está também a implementar reforços de potência em aproveitamentos hídricos já existentes (Tabela 3.2). Estes são realizados em aproveitamentos em serviço/exploração, utilizando estruturas existentes, e tendo por objetivo económico evitar o desperdício energético decorrente de descarregamentos, devidos à reduzida capacidade útil da albufeira e/ou reduzida potência instalada no aproveitamento. No caso de Alqueva II, Venda Nova III e Salomonde II o reforço é feito com grupos reversíveis, equipados assim para efetuarem também bombagem. [4]

Tabela 3.2: Reforços de potência em aproveitamentos da EDP [4]

Reforços de Potência	Situação	Início de Construção	Entrada em Serviço	Potência a Instalar (MW)
Picote II	Concluído	2007	2011	246
Bemposta II	Concluído	2008	2011	191
Alqueva II	Concluído	2008	2012	256
Venda Nova III	Em construção	2009	2015	746
Salomonde II	Em construção	2010	2015	207
Paradela II	Em estudo	-	-	318

De notar que nas tabelas apenas estão descritos os investimentos feitos por parte da EDP, havendo ainda outras empresas promotoras de aproveitamentos hidroelétricos.

3.2 Exploração de Aproveitamentos Hidroelétricos

3.2.1 Características Gerais

A exploração de aproveitamentos hidroelétricos e a sua otimização resultam num problema bastante complexo quer ao nível da produção, do transporte ou da distribuição, uma vez que é necessário prever certas grandezas, podendo ser afetado por incertezas e risco. Para além de ser necessário considerar as decisões operacionais e o impacto destas nas restantes centrais, há que ter em conta a imprevisibilidade das afluências e a não linearidade da potência destes aproveitamentos, devido à sua dependência relativamente à queda e ao caudal turbinado. Dada a complexidade do problema e sendo este um problema não linear, ultrapassa a capacidade humana de cálculo mental, sendo necessário recorrer a ferramentas computacionais.

Por outro lado, é fundamental ter em conta o horizonte temporal do planeamento, já que todas as decisões tomadas no presente irão afetar significativamente as condições futuras de exploração. Os projetos de exploração dos sistemas hídricos podem abranger duas escalas temporais, sendo estas descritas como planeamento a [16]:

- **curto prazo** – abrange um horizonte de ações futuras que vão de um dia até uma semana. As decisões são tomadas tipicamente em estádios cuja duração é de uma hora, embora resoluções inferiores (meia hora) possam ser igualmente consideradas;
- **médio e longo prazo** – abrange um horizonte compreendido entre alguns meses até vários anos. O período base tem normalmente a duração de semanas ou meses, em que a construção de novas centrais, reforços e modernização de outras podem ser igualmente objeto de estudo.

Numa análise simples do problema e tendo em conta que os custos de produção de uma central hídrica são praticamente nulos, há que ponderar as decisões relativamente a turbinar e bombar. Turbinar no presente poderá parecer a melhor solução para poupar combustível e, conseqüentemente, diminuir o custo de produção devido à não utilização de centrais térmicas. Contudo, se existir um défice de afluências nos períodos seguintes, o custo de produção irá aumentar drasticamente. Por outro lado, recorrer apenas a energia térmica no presente, por forma a utilizar a energia hídrica no futuro, poderá resultar em descarregamentos caso as afluências sejam elevadas.

As dificuldades encontradas neste tipo de problema, devem-se essencialmente aos seguintes fatores [16]:

- Característica não linear da potência gerada por um aproveitamento hidroelétrico;
- Efeitos da propagação temporal das decisões tomadas num certo momento;
- Incerteza associada à procura de energia elétrica e às afluências;
- Configuração das cascatas;
- Efeito da bombagem.

Existem já alguns trabalhos realizados nesta área, sendo verificadas diferenças no método de resolução utilizado e também a nível das simplificações efetuadas. Algumas das simplificações consistem na adoção de valores constantes para certas variáveis sob certas condições de exploração, linearização de variáveis cujo comportamento é não linear ou mesmo a não consideração de algumas variáveis. Todas estas simplificações têm o objetivo de facilitar a resolução do problema e torná-lo menos pesado, não se pretendendo obter uma solução ótima, mas sim um conjunto de soluções de boa qualidade.

3.2.2 Métodos Existentes

Como já referido, existem várias formas de abordar o problema de exploração e otimização dos aproveitamentos hídricos. Apesar dos diversos estudos já efetuados na área, ainda não existe uma metodologia ótima de resolução, isto devido à diferença na importância atribuída a certas características por parte dos autores, que pode ir desde a rapidez computacional à própria qualidade da solução.

Das diferentes metodologias já utilizadas, as mais relevantes são a programação não linear, a programação linear, a programação dinâmica, a programação linear inteira mista e as meta-heurísticas.

Programação Não Linear

Os modelos não lineares permitem considerar de uma forma bastante realista as características hídricas dos aproveitamentos hidroelétricos, principalmente se comparados com os modelos lineares.

No entanto, estes modelos podem não conseguir evitar descargas de água em períodos em que tal não seja desejável e podem gerar ordens para turbinar que sejam inaceitáveis do ponto de vista de operação. Além disso são muito complexos e de lenta resolução. [16]

Programação Linear

A programação linear tem sido bastante aplicada em problemas de planeamento de recursos hídricos já que existe uma grande variedade de software disponível relativo a essa área. A sua resolução consiste numa aproximação natural ao problema, que é normalmente resolvido por linearização.

São abordagens mais simples, pois os modelos baseados em programação linear consideram que a produção do aproveitamento hidroelétrico é linearmente dependente do caudal turbinado e desprezam o efeito de variação da queda. [13]

Programação Dinâmica

A programação dinâmica é uma técnica de otimização apoiada no princípio de otimalidade, obtendo as suas soluções através de processos regressivos, trabalhando o problema do fim para o início. Este método encontra-se entre os primeiros a ser utilizados para resolução deste tipo de problemas de otimização.

Porém, a aplicação direta da programação dinâmica a sistemas hídricos em cascata é impraticável, devido à dimensionalidade do problema resultante. [12]

Programação Linear Inteira Mista

O problema do planeamento da exploração de um sistema hídrico apresenta uma estrutura não linear inteira mista, o que torna bastante difícil a sua resolução recorrendo aos modelos matemáticos existentes. Novas técnicas de resolução têm ajudado a atingir altos níveis de eficiência, não só em termos de precisão bem como com bons tempos de computação.

Contudo, quando se pretende obter uma solução com maior precisão ou envolvendo um maior número de variáveis, este método torna-se ineficaz para lidar com este tipo de problemas devido ao elevado esforço de computação requerido. [12]

Meta-Heurísticas

As meta-heurísticas correspondem a algoritmos de otimização inspirados em processos naturais ou biológicos, sendo neste momento a principal aposta das empresas nesta área, destacando-se os Algoritmos Genéticos e os Enxames de Partículas Evolucionários. Os Algoritmos Genéticos inspecionam vários caminhos em cada iteração e reduzem a possibilidade da solução ficar presa em ótimos locais. O espaço de pesquisa é explorado, nomeadamente, nas zonas onde a probabilidade de obter melhores resultados se mostra mais elevada. O método de Enxame de Partículas Evolucionário parece ter um comportamento que é independente da dimensão do problema e destaca-se pela sua simplicidade e rapidez. [16]

3.3 *Hydro Scheduling Problem*

O *Hydro Scheduling Problem* (HSP) corresponde a um problema de gestão operacional de um conjunto de aproveitamentos hidroelétricos e, neste trabalho está associado à otimização da energia produzida por um conjunto de centrais hídricas que oferecem a sua potência num mercado tipo *Pool*, tendo em conta a interligação entre as centrais numa cascata, os preços de mercado e as aflúncias às suas albufeiras. Dada a dimensão e complexidade deste problema é necessário adotar algumas simplificações para formular o modelo matemático a desenvolver [3]:

- as empresas possuidoras destas centrais são consideradas “price takers”, ou seja admite-se que as suas propostas não influenciam os preços de fecho do mercado;
- o custo de arranque das centrais hídricas é nulo;
- o rendimento mantém-se constante, não sendo alterado com o caudal turbinado ou bombado;
- os regolfos, que correspondem à subida do nível da água a jusante por ação do turbinamento, são ignorados, e é considerado constante o nível a jusante da central;
- considera-se desprezável o tempo de mudança de estado da central elétrica do modo de turbina ao modo de bomba.

As considerações mencionadas permitem tornar o modelo mais simples em termos de resolução prática, com resultados muito aceitáveis, uma vez que as considerações essenciais são representadas, nomeadamente [3]:

- relação não linear entre a potência, queda e caudal;
- interligação dos reservatórios;
- possibilidade de bombagem;
- restrições de operação (limites máximos e mínimos, caudais ecológicos, curva nível volume da albufeira).

Analisando as simplificações referidas, considera-se que as ofertas das centrais não influenciam o resultado do mercado. Nestas condições, os preços de mercado são dados de entrada e resultam ou de históricos verificados, ou de previsões externas a este modelo.

Relativamente ao arranque das centrais hídricas, existindo água disponível estas conseguem entrar em funcionamento de forma rápida e o seu custo é praticamente nulo, sendo portanto desprezado no HSP.

Por outro lado, o rendimento de uma turbina hidráulica varia com a queda e com o caudal turbinado. O HSP permite representar este fenómeno, pois é possível em cada iteração do modelo atualizar o rendimento em função dos valores da queda e caudais obtidos na iteração anterior. Porém, o mesmo será considerado constante, já que a sua variação não é significativa.

Um dos problemas mais difíceis de tratar no estudo de aproveitamentos hidroelétricos diz respeito à questão dos regolfos. Este valor constante corresponde a um nível médio estimado, que considera o efeito da perda de queda devido aos regolfos.

Para a formulação matemática do problema é necessário calcular a potência produzida numa central hídrica. A potência gerada por uma turbina resulta da energia potencial gravítica armazenada na água da albufeira, dada por $W_p = m \times g \times h$. Sabendo que a densidade da água é aproximadamente 1000 kg/m³ e desprezando as perdas de carga, podemos obter a potência gerada pela turbina hidráulica, através da expressão 3.1.

$$P_t = 9,8 \times q \times h \times \mu_t \quad (W) \quad (3.1)$$

Nesta expressão:

q – caudal em m³/s;

h – queda em metros;

μ_t – rendimento de turbinagem.

No entanto, deverão ser consideradas as perdas de carga que se dão ao longo do circuito hidráulico, representadas em $\Delta h = \beta \times q^2$. Esta expressão permite definir a queda útil e corresponde à diferença entre a queda bruta (h) – desnível entre a água a montante e a jusante – e as perdas de

carga verificadas no circuito hidráulico. Assim sendo, a potência gerada passa a ser calculada pela expressão 3.2.

$$P_t = 9,8 \times q \times (h - \beta \times q^2) \times \mu_t \quad (kW) \quad (3.2)$$

Nesta expressão:

q – caudal em m³/s;

h – queda em metros;

β – coeficiente perda carga;

μ_t – rendimento de turbinagem.

A Figura 3.2 representa a equação dada em 3.2, isto é, a potência gerada por um aproveitamento hidroelétrico em função da queda e do caudal.

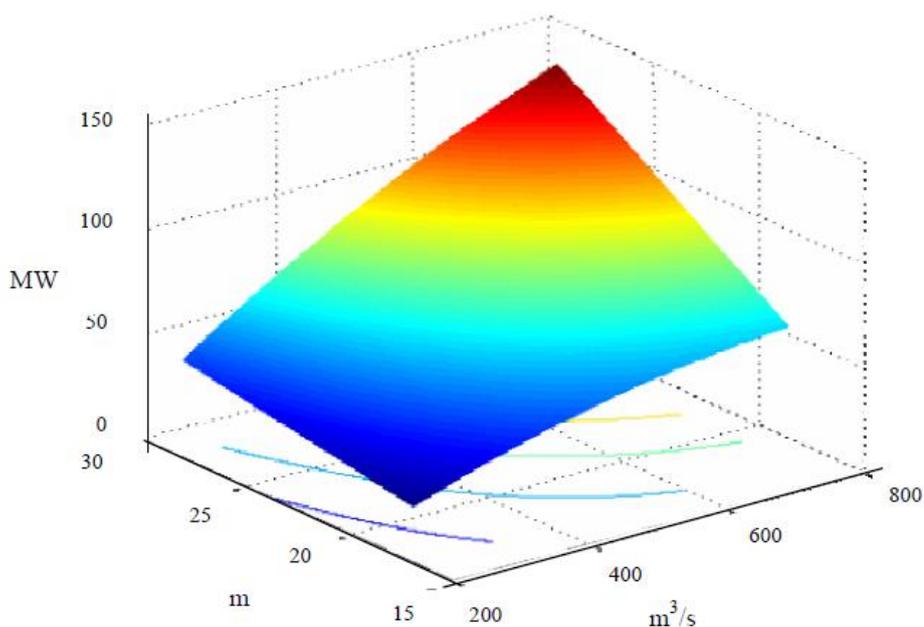


Figura 3.2: Potência gerada por uma central hídrica em função da queda e caudal.

Se o processo de bombagem for considerado, a equação que expressa a potência consumida é dada por 3.3, sendo μ_b o rendimento da bombagem.

$$P_b = 9,8 \times q \times (h + \beta \times q^2) \times (1/\mu_b) \quad (kW) \quad (3.3)$$

Observando esta expressão, verifica-se que para a mesma potência do alternador, o caudal de bombagem é menor.

Analisando o gráfico da Figura 3.2, verifica-se a existência de uma família de curvas, quando se considera a potência em função do caudal turbinado, cada uma delas obtida para um valor de queda constante. Observa-se esse facto com mais detalhe, no gráfico da Figura 3.3.

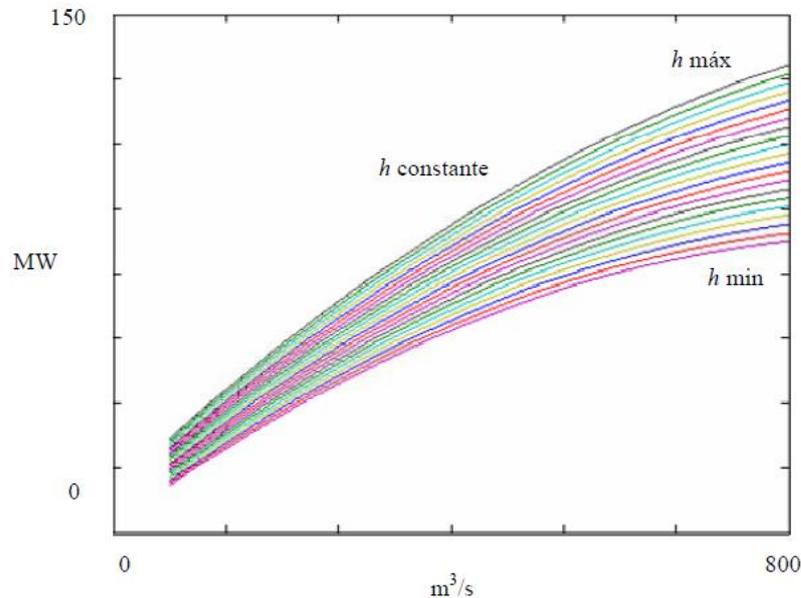


Figura 3.3: Potência gerada por uma central hídrica em função do caudal, para diferentes valores da queda.

As curvas representadas neste gráfico, cada uma delas obtida para um valor de queda constante, apresentam uma característica não linear devido ao efeito da perda de carga. De facto, à medida que o caudal turbinado aumenta, a perda de carga também aumenta, penalizando a potência (equação 3.2). Uma das simplificações adotada no HSP consistiu em assumir a perda de carga constante e, por isso, é importante analisar o impacto desta condição no problema.

Existem várias hipóteses para considerar a perda de carga no *Hydro Scheduling Problem* [3]:

- considerar perda de carga nula, desprezando-a;
- optar por usar uma perda de carga média de valor constante;
- admitir o seu valor máximo e considerar esse valor constante;
- usar a expressão completa e não linear, através do cálculo iterativo da perda de carga.

Numa análise ao gráfico da Figura 3.4, ao considerar a perda de carga nula, verifica-se uma grande discrepância entre os valores na zona de turbinamentos elevados, cometendo um erro por excesso.

A utilização de uma curva de perda de carga constante correspondente a um valor médio que pode ser determinada através da minimização do erro médio quadrático das duas curvas, corresponde à opção que permite obter um erro menor para todo o intervalo de valores de caudais turbinados.

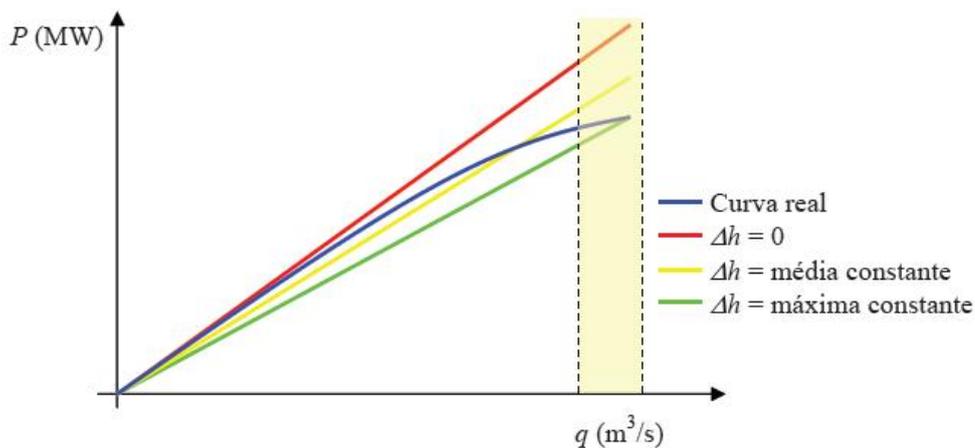


Figura 3.4: Impacto da perda de carga na potência para caudais elevados.

Por fim, é também possível a utilização de um valor constante de perda de carga coincidente com o seu valor máximo. Neste caso verifica-se um erro por defeito, mas deve notar-se que nas zonas dos caudais mais elevados, o erro associado a esta última hipótese é mais pequeno se comparado com as duas anteriores.

Esta característica é muito importante porque a tendência do modelo HSP será a de colocar quer o turbinamento quer a bombagem nos seus limites máximos e mínimos. Existe ainda a hipótese de incluir a perda de carga calculada através do processo iterativo, em função do caudal turbinado obtido em cada iteração. Embora mais próxima da realidade, esta opção implica uma maior utilização de recursos, especialmente ao nível do tempo de processamento.

Neste trabalho pretende-se resolver o problema da gestão de aproveitamentos hidroelétricos considerando a relação não linear entre a potência, queda e caudal pelas razões já explicitadas relacionadas com o efeito da queda. Assim, existem várias hipóteses para incluir a queda [3]:

- considerar a queda constante, determinando um valor médio;
- considerar uma família de curvas predefinidas para valores esperados da queda;
- resolver o problema não linear, adotando técnicas de resolução não lineares ou meta heurísticas;
- implementar um processo iterativo, que considere em cada iteração um valor de queda constante, sendo este sucessivamente atualizado.

O modelo de HSP que foi desenvolvido baseia-se no primeiro ponto referido. De forma a simplificar o problema, o efeito não linear da queda será desprezado, considerando-a constante.

3.4 Formulação Geral do Problema

Antes da reestruturação do setor elétrico, a resolução do problema de exploração das centrais hídricas baseava-se na minimização do custo global do sistema, atendendo a todas as suas restrições e procurando manter um nível satisfatório de segurança.

Com a liberalização do setor, surgiu o mercado competitivo com a possibilidade dos consumidores escolherem os seus fornecedores. Posto isto, as empresas procuram agora maximizar os seus rendimentos, tendo em conta os preços de mercado. No entanto, as propostas apresentadas no mercado de eletricidade partem de previsões de preços que apresentam um certo grau de incerteza, obrigando as empresas a utilizar ferramentas de previsão de preços e de otimização.

Um modelo geral de otimização para a exploração de centrais hídricas é apresentado em seguida. Inclui uma função objetivo que se pretende maximizar, sujeita a um conjunto de restrições que deverão ser respeitadas. Trata-se de um problema não linear de maximização do lucro esperado pelas centrais, em função do preço de mercado, admitindo que estas são “price takers”.

$$\text{Max}F(x) \quad (3.4)$$

Sujeito a:

$$b^{\min} \leq A \cdot x \leq b^{\max} \quad (3.5)$$

$$x^{\min} \leq x \leq x^{\max} \quad (3.6)$$

3.4.1 Variáveis

Na formulação de um problema de otimização existem sempre três tipos de variáveis, sendo estas:

- Variáveis de decisão (u_{ik}): variáveis cujos valores se pretendem obter e que influenciam o comportamento do sistema;
- Variáveis de estado (x_{ik}): variáveis que descrevem completamente o sistema, isto é, se for conhecido o valor de todas elas, para todos os períodos em análise, é possível saber o comportamento do sistema;
- Parâmetros (p_{ik}): dados introduzidos no problema, correspondendo em muitos casos a elementos exógenos à empresa.

Na Tabela 3.3 são apresentadas as principais variáveis que serão utilizadas no problema. Nesta descrição $i \in \{1, 2, \dots, I\}$ e $k \in \{1, 2, \dots, K\}$, sendo I o número total de centrais hídricas e K o número de períodos do horizonte temporal a analisar.

A título de exemplo a Figura 3.5 ilustra a configuração de dois aproveitamentos interligados, denominados 1 e 2, com o segundo a jusante do primeiro. Notar que a variável caudal bombado neste problema é modelizada na equação balanço da água e não como um problema tratado separadamente. A central 1 possui bombagem.[3]

Tabela 3.3: Variáveis de decisão, de estado e parâmetros para o HSP

Tipo	Variáveis	Descrição
Decisão	qt_{ik}	Caudal turbinado pela central i, na hora k
	qb_{ik}	Caudal bombado pela central i, na hora k
	s_{ik}	Caudal descarregado pela central i, na hora k
Estado	v_{ik}	Volume da albufeira da central i, na hora k
	h_{ik}	Queda da central i, na hora k
	na_{ik}	Nível de armazenamento da albufeira i, na hora k
Parâmetros	a_{ik}	Afluência à albufeira da central i, na hora k
	π_k	Preço de mercado na hora k
	ξ_{ik}	Nível médio a jusante da central i, na hora k
	μ_i	Rendimento de turbinagem da central i
	μ_{b_i}	Rendimento de bombagem da central i
	v_i^0	Volume inicial da central i

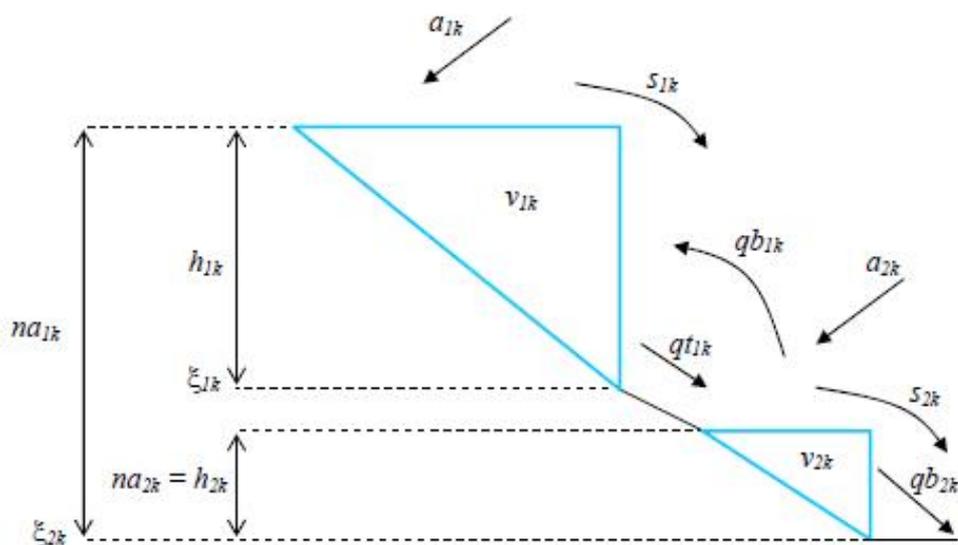


Figura 3.5: Sistema de reservatórios em cascata. [3]

3.4.2 Restrições

Em qualquer problema de otimização de aproveitamentos hidroelétricos há a necessidade de considerar restrições que refletem aspetos técnicos ou de operação interna. O conjunto resultante de todas as restrições define o espaço das soluções viáveis ou admissíveis do problema de entre as quais será selecionada a solução adotada, tendo em conta a função objectivo do problema.

As restrições deste problema podem ser operacionais, relativas aos limites a impor a cada uma das variáveis, ou globais, referentes a todo o sistema. Nas primeiras, podemos incluir o volume da albufeira e o nível de armazenamento (inequações 3.9 e 3.10, respectivamente), estando limitados por um valor máximo e um mínimo, isto devido a problemas como controlo de cheias, mínimos técnicos para funcionamento das máquinas, ou mesmo volumes obrigatórios que devem

ser assegurados para outras atividades como abastecimento de águas, irrigação ou atividades recreacionais.

Os caudais turbinados e bombados (inequações 3.11 e 3.12, respectivamente) também estão sujeitos a limites, bem como as potências produzidas pelos geradores. Os caudais, além do limite máximo fixo, apresentam outro limite máximo consoante a altura da queda, visto serem dependentes desta. Contudo, este facto não será considerado, pois irá sempre ser utilizado o caudal máximo, como acontece geralmente na exploração real deste tipo de centrais.

A altura de queda varia consoante o caudal armazenado, facto que influencia diretamente as potências de turbinagem e de bombagem de um aproveitamento. A altura de queda está limitada pelos limites do volume de água armazenada em cada reservatório.

Os caudais descarregados (inequação 3.13) apenas são limitados com um valor mínimo, já que se assume que as centrais têm a capacidade de descarregar quantidades de água tão elevadas quanto necessário, garantindo o balanço da água caso hajam afluências excessivas.

A equação do balanço de água (equação 3.8) corresponde a uma restrição de igualdade que, para cada intervalo de tempo e para cada central, modeliza a dependência temporal e hidráulica das ações ocorridas nas centrais do sistema.

Existe outra restrição (equação 3.15) que pode ser usada em alguns aproveitamentos que apresentam condições especiais, nomeadamente caudais obrigatórios tais como, por exemplo, ecológicos ou retiradas para regas. Esta implica que o total do volume lançado para jusante tem de estar compreendido entre determinados valores especificados.

3.4.3 Formulação Completa do Problema

A função objetivo deste problema pretende maximizar os lucros obtidos (proveitos de turbinamento menos os custos de bombagem) pelas I centrais, ao longo dos K períodos, tendo em conta todas as restrições. Na função objectivo é também incluído um termo que penaliza os descarregamentos, de forma a evitar que o modelo selecione soluções com um nível excessivo de descarregamentos de água.

A formulação completa do problema está descrita, em seguida.

$$\text{Max} \sum_{(i=1)}^I \sum_{(k=1)}^K (\pi_k \times Pt_{ik}) - (\pi_k \times Pb_{ik}) - (ps \times s_{ik}) \quad (3.7)$$

Sujeito a:

$$v_{ik} = v_{i(k-1)} + a_{ik} - qt_{ik} - s_{ik} + qb_{ik} + \sum_{(m \in M_i)}^L (qt_{m(k-\phi_m)} + s_{m(k-\lambda_m)} - qb_{m(k-\omega_m)}) \quad (3.8)$$

$$v_i^{\min} \leq v_{ik} \leq v_i^{\max} \quad (3.9)$$

$$na_i^{\min} \leq na_{ik} \leq na_i^{\max} \quad (3.10)$$

$$qt_i^{\min} \leq qt_{ik} \leq \min(qt_i^{\max}, qtn_i, \sqrt{\frac{h_{ik}}{htn_i}}) \quad (3.11)$$

$$qb_i^{\min} \leq qb_{ik} \leq \min(qb_i^{\max}, qbn_i - \delta \times (h_{ik} - hbn_i)) \quad (3.12)$$

$$0 \leq s_{ik} \leq \infty \quad (3.13)$$

$$v_{iK} = v_{ik}^f \quad (3.14)$$

$$vol_i^{\min} \leq qt_{ik} + s_{ik} - qb_{ik} \leq vol_i^{\max} \quad (3.15)$$

Nesta formulação:

I - número total de centrais hidroelétricas;

K - número total de períodos;

L - número total de aproveitamentos a montante de i ;

π_k - preço de mercado na hora k ;

Pt_{ik} - potência de turbinamento na central i , na hora k , dada por (3.2);

Pb_{ik} - potência de bombagem na central i , na hora k dada por (3.3);

ps - penalidade atribuída aos descarregamentos;

s_{ik} - caudal descarregado pela central i , no período k ;

v_{ik} - volume de água na albufeira i , no período k ;

a_{ik} - afluência natural ao reservatório i , no período k ;

na_{ik} - nível de armazenamento da água no reservatório i , no período k ;

qt_{ik} - caudal turbinado pela central i , no período k ;

qb_{ik} - caudal bombado pela central i , no período k ;

M_i - conjunto de reservatórios diretamente ligados e a montante do reservatório i ;

ϕ_m - atraso para caudais turbinados do aproveitamento m até ao i ;

λ_m - atraso para caudais descarregados do aproveitamento m até ao i ;

ω_m - tempo de atraso para caudais bombados do aproveitamento m até ao i;

vol_i^{min} - volume lançado mínimo para a central i, em todos os períodos;

vol_i^{max} - volume lançado máximo para a central i, em todos os períodos;

v_i^{min} - volume mínimo da albufeira i;

v_i^{max} - volume máximo da albufeira i;

qt_i^{min} - caudal turbinado mínimo da central i;

qt_i^{max} - caudal turbinado máximo da central i;

qb_i^{min} - caudal bombado mínimo da central i;

qb_i^{max} - caudal turbinado máximo da central i;

qtn_i - caudal nominal de turbinamento da central i;

qbn_i - caudal nominal de bombagem da central i;

htn_i - queda nominal de turbinamento da central i;

htb_i - queda nominal de bombagem da central i;

δ_i - Coeficiente de bombagem da central i;

v_{iK} - volume da última hora da central i;

v_{ik}^f - volume final pretendido na central i.

Capítulo 4

Descrição da Metodologia

4.1 Programação Linear

A programação linear é um método de otimização que minimiza ou maximiza uma função objetivo linear, de acordo com o resultado pretendido, com variáveis sujeitas a limites e restrições lineares de igualdade e/ou desigualdade. Comportamentos não lineares, quer na função objetivo quer nas restrições, devem ser aproximados por funções lineares para que se possa usar este método de otimização. A programação linear encontra sempre uma solução para o problema ao qual é aplicada, desde que o problema seja bem formulado e, geralmente, apresenta um tempo de cálculo reduzido. Estes algoritmos proporcionam códigos extremamente robustos e eficientes, que são comercializados e se encontram à disposição dos utilizadores. Neste trabalho utiliza-se a função de programação linear *linprog*, existente no *software* MATLAB.

4.2 Formulação do Problema Simplificado

Como simplificação ao modelo geral já apresentado no Capítulo 3, pretende-se apenas otimizar o potencial hidroelétrico da bacia hidrográfica, sendo todos os modelos criados apenas focados no controlo dos caudais e no volume de água armazenado. Para ser possível resolver este problema de otimização utilizando programação linear, é necessário desprezar o efeito não linear da queda, considerando-a constante. É então estabelecida uma relação linear entre a potência ativa gerada e o caudal turbinado, sendo esta a única variável a utilizar para calcular da potência. Neste tipo de modelação, as decisões associadas à obtenção do volume de água turbinada e bombada não dependem diretamente da altura de queda. No entanto, esta variável é importante para determinar a quantidade de energia produzida ao longo de cada hora ou estado de funcionamento, sendo que mesmo assumindo um valor constante para a altura de queda, os valores de potência obtidos serão sempre afetados por um erro. A expressão (4.1) representa a função objetivo do problema indicando-se na Tabela 4.1 as variáveis de decisão, de estado e outros parâmetros utilizados.

Tabela 4.1: Variáveis de decisão, de estado e parâmetros para o modelo simplificado

Tipo	Variáveis	Descrição
Decisão	qt_{ik}	Caudal turbinado pela central i, na hora k
	qb_{ik}	Caudal bombado pela central i, na hora k
	s_{ik}	Caudal descarregado pela central i, na hora k
Estado	v_{ik}	Volume da albufeira da central i, na hora k
	h_i	Queda da central i
Parâmetros	a_{ik}	Afluência à albufeira da central i, na hora k
	π_k	Preço de mercado na hora k
	μ_{t_i}	Rendimento de turbinagem da central i
	μ_{b_i}	Rendimento de bombagem da central i
	v_i^0	Volume inicial da central i
	v_i^f	Volume final da central i

$$\text{Max} \sum_{(i=1)}^I \sum_{(k=1)}^K (\pi_k \times Pt_{ik}) - (\pi_k \times Pb_{ik}) - (ps \times s_{ik}) \quad (4.1)$$

Nesta função objetivo I representa o número de aproveitamentos hídricos e K é o número de períodos incluídos no horizonte temporal a estudar. Esta função objetivo é sujeita às seguintes restrições:

$$v_{ik} = v_{i(k-1)} + a_{ik} - qt_{ik} - s_{ik} + qb_{ik} \quad (4.2)$$

$$v_i^{\min} \leq v_{ik} \leq v_i^{\max} \quad (4.3)$$

$$qt_i^{\min} \leq qt_{ik} \leq qt_i^{\max} \quad (4.4)$$

$$qb_i^{\min} \leq qb_{ik} \leq qb_i^{\max} \quad (4.5)$$

$$0 \leq s_{ik} \leq \infty \quad (4.6)$$

$$v_{iK} = v_{ik}^f \quad (4.7)$$

4.3 Modelos Desenvolvidos

4.3.1 Considerações Gerais

Os modelos criados e apresentados nos próximos pontos foram desenvolvidos com o intuito de otimizar a exploração de um conjunto de aproveitamentos hídricos, de acordo com o preço de mercado. Utilizou-se um algoritmo de otimização que permite decidir quando a central deve turbinar e bombar, de forma a maximizar o lucro e respeitando as restrições impostas. Serão apresentados quatro modelos com configurações hidráulicas diferentes e cada vez mais complexas. Ao longo da criação dos modelos, foram sendo realizados testes para observar o seu comportamento

e viabilidade, sendo que as próprias características das centrais, a sua interligação e fatores como a existência de afluências naturais alteram significativamente a solução final.

O último modelo, além dos objetivos já mencionados, pretende identificar até onde se pode estender a rede hidráulica, ou seja, qual o número máximo de centrais que é possível incluir no algoritmo obtendo-se uma solução viável e como varia o tempo de computação respectivo.

4.3.2 Modelo Exemplo

Como exemplo, apresenta-se o problema aplicado a um sistema hídrico constituído por um apenas um reservatório. Considera-se que a central hidroelétrica tem somente um grupo gerador reversível, isto é, capaz de turbinar e bombear. O sistema encontra-se ilustrado na Figura 4.1.

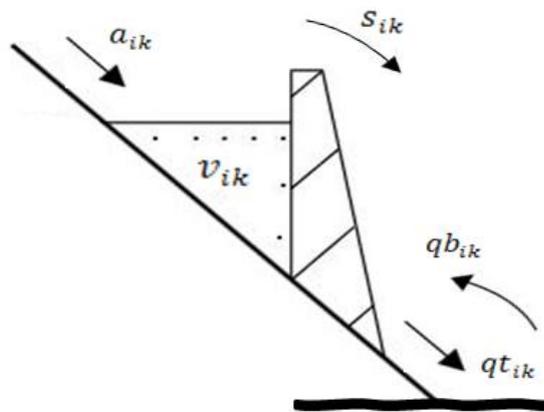


Figura 4.1: Sistema hídrico com um reservatório.

O volume de armazenamento do reservatório, v_{ik} , está limitado por um valor mínimo e um valor máximo. O volume inicial de água no reservatório, v_i^0 , é um dado de entrada e o volume final de água no reservatório, v_i^f , é escolhido pelo utilizador. Os caudais de água turbinado e bombeado, qt_{ik} e qb_{ik} respectivamente, estão também limitados inferiormente e superiormente. O descarregamento, s_{ik} , é ilimitado mas, como já apresentado na função objetivo, tem uma penalização associada.

A equação de estado é dada pela equação do balanço de água (equação 4.8).

$$v_{i,k} = v_{i,(k-1)} + a_{i,k} - qt_{i,k} - s_{i,k} + qb_{i,k} \quad (4.8)$$

Na Figura 4.2 é apresentado o modelo em termos de balanço de fluxos de água ao longo de 168 horas de funcionamento.

Com base no balanço dos fluxos de água neste sistema, e com recurso à equação (4.8), é possível determinar as grandezas envolvidas em cada estado temporal. Esta afirmação encontra-se exemplificada no conjunto de equações (4.9).

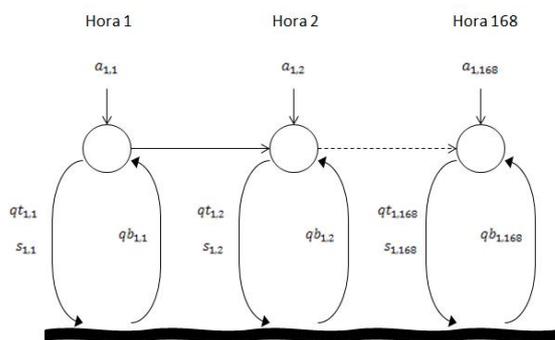


Figura 4.2: Balanço de fluxos de água (Lei dos nós).

$$\begin{cases} v_{1,1} = v_{1,0} + a_{1,1} - qt_{1,1} - s_{1,1} + qb_{1,1} \\ \dots \\ v_{1,168} = v_{1,167} + a_{1,168} - qt_{1,168} - s_{1,168} + qb_{1,168} \end{cases} \quad (4.9)$$

Nestas equações, apenas o volume inicial do reservatório e o valor das afluências naturais são conhecidos, as restantes variáveis serão calculadas através do algoritmo de otimização.

A função a ser utilizada para este propósito, *linprog*, é descrita, para este caso, pelo sistema apresentado em (4.10), sendo que neste caso a restrição de desigualdade não é utilizada.

$$\max f(x), \text{su}j.a \begin{cases} A \cdot x \leq b, \\ Aeq \cdot x = beq, \\ lb \leq x \leq ub \end{cases} \quad (4.10)$$

Para esta formulação, as variáveis relativas ao volume armazenado, turbinado, descarregado e bombado, podem ser transformadas numa única variável de decisão, representada em (4.11).

$$[x] = \begin{bmatrix} v_{ik} \\ qt_{ik} \\ s_{ik} \\ qb_{ik} \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Assim sendo, o sistema de equações para um reservatório e para um horizonte temporal de 168 horas apresentado em (4.9), pode ser descrito num novo conjunto de equações mostrado em (4.12).

$$\begin{cases} x(1) = v_{1,0} + a_{1,1} - x(169) - x(337) + x(505) \\ \dots \\ x(168) = v_{1,167} + a_{1,168} - x(336) - x(504) + x(672) \end{cases} \quad (4.12)$$

Com esta transformação na representação das variáveis de estado, é possível construir a função objetivo adaptada ao algoritmo de otimização linear (equação 4.13).

$$\text{Max}(\pi_1 \times qt_{1,1} + \dots + \pi_{168} \times qt_{1,168}) - (\pi_1 \times qb_{1,1} + \dots + \pi_{168} \times qb_{1,168}) - (ps \times s_{1,1} + \dots + ps \times s_{1,168}) \quad (4.13)$$

Nesta nova função objetivo, substituíram-se as potências de turbinagem e de bombagem pelos respectivos caudais. Isto é possível devido à não inclusão da variação da queda, utilizando um valor constante como já foi referido anteriormente. A título de exemplo, a função da potência gerada por uma turbina pode ser transformada numa função do tipo apresentado em (4.14).

$$Pt = \alpha \times qt \quad (4.14)$$

Em que $\alpha = 9,8 \times h \times \mu t$ e portanto resulta num valor constante, fazendo com que a potência dependa linearmente com o caudal turbinado ou bombado. Esta relação linear encontra-se ilustrada na Figura 4.3.

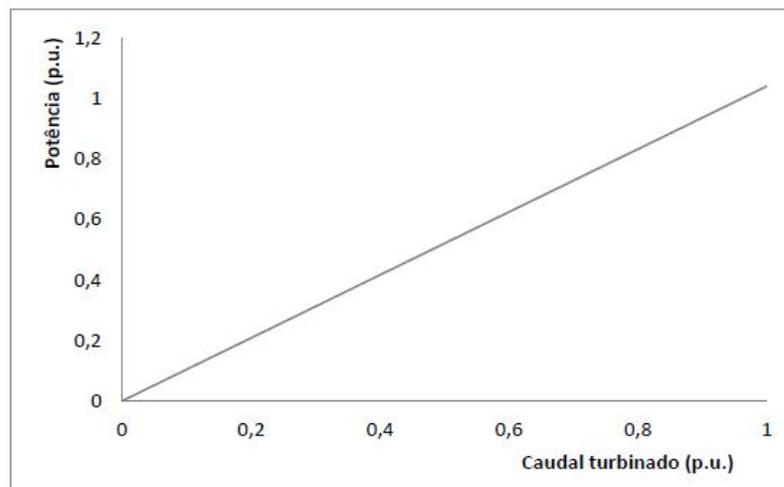


Figura 4.3: Relação linear entre a potência gerada e o caudal turbinado.

Posto isto, a maximização da função objetivo formulada com os caudais turbinados e bombados será equivalente à função objetivo original, sendo a potência calculada posteriormente. Este exemplo foi dado em relação à turbinagem mas é também aplicado ao processo de bombagem.

4.3.3 Modelo 1 - Sistema com 2 reservatórios

Para explorar os modelos convenientemente e de forma mais próxima à realidade, os casos de estudo devem incluir mais do que uma central produtora de energia hidroelétrica que partilhem o mesmo curso de água. Ou seja, os reservatórios constituem no seu conjunto uma cascata hídrica.

O primeiro modelo implementado é o mais simples dos quatro, contendo apenas dois reservatórios em cascata, como ilustrado na Figura 4.4.

O reservatório 1 encontra-se a montante do reservatório 2, onde terminará a cascata. As centrais têm níveis de armazenamento e caudais diferentes e ambas possuem bombagem. As características das centrais baseiam-se em aproveitamentos hídricos existentes e serão apresentadas no próximo capítulo, aquando da descrição dos testes efetuados e apresentação dos resultados obtidos.

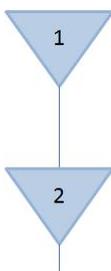


Figura 4.4: Esquema da cascata com dois reservatórios.

As equações de estado para cada reservatório estão apresentadas no conjunto de equações (4.15), para k horas.

$$\begin{cases} v_{1,k} = v_{1,(k-1)} + a_{1,k} - qt_{1,k} - s_{1,k} + qb_{i,k} \\ v_{2,k} = v_{2,(k-1)} + a_{2,k} + qt_{1,k} + s_{1,k} - qb_{1,k} - qt_{2,k} - s_{2,k} + qb_{2,k} \end{cases} \quad (4.15)$$

Procedendo à transformação das variáveis de decisão numa só variável, para 168 horas obtém-se o conjunto de equações apresentado em (4.16).

$$\begin{cases} x(1) = v_{1,0} + a_{1,1} - x(337) - x(673) + x(1009) \\ x(2) = v_{2,0} + a_{2,1} + x(337) + x(673) - x(1009) - x(338) - x(674) + x(1010) \end{cases} \quad (4.16)$$

Na estrutura $Aeq \cdot x = beq$, Aeq é a matriz dos coeficientes que relaciona as variáveis de estado com os dados iniciais do problema, traduzindo a incidência nodal das variáveis no balanço de fluxos. Os vetores x e beq representam respetivamente as variáveis de estado, as afluências naturais horárias e o volume inicial de cada reservatório.

Relativamente a este modelo com dois reservatórios, apresenta-se em seguida um exemplo resumido da matriz e vetores para 168 horas (4.17).

$$\begin{bmatrix} Aeq \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & & 0 & 0 \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ 0 & 0 & & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(1) \\ x(2) \\ \vdots \\ x(1343) \\ x(1344) \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} beq \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1^0 + a_{1,1} \\ v_2^0 + a_{2,1} \\ \vdots \\ a_{1,168} \\ a_{2,168} \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

A função objetivo terá a forma apresentada em (4.18).

$$\begin{bmatrix} f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & \pi_1 & \dots & \pi_{168} & -ps & \dots & -ps & -\pi_1 & \dots & -\pi_{168} \end{bmatrix}^T \quad (4.18)$$

Nesta expressão, a primeira parcela diz respeito aos volumes armazenados e tem um coeficiente nulo, pois não entram na função objetivo. A segunda e quarta parcelas são relativas aos caudais turbinados e bombados, respetivamente, sendo o seu coeficiente o preço de mercado na hora respetiva. A terceira parcela refere-se aos descarregamentos estando associada uma penalização.

Finalmente, os testes deste modelo serão feitos para um caso de volume final livre, afluências nulas e incluindo a afluência natural da central 1.

4.3.4 Modelo 2 - Sistema com 3 reservatórios

O segundo modelo acrescenta mais um reservatório ao modelo 1, sendo o seu esquema ilustrado na Figura 4.5.

Esta configuração coloca os reservatórios q e 2 ligados a um mesmo reservatório. Os reservatórios 1 e 2 encontram-se a montante do reservatório 3, onde terminará a cascata. As centrais têm níveis de armazenamento e caudais diferentes e possuem bombagem.

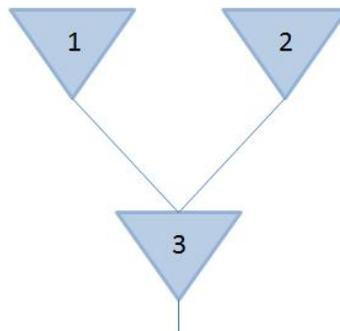


Figura 4.5: Esquema da cascata com três reservatórios.

As equações de estado que descrevem o comportamento do sistema são enunciadas no conjunto de equações (4.19) e (4.20) para a primeira e última hora, respetivamente.

$$\begin{cases} v_{1,1} = v_{1,0} + a_{1,1} - qt_{1,1} - s_{1,1} + qb_{1,1} \\ v_{2,1} = v_{2,0} + a_{2,1} - qt_{2,1} - s_{2,1} + qb_{2,1} \\ v_{3,1} = v_{3,0} + a_{3,1} + qt_{1,1} + s_{1,1} - qb_{1,1} + qt_{2,1} + s_{2,1} - qb_{2,1} - qt_{3,1} - s_{3,1} + qb_{3,1} \end{cases} \quad (4.19)$$

$$\begin{cases} v_{1,168} = v_{1,167} + a_{1,168} - qt_{1,168} - s_{1,168} + qb_{1,168} \\ v_{2,168} = v_{2,167} + a_{2,168} - qt_{2,168} - s_{2,168} + qb_{2,168} \\ v_{3,168} = v_{3,167} + a_{3,168} + qt_{1,168} + s_{1,168} - qb_{1,168} + qt_{2,168} + s_{2,168} - qb_{2,168} - qt_{3,168} - s_{3,168} + qb_{3,168} \end{cases} \quad (4.20)$$

Procedendo à transformação das variáveis de decisão numa só variável, para 168 horas obtém-se o conjunto de equações apresentado em(4.21).

$$\begin{cases} x(1) = v_{1,0} + a_{1,1} - x(505) - x(1009) + x(1513) \\ x(2) = v_{2,0} + a_{2,1} - x(506) - x(1010) + x(1514) \\ x(3) = v_{3,0} + a_{3,1} + x(505) + x(1009) - x(1513) + x(506) + x(1010) \\ \quad - x(1514) - x(507) - x(1011) + x(1515) \end{cases} \quad (4.21)$$

Para este modelo serão apresentados testes realizados sem afluições e com inclusão das afluições naturais horárias para a central 1 e para a central 2.

4.3.5 Modelo 3 - Sistema com 8 reservatórios

Este sistema com oito reservatórios é adaptado da cascata do Douro Nacional, sendo as suas características também alteradas por razões de confidencialidade. Os seus dados foram gentilmente fornecidos pela EDP Produção.

Esta configuração mostra-se mais complexa que as já apresentadas nos dois primeiros modelos, havendo mais interligações entre as centrais. Todas estas têm níveis de armazenamento e caudais diferentes, e apenas as centrais G e H são dotadas de bombagem.

O esquema deste circuito hidráulico é ilustrado no Figura 4.6.

As equações de estado que descrevem o comportamento do sistema para a primeira hora são enunciadas no conjunto de equações (4.22).

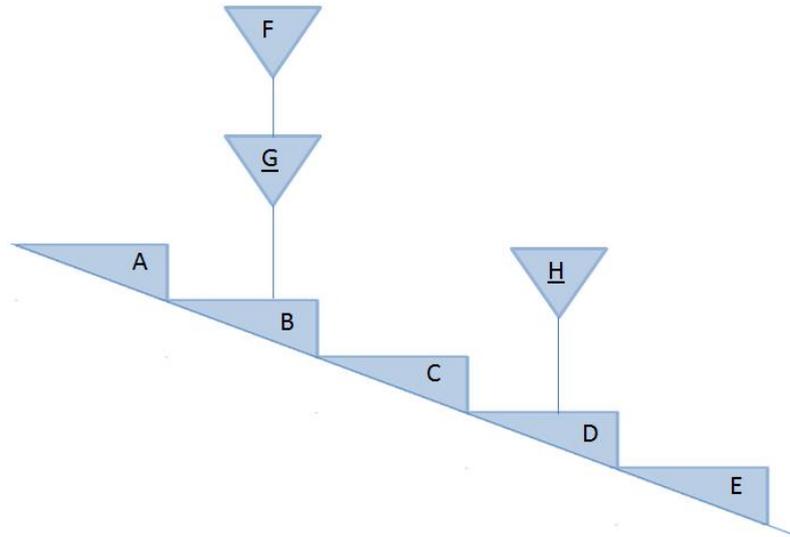


Figura 4.6: Esquema da cascata com oito reservatórios adaptada do Douro Nacional.

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{A,1} = v_{A,0} + a_{A,1} - qt_{A,1} - s_{A,1} \\ v_{B,1} = v_{B,0} + a_{B,1} + qt_{A,1} + s_{A,1} - qt_{B,1} - s_{B,1} + qt_{G,1} + s_{G,1} - qb_{G,1} \\ v_{C,1} = v_{C,0} + a_{C,1} + qt_{B,1} + s_{B,1} - qt_{C,1} - s_{C,1} \\ v_{D,1} = v_{D,0} + a_{D,1} + qt_{C,1} + s_{C,1} - qt_{D,1} - s_{D,1} + qt_{H,1} + s_{H,1} - qb_{H,1} \\ v_{E,1} = v_{E,0} + a_{E,1} + qt_{D,1} + s_{D,1} - qt_{E,1} - s_{E,1} \\ v_{F,1} = v_{F,0} + a_{F,1} - qt_{F,1} - s_{F,1} \\ v_{G,1} = v_{G,0} + a_{G,1} + qt_{F,1} + s_{F,1} - qt_{G,1} - s_{G,1} + qb_{G,1} \\ v_{H,1} = v_{H,0} + a_{H,1} - qt_{H,1} - s_{H,1} + qb_{H,1} \end{array} \right. \quad (4.22)$$

Procedendo à transformação das variáveis de decisão numa só variável, para 168 horas obtém-se o conjunto de equações apresentado em (4.23).

$$\left\{ \begin{array}{l} x(1) = v_{A,0} + a_{A,1} - x(1345) - x(2689) \\ x(2) = v_{B,0} + a_{B,1} + x(1345) + x(2689) - x(1346) - x(2690) + x(1351) + x(2695) - x(4039) \\ x(3) = v_{C,0} + a_{C,1} + x(1346) + x(2690) - x(1347) - x(2691) \\ x(4) = v_{D,0} + a_{D,1} + x(1347) + x(2691) - x(1348) - x(2692) + x(1352) + x(2696) - x(4040) \\ x(5) = v_{E,0} + a_{E,1} + x(1348) + x(2692) - x(1349) - x(2693) \\ x(6) = v_{F,0} + a_{F,1} - x(1350) - x(2694) \\ x(7) = v_{G,0} + a_{G,1} + x(1350) + x(2694) - x(1351) - x(2695) + x(4039) \\ x(8) = v_{H,0} + a_{H,1} - x(1352) - x(2696) + x(4040) \end{array} \right. \quad (4.23)$$

Relativamente a este terceiro modelo, o teste efetuado permite verificar o comportamento das oito centrais sem inclusão de afluências naturais.

4.3.6 Modelo 4 - Sistema com n reservatórios

Este último modelo é um modelo dinâmico, que permite a inclusão de n reservatórios no sistema, criando um esquema exemplificado na Figura 4.7.

Esta configuração coloca n reservatórios em cascata, em que apenas o reservatório 1 não possui um reservatório a montante e a cascata termina no reservatório n. Por questões de simplificação foram atribuídas as mesmas características a todas as centrais, tanto em termos de níveis de armazenamento como de caudais. Todas as centrais possuem bombagem.

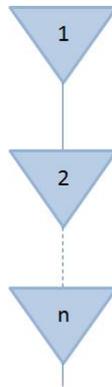


Figura 4.7: Esquema da cascata com n reservatórios.

As equações de estado que descrevem o comportamento do sistema para a primeira hora são enunciadas no conjunto de equações (4.24).

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{1,1} = v_{1,0} + a_{1,1} - qt_{1,1} - s_{1,1} + qb_{i,1} \\ v_{2,1} = v_{2,0} + a_{2,1} + qt_{1,1} + s_{1,1} - qb_{1,1} - qt_{2,1} - s_{2,1} + qb_{2,1} \\ \dots \\ v_{n,1} = v_{n,0} + a_{n,1} + qt_{(n-1),1} + s_{(n-1),1} - qb_{(n-1),1} - qt_{n,1} - s_{n,1} + qb_{n,1} \end{array} \right. \quad (4.24)$$

Este modelo foi criado com base nos modelos já apresentados, sendo o mais complexo, e com um propósito diferente. Além da verificação da viabilidade do problema de otimização da exploração de centrais hídricas que tem vindo a ser estudado, será avaliada a possibilidade de resolver esse problema de otimização considerando um elevado número de centrais, bem como a variação do tempo de computação com esse número de centrais. O número de variáveis do problema dependerá do número de centrais, do número de períodos horários a considerar, da existência ou não de bombagem em todos os aproveitamentos e ainda dos descarregamentos. Nestas condições poderemos dizer que o número de variáveis corresponderá ao produto de $3 \cdot K \cdot I$ em que o coeficiente

3 decorre da existência de variáveis associadas aos caudais turbinados, bombados e descarregados, K corresponde ao número de períodos horários e I está associado ao número de centrais

Capítulo 5

Apresentação e Análise dos Resultados

5.1 Considerações Gerais

Como já referido anteriormente, foram criados quatro modelos diferentes, em que se aumenta de forma sucessiva o seu grau de complexidade, variando o número de reservatórios e a sua configuração hidráulica. A Tabela 5.1 apresenta sucintamente algumas características de cada modelo.

Tabela 5.1: Características dos modelos criados.

Modelo	Nº de reservatórios	Interligação Hidráulica	Afluências
1	2	Sim	Sim
2	3	Sim	Sim
3	8	Sim	Não
4	n	Sim	Não

Todos os testes foram realizados para um intervalo de tempo de uma semana, equivalente a 168 horas. Também foram utilizados os mesmos valores do preço de mercado para cada hora em todos os testes. A Figura 5.1 ilustra graficamente a evolução do preço de mercado ao longo das 168 horas.

Nos dois primeiros modelos serão incluídas as afluências naturais a duas centrais, para verificar o impacto que têm no comportamento das mesmas. A afluência natural da central 1 encontra-se descrita na Figura 5.2 e a afluência natural da central 2 na Figura 5.3.

Mais uma vez, os modelos descritos e os respetivos testes foram realizados através da ferramenta de programação MATLAB, enquanto o tratamento dos dados e dos resultados foi realizado em Excel. O computador utilizado para o efeito apresenta as características seguintes:

- Sistema operativo: Windows Vista 32 bits;
- Processador: Intel® Pentium® Dual CPU T2390 @ 1.86 GHz;
- Memória (RAM): 2,00 GB.

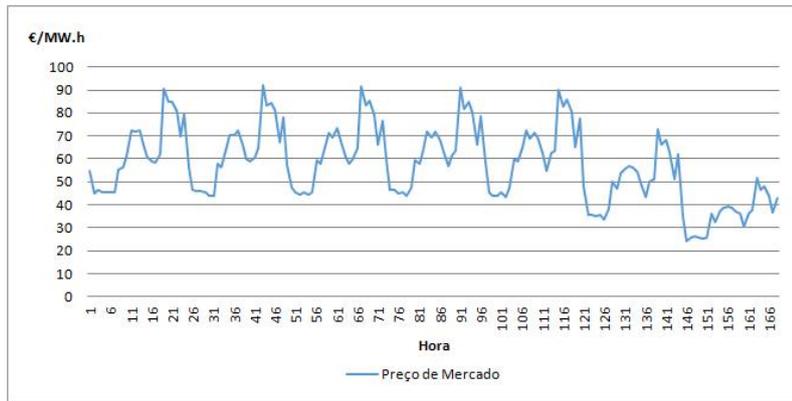


Figura 5.1: Preços de Mercado.

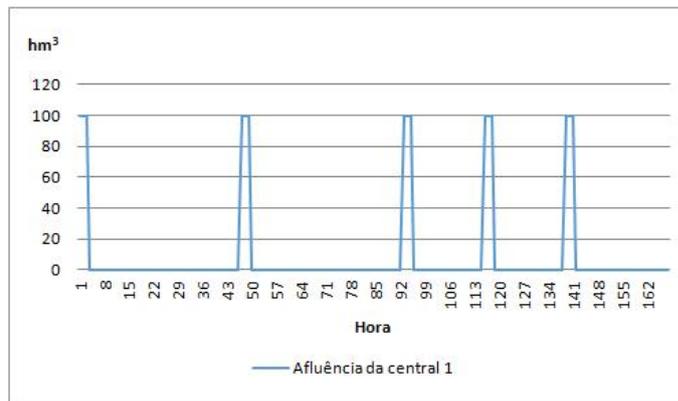


Figura 5.2: Afluência natural da central 1.



Figura 5.3: Afluência natural da central 2.

5.2 Modelo 1

Este modelo admite a existência de duas centrais em cascata com as características descritas na Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Características das centrais utilizadas no Modelo 1.

Central	Volume mínimo (hm^3)	Volume máximo (hm^3)	Caudal máximo de turbinamento (m^3/s)	Caudal máximo de bombagem (m^3/s)
1	800	1000	400	400
2	10	30	120	120

Para este modelo foram efetuados testes para três casos distintos de forma a verificar os diferentes comportamentos do sistema hídrico para diferentes situações, sendo estas:

- Caso 1: sem afluições e sem restrição de volume final;
- Caso 2: sem afluições e com restrição de volume final;
- Caso 3: com afluição na central 1 e restrição de volume final.

5.2.1 Caso 1

Na Tabela 5.3 são apresentadas as características das centrais para o primeiro caso.

Tabela 5.3: Dados das centrais utilizados no Caso 1

Central	Volume Inicial (hm^3)	Volume Final (hm^3)	Afluições
1	900	n.a.	n.a.
2	20	n.a.	n.a.

Os resultados obtidos para o Caso 1 são apresentados nas Figuras 5.4, 5.5, 5.6 e 5.7. Serão apresentados os resultados referentes aos caudais turbinado, bombado e descarregado e à variação do volume para cada central.

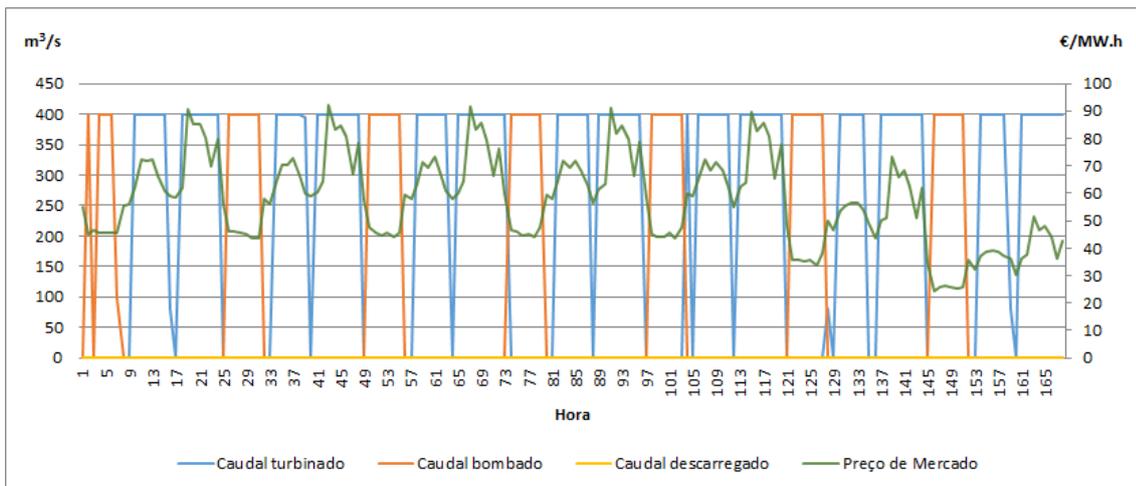


Figura 5.4: Resultados para os caudais turbinado, bombado e descarregado da central 1 do Modelo 1 - Caso 1.

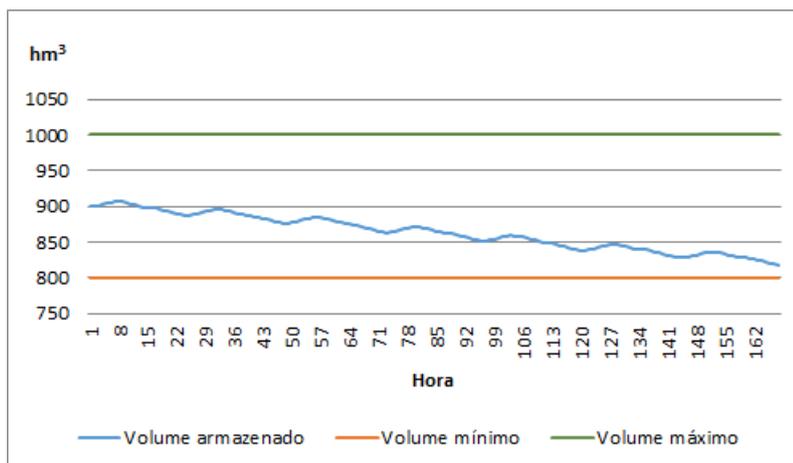


Figura 5.5: Variação do volume da central 1 do Modelo 1 - Caso 1.

Analisando o gráfico da Figura 5.4, verifica-se que a central 1 turbinar sempre que os preços têm um valor mais elevado e realiza bombagem quando os preços são menores, não havendo descarregamentos. Apesar de não ter sido incluída uma restrição relativa ao volume final, a central não poderia turbinar durante as 168 horas por não ter água suficiente para tal. Assim é realizada bombagem nas horas de menor consumo, de forma a poder turbinar nas horas de preço mais elevado.

Pode-se observar nas duas Figuras 5.4 e 5.5, que o período total de turbinagem é muito superior ao período de bombagem. Na Figura 5.5, verifica-se o decréscimo do volume do reservatório, quase atingindo o seu valor mínimo no final do período estudado.

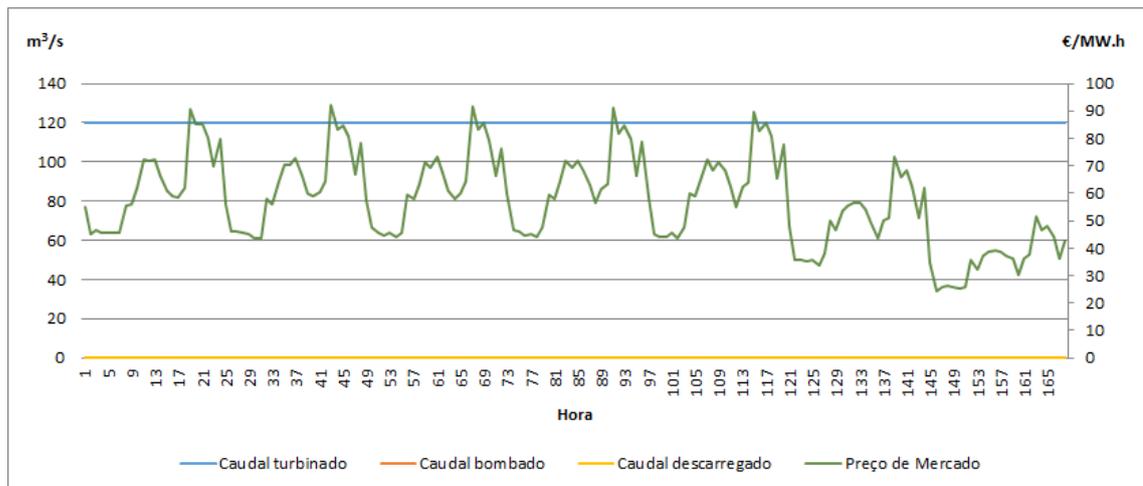


Figura 5.6: Resultados para os caudais turbinado, bombado e descarregado da central 2 do Modelo 1 - Caso 1.

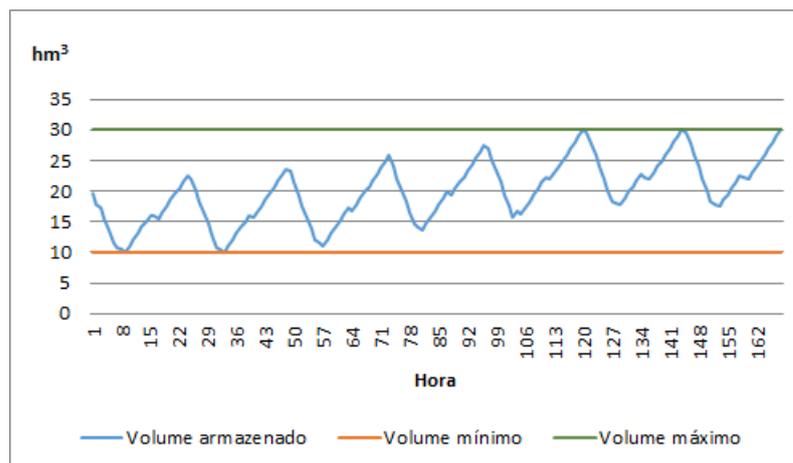


Figura 5.7: Variação do volume da central 2 do Modelo 1 - Caso 1.

No gráfico da Figura 5.6, observa-se que a central 2 turbinou ao máximo durante as 168 horas, não tendo efetuado bombagem nem descarregamento. Isto deve-se ao facto de ter água armazenada suficiente para tal, já que recebe a água turbinada pela central a montante. Mesmo tendo de dispensar água para a central 1 realizar bombagem, e como já foi dito antes, os períodos de turbinagem da central 1 são superiores aos de bombagem, resultando num maior caudal recebido pela central 2.

O volume da central 2, tal como apresentado na Figura 5.7, acabou por aumentar em relação ao valor inicial, apesar da constante ação de turbinamento. Isto porque o volume útil da central 2 é muito menor que o da central 1, o mesmo acontecendo com o máximo caudal a turbinar. Assim sendo, a central 2 recebe água a um ritmo superior do que a que consegue turbinar, acabando por aumentar o seu volume armazenado.

5.2.2 Caso 2

Na Tabela 5.4 são apresentadas as características das centrais para o segundo caso.

Tabela 5.4: Dados das centrais utilizados no Caso 2

Central	Volume Inicial (hm^3)	Volume Final (hm^3)	Afluências
1	900	900	n.a.
2	20	20	n.a.

Os resultados obtidos para o Caso 2 são apresentados nas Figuras 5.8, 5.9, 5.10 e 5.11.

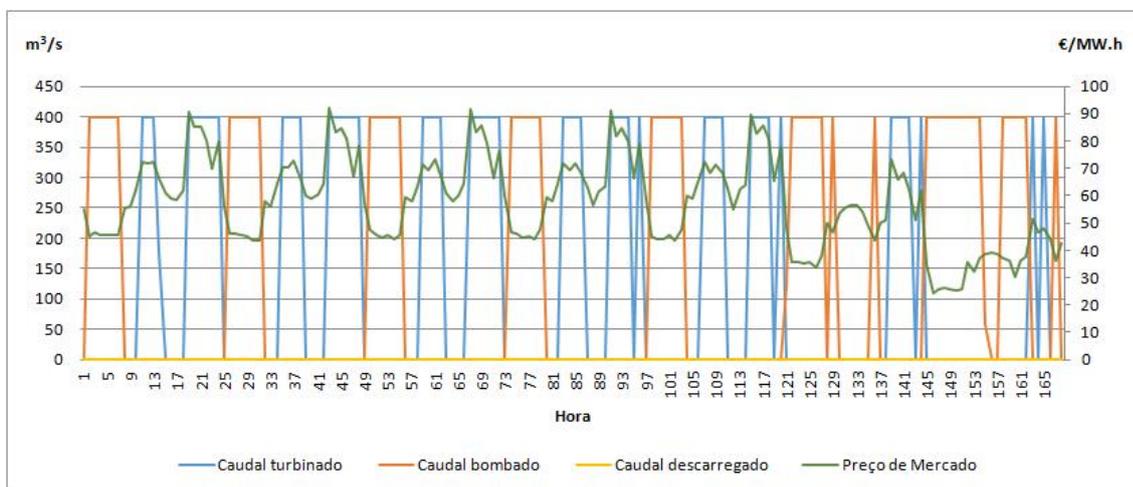


Figura 5.8: Resultados para os caudais turbinado, bombado e descarregado da central 1 do Modelo 1 - Caso 2.

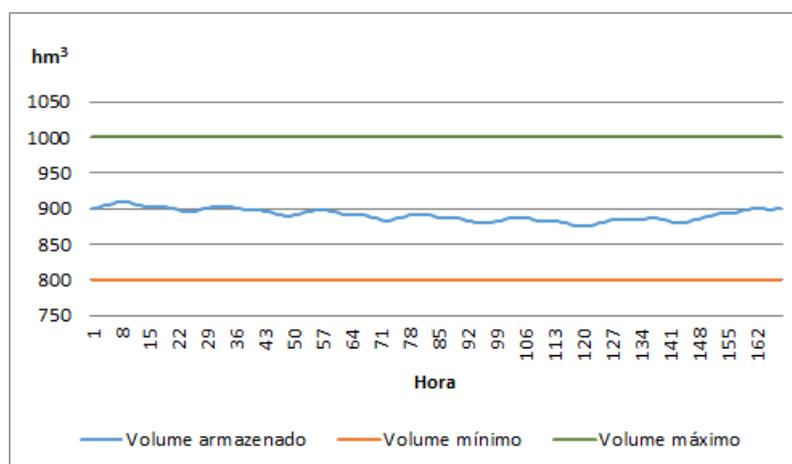


Figura 5.9: Variação do volume da central 1 do Modelo 1 - Caso 2.

Pela análise da Figura 5.8, verifica-se a existência das ações de turbinagem e de bombagem, a primeira nas horas em que o preço de mercado é mais elevado e a última quando estes são mais baixos. Os períodos em que ocorre a bombagem, resultam da necessidade de água para turbinar mas neste caso também são necessários para que a restrição de volume final seja cumprida.

Na Figura 5.9, observa-se que o volume da central 1 decresce, embora nos períodos finais aumente para atingir o volume final.

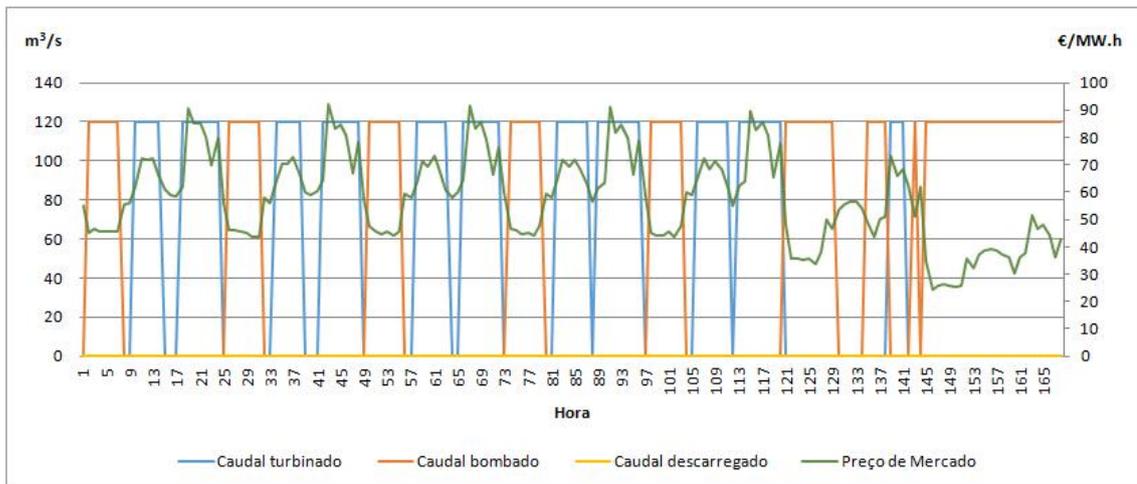


Figura 5.10: Resultados para os caudais turbinado, bombado e descarregado da central 2 do Modelo 1 - Caso 2.

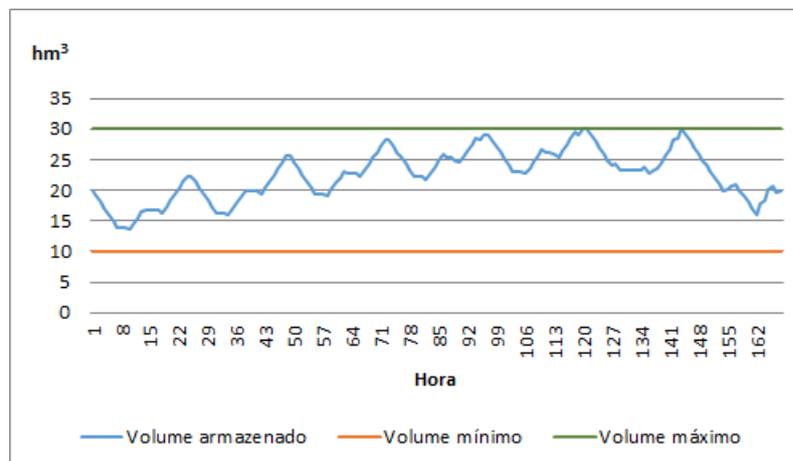


Figura 5.11: Variação do volume da central 2 do Modelo 1 - Caso 2.

Tal como acontece com a central 1, a central 2 turbinava quando os preços são mais altos e bombeava quando estes são menores. Verifica-se uma maior ação de bombagem nas horas finais, tal como evidenciado na Figura 5.10, já que é necessário restabelecer o volume para o valor final mas também devido à saída da água do reservatório por efeito de bombagem da central 1.

A variação do volume armazenado da central 2, apresentada na Figura 5.11, mostra-se mais acentuada que na central 1, devido à quantidade que recebe e fornece à mesma, além das próprias ações de turbinamento e bombagem.

5.2.3 Caso 3

Na Tabela 5.5 são apresentadas as características das centrais para o terceiro caso.

Tabela 5.5: Dados das centrais utilizados no Caso 3

Central	Volume Inicial (hm^3)	Volume Final (hm^3)	Afluências
1	900	900	Sim
2	20	20	n.a.

Os resultados obtidos para o Caso 3 são apresentados nas Figuras 5.12, 5.13, 5.14 e 5.15.

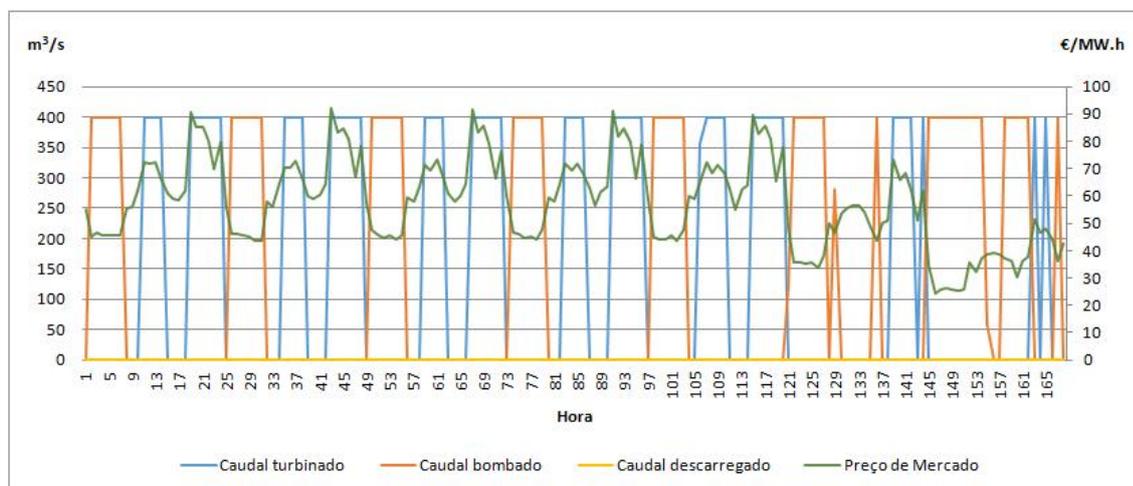


Figura 5.12: Resultados para os caudais turbinado, bombado e descarregado da central 1 do Modelo 1 - Caso 3.

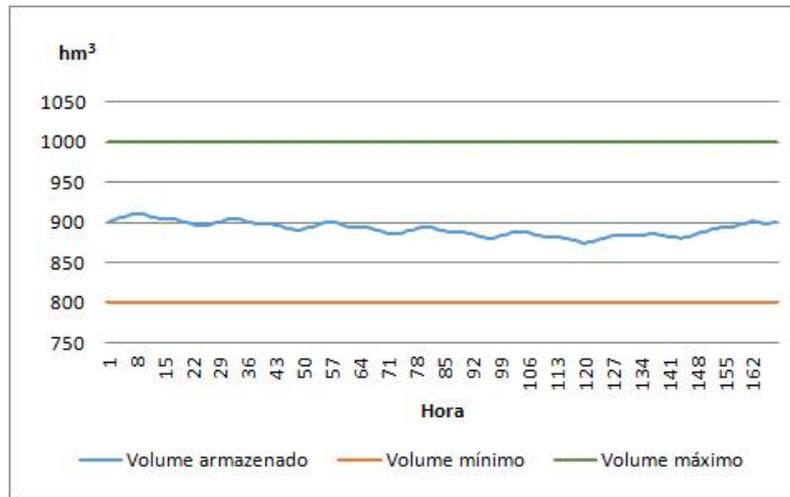


Figura 5.13: Variação do volume da central 1 do Modelo 1 - Caso 3.

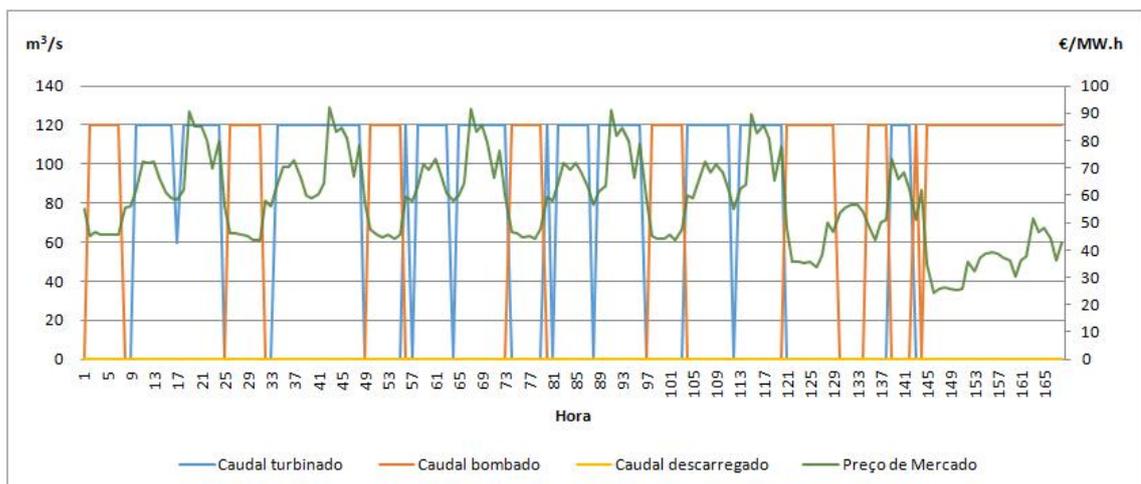


Figura 5.14: Resultados para os caudais turbinado, bombado e descarregado da central 2 do Modelo 1 - Caso 3.

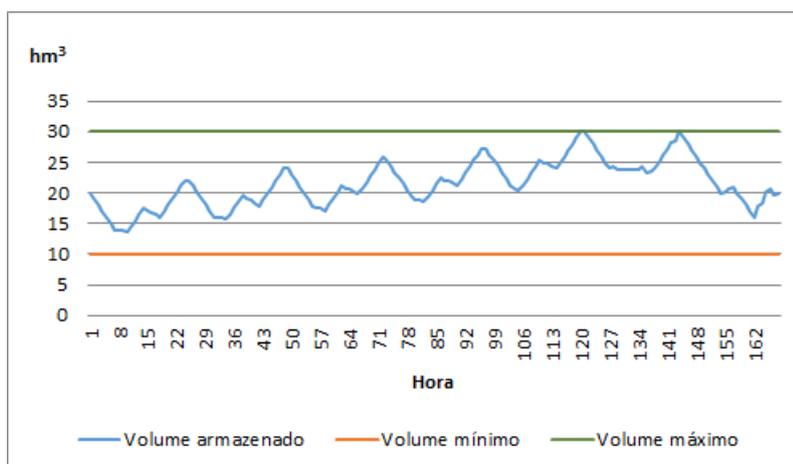


Figura 5.15: Variação do volume da central 2 do Modelo 1 - Caso 3.

Neste caso, a influência das afluições naturais da central 1 não consegue ser muito perceptível a partir das Figuras dos gráficos dos caudais 5.12 e 5.13 e das Figuras dos gráficos da evolução do volume armazenado 5.13 e 5.15, que têm um comportamento muito semelhante ao do caso 2. Este impacto pode não ser visível devido ao pequeno período de ocorrência de afluição. No entanto, verifica-se que neste caso, a potência gerada é maior e a potência consumida pela bombagem é menor, ou seja, pode-se concluir que havia mais água disponível para turbinar resultante da afluição natural pelo que foi necessário recorrer menos à bombagem..

5.3 Modelo 2

Este modelo admite a existência de três centrais em cascata com as características descritas na Tabela 5.6.

Tabela 5.6: Características das centrais utilizadas no Modelo 2.

Central	Volume mínimo (hm^3)	Volume máximo (hm^3)	Caudal máximo de turbinamento (m^3/s)	Caudal máximo de bombagem (m^3/s)
1	800	1000	400	400
2	10	30	120	120
3	10	50	70	70

Para este modelo foram efetuados testes para três casos distintos de forma a mostrar os diferentes comportamentos do modelo para diferentes situações, sendo estes:

- Caso 1: sem afluições e com restrição de volume final;

- Caso 2: com afluência na central 1 e com restrição de volume final;
- Caso 3: com afluência na central 2 e com restrição de volume final.

5.3.1 Caso 1

Na Tabela 5.7 são apresentadas as características das centrais para o primeiro caso.

Tabela 5.7: Dados das centrais utilizados no Caso 1

Central	Volume Inicial (hm^3)	Volume Final (hm^3)	Afluências
1	900	900	n.a
2	20	20	n.a.
3	30	30	n.a.

Os resultados obtidos para o Caso 1 são apresentados nas Figuras 5.16, 5.17, 5.18, 5.19, 5.20 e 5.21. Serão apresentados os resultados referentes aos caudais turbinado, bombado e descarregado e à variação do volume para cada central.

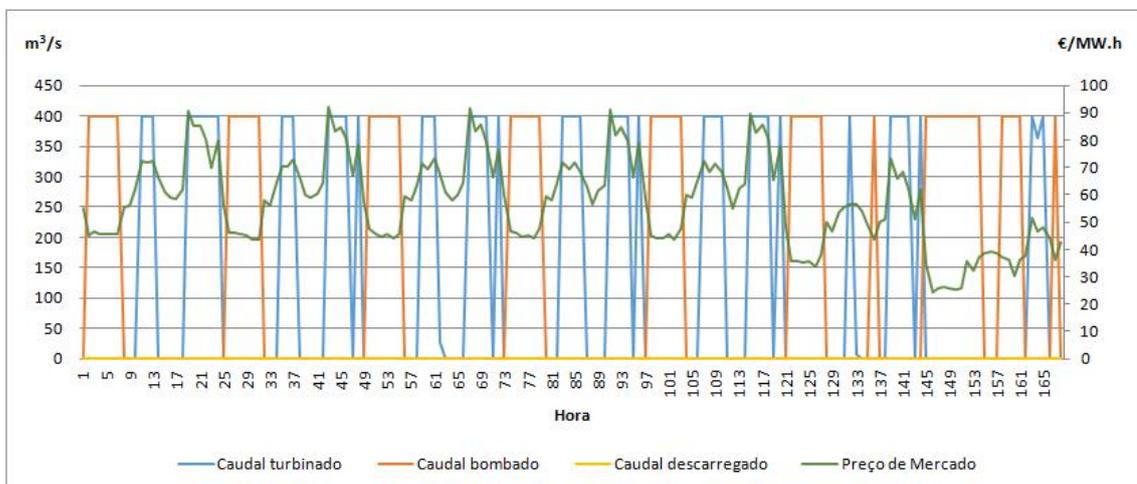


Figura 5.16: Resultados para os caudais turbinado, bombado e descarregado da central 1 do Modelo 2 - Caso 1.

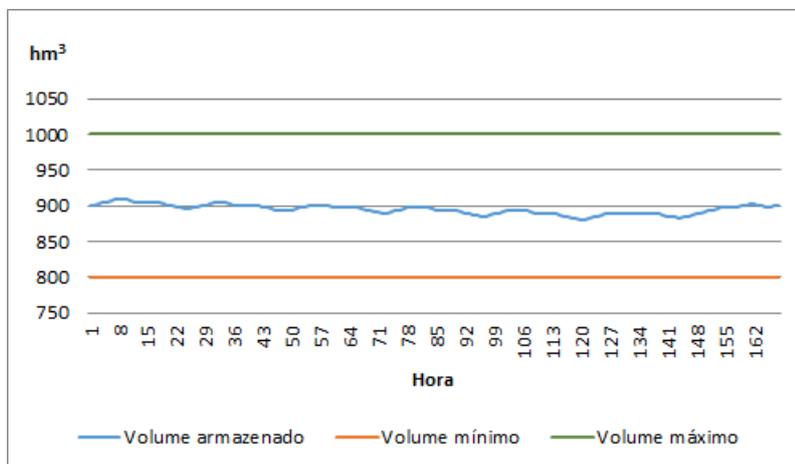


Figura 5.17: Variação do volume da central 1 do Modelo 2 - Caso 1.

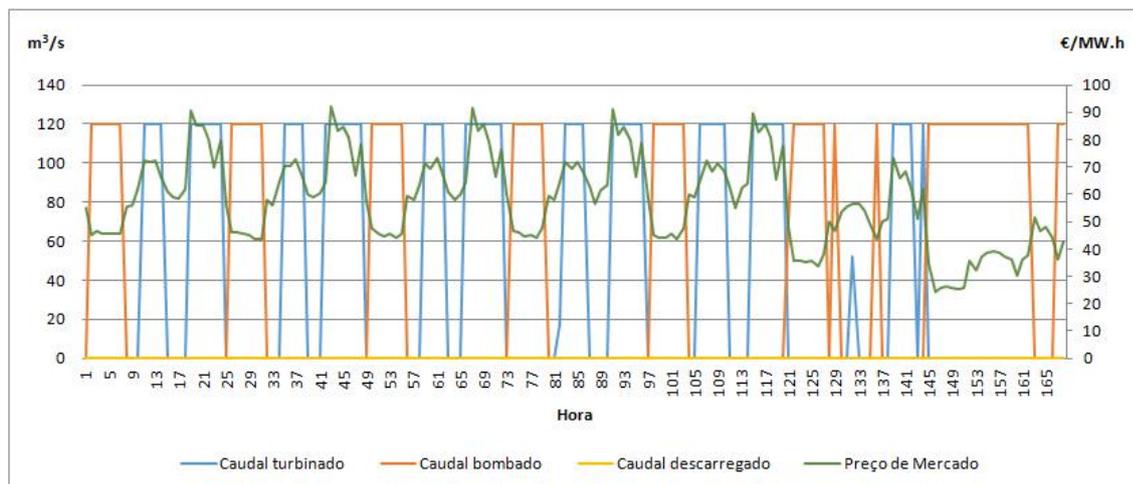


Figura 5.18: Resultados para os caudais turbinado, bombado e descarregado da central 2 do Modelo 2 - Caso 1.

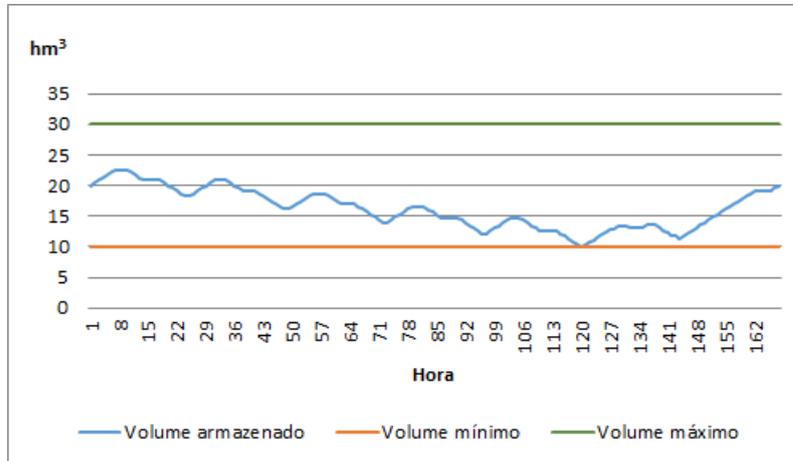


Figura 5.19: Variação do volume da central 2 do Modelo 2 - Caso 1.

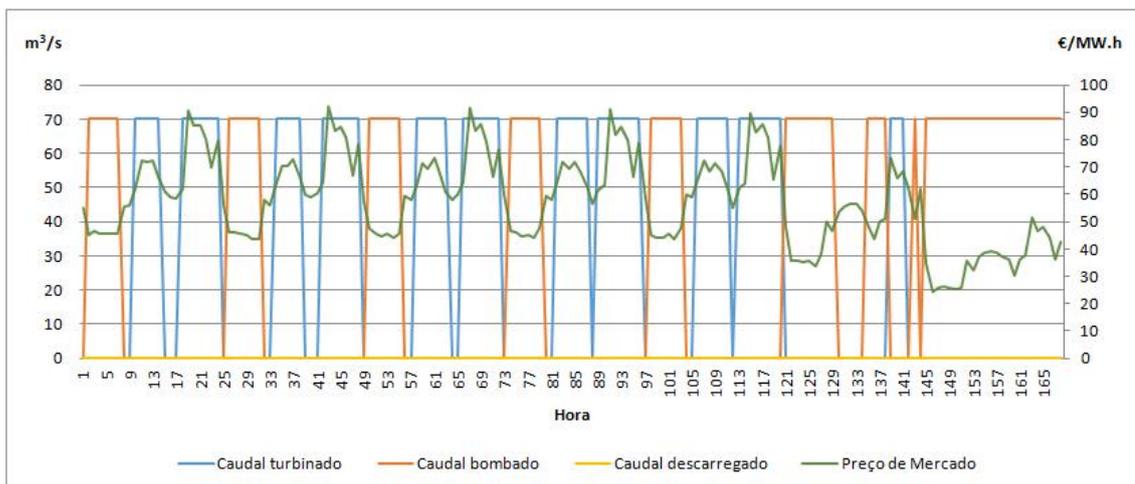


Figura 5.20: Resultados para os caudais turbinado, bombado e descarregado da central 3 do Modelo 2 - Caso 1.

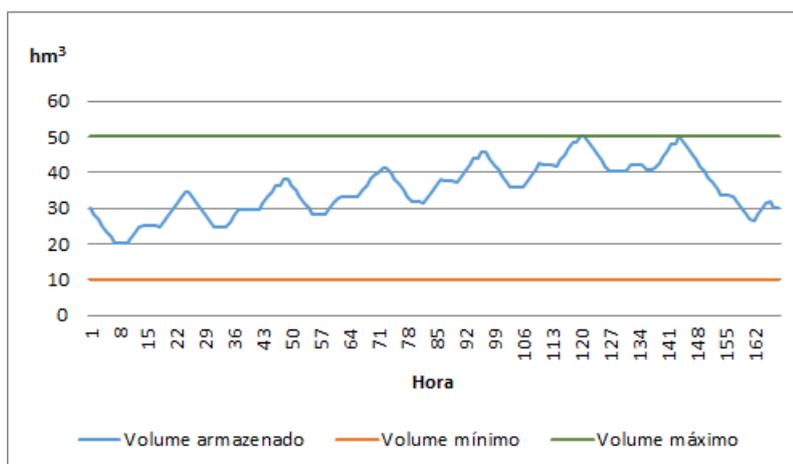


Figura 5.21: Variação do volume da central 3 do Modelo 2 - Caso 1.

Como esperado e verificado nas Figuras 5.16, 5.18 e 5.20, as três centrais procedem ao turbinamento nas horas em que o preço é mais elevado e realizam bombagem quando o preço é menor. A central 1 efetua bombagem maioritariamente nas horas finais, para conseguir atingir o volume esperado final, mas ainda consegue turbinar quando o preço aumenta. A central 2 também acionou a bombagem nos períodos finais com o mesmo intuito. No entanto observando a variação do seu volume na Figura 5.19, verifica-se que apenas fez uma interrupção no período de preço mais alto, não tendo condições para turbinar. Já a central 3, que se encontra interligada com as centrais 1 e 2, realiza bombagem durante as últimas 24 horas, independentemente do preço de mercado, para responder à própria necessidade de volume de forma a cumprir a restrição de volume final, mas também para deter água suficiente para as centrais a montante realizarem bombagem.

5.3.2 Caso 2

Na Tabela 5.8 são apresentadas as características das centrais para o segundo caso.

Tabela 5.8: Dados das centrais utilizados no Caso 2

Central	Volume Inicial (hm^3)	Volume Final (hm^3)	Afluências
1	900	900	Sim
2	20	20	n.a.
3	30	30	n.a.

Os resultados obtidos para o Caso 2 são apresentados nas Figuras 5.22, 5.23, 5.24, 5.25, 5.26 e 5.27.

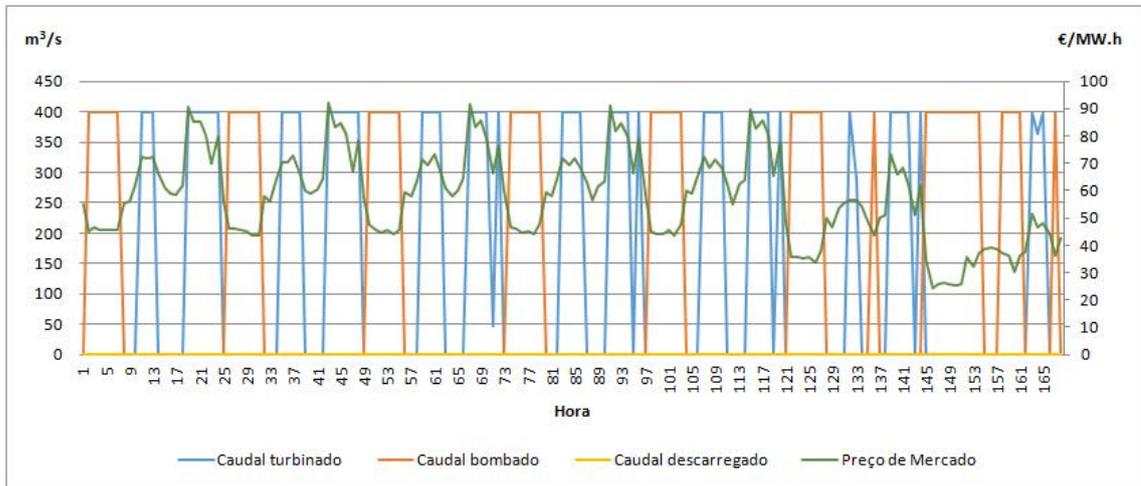


Figura 5.22: Resultados para os caudais turbinado, bombeado e descarregado da central 1 do Modelo 2 - Caso 2.

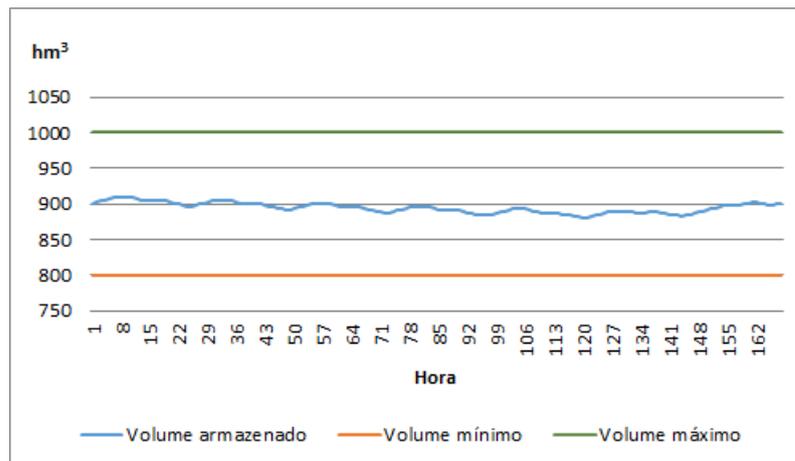


Figura 5.23: Variação do volume da central 1 do Modelo 2 - Caso 2.

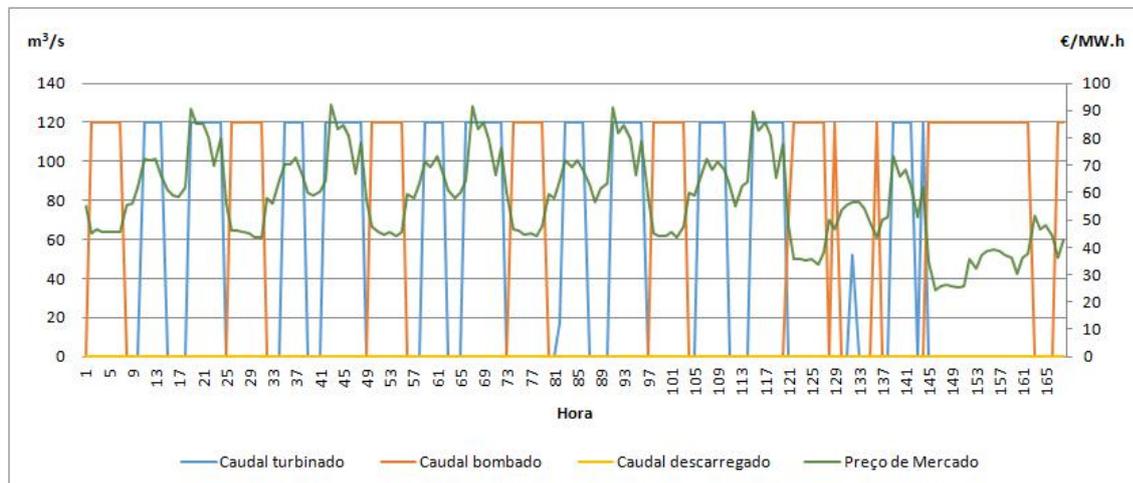


Figura 5.24: Resultados para os caudais turbinado, bombado e descarregado da central 2 do Modelo 2 - Caso 2.

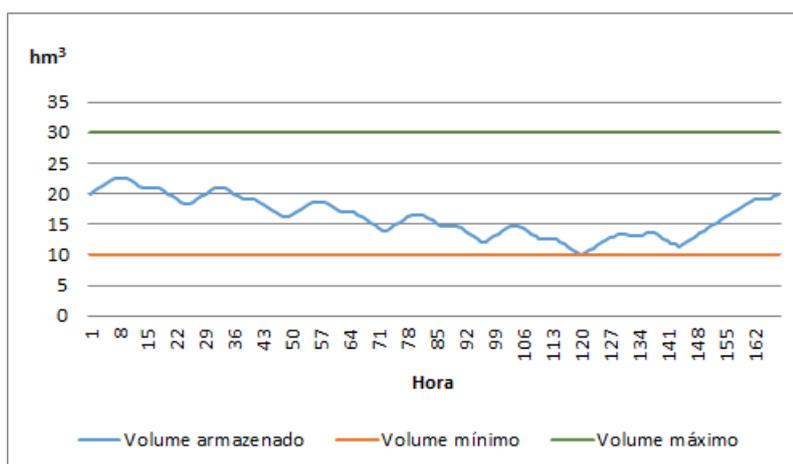


Figura 5.25: Variação do volume da central 2 do Modelo 2 - Caso 2.

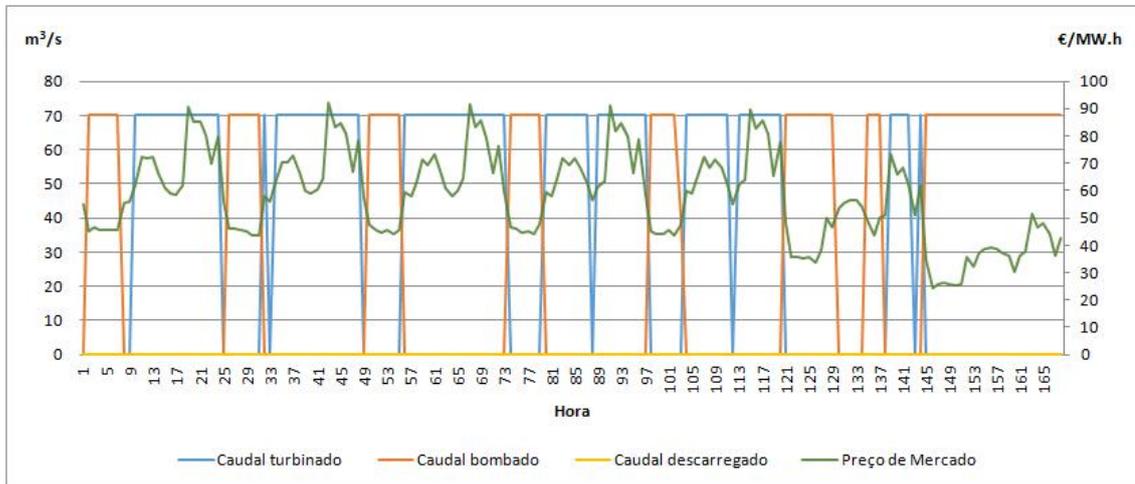


Figura 5.26: Resultados para os caudais turbinado, bombeado e descarregado da central 3 do Modelo 2 - Caso 2.

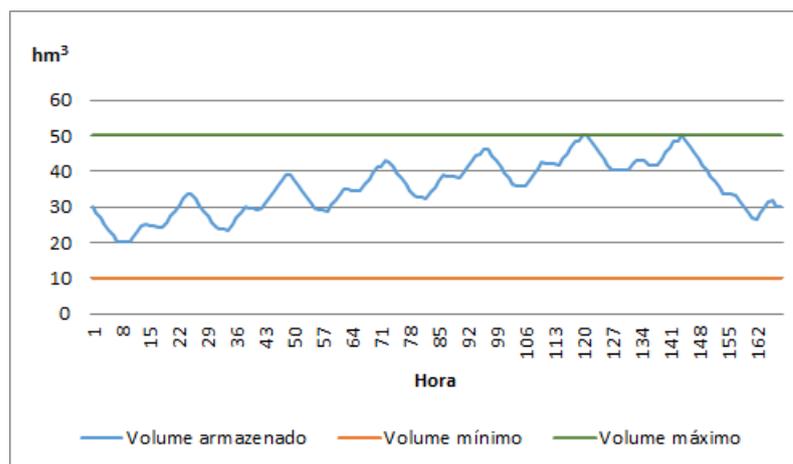


Figura 5.27: Variação do volume da central 3 do Modelo 2 - Caso 2.

Considerando a afluência natural à central 1, verifica-se um aumento dos períodos de turbinagem efetuados pelas centrais 1 e 3, como se pode observar nas Figuras 5.22 e 5.26, respetivamente. A central 1 continua a efetuar bombagem de igual forma que no caso 2, no entanto o valor do seu caudal turbinado é maior. A central 2, que neste caso não possui afluências, não sofre alterações no seu comportamento relativamente ao caso 1, como se pode verificar nas Figuras e 5.25. A central 3 aumentou bastante os seus períodos de turbinagem e reduziu os períodos de bombagem, embora recorrendo a esta ação novamente nas últimas 24 horas para satisfazer a restrição de volume final das três centrais.

5.3.3 Caso 3

Na Tabela 5.9 são apresentadas as características das centrais para o caso 3.

Tabela 5.9: Dados das centrais utilizados no Caso 3

Central	Volume Inicial (hm^3)	Volume Final (hm^3)	Afluências
1	900	900	n.a.
2	20	20	Sim
3	30	30	n.a.

Os resultados obtidos para o Caso 3 são apresentados nas Figuras 5.28, 5.29, 5.30, 5.31, 5.32 e 5.33.

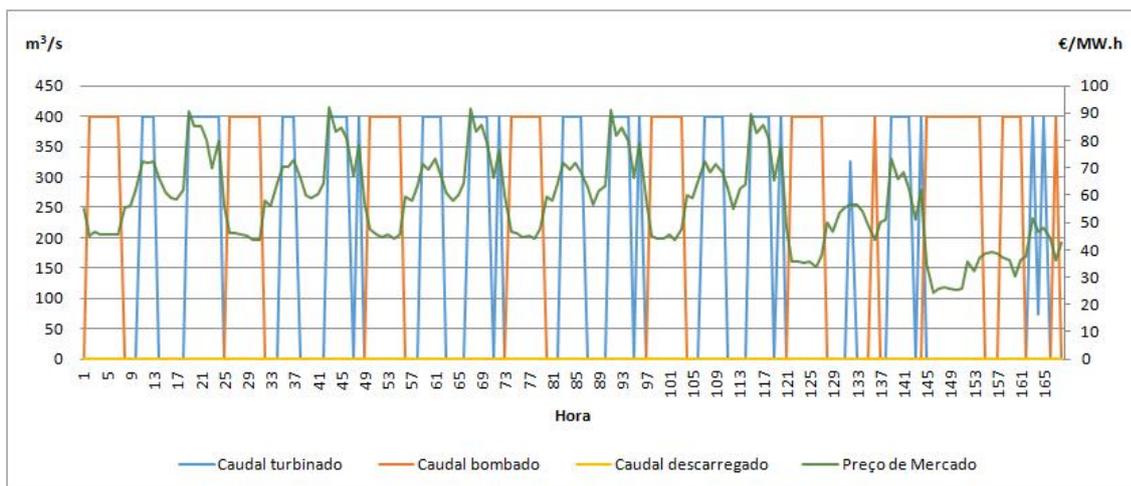


Figura 5.28: Resultados para os caudais turbinado, bombado e descarregado da central 1 do Modelo 2 - Caso 3.

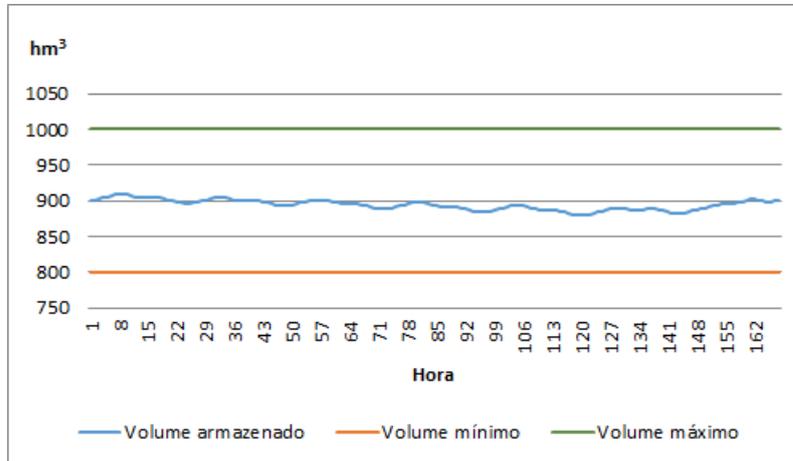


Figura 5.29: Variação do volume da central 1 do Modelo 2 - Caso 3.

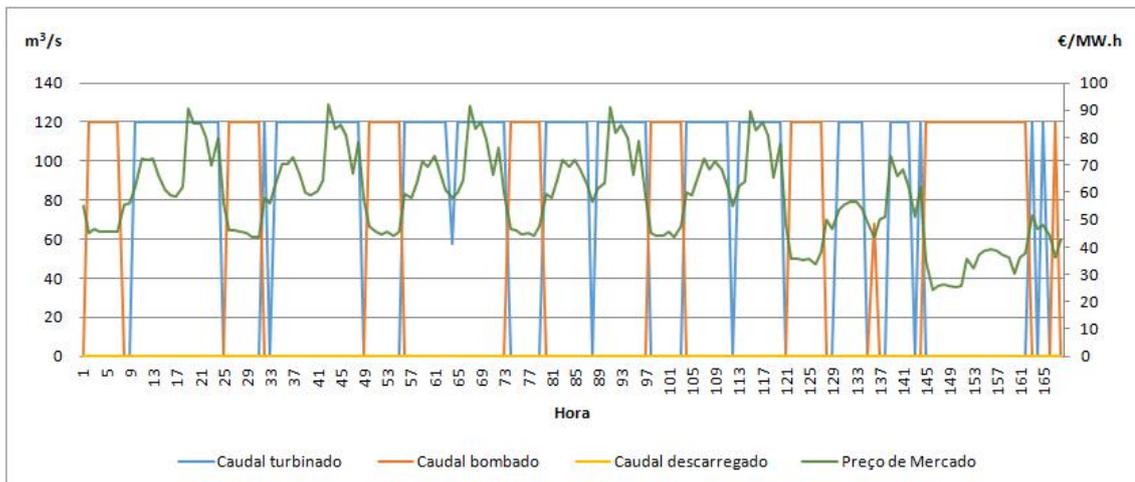


Figura 5.30: Resultados para os caudais turbinado, bombado e descarregado da central 2 do Modelo 2 - Caso 3.

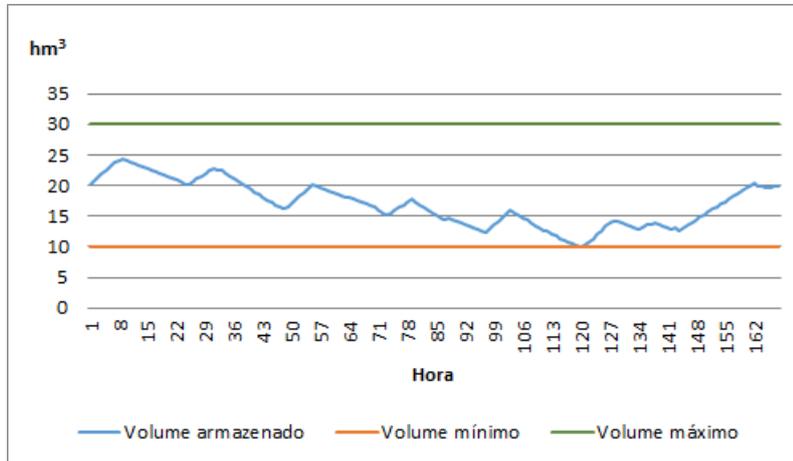


Figura 5.31: Variação do volume da central 2 do Modelo 2 - Caso 3.

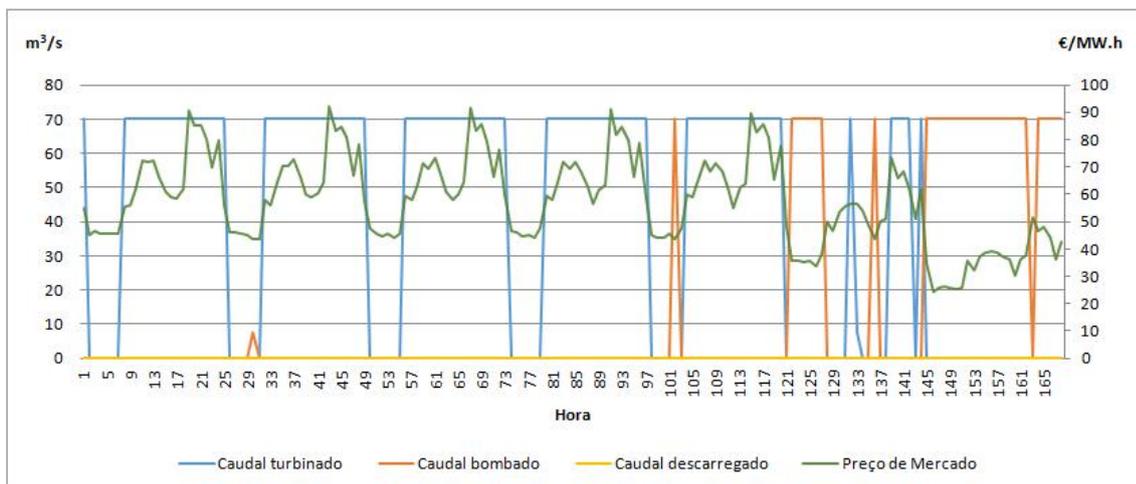


Figura 5.32: Resultados para os caudais turbinado, bombado e descarregado da central 3 do Modelo 2 - Caso 3.

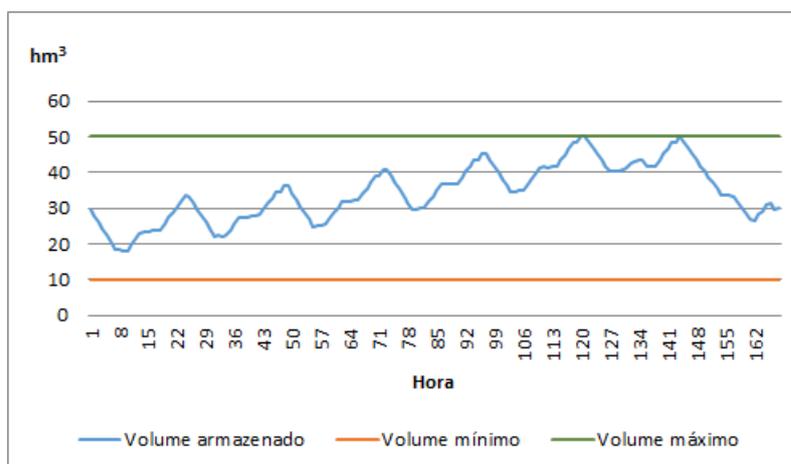


Figura 5.33: Variação do volume da central 3 do Modelo 2 - Caso 3.

Com a inclusão da afluência natural na central 2, verifica-se o mesmo comportamento do caso anterior mas agora para a segunda central. Através das Figuras 5.30 e 5.32, observa-se um aumento dos períodos de turbinagem e diminuição dos períodos de bombagem para as centrais 2 e 3, respetivamente. O decréscimo da ação de bombagem é mais notório na central 3, que apresenta um caudal bombado praticamente nulo até aproximadamente à hora 100. Relativamente à central 1, altera ligeiramente o seu comportamento relativamente aos períodos de turbinagem comparando com o caso 1, provavelmente devido às alterações do volume da central a jusante. No entanto o caudal turbinado pela mesma não sofre alterações. Quanto à realização de bombagem, mantêm-se os valores e períodos em relação ao caso 1.

5.4 Modelo 3

Este modelo admite a existência de oito centrais interligadas com as características descritas na Tabela 5.10.

Os dados iniciais das centrais especificados pelo utilizador e inseridos neste modelo são apresentados na Tabela 5.11.

Os resultados obtidos para este terceiro modelo são apresentados nas Figura 5.34 a Figura 5.49. Serão apresentados os resultados referentes aos caudais turbinado, bombado e descarregado e à variação do volume para cada central.

Tabela 5.10: Características das centrais utilizadas no Modelo 3.

Central	Volume mínimo (hm^3)	Volume máximo (hm^3)	Caudal máximo de turbinamento (m^3/s)	Caudal máximo de bombagem (m^3/s)
A	71	83	500	-
B	85	97	550	-
C	82	95	744	-
D	132	148	705	-
E	94	110	750	-
F	25	31	120	-
G	156	216	210	162
H	84	106	320	251

Tabela 5.11: Dados das centrais utilizados no Modelo 3.

Central	Volume Inicial (hm^3)	Volume Final (hm^3)
A	77	71
B	91	85
C	88.5	82
D	140	132
E	102	94
F	28	25
G	186	156
H	95	84

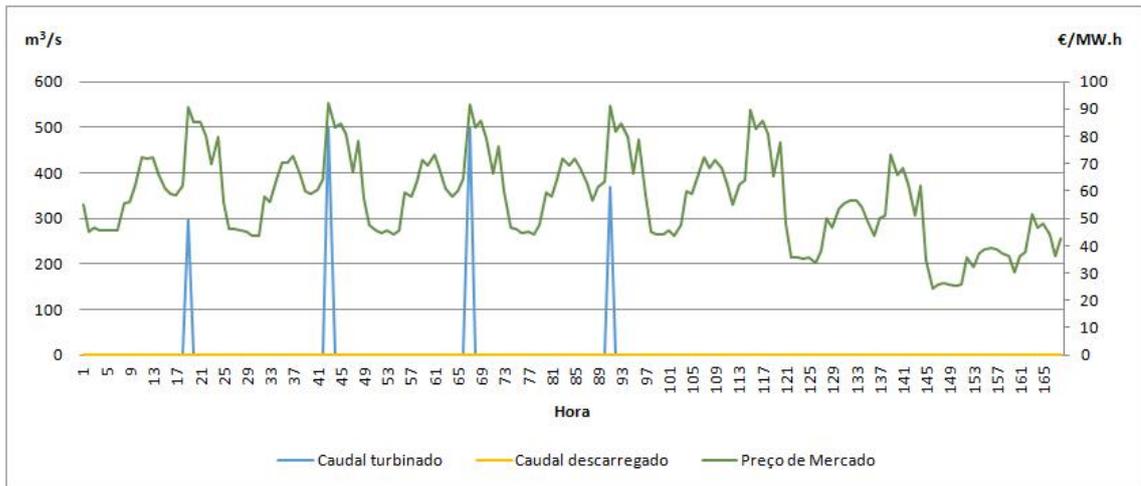


Figura 5.34: Resultados para os caudais turbinado, bombado e descarregado da central A do Modelo 3.

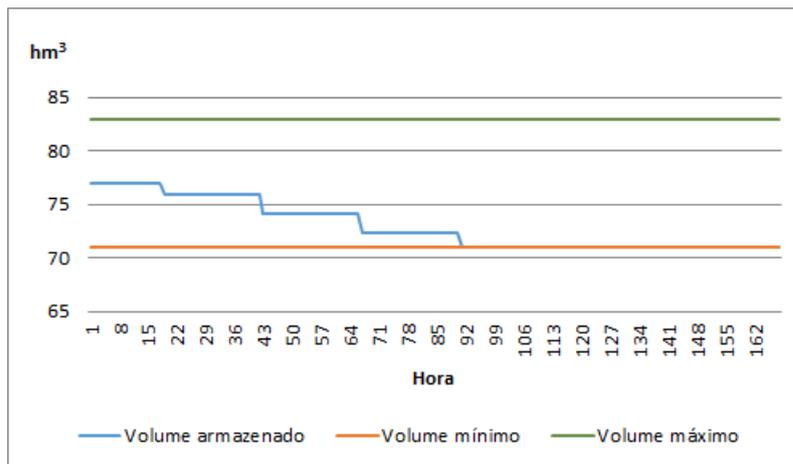


Figura 5.35: Variação do volume da central A do Modelo 3.

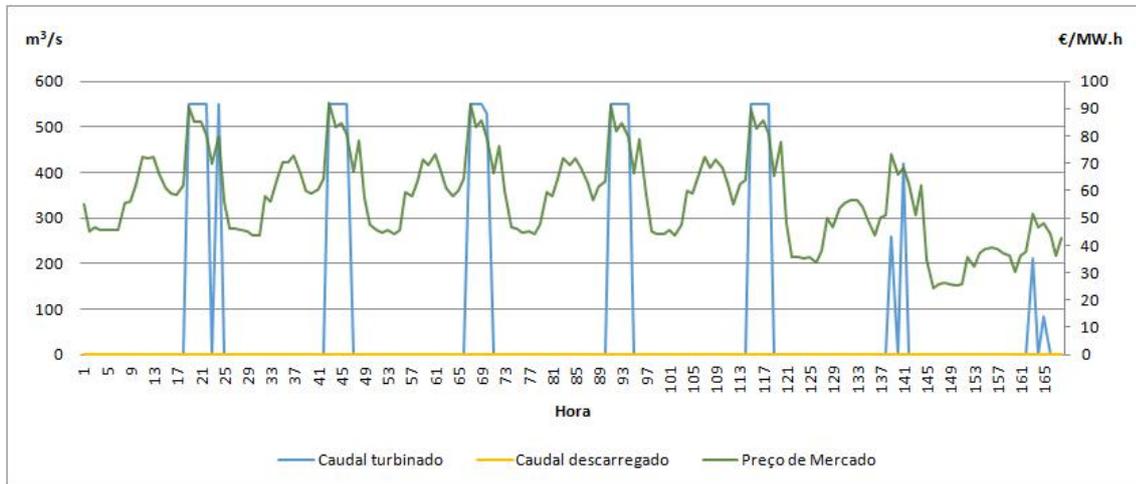


Figura 5.36: Resultados para os caudais turbinado, bombado e descarregado da central B do Modelo 3.

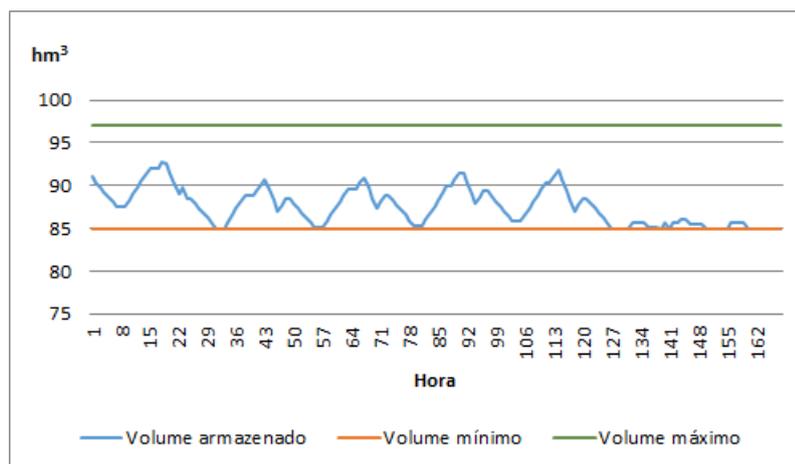


Figura 5.37: Variação do volume da central B do Modelo 3.

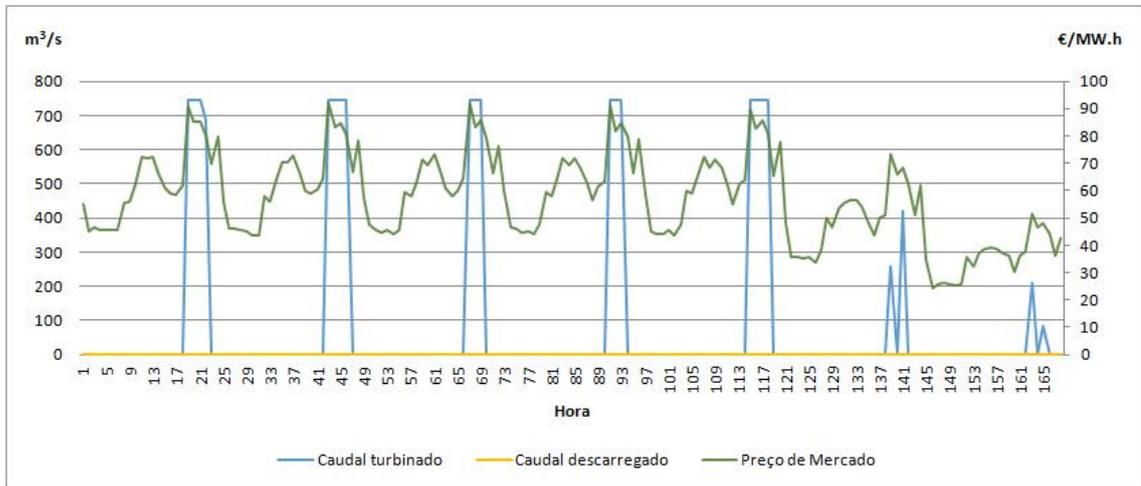


Figura 5.38: Resultados para os caudais turbinado, bombado e descarregado da central C do Modelo 3.

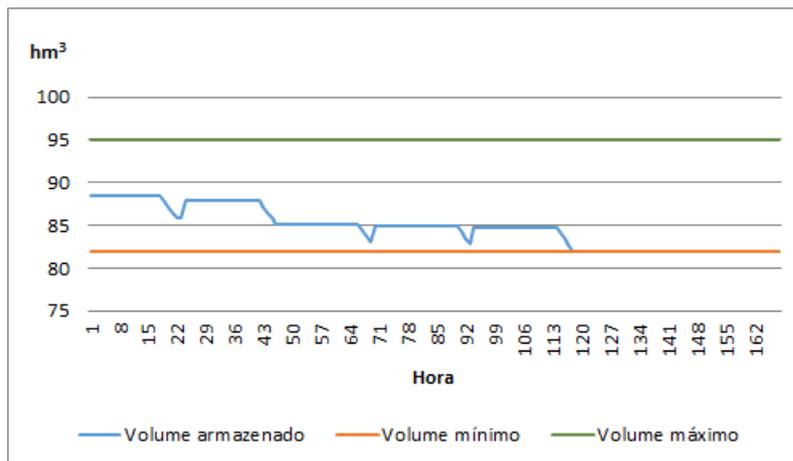


Figura 5.39: Variação do volume da central C do Modelo 3.

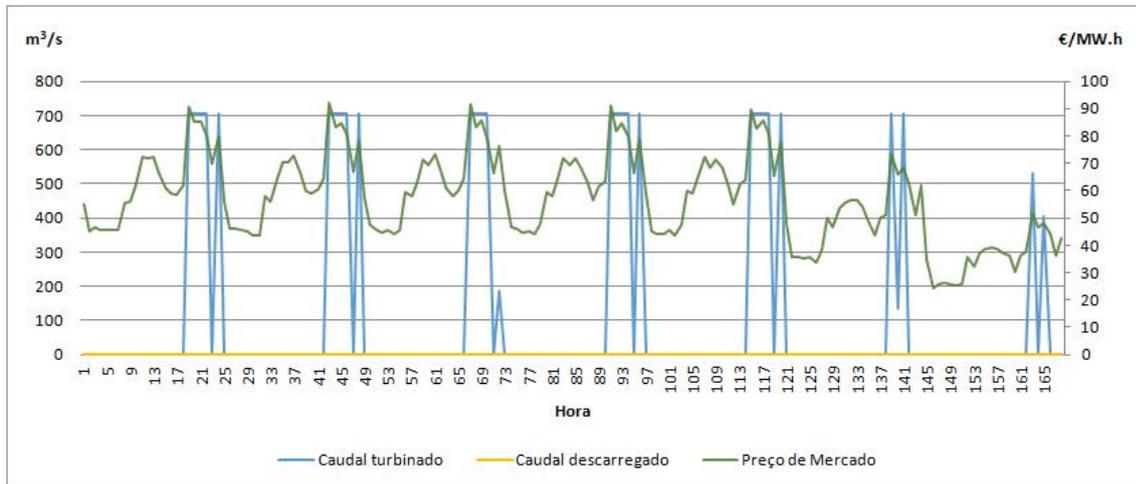


Figura 5.40: Resultados para os caudais turbinado, bombado e descarregado da central D do Modelo 3.

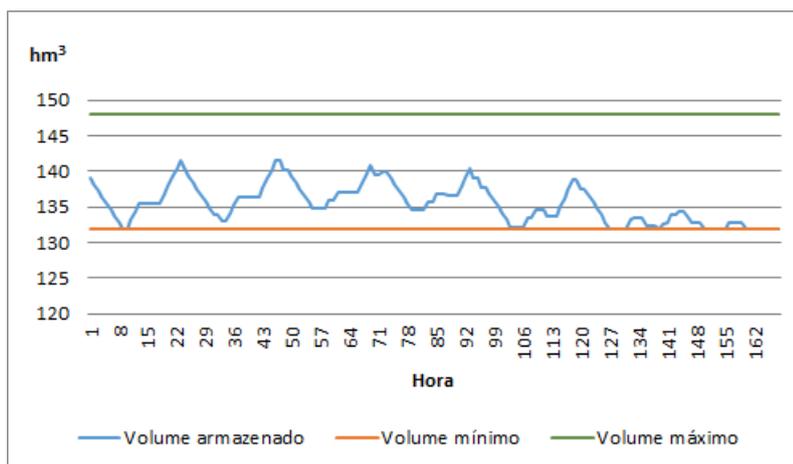


Figura 5.41: Variação do volume da central D do Modelo 3.

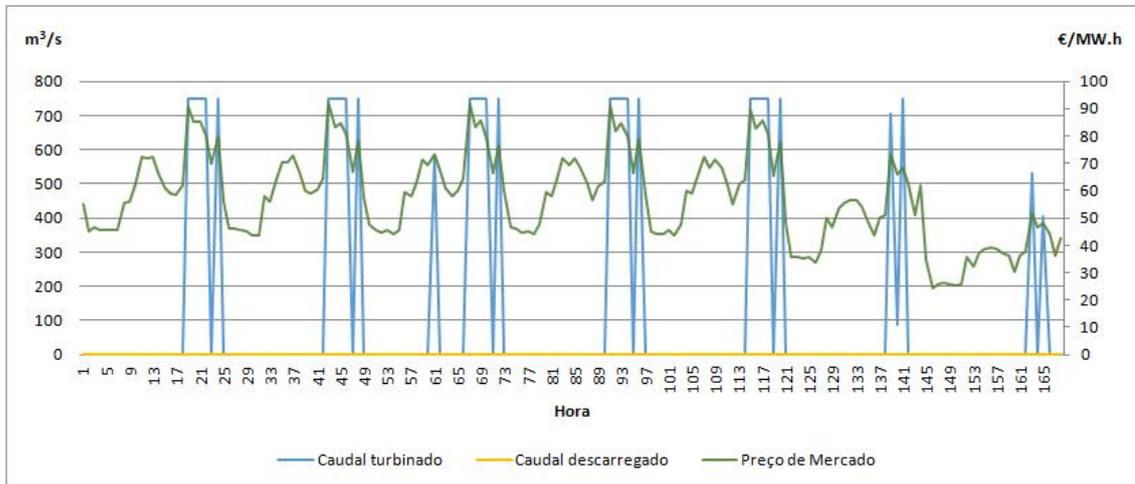


Figura 5.42: Resultados para os caudais turbinado, bombado e descarregado da central E do Modelo 3.

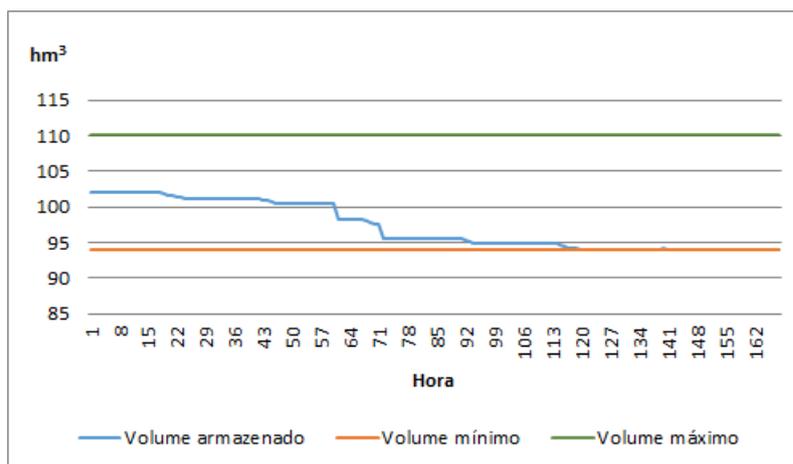


Figura 5.43: Variação do volume da central E do Modelo 3.

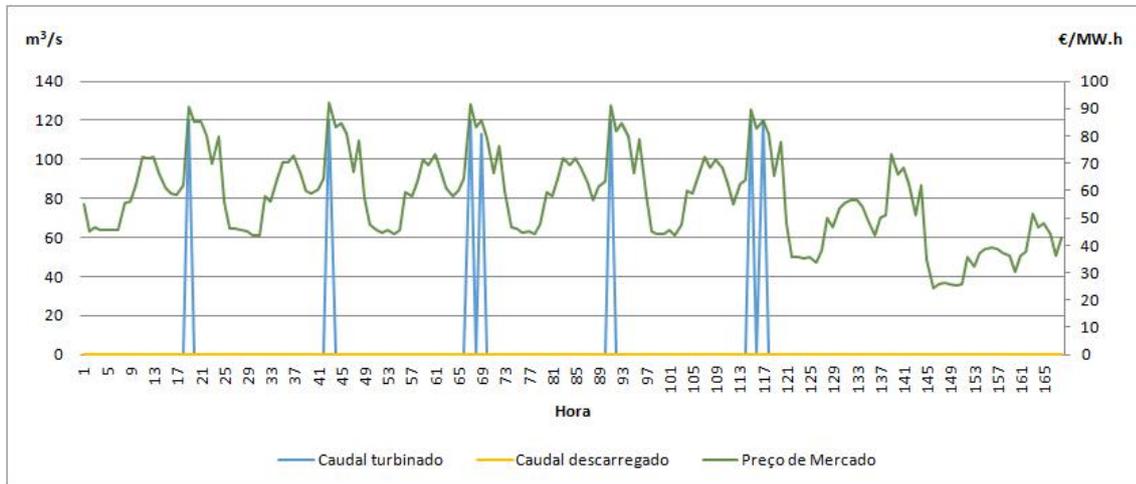


Figura 5.44: Resultados para os caudais turbinado, bombado e descarregado da central F do Modelo 3.

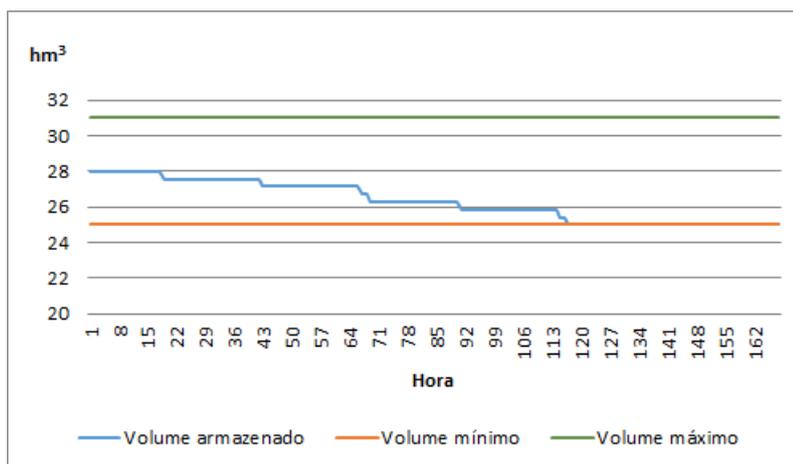


Figura 5.45: Variação do volume da central F do Modelo 3.

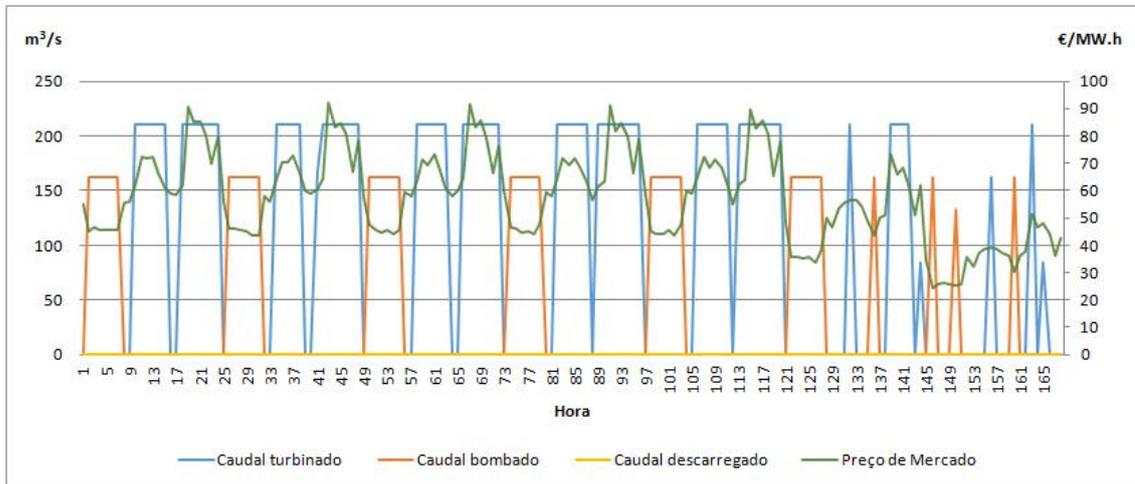


Figura 5.46: Resultados para os caudais turbinado, bombado e descarregado da central G do Modelo 3.

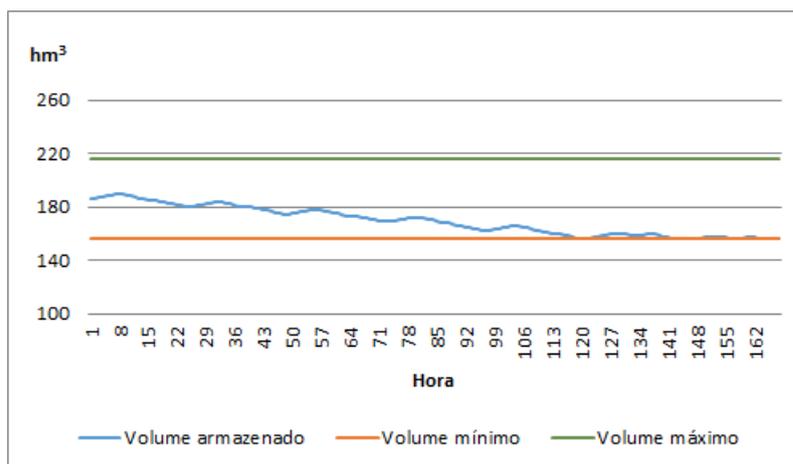


Figura 5.47: Variação do volume da central G do Modelo 3.

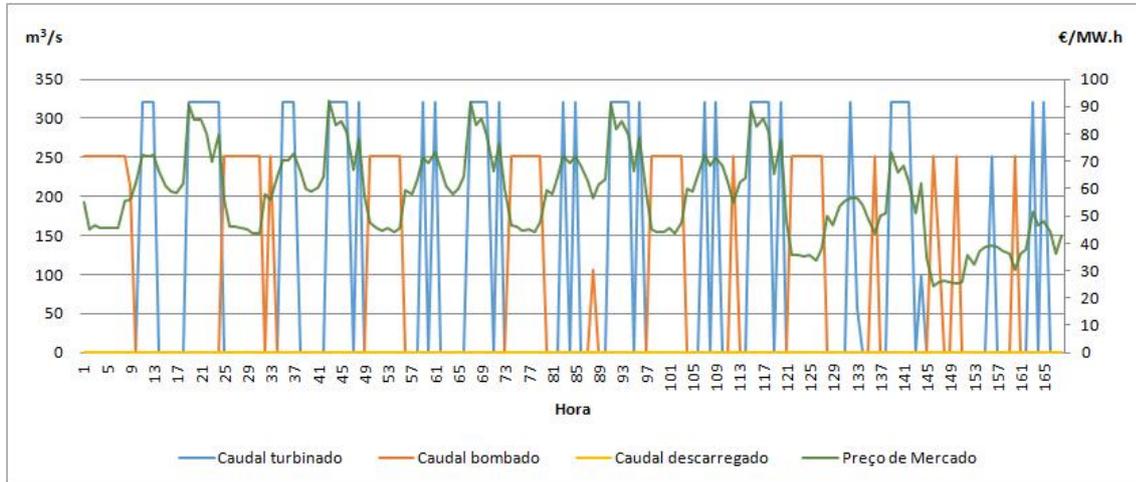


Figura 5.48: Resultados para os caudais turbinado, bombado e descarregado da central H do Modelo 3.

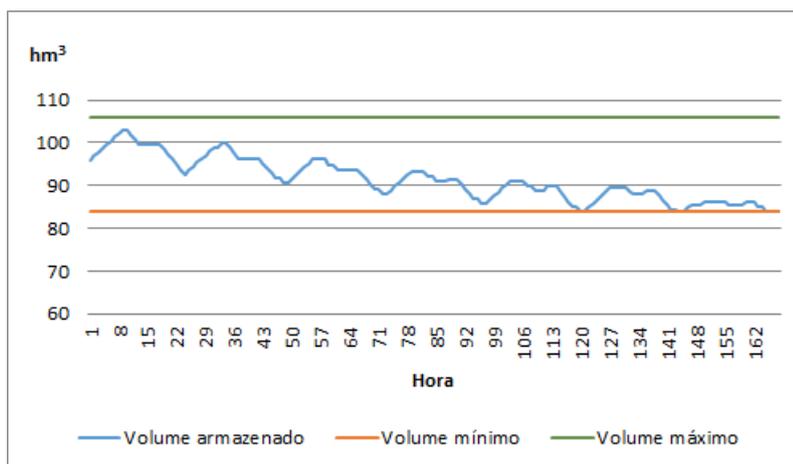


Figura 5.49: Variação do volume da central H do Modelo 3.

As centrais A e F, Figuras 5.34 e 5.44 respetivamente, operam da mesma forma, não têm centrais a montante nem possuem bombagem, ou seja, a água do volume inicial é a única que têm disponível para o período de 168 horas, tal como se pode observar nas Figuras 5.35 e 5.45. As duas centrais turbinam a água até atingirem o volume mínimo, que neste caso é o volume final imposto. No entanto o turbinamento ocorre apenas nos períodos de preço de mercado mais elevado, como desejado.

A central B, além do seu volume inicial, recebe a água turbinada das centrais A e G o que lhe permite aumentar o número dos seus períodos de turbinagem. Contudo, a central G possui bombagem, sendo retirado à central B o volume de água para esse efeito.

A central C encontra-se a jusante da central B e além de turbinar a água inicialmente contida no próprio reservatório, ainda tem disponível água que provém do turbinamento da central a montante, podendo portanto turbinar durante mais períodos. A central E encontra-se nas mesmas condições que a central C, sendo a central D a montante desta.

As centrais G e H são as únicas dotadas de bombagem, o que lhes permite turbinar durante mais períodos de tempo, já que recorrem à bombagem para aumentar o seu volume com esse intuito. A central G ainda recebe água adicional resultante do turbinamento da central a montante F, o que lhe permite turbinar durante mais tempo em relação à central H.

Como pretendido, as ações de turbinamento e de bombagem de todas as centrais ocorrem nas horas de preço mais elevado e mais baixo, respetivamente.

5.5 Modelo 4

Como já referido no Capítulo 4, este modelo tem um propósito distinto dos restantes. Baseado nos modelos anteriores de forma a providenciar os resultados desejados e cumprir as restrições impostas, este último modelo pretende verificar a capacidade do *linprog* de lidar com um grande número de centrais e, portanto, de variáveis e de restrições. Este facto é relevante para determinar se é possível a sua utilização na resolução de problemas com sistemas mais complexos dotados de um maior número de aproveitamentos hídricos e para períodos de tempo eventualmente mais longos.

De forma a simplificar o problema, foram atribuídas as mesmas características a todas as centrais incluídas no problema. Estas encontram-se descritas na Tabela 5.12.

Tabela 5.12: Dados das centrais utilizadas no Modelo 4.

Central	Volume mínimo (hm^3)	Volume máximo (hm^3)	Caudal máximo de turbinamento (m^3/s)	Caudal máximo de bombagem (m^3/s)
1 a n	800	10	400	400

De seguida, apresenta-se o resultado deste estudo através do gráfico da Figura 5.50 que representa o tempo de computação em função do número de centrais envolvidas na formulação.

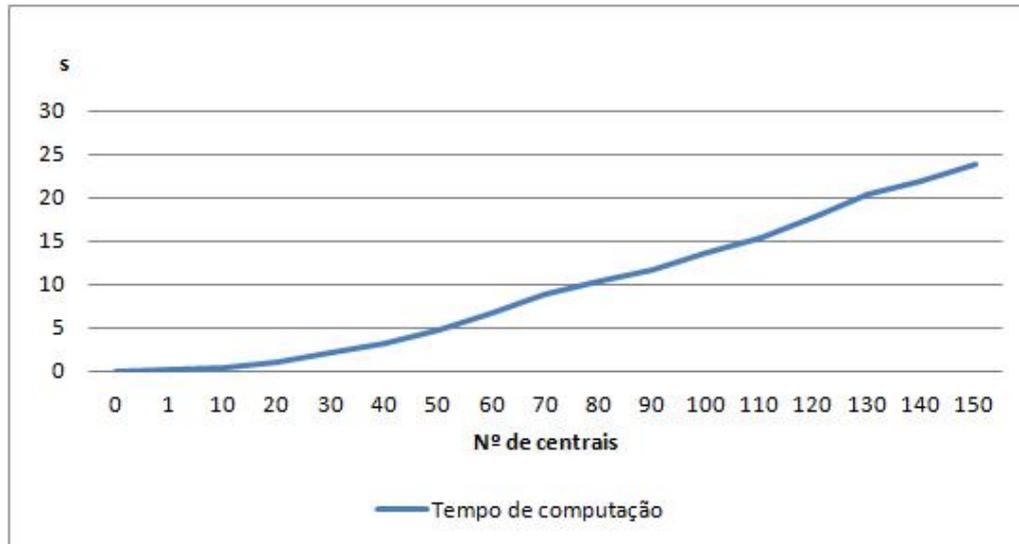


Figura 5.50: Variação do tempo de computação com o nº de centrais.

Com o programa desenvolvido foi possível realizar testes para 150 centrais interligadas entre si em cascata e considerando um horizonte de planeamento de 168 horas. De acordo com o gráfico da Figura 5.50, verifica-se que o tempo de computação aumenta com o acréscimo do número de centrais. Para um sistema hídrico com 150 aproveitamentos o teste demorou aproximadamente 24 segundos, não sendo uma duração muito longa tendo o problema de otimização correspondente $3 \cdot 168 \cdot 150 = 75.600$ variáveis e $5 \cdot 168 \cdot 150 = 126.000$ restrições. Para cada número de aproveitamentos hídricos foram realizados diversos testes, verificando-se que os tempos de cálculo obtidos apresentavam ligeiras variações. Os valores apresentados neste gráfico correspondem, para cada número de centrais que integram o sistema hídrico, ao valor médio dos tempos de cálculo obtidos nessas simulações.

Em 2008, a mesma função limitava este tipo de problema a apenas 16 aproveitamentos para o mesmo horizonte temporal, sendo este resultado muito interessante para as empresas de produção de energia hidroelétrica.

Capítulo 6

Conclusões e Trabalhos Futuros

6.1 Conclusões Finais

Com a reestruturação do setor elétrico e a introdução dos mercados de eletricidade, as empresas viram-se forçadas a alterar a sua organização e forma de atuação para aumentar os seus rendimentos. A competitividade decorrente da liberalização do mercado obriga a uma maior eficiência na gestão e operação dos recursos, requerendo a utilização de ferramentas de apoio à decisão através de novas metodologias e ferramentas computacionais.

A otimização de aproveitamentos hídricos em ambiente de mercado tem sido uma matéria de grande interesse e estudo nos últimos anos, devido ao facto das centrais terem um custo de produção nulo e estarem associadas a grandes investimentos, necessitando de uma rápida amortização.

Este trabalho apresenta um conjunto de contribuições para ultrapassar as dificuldades atrás referidas, através do desenvolvimento de um modelo de otimização que auxilia no planeamento operacional a curto prazo de um aproveitamento hídrico e também possibilidade de resolver esse problema de otimização considerando um elevado número de centrais.

Foi necessária a implementação de algumas simplificações ao problema como, por exemplo, considerar os custos de arranque das centrais nulos e os rendimentos de turbinagem e bombagem constantes, ignorar os regolfos e desprezar o tempo de passagem da central elétrica de modo de turbina ao modo de bomba. Para se obter a formulação linear, foi ainda desprezado o efeito não linear da queda, considerando-a constante e estabelecendo um relação linear entre a potência ativa gerada e o caudal turbinado.

Tendo em conta a análise dos resultados, o trabalho realizado apresenta as seguintes conclusões:

- as soluções obtidas sugerem que quando se turbina se utiliza em geral o máximo caudal de turbinagem e quando se bomba se utiliza, em geral, o máximo caudal de bombagem. Isto deve-se ao facto de se pretender maximizar o lucro;
- foram analisados dois sistemas mais pequenos, um sistema que replica as características da cascata do Douro Nacional e um sistema de maior dimensão. Os resultados obtidos para a cascata do Douro Nacional estão em linha com os obtidos por [17];

- confirma-se que as ações de bombagem são realizadas nas horas em que os preços são mais baixos e as ações de turbinagem quando os preços são mais elevados;
- as centrais hídricas foram consideradas como "price takers", isto é, assumiu-se um conjunto de preços iniciais que não se alteram. No entanto, as decisões de turbinagem fazem aumentar a produção a preço zero nas horas fora de vazio fazendo reduzir o preço nessas horas. Por seu lado, as decisões de bombagem nas horas de vazio fazem aumentar a carga nessas horas e portanto fazem aumentar o preço. Isto significa que o diferencial de preços entre as horas fora de vazio e as horas de vazio se irá progressivamente reduzir à medida que o número de centrais com grupos reversíveis aumenta. Assim, é importante desenvolver modelos que possam avaliar o impacto das decisões de operação nos preços de mercado;
- foi avaliada a possibilidade de utilizar a função *linprog* do MATLAB para resolver problemas de maior dimensão tendo-se verificado que era viável resolver problemas do planeamento da operação de sistemas hídricos com 150 aproveitamentos para períodos de uma semana, correspondendo a $3 \cdot 150 \cdot 168 = 75.600$ variáveis de decisão e $5 \cdot 150 \cdot 168 = 126.000$ restrições.

6.2 Propostas de Desenvolvimento Futuro

Com a realização deste trabalho foi possível identificar alguns aspetos que seriam interessantes desenvolver em futuras investigações. Alguns dos desenvolvimentos são salientados de seguida:

- a possibilidade de incluir esta formulação num processo iterativo em que partindo de um conjunto inicial de quedas, se calculam os caudais, e depois com esses caudais são recalculadas as quedas e o problema linear é resolvido de novo, e assim sucessivamente, até convergir;
- sendo uma das simplificações deste trabalho a consideração de um custo nulo de arranque das centrais hídricas, seria de grande interesse verificar o impacto dos custos de arranques e paragens que estas estratégias de operação implicam, nos custos de manutenção;
- o cálculo do valor futuro da água, que é um problema ainda com diversos aspetos a serem desenvolvidos, especialmente em mercados de eletricidade;
- tendo-se verificado a possibilidade de resolver o problema de otimização considerando um elevado número de centrais, seria interessante aplicar a metodologia a sistemas mais complexos.
- como foi referido anteriormente, neste trabalho os aproveitamentos hídricos foram considerados como "price takers", isto é, assumiu-se que o conjunto de preços inicialmente considerados não era alterado devido às decisões de operação das centrais em análise. Será importante incluir este modelo num processo iterativo que permita considerar os aproveitamentos hídricos como "price makers". Assim, o conjunto inicial de preços seria utilizado

para obter um primeiro conjunto de decisões de operação. Essas decisões seriam depois utilizadas para avaliar as alterações nos preços de mercado devido ao aumento a produção em algumas horas e ao aumento da carga noutras. Os novos preços seriam depois utilizados para obter um novo conjunto de decisões de operação, sendo este processo repetido até convergir. Como resultado, será de esperar que o lucro a obter no final deste processo seja menor que o que se obtém considerando os aproveitamentos como "price takers".

A finalizar este trabalho, agradece-se novamente à EDP Produção nas pessoas dos Eng. Virgílio Mendes e José Carlos Sousa, esperando-se que este trabalho e as conclusões obtidas possam ser úteis a esta empresa.

Anexo A

Anexos

A.1 Anexo A - Características das Centrais

Central	1	2	3
Volume Mínimo (hm ³)	800	10	10
Volume Máximo (hm ³)	1000	30	50
Volume Útil (hm ³)	200	20	40
Caudal Máximo de Turbinagem (m ³ /s)	400	120	70
Caudal Máximo de Bombagem (m ³ /s)	400	120	70
Queda nominal (m)	50	100	150
Rendimento de Turbinagem (%)	88	89	89
Rendimento de Bombagem (%)	92	93	93

Figura A.1: Características das centrais 1, 2 e 3 utilizadas nos Modelos 1, 2 e 4.

Central	A	B	C	D	E	F	G	H
Volume Mínimo (hm ³)	71	85	82	132	94	25	156	84
Volume Máximo (hm ³)	83	97	95	148	110	31	216	106
Volume Útil (hm ³)	12	12	13	16	16	6	60	22
Caudal Máximo de Turbinagem (m ³ /s)	500	550	744	705	750	120	210	320
Caudal Máximo de Bombagem (m ³ /s)	-	-	-	-	-	-	162	251
Queda nominal (m)	21	30	27	33	11	30	116	50
Rendimento de Turbinagem (%)	90	92	92	91	86	89	88	88
Rendimento de Bombagem (%)	-	-	-	-	-	-	92	92

Figura A.2: Características das centrais do DNA utilizadas no Modelo 3.

A.2 Anexo B - Preço de Mercado e Afluências

Hora	Preço de Mercado (€/MWh)						
1	55,0000	43	91,9074	85	71,7079	127	38,0072
2	45,0000	44	83,1337	86	68,2558	128	49,8766
3	46,5000	45	84,4880	87	62,9987	129	46,7718
4	45,4400	46	80,9645	88	56,6450	130	53,6584
5	45,5200	47	67,0481	89	61,6784	131	55,7608
6	45,5100	48	78,2235	90	63,6125	132	56,6976
7	45,5800	49	57,4129	91	91,1951	133	56,3521
8	55,4900	50	47,5009	92	81,8402	134	54,1548
9	56,1600	51	45,6905	93	84,7638	135	49,2825
10	61,7500	52	44,4190	94	79,9845	136	43,4749
11	72,5000	53	45,5013	95	66,2184	137	50,2712
12	71,7400	54	44,1620	96	78,7454	138	51,1561
13	72,4200	55	45,6321	97	58,4370	139	73,0917
14	66,2500	56	59,6606	98	45,2292	140	65,9991
15	61,0700	57	58,1304	99	44,1095	141	68,4184
16	58,9500	58	63,6457	100	43,9204	142	62,5623
17	58,5000	59	71,3280	101	45,6182	143	50,9355
18	62,0000	60	69,1846	102	43,4050	144	61,8392
19	90,6000	61	73,2207	103	47,6546	145	34,9600
20	85,0000	62	67,4751	104	59,9590	146	24,1999
21	85,0000	63	61,1502	105	59,0252	147	25,5990
22	80,4700	64	57,7835	106	65,0006	148	26,4499
23	70,0000	65	60,0707	107	72,2836	149	25,7073
24	79,7200	66	64,4032	108	68,5663	150	25,2999
25	56,2028	67	91,7693	109	71,2868	151	25,6392
26	46,2462	68	83,1357	110	68,5347	152	35,8872
27	46,0187	69	85,4808	111	62,2013	153	32,2984
28	45,7435	70	79,2075	112	55,0122	154	37,2274
29	45,3646	71	66,2993	113	62,6187	155	38,7265
30	43,7471	72	76,4155	114	63,7476	156	39,2514
31	43,8856	73	59,9680	115	89,8655	157	38,7415
32	58,0757	74	46,7321	116	82,8828	158	37,3736
33	56,1470	75	46,2892	117	85,8955	159	36,2048
34	64,1833	76	44,6714	118	80,7531	160	30,3757
35	70,2382	77	45,3507	119	65,2651	161	36,2480
36	70,1821	78	44,1042	120	77,7660	162	37,7068
37	72,6332	79	47,5352	121	47,9805	163	51,7777
38	66,3553	80	59,5774	122	35,6613	164	46,4375
39	59,7753	81	57,9239	123	35,5751	165	48,0571
40	59,0611	82	64,2487	124	35,3135	166	44,0416
41	60,6411	83	71,8587	125	35,5248	167	36,4432
42	64,4393	84	69,1783	126	33,6213	168	42,6835

Figura A.3: Preço de Mercado.

Hora	Afluência 1 (m3/s)						
1	100	43	0	85	0	127	0
2	100	44	0	86	0	128	0
3	100	45	0	87	0	129	0
4	0	46	0	88	0	130	0
5	0	47	100	89	0	131	0
6	0	48	100	90	0	132	0
7	0	49	100	91	0	133	0
8	0	50	0	92	0	134	0
9	0	51	0	93	100	135	0
10	0	52	0	94	100	136	0
11	0	53	0	95	100	137	0
12	0	54	0	96	0	138	0
13	0	55	0	97	0	139	100
14	0	56	0	98	0	140	100
15	0	57	0	99	0	141	100
16	0	58	0	100	0	142	0
17	0	59	0	101	0	143	0
18	0	60	0	102	0	144	0
19	0	61	0	103	0	145	0
20	0	62	0	104	0	146	0
21	0	63	0	105	0	147	0
22	0	64	0	106	0	148	0
23	0	65	0	107	0	149	0
24	0	66	0	108	0	150	0
25	0	67	0	109	0	151	0
26	0	68	0	110	0	152	0
27	0	69	0	111	0	153	0
28	0	70	0	112	0	154	0
29	0	71	0	113	0	155	0
30	0	72	0	114	0	156	0
31	0	73	0	115	0	157	0
32	0	74	0	116	100	158	0
33	0	75	0	117	100	159	0
34	0	76	0	118	100	160	0
35	0	77	0	119	0	161	0
36	0	78	0	120	0	162	0
37	0	79	0	121	0	163	0
38	0	80	0	122	0	164	0
39	0	81	0	123	0	165	0
40	0	82	0	124	0	166	0
41	0	83	0	125	0	167	0
42	0	84	0	126	0	168	0

Figura A.4: Afluência da central 1.

Hora	Afluência 2 (m3/s)						
1	50	43	0	85	0	127	50
2	50	44	0	86	0	128	50
3	50	45	0	87	50	129	50
4	50	46	0	88	50	130	50
5	50	47	50	89	50	131	50
6	50	48	50	90	50	132	50
7	50	49	50	91	50	133	50
8	50	50	50	92	50	134	50
9	50	51	50	93	50	135	50
10	50	52	50	94	50	136	50
11	50	53	50	95	50	137	50
12	50	54	50	96	50	138	50
13	50	55	50	97	50	139	50
14	50	56	50	98	50	140	50
15	50	57	50	99	50	141	50
16	50	58	50	100	50	142	50
17	50	59	50	101	50	143	50
18	50	60	50	102	50	144	0
19	50	61	50	103	50	145	0
20	50	62	50	104	0	146	0
21	50	63	50	105	0	147	0
22	50	64	50	106	0	148	0
23	50	65	50	107	0	149	0
24	0	66	50	108	0	150	0
25	0	67	50	109	0	151	0
26	0	68	50	110	0	152	0
27	0	69	50	111	0	153	0
28	0	70	0	112	0	154	0
29	0	71	0	113	0	155	0
30	0	72	0	114	0	156	0
31	0	73	0	115	0	157	0
32	0	74	0	116	50	158	0
33	0	75	0	117	50	159	0
34	0	76	0	118	50	160	0
35	0	77	0	119	50	161	0
36	0	78	0	120	50	162	0
37	0	79	0	121	50	163	0
38	0	80	0	122	50	164	0
39	0	81	0	123	50	165	0
40	0	82	0	124	50	166	0
41	0	83	0	125	50	167	0
42	0	84	0	126	50	168	0

Figura A.5: Afluência da central 2.

A.3 Anexo C - Resultados das Potências Turbinada e Bombada

Hora	Potência Turbinada (MW)						
1	0,00	43	172,48	85	172,48	127	0,00
2	0,00	44	172,48	86	172,48	128	34,50
3	0,00	45	172,48	87	172,48	129	0,00
4	0,00	46	172,48	88	0,00	130	172,48
5	0,00	47	172,48	89	172,48	131	172,48
6	0,00	48	172,48	90	172,48	132	172,48
7	0,00	49	0,00	91	172,48	133	172,48
8	0,00	50	0,00	92	172,48	134	172,48
9	0,00	51	0,00	93	172,48	135	0,00
10	172,48	52	0,00	94	172,48	136	0,00
11	172,48	53	0,00	95	172,48	137	172,48
12	172,48	54	0,00	96	172,48	138	172,48
13	172,48	55	0,00	97	0,00	139	172,48
14	172,48	56	0,00	98	0,00	140	172,48
15	172,48	57	0,00	99	0,00	141	172,48
16	34,50	58	172,48	100	0,00	142	172,48
17	0,00	59	172,48	101	0,00	143	172,48
18	172,48	60	172,48	102	0,00	144	172,48
19	172,48	61	172,48	103	0,00	145	0,00
20	172,48	62	172,48	104	172,48	146	0,00
21	172,48	63	172,48	105	0,00	147	0,00
22	172,48	64	0,00	106	172,48	148	0,00
23	172,48	65	172,48	107	172,48	149	0,00
24	172,48	66	172,48	108	172,48	150	0,00
25	0,00	67	172,48	109	172,48	151	0,00
26	0,00	68	172,48	110	172,48	152	0,00
27	0,00	69	172,48	111	172,48	153	0,00
28	0,00	70	172,48	112	0,00	154	172,48
29	0,00	71	172,48	113	172,48	155	172,48
30	0,00	72	172,48	114	172,48	156	172,48
31	0,00	73	172,48	115	172,48	157	172,48
32	0,00	74	0,00	116	172,48	158	172,48
33	0,00	75	0,00	117	172,48	159	34,50
34	172,48	76	0,00	118	172,48	160	0,00
35	172,48	77	0,00	119	172,48	161	172,48
36	172,48	78	0,00	120	172,48	162	172,48
37	172,48	79	0,00	121	0,00	163	172,48
38	172,48	80	0,00	122	0,00	164	172,48
39	170,56	81	0,00	123	0,00	165	172,48
40	0,00	82	172,48	124	0,00	166	172,48
41	172,48	83	172,48	125	0,00	167	172,48
42	172,48	84	172,48	126	0,00	168	172,48

Figura A.6: Potência horária turbinada pela central 1 do Modelo 1 - Caso 1.

Hora	Potência Bombada (MW)						
1	0,00	43	0,00	85	0,00	127	213,04
2	213,04	44	0,00	86	0,00	128	0,00
3	0,00	45	0,00	87	0,00	129	0,00
4	213,04	46	0,00	88	0,00	130	0,00
5	213,04	47	0,00	89	0,00	131	0,00
6	213,04	48	0,00	90	0,00	132	0,00
7	52,08	49	0,00	91	0,00	133	0,00
8	0,00	50	213,04	92	0,00	134	0,00
9	0,00	51	213,04	93	0,00	135	0,00
10	0,00	52	213,04	94	0,00	136	0,00
11	0,00	53	213,04	95	0,00	137	0,00
12	0,00	54	213,04	96	0,00	138	0,00
13	0,00	55	213,04	97	0,00	139	0,00
14	0,00	56	0,00	98	213,04	140	0,00
15	0,00	57	0,00	99	213,04	141	0,00
16	0,00	58	0,00	100	213,04	142	0,00
17	0,00	59	0,00	101	213,04	143	0,00
18	0,00	60	0,00	102	213,04	144	0,00
19	0,00	61	0,00	103	213,04	145	0,00
20	0,00	62	0,00	104	0,00	146	213,04
21	0,00	63	0,00	105	0,00	147	213,04
22	0,00	64	0,00	106	0,00	148	213,04
23	0,00	65	0,00	107	0,00	149	213,04
24	0,00	66	0,00	108	0,00	150	213,04
25	0,00	67	0,00	109	0,00	151	213,04
26	213,04	68	0,00	110	0,00	152	0,00
27	213,04	69	0,00	111	0,00	153	0,00
28	213,04	70	0,00	112	0,00	154	0,00
29	213,04	71	0,00	113	0,00	155	0,00
30	213,04	72	0,00	114	0,00	156	0,00
31	213,04	73	0,00	115	0,00	157	0,00
32	0,00	74	213,04	116	0,00	158	0,00
33	0,00	75	213,04	117	0,00	159	0,00
34	0,00	76	213,04	118	0,00	160	0,00
35	0,00	77	213,04	119	0,00	161	0,00
36	0,00	78	213,04	120	0,00	162	0,00
37	0,00	79	213,04	121	0,00	163	0,00
38	0,00	80	0,00	122	213,04	164	0,00
39	0,00	81	0,00	123	213,04	165	0,00
40	0,00	82	0,00	124	213,04	166	0,00
41	0,00	83	0,00	125	213,04	167	0,00
42	0,00	84	0,00	126	213,04	168	0,00

Figura A.7: Potência horária bombada pela central 1 do Modelo 1 - Caso 1.

Hora	Potência Turbinada (MW)						
1	104,66	43	104,66	85	104,66	127	104,66
2	104,66	44	104,66	86	104,66	128	104,66
3	104,66	45	104,66	87	104,66	129	104,66
4	104,66	46	104,66	88	104,66	130	104,66
5	104,66	47	104,66	89	104,66	131	104,66
6	104,66	48	104,66	90	104,66	132	104,66
7	104,66	49	104,66	91	104,66	133	104,66
8	104,66	50	104,66	92	104,66	134	104,66
9	104,66	51	104,66	93	104,66	135	104,66
10	104,66	52	104,66	94	104,66	136	104,66
11	104,66	53	104,66	95	104,66	137	104,66
12	104,66	54	104,66	96	104,66	138	104,66
13	104,66	55	104,66	97	104,66	139	104,66
14	104,66	56	104,66	98	104,66	140	104,66
15	104,66	57	104,66	99	104,66	141	104,66
16	104,66	58	104,66	100	104,66	142	104,66
17	104,66	59	104,66	101	104,66	143	104,66
18	104,66	60	104,66	102	104,66	144	104,66
19	104,66	61	104,66	103	104,66	145	104,66
20	104,66	62	104,66	104	104,66	146	104,66
21	104,66	63	104,66	105	104,66	147	104,66
22	104,66	64	104,66	106	104,66	148	104,66
23	104,66	65	104,66	107	104,66	149	104,66
24	104,66	66	104,66	108	104,66	150	104,66
25	104,66	67	104,66	109	104,66	151	104,66
26	104,66	68	104,66	110	104,66	152	104,66
27	104,66	69	104,66	111	104,66	153	104,66
28	104,66	70	104,66	112	104,66	154	104,66
29	104,66	71	104,66	113	104,66	155	104,66
30	104,66	72	104,66	114	104,66	156	104,66
31	104,66	73	104,66	115	104,66	157	104,66
32	104,66	74	104,66	116	104,66	158	104,66
33	104,66	75	104,66	117	104,66	159	104,66
34	104,66	76	104,66	118	104,66	160	104,66
35	104,66	77	104,66	119	104,66	161	104,66
36	104,66	78	104,66	120	104,66	162	104,66
37	104,66	79	104,66	121	104,66	163	104,66
38	104,66	80	104,66	122	104,66	164	104,66
39	104,66	81	104,66	123	104,66	165	104,66
40	104,66	82	104,66	124	104,66	166	104,66
41	104,66	83	104,66	125	104,66	167	104,66
42	104,66	84	104,66	126	104,66	168	104,66

Figura A.8: Potência horária turbinada pela central 2 do Modelo 1 - Caso 1.

Hora	Potência Bombada (MW)						
1	0,00	43	0,00	85	0,00	127	0,00
2	0,00	44	0,00	86	0,00	128	0,00
3	0,00	45	0,00	87	0,00	129	0,00
4	0,00	46	0,00	88	0,00	130	0,00
5	0,00	47	0,00	89	0,00	131	0,00
6	0,00	48	0,00	90	0,00	132	0,00
7	0,00	49	0,00	91	0,00	133	0,00
8	0,00	50	0,00	92	0,00	134	0,00
9	0,00	51	0,00	93	0,00	135	0,00
10	0,00	52	0,00	94	0,00	136	0,00
11	0,00	53	0,00	95	0,00	137	0,00
12	0,00	54	0,00	96	0,00	138	0,00
13	0,00	55	0,00	97	0,00	139	0,00
14	0,00	56	0,00	98	0,00	140	0,00
15	0,00	57	0,00	99	0,00	141	0,00
16	0,00	58	0,00	100	0,00	142	0,00
17	0,00	59	0,00	101	0,00	143	0,00
18	0,00	60	0,00	102	0,00	144	0,00
19	0,00	61	0,00	103	0,00	145	0,00
20	0,00	62	0,00	104	0,00	146	0,00
21	0,00	63	0,00	105	0,00	147	0,00
22	0,00	64	0,00	106	0,00	148	0,00
23	0,00	65	0,00	107	0,00	149	0,00
24	0,00	66	0,00	108	0,00	150	0,00
25	0,00	67	0,00	109	0,00	151	0,00
26	0,00	68	0,00	110	0,00	152	0,00
27	0,00	69	0,00	111	0,00	153	0,00
28	0,00	70	0,00	112	0,00	154	0,00
29	0,00	71	0,00	113	0,00	155	0,00
30	0,00	72	0,00	114	0,00	156	0,00
31	0,00	73	0,00	115	0,00	157	0,00
32	0,00	74	0,00	116	0,00	158	0,00
33	0,00	75	0,00	117	0,00	159	0,00
34	0,00	76	0,00	118	0,00	160	0,00
35	0,00	77	0,00	119	0,00	161	0,00
36	0,00	78	0,00	120	0,00	162	0,00
37	0,00	79	0,00	121	0,00	163	0,00
38	0,00	80	0,00	122	0,00	164	0,00
39	0,00	81	0,00	123	0,00	165	0,00
40	0,00	82	0,00	124	0,00	166	0,00
41	0,00	83	0,00	125	0,00	167	0,00
42	0,00	84	0,00	126	0,00	168	0,00

Figura A.9: Potência horária bombada pela central 2 do Modelo 1 - Caso 1.

Hora	Potência Turbinada (MW)						
1	0,00	43	172,48	85	172,48	127	0,00
2	0,00	44	172,48	86	172,48	128	0,00
3	0,00	45	172,48	87	0,00	129	0,00
4	0,00	46	172,48	88	0,00	130	0,00
5	0,00	47	172,48	89	0,00	131	0,00
6	0,00	48	172,48	90	0,00	132	0,00
7	0,00	49	0,00	91	172,48	133	0,00
8	0,00	50	0,00	92	172,48	134	0,00
9	0,00	51	0,00	93	172,48	135	0,00
10	0,00	52	0,00	94	172,48	136	0,00
11	172,48	53	0,00	95	0,00	137	0,00
12	172,48	54	0,00	96	172,48	138	0,00
13	172,48	55	0,00	97	0,00	139	172,48
14	76,66	56	0,00	98	0,00	140	172,48
15	0,00	57	0,00	99	0,00	141	172,48
16	0,00	58	0,00	100	0,00	142	172,48
17	0,00	59	172,48	101	0,00	143	0,00
18	0,00	60	172,48	102	0,00	144	172,48
19	172,48	61	172,48	103	0,00	145	0,00
20	172,48	62	172,48	104	0,00	146	0,00
21	172,48	63	0,00	105	0,00	147	0,00
22	172,48	64	0,00	106	0,00	148	0,00
23	172,48	65	0,00	107	172,48	149	0,00
24	172,48	66	0,00	108	172,48	150	0,00
25	0,00	67	172,48	109	172,48	151	0,00
26	0,00	68	172,48	110	172,48	152	0,00
27	0,00	69	172,48	111	0,00	153	0,00
28	0,00	70	172,48	112	0,00	154	0,00
29	0,00	71	172,48	113	0,00	155	0,00
30	0,00	72	172,48	114	0,00	156	0,00
31	0,00	73	0,00	115	172,48	157	0,00
32	0,00	74	0,00	116	172,48	158	0,00
33	0,00	75	0,00	117	172,48	159	0,00
34	0,00	76	0,00	118	172,48	160	0,00
35	172,48	77	0,00	119	0,00	161	0,00
36	172,48	78	0,00	120	172,48	162	0,00
37	172,48	79	0,00	121	0,00	163	172,48
38	172,48	80	0,00	122	0,00	164	0,00
39	0,00	81	0,00	123	0,00	165	172,48
40	0,00	82	0,00	124	0,00	166	0,00
41	0,00	83	172,48	125	0,00	167	0,00
42	0,00	84	172,48	126	0,00	168	0,00

Figura A.10: Potência horária turbinada pela central 1 do Modelo 1 - Caso 2.

Hora	Potência Bombada (MW)						
1	0,00	43	0,00	85	0,00	127	213,04
2	213,04	44	0,00	86	0,00	128	0,00
3	213,04	45	0,00	87	0,00	129	213,04
4	213,04	46	0,00	88	0,00	130	0,00
5	213,04	47	0,00	89	0,00	131	0,00
6	213,04	48	0,00	90	0,00	132	0,00
7	213,04	49	0,00	91	0,00	133	0,00
8	0,00	50	213,04	92	0,00	134	0,00
9	0,00	51	213,04	93	0,00	135	0,00
10	0,00	52	213,04	94	0,00	136	213,04
11	0,00	53	213,04	95	0,00	137	0,00
12	0,00	54	213,04	96	0,00	138	0,00
13	0,00	55	213,04	97	0,00	139	0,00
14	0,00	56	0,00	98	213,04	140	0,00
15	0,00	57	0,00	99	213,04	141	0,00
16	0,00	58	0,00	100	213,04	142	0,00
17	0,00	59	0,00	101	213,04	143	0,00
18	0,00	60	0,00	102	213,04	144	0,00
19	0,00	61	0,00	103	213,04	145	213,04
20	0,00	62	0,00	104	0,00	146	213,04
21	0,00	63	0,00	105	0,00	147	213,04
22	0,00	64	0,00	106	0,00	148	213,04
23	0,00	65	0,00	107	0,00	149	213,04
24	0,00	66	0,00	108	0,00	150	213,04
25	0,00	67	0,00	109	0,00	151	213,04
26	213,04	68	0,00	110	0,00	152	213,04
27	213,04	69	0,00	111	0,00	153	213,04
28	213,04	70	0,00	112	0,00	154	213,04
29	213,04	71	0,00	113	0,00	155	30,77
30	213,04	72	0,00	114	0,00	156	0,00
31	213,04	73	0,00	115	0,00	157	0,00
32	0,00	74	213,04	116	0,00	158	213,04
33	0,00	75	213,04	117	0,00	159	213,04
34	0,00	76	213,04	118	0,00	160	213,04
35	0,00	77	213,04	119	0,00	161	213,04
36	0,00	78	213,04	120	0,00	162	213,04
37	0,00	79	213,04	121	63,91	163	0,00
38	0,00	80	0,00	122	213,04	164	0,00
39	0,00	81	0,00	123	213,04	165	0,00
40	0,00	82	0,00	124	213,04	166	0,00
41	0,00	83	0,00	125	213,04	167	213,04
42	0,00	84	0,00	126	213,04	168	0,00

Figura A.11: Potência horária bombada pela central 1 do Modelo 1 - Caso 2.

Hora	Potência Turbinada (MW)						
1	0,00	43	104,66	85	104,66	127	0,00
2	0,00	44	104,66	86	104,66	128	0,00
3	0,00	45	104,66	87	104,66	129	0,00
4	0,00	46	104,66	88	0,00	130	0,00
5	0,00	47	104,66	89	104,66	131	0,00
6	0,00	48	104,66	90	104,66	132	0,00
7	0,00	49	0,00	91	104,66	133	0,00
8	0,00	50	0,00	92	104,66	134	0,00
9	0,00	51	0,00	93	104,66	135	0,00
10	104,66	52	0,00	94	104,66	136	0,00
11	104,66	53	0,00	95	104,66	137	0,00
12	104,66	54	0,00	96	104,66	138	0,00
13	104,66	55	0,00	97	0,00	139	104,66
14	104,66	56	0,00	98	0,00	140	104,66
15	0,00	57	0,00	99	0,00	141	104,66
16	0,00	58	104,66	100	0,00	142	0,00
17	0,00	59	104,66	101	0,00	143	0,00
18	104,66	60	104,66	102	0,00	144	0,00
19	104,66	61	104,66	103	0,00	145	0,00
20	104,66	62	104,66	104	0,00	146	0,00
21	104,66	63	104,66	105	0,00	147	0,00
22	104,66	64	0,00	106	104,66	148	0,00
23	104,66	65	0,00	107	104,66	149	0,00
24	104,66	66	104,66	108	104,66	150	0,00
25	0,00	67	104,66	109	104,66	151	0,00
26	0,00	68	104,66	110	104,66	152	0,00
27	0,00	69	104,66	111	104,66	153	0,00
28	0,00	70	104,66	112	0,00	154	0,00
29	0,00	71	104,66	113	104,66	155	0,00
30	0,00	72	104,66	114	104,66	156	0,00
31	0,00	73	0,00	115	104,66	157	0,00
32	0,00	74	0,00	116	104,66	158	0,00
33	0,00	75	0,00	117	104,66	159	0,00
34	104,66	76	0,00	118	104,66	160	0,00
35	104,66	77	0,00	119	104,66	161	0,00
36	104,66	78	0,00	120	104,66	162	0,00
37	104,66	79	0,00	121	0,00	163	0,00
38	104,66	80	0,00	122	0,00	164	0,00
39	0,00	81	0,00	123	0,00	165	0,00
40	0,00	82	104,66	124	0,00	166	0,00
41	0,00	83	104,66	125	0,00	167	0,00
42	104,66	84	104,66	126	0,00	168	0,00

Figura A.12: Potência horária turbinada pela central 2 do Modelo 1 - Caso 2.

Hora	Potência Bombada (MW)						
1	0,00	43	0,00	85	0,00	127	126,46
2	126,46	44	0,00	86	0,00	128	126,46
3	126,46	45	0,00	87	0,00	129	126,46
4	126,46	46	0,00	88	0,00	130	0,00
5	126,46	47	0,00	89	0,00	131	0,00
6	126,46	48	0,00	90	0,00	132	0,00
7	126,46	49	0,00	91	0,00	133	0,00
8	0,00	50	126,46	92	0,00	134	0,00
9	0,00	51	126,46	93	0,00	135	126,46
10	0,00	52	126,46	94	0,00	136	126,46
11	0,00	53	126,46	95	0,00	137	126,46
12	0,00	54	126,46	96	0,00	138	126,46
13	0,00	55	126,46	97	0,00	139	0,00
14	0,00	56	0,00	98	126,46	140	0,00
15	0,00	57	0,00	99	126,46	141	0,00
16	0,00	58	0,00	100	126,46	142	0,00
17	0,00	59	0,00	101	126,46	143	126,46
18	0,00	60	0,00	102	126,46	144	0,00
19	0,00	61	0,00	103	126,46	145	126,46
20	0,00	62	0,00	104	0,00	146	126,46
21	0,00	63	0,00	105	0,00	147	126,46
22	0,00	64	0,00	106	0,00	148	126,46
23	0,00	65	0,00	107	0,00	149	126,46
24	0,00	66	0,00	108	0,00	150	126,46
25	0,00	67	0,00	109	0,00	151	126,46
26	126,46	68	0,00	110	0,00	152	126,46
27	126,46	69	0,00	111	0,00	153	126,46
28	126,46	70	0,00	112	0,00	154	126,46
29	126,46	71	0,00	113	0,00	155	126,46
30	126,46	72	0,00	114	0,00	156	126,46
31	126,46	73	0,00	115	0,00	157	126,46
32	0,00	74	126,46	116	0,00	158	126,46
33	0,00	75	126,46	117	0,00	159	126,46
34	0,00	76	126,46	118	0,00	160	126,46
35	0,00	77	126,46	119	0,00	161	126,46
36	0,00	78	126,46	120	0,00	162	126,46
37	0,00	79	126,46	121	126,46	163	126,46
38	0,00	80	0,00	122	126,46	164	126,46
39	0,00	81	0,00	123	126,46	165	126,46
40	0,00	82	0,00	124	126,46	166	126,46
41	0,00	83	0,00	125	126,46	167	126,46
42	0,00	84	0,00	126	126,46	168	126,46

Figura A.13: Potência horária bombada pela central 2 do Modelo 1 - Caso 2.

Hora	Potência Turbinada (MW)						
1	0,00	43	172,48	85	172,48	127	0,00
2	0,00	44	172,48	86	172,48	128	0,00
3	0,00	45	172,48	87	0,00	129	0,00
4	0,00	46	172,48	88	0,00	130	0,00
5	0,00	47	172,48	89	0,00	131	0,00
6	0,00	48	172,48	90	0,00	132	0,00
7	0,00	49	0,00	91	172,48	133	0,00
8	0,00	50	0,00	92	172,48	134	0,00
9	0,00	51	0,00	93	172,48	135	0,00
10	0,00	52	0,00	94	172,48	136	0,00
11	172,48	53	0,00	95	172,48	137	0,00
12	172,48	54	0,00	96	172,48	138	0,00
13	172,48	55	0,00	97	0,00	139	172,48
14	172,48	56	0,00	98	0,00	140	172,48
15	0,00	57	0,00	99	0,00	141	172,48
16	0,00	58	0,00	100	0,00	142	172,48
17	0,00	59	172,48	101	0,00	143	0,00
18	0,00	60	172,48	102	0,00	144	172,48
19	172,48	61	172,48	103	0,00	145	0,00
20	172,48	62	172,48	104	0,00	146	0,00
21	172,48	63	0,00	105	0,00	147	0,00
22	172,48	64	0,00	106	154,27	148	0,00
23	172,48	65	0,00	107	172,48	149	0,00
24	172,48	66	0,00	108	172,48	150	0,00
25	0,00	67	172,48	109	172,48	151	0,00
26	0,00	68	172,48	110	172,48	152	0,00
27	0,00	69	172,48	111	0,00	153	0,00
28	0,00	70	172,48	112	0,00	154	0,00
29	0,00	71	172,48	113	0,00	155	0,00
30	0,00	72	172,48	114	0,00	156	0,00
31	0,00	73	0,00	115	172,48	157	0,00
32	0,00	74	0,00	116	172,48	158	0,00
33	0,00	75	0,00	117	172,48	159	0,00
34	0,00	76	0,00	118	172,48	160	0,00
35	172,48	77	0,00	119	172,48	161	0,00
36	172,48	78	0,00	120	172,48	162	0,00
37	172,48	79	0,00	121	0,00	163	172,48
38	172,48	80	0,00	122	0,00	164	0,00
39	0,00	81	0,00	123	0,00	165	172,48
40	0,00	82	0,00	124	0,00	166	0,00
41	0,00	83	172,48	125	0,00	167	0,00
42	0,00	84	172,48	126	0,00	168	0,00

Figura A.14: Potência horária turbinada pela central 1 do Modelo 1 - Caso 3.

Hora	Potência Bombada (MW)						
1	0,00	43	0,00	85	0,00	127	213,04
2	213,04	44	0,00	86	0,00	128	0,00
3	213,04	45	0,00	87	0,00	129	149,13
4	213,04	46	0,00	88	0,00	130	0,00
5	213,04	47	0,00	89	0,00	131	0,00
6	213,04	48	0,00	90	0,00	132	0,00
7	213,04	49	0,00	91	0,00	133	0,00
8	0,00	50	213,04	92	0,00	134	0,00
9	0,00	51	213,04	93	0,00	135	0,00
10	0,00	52	213,04	94	0,00	136	213,04
11	0,00	53	213,04	95	0,00	137	0,00
12	0,00	54	213,04	96	0,00	138	0,00
13	0,00	55	213,04	97	0,00	139	0,00
14	0,00	56	0,00	98	213,04	140	0,00
15	0,00	57	0,00	99	213,04	141	0,00
16	0,00	58	0,00	100	213,04	142	0,00
17	0,00	59	0,00	101	213,04	143	0,00
18	0,00	60	0,00	102	213,04	144	0,00
19	0,00	61	0,00	103	213,04	145	213,04
20	0,00	62	0,00	104	0,00	146	213,04
21	0,00	63	0,00	105	0,00	147	213,04
22	0,00	64	0,00	106	0,00	148	213,04
23	0,00	65	0,00	107	0,00	149	213,04
24	0,00	66	0,00	108	0,00	150	213,04
25	0,00	67	0,00	109	0,00	151	213,04
26	213,04	68	0,00	110	0,00	152	213,04
27	213,04	69	0,00	111	0,00	153	213,04
28	213,04	70	0,00	112	0,00	154	213,04
29	213,04	71	0,00	113	0,00	155	30,77
30	213,04	72	0,00	114	0,00	156	0,00
31	213,04	73	0,00	115	0,00	157	0,00
32	0,00	74	213,04	116	0,00	158	213,04
33	0,00	75	213,04	117	0,00	159	213,04
34	0,00	76	213,04	118	0,00	160	213,04
35	0,00	77	213,04	119	0,00	161	213,04
36	0,00	78	213,04	120	0,00	162	213,04
37	0,00	79	213,04	121	63,91	163	0,00
38	0,00	80	0,00	122	213,04	164	0,00
39	0,00	81	0,00	123	213,04	165	0,00
40	0,00	82	0,00	124	213,04	166	0,00
41	0,00	83	0,00	125	213,04	167	213,04
42	0,00	84	0,00	126	213,04	168	0,00

Figura A.15: Potência horária bombada pela central 1 do Modelo 1 - Caso 3.

Hora	Potência Turbinada (MW)						
1	0,00	43	104,66	85	104,66	127	0,00
2	0,00	44	104,66	86	104,66	128	0,00
3	0,00	45	104,66	87	104,66	129	0,00
4	0,00	46	104,66	88	0,00	130	0,00
5	0,00	47	104,66	89	104,66	131	0,00
6	0,00	48	104,66	90	104,66	132	0,00
7	0,00	49	0,00	91	104,66	133	0,00
8	0,00	50	0,00	92	104,66	134	0,00
9	0,00	51	0,00	93	104,66	135	0,00
10	104,66	52	0,00	94	104,66	136	0,00
11	104,66	53	0,00	95	104,66	137	0,00
12	104,66	54	0,00	96	104,66	138	0,00
13	104,66	55	0,00	97	0,00	139	104,66
14	104,66	56	104,66	98	0,00	140	104,66
15	104,66	57	0,00	99	0,00	141	104,66
16	104,66	58	104,66	100	0,00	142	104,66
17	52,33	59	104,66	101	0,00	143	0,00
18	104,66	60	104,66	102	0,00	144	0,00
19	104,66	61	104,66	103	0,00	145	0,00
20	104,66	62	104,66	104	104,66	146	0,00
21	104,66	63	104,66	105	104,66	147	0,00
22	104,66	64	0,00	106	104,66	148	0,00
23	104,66	65	104,66	107	104,66	149	0,00
24	104,66	66	104,66	108	104,66	150	0,00
25	0,00	67	104,66	109	104,66	151	0,00
26	0,00	68	104,66	110	104,66	152	0,00
27	0,00	69	104,66	111	104,66	153	0,00
28	0,00	70	104,66	112	0,00	154	0,00
29	0,00	71	104,66	113	104,66	155	0,00
30	0,00	72	104,66	114	104,66	156	0,00
31	0,00	73	104,66	115	104,66	157	0,00
32	0,00	74	0,00	116	104,66	158	0,00
33	0,00	75	0,00	117	104,66	159	0,00
34	104,66	76	0,00	118	104,66	160	0,00
35	104,66	77	0,00	119	104,66	161	0,00
36	104,66	78	0,00	120	104,66	162	0,00
37	104,66	79	0,00	121	0,00	163	0,00
38	104,66	80	104,66	122	0,00	164	0,00
39	104,66	81	0,00	123	0,00	165	0,00
40	104,66	82	104,66	124	0,00	166	0,00
41	104,66	83	104,66	125	0,00	167	0,00
42	104,66	84	104,66	126	0,00	168	0,00

Figura A.16: Potência horária turbinada pela central 2 do Modelo 1 - Caso 3.

Hora	Potência Bombada (MW)						
1	0,00	43	0,00	85	0,00	127	126,46
2	126,46	44	0,00	86	0,00	128	126,46
3	126,46	45	0,00	87	0,00	129	126,46
4	126,46	46	0,00	88	0,00	130	0,00
5	126,46	47	0,00	89	0,00	131	0,00
6	126,46	48	0,00	90	0,00	132	0,00
7	126,46	49	0,00	91	0,00	133	0,00
8	0,00	50	126,46	92	0,00	134	0,00
9	0,00	51	126,46	93	0,00	135	126,46
10	0,00	52	126,46	94	0,00	136	126,46
11	0,00	53	126,46	95	0,00	137	126,46
12	0,00	54	126,46	96	0,00	138	126,46
13	0,00	55	126,46	97	0,00	139	0,00
14	0,00	56	0,00	98	126,46	140	0,00
15	0,00	57	0,00	99	126,46	141	0,00
16	0,00	58	0,00	100	126,46	142	0,00
17	0,00	59	0,00	101	126,46	143	126,46
18	0,00	60	0,00	102	126,46	144	0,00
19	0,00	61	0,00	103	126,46	145	126,46
20	0,00	62	0,00	104	0,00	146	126,46
21	0,00	63	0,00	105	0,00	147	126,46
22	0,00	64	0,00	106	0,00	148	126,46
23	0,00	65	0,00	107	0,00	149	126,46
24	0,00	66	0,00	108	0,00	150	126,46
25	0,00	67	0,00	109	0,00	151	126,46
26	126,46	68	0,00	110	0,00	152	126,46
27	126,46	69	0,00	111	0,00	153	126,46
28	126,46	70	0,00	112	0,00	154	126,46
29	126,46	71	0,00	113	0,00	155	126,46
30	126,46	72	0,00	114	0,00	156	126,46
31	126,46	73	0,00	115	0,00	157	126,46
32	0,00	74	126,46	116	0,00	158	126,46
33	0,00	75	126,46	117	0,00	159	126,46
34	0,00	76	126,46	118	0,00	160	126,46
35	0,00	77	126,46	119	0,00	161	126,46
36	0,00	78	126,46	120	0,00	162	126,46
37	0,00	79	126,46	121	126,46	163	126,46
38	0,00	80	0,00	122	126,46	164	126,46
39	0,00	81	0,00	123	126,46	165	126,46
40	0,00	82	0,00	124	126,46	166	126,46
41	0,00	83	0,00	125	126,46	167	126,46
42	0,00	84	0,00	126	126,46	168	126,46

Figura A.17: Potência horária bombada pela central 2 do Modelo 1 - Caso 3.

Hora	Potência Turbinada (MW)						
1	0,00	43	172,48	85	172,48	127	0,00
2	0,00	44	172,48	86	172,48	128	0,00
3	0,00	45	172,48	87	0,00	129	0,00
4	0,00	46	172,48	88	0,00	130	0,00
5	0,00	47	0,00	89	0,00	131	0,00
6	0,00	48	172,48	90	0,00	132	172,48
7	0,00	49	0,00	91	172,48	133	3,35
8	0,00	50	0,00	92	172,48	134	0,00
9	0,00	51	0,00	93	172,48	135	0,00
10	0,00	52	0,00	94	172,48	136	0,00
11	172,48	53	0,00	95	0,00	137	0,00
12	172,48	54	0,00	96	172,48	138	0,00
13	172,48	55	0,00	97	0,00	139	172,48
14	0,00	56	0,00	98	0,00	140	172,48
15	0,00	57	0,00	99	0,00	141	172,48
16	0,00	58	0,00	100	0,00	142	172,48
17	0,00	59	172,48	101	0,00	143	0,00
18	0,00	60	172,48	102	0,00	144	172,48
19	172,48	61	172,48	103	0,00	145	0,00
20	172,48	62	11,98	104	0,00	146	0,00
21	172,48	63	0,00	105	0,00	147	0,00
22	172,48	64	0,00	106	0,00	148	0,00
23	172,48	65	0,00	107	172,48	149	0,00
24	172,48	66	0,00	108	172,48	150	0,00
25	0,00	67	172,48	109	172,48	151	0,00
26	0,00	68	172,48	110	172,48	152	0,00
27	0,00	69	172,48	111	0,00	153	0,00
28	0,00	70	172,48	112	0,00	154	0,00
29	0,00	71	0,00	113	0,00	155	0,00
30	0,00	72	172,48	114	0,00	156	0,00
31	0,00	73	0,00	115	172,48	157	0,00
32	0,00	74	0,00	116	172,48	158	0,00
33	0,00	75	0,00	117	172,48	159	0,00
34	0,00	76	0,00	118	172,48	160	0,00
35	172,48	77	0,00	119	0,00	161	0,00
36	172,48	78	0,00	120	172,48	162	0,00
37	172,48	79	0,00	121	0,00	163	172,48
38	0,00	80	0,00	122	0,00	164	157,15
39	0,00	81	0,00	123	0,00	165	172,48
40	0,00	82	0,00	124	0,00	166	0,00
41	0,00	83	172,48	125	0,00	167	0,00
42	0,00	84	172,48	126	0,00	168	0,00

Figura A.18: Potência horária turbinada pela central 1 do Modelo 2 - Caso 1.

Hora	Potência Bombada (MW)						
1	0,00	43	0,00	85	0,00	127	213,04
2	213,04	44	0,00	86	0,00	128	0,00
3	213,04	45	0,00	87	0,00	129	0,00
4	213,04	46	0,00	88	0,00	130	0,00
5	213,04	47	0,00	89	0,00	131	0,00
6	213,04	48	0,00	90	0,00	132	0,00
7	213,04	49	0,00	91	0,00	133	0,00
8	0,00	50	213,04	92	0,00	134	0,00
9	0,00	51	213,04	93	0,00	135	0,00
10	0,00	52	213,04	94	0,00	136	213,04
11	0,00	53	213,04	95	0,00	137	0,00
12	0,00	54	213,04	96	0,00	138	0,00
13	0,00	55	213,04	97	0,00	139	0,00
14	0,00	56	0,00	98	213,04	140	0,00
15	0,00	57	0,00	99	213,04	141	0,00
16	0,00	58	0,00	100	213,04	142	0,00
17	0,00	59	0,00	101	213,04	143	0,00
18	0,00	60	0,00	102	213,04	144	0,00
19	0,00	61	0,00	103	213,04	145	213,04
20	0,00	62	0,00	104	0,00	146	213,04
21	0,00	63	0,00	105	0,00	147	213,04
22	0,00	64	0,00	106	0,00	148	213,04
23	0,00	65	0,00	107	0,00	149	213,04
24	0,00	66	0,00	108	0,00	150	213,04
25	0,00	67	0,00	109	0,00	151	213,04
26	213,04	68	0,00	110	0,00	152	213,04
27	213,04	69	0,00	111	0,00	153	213,04
28	213,04	70	0,00	112	0,00	154	213,04
29	213,04	71	0,00	113	0,00	155	0,00
30	213,04	72	0,00	114	0,00	156	0,00
31	213,04	73	0,00	115	0,00	157	0,00
32	0,00	74	213,04	116	0,00	158	213,04
33	0,00	75	213,04	117	0,00	159	213,04
34	0,00	76	213,04	118	0,00	160	213,04
35	0,00	77	213,04	119	0,00	161	213,04
36	0,00	78	213,04	120	0,00	162	0,00
37	0,00	79	213,04	121	0,00	163	0,00
38	0,00	80	0,00	122	213,04	164	0,00
39	0,00	81	0,00	123	213,04	165	0,00
40	0,00	82	0,00	124	213,04	166	0,00
41	0,00	83	0,00	125	213,04	167	213,04
42	0,00	84	0,00	126	213,04	168	0,00

Figura A.19: Potência horária bombada pela central 1 do Modelo 2 - Caso 1.

Hora	Potência Turbinada (MW)						
1	0,00	43	104,66	85	104,66	127	0,00
2	0,00	44	104,66	86	104,66	128	0,00
3	0,00	45	104,66	87	0,00	129	0,00
4	0,00	46	104,66	88	0,00	130	0,00
5	0,00	47	104,66	89	0,00	131	0,00
6	0,00	48	104,66	90	0,00	132	45,55
7	0,00	49	0,00	91	104,66	133	0,00
8	0,00	50	0,00	92	104,66	134	0,00
9	0,00	51	0,00	93	104,66	135	0,00
10	0,00	52	0,00	94	104,66	136	0,00
11	104,66	53	0,00	95	104,66	137	0,00
12	104,66	54	0,00	96	104,66	138	0,00
13	104,66	55	0,00	97	0,00	139	104,66
14	104,66	56	0,00	98	0,00	140	104,66
15	0,00	57	0,00	99	0,00	141	104,66
16	0,00	58	0,00	100	0,00	142	104,66
17	0,00	59	104,66	101	0,00	143	0,00
18	0,00	60	104,66	102	0,00	144	104,66
19	104,66	61	104,66	103	0,00	145	0,00
20	104,66	62	104,66	104	0,00	146	0,00
21	104,66	63	0,00	105	0,00	147	0,00
22	104,66	64	0,00	106	104,66	148	0,00
23	104,66	65	0,00	107	104,66	149	0,00
24	104,66	66	104,66	108	104,66	150	0,00
25	0,00	67	104,66	109	104,66	151	0,00
26	0,00	68	104,66	110	104,66	152	0,00
27	0,00	69	104,66	111	0,00	153	0,00
28	0,00	70	104,66	112	0,00	154	0,00
29	0,00	71	104,66	113	0,00	155	0,00
30	0,00	72	104,66	114	0,00	156	0,00
31	0,00	73	0,00	115	104,66	157	0,00
32	0,00	74	0,00	116	104,66	158	0,00
33	0,00	75	0,00	117	104,66	159	0,00
34	0,00	76	0,00	118	104,66	160	0,00
35	104,66	77	0,00	119	104,66	161	0,00
36	104,66	78	0,00	120	104,66	162	0,00
37	104,66	79	0,00	121	0,00	163	0,00
38	104,66	80	0,00	122	0,00	164	0,00
39	0,00	81	0,00	123	0,00	165	0,00
40	0,00	82	15,51	124	0,00	166	0,00
41	0,00	83	104,66	125	0,00	167	0,00
42	104,66	84	104,66	126	0,00	168	0,00

Figura A.20: Potência horária turbinada pela central 2 do Modelo 2 - Caso 1.

Hora	Potência Bombada (MW)						
1	0,00	43	0,00	85	0,00	127	126,46
2	126,46	44	0,00	86	0,00	128	0,00
3	126,46	45	0,00	87	0,00	129	126,46
4	126,46	46	0,00	88	0,00	130	0,00
5	126,46	47	0,00	89	0,00	131	0,00
6	126,46	48	0,00	90	0,00	132	0,00
7	126,46	49	0,00	91	0,00	133	0,00
8	0,00	50	126,46	92	0,00	134	0,00
9	0,00	51	126,46	93	0,00	135	0,00
10	0,00	52	126,46	94	0,00	136	126,46
11	0,00	53	126,46	95	0,00	137	0,00
12	0,00	54	126,46	96	0,00	138	0,00
13	0,00	55	126,46	97	0,00	139	0,00
14	0,00	56	0,00	98	126,46	140	0,00
15	0,00	57	0,00	99	126,46	141	0,00
16	0,00	58	0,00	100	126,46	142	0,00
17	0,00	59	0,00	101	126,46	143	0,00
18	0,00	60	0,00	102	126,46	144	0,00
19	0,00	61	0,00	103	126,46	145	126,46
20	0,00	62	0,00	104	0,00	146	126,46
21	0,00	63	0,00	105	0,00	147	126,46
22	0,00	64	0,00	106	0,00	148	126,46
23	0,00	65	0,00	107	0,00	149	126,46
24	0,00	66	0,00	108	0,00	150	126,46
25	0,00	67	0,00	109	0,00	151	126,46
26	126,46	68	0,00	110	0,00	152	126,46
27	126,46	69	0,00	111	0,00	153	126,46
28	126,46	70	0,00	112	0,00	154	126,46
29	126,46	71	0,00	113	0,00	155	126,46
30	126,46	72	0,00	114	0,00	156	126,46
31	126,46	73	0,00	115	0,00	157	126,46
32	0,00	74	126,46	116	0,00	158	126,46
33	0,00	75	126,46	117	0,00	159	126,46
34	0,00	76	126,46	118	0,00	160	126,46
35	0,00	77	126,46	119	0,00	161	126,46
36	0,00	78	126,46	120	0,00	162	126,46
37	0,00	79	126,46	121	73,77	163	0,00
38	0,00	80	0,00	122	126,46	164	0,00
39	0,00	81	0,00	123	126,46	165	0,00
40	0,00	82	0,00	124	126,46	166	0,00
41	0,00	83	0,00	125	126,46	167	126,46
42	0,00	84	0,00	126	126,46	168	126,46

Figura A.21: Potência horária bombada pela central 2 do Modelo 2 - Caso 1.

Hora	Potência Turbinada (MW)						
1	0,00	43	91,58	85	91,58	127	0,00
2	0,00	44	91,58	86	91,58	128	0,00
3	0,00	45	91,58	87	91,58	129	0,00
4	0,00	46	91,58	88	0,00	130	0,00
5	0,00	47	91,58	89	91,58	131	0,00
6	0,00	48	91,58	90	91,58	132	0,00
7	0,00	49	0,00	91	91,58	133	0,00
8	0,00	50	0,00	92	91,58	134	0,00
9	0,00	51	0,00	93	91,58	135	0,00
10	91,58	52	0,00	94	91,58	136	0,00
11	91,58	53	0,00	95	91,58	137	0,00
12	91,58	54	0,00	96	91,58	138	0,00
13	91,58	55	0,00	97	0,00	139	91,58
14	91,58	56	0,00	98	0,00	140	91,58
15	0,00	57	0,00	99	0,00	141	91,58
16	0,00	58	91,58	100	0,00	142	0,00
17	0,00	59	91,58	101	0,00	143	0,00
18	91,58	60	91,58	102	0,00	144	0,00
19	91,58	61	91,58	103	0,00	145	0,00
20	91,58	62	91,58	104	0,00	146	0,00
21	91,58	63	91,58	105	0,00	147	0,00
22	91,58	64	0,00	106	91,58	148	0,00
23	91,58	65	0,00	107	91,58	149	0,00
24	91,58	66	91,58	108	91,58	150	0,00
25	0,00	67	91,58	109	91,58	151	0,00
26	0,00	68	91,58	110	91,58	152	0,00
27	0,00	69	91,58	111	91,58	153	0,00
28	0,00	70	91,58	112	0,00	154	0,00
29	0,00	71	91,58	113	91,58	155	0,00
30	0,00	72	91,58	114	91,58	156	0,00
31	0,00	73	0,00	115	91,58	157	0,00
32	0,00	74	0,00	116	91,58	158	0,00
33	0,00	75	0,00	117	91,58	159	0,00
34	91,58	76	0,00	118	91,58	160	0,00
35	91,58	77	0,00	119	91,58	161	0,00
36	91,58	78	0,00	120	91,58	162	0,00
37	91,58	79	0,00	121	0,00	163	0,00
38	91,58	80	0,00	122	0,00	164	0,00
39	0,00	81	0,00	123	0,00	165	0,00
40	0,00	82	91,58	124	0,00	166	0,00
41	0,00	83	91,58	125	0,00	167	0,00
42	91,58	84	91,58	126	0,00	168	0,00

Figura A.22: Potência horária turbinada pela central 3 do Modelo 2 - Caso 1.

Hora	Potência Bombada (MW)						
1	0,00	43	0,00	85	0,00	127	110,64
2	110,64	44	0,00	86	0,00	128	110,64
3	110,64	45	0,00	87	0,00	129	110,64
4	110,64	46	0,00	88	0,00	130	0,00
5	110,64	47	0,00	89	0,00	131	0,00
6	110,64	48	0,00	90	0,00	132	0,00
7	110,64	49	0,00	91	0,00	133	0,00
8	0,00	50	110,64	92	0,00	134	0,00
9	0,00	51	110,64	93	0,00	135	110,64
10	0,00	52	110,64	94	0,00	136	110,64
11	0,00	53	110,64	95	0,00	137	110,64
12	0,00	54	110,64	96	0,00	138	110,64
13	0,00	55	110,64	97	0,00	139	0,00
14	0,00	56	0,00	98	110,64	140	0,00
15	0,00	57	0,00	99	110,64	141	0,00
16	0,00	58	0,00	100	110,64	142	0,00
17	0,00	59	0,00	101	110,64	143	110,64
18	0,00	60	0,00	102	110,64	144	0,00
19	0,00	61	0,00	103	110,64	145	110,64
20	0,00	62	0,00	104	0,00	146	110,64
21	0,00	63	0,00	105	0,00	147	110,64
22	0,00	64	0,00	106	0,00	148	110,64
23	0,00	65	0,00	107	0,00	149	110,64
24	0,00	66	0,00	108	0,00	150	110,64
25	0,00	67	0,00	109	0,00	151	110,64
26	110,64	68	0,00	110	0,00	152	110,64
27	110,64	69	0,00	111	0,00	153	110,64
28	110,64	70	0,00	112	0,00	154	110,64
29	110,64	71	0,00	113	0,00	155	110,64
30	110,64	72	0,00	114	0,00	156	110,64
31	110,64	73	0,00	115	0,00	157	110,64
32	0,00	74	110,64	116	0,00	158	110,64
33	0,00	75	110,64	117	0,00	159	110,64
34	0,00	76	110,64	118	0,00	160	110,64
35	0,00	77	110,64	119	0,00	161	110,64
36	0,00	78	110,64	120	0,00	162	110,64
37	0,00	79	110,64	121	110,64	163	110,64
38	0,00	80	0,00	122	110,64	164	110,64
39	0,00	81	0,00	123	110,64	165	110,64
40	0,00	82	0,00	124	110,64	166	110,64
41	0,00	83	0,00	125	110,64	167	110,64
42	0,00	84	0,00	126	110,64	168	110,64

Figura A.23: Potência horária bombada pela central 3 do Modelo 2 - Caso 1.

Hora	Potência Turbinada (MW)						
1	0,00	43	172,48	85	172,48	127	0,00
2	0,00	44	172,48	86	172,48	128	0,00
3	0,00	45	172,48	87	0,00	129	0,00
4	0,00	46	172,48	88	0,00	130	0,00
5	0,00	47	172,48	89	0,00	131	0,00
6	0,00	48	172,48	90	0,00	132	172,48
7	0,00	49	0,00	91	172,48	133	124,09
8	0,00	50	0,00	92	172,48	134	0,00
9	0,00	51	0,00	93	172,48	135	0,00
10	0,00	52	0,00	94	172,48	136	0,00
11	172,48	53	0,00	95	0,00	137	0,00
12	172,48	54	0,00	96	172,48	138	0,00
13	172,48	55	0,00	97	0,00	139	172,48
14	0,00	56	0,00	98	0,00	140	172,48
15	0,00	57	0,00	99	0,00	141	172,48
16	0,00	58	0,00	100	0,00	142	172,48
17	0,00	59	172,48	101	0,00	143	0,00
18	0,00	60	172,48	102	0,00	144	172,48
19	172,48	61	172,48	103	0,00	145	0,00
20	172,48	62	172,48	104	0,00	146	0,00
21	172,48	63	0,00	105	0,00	147	0,00
22	172,48	64	0,00	106	0,00	148	0,00
23	172,48	65	0,00	107	172,48	149	0,00
24	172,48	66	0,00	108	172,48	150	0,00
25	0,00	67	172,48	109	172,48	151	0,00
26	0,00	68	172,48	110	172,48	152	0,00
27	0,00	69	172,48	111	0,00	153	0,00
28	0,00	70	172,48	112	0,00	154	0,00
29	0,00	71	20,60	113	0,00	155	0,00
30	0,00	72	172,48	114	0,00	156	0,00
31	0,00	73	0,00	115	172,48	157	0,00
32	0,00	74	0,00	116	172,48	158	0,00
33	0,00	75	0,00	117	172,48	159	0,00
34	0,00	76	0,00	118	172,48	160	0,00
35	172,48	77	0,00	119	0,00	161	0,00
36	172,48	78	0,00	120	172,48	162	0,00
37	172,48	79	0,00	121	0,00	163	172,48
38	172,48	80	0,00	122	0,00	164	157,15
39	0,00	81	0,00	123	0,00	165	172,48
40	0,00	82	0,00	124	0,00	166	0,00
41	0,00	83	172,48	125	0,00	167	0,00
42	0,00	84	172,48	126	0,00	168	0,00

Figura A.24: Potência horária turbinada pela central 1 do Modelo 2 - Caso 2.

Hora	Potência Bombada (MW)						
1	0,00	43	0,00	85	0,00	127	213,04
2	213,04	44	0,00	86	0,00	128	0,00
3	213,04	45	0,00	87	0,00	129	0,00
4	213,04	46	0,00	88	0,00	130	0,00
5	213,04	47	0,00	89	0,00	131	0,00
6	213,04	48	0,00	90	0,00	132	0,00
7	213,04	49	0,00	91	0,00	133	0,00
8	0,00	50	213,04	92	0,00	134	0,00
9	0,00	51	213,04	93	0,00	135	0,00
10	0,00	52	213,04	94	0,00	136	213,04
11	0,00	53	213,04	95	0,00	137	0,00
12	0,00	54	213,04	96	0,00	138	0,00
13	0,00	55	213,04	97	0,00	139	0,00
14	0,00	56	0,00	98	213,04	140	0,00
15	0,00	57	0,00	99	213,04	141	0,00
16	0,00	58	0,00	100	213,04	142	0,00
17	0,00	59	0,00	101	213,04	143	0,00
18	0,00	60	0,00	102	213,04	144	0,00
19	0,00	61	0,00	103	213,04	145	213,04
20	0,00	62	0,00	104	0,00	146	213,04
21	0,00	63	0,00	105	0,00	147	213,04
22	0,00	64	0,00	106	0,00	148	213,04
23	0,00	65	0,00	107	0,00	149	213,04
24	0,00	66	0,00	108	0,00	150	213,04
25	0,00	67	0,00	109	0,00	151	213,04
26	213,04	68	0,00	110	0,00	152	213,04
27	213,04	69	0,00	111	0,00	153	213,04
28	213,04	70	0,00	112	0,00	154	213,04
29	213,04	71	0,00	113	0,00	155	0,00
30	213,04	72	0,00	114	0,00	156	0,00
31	213,04	73	0,00	115	0,00	157	0,00
32	0,00	74	213,04	116	0,00	158	213,04
33	0,00	75	213,04	117	0,00	159	213,04
34	0,00	76	213,04	118	0,00	160	213,04
35	0,00	77	213,04	119	0,00	161	213,04
36	0,00	78	213,04	120	0,00	162	0,00
37	0,00	79	213,04	121	0,00	163	0,00
38	0,00	80	0,00	122	213,04	164	0,00
39	0,00	81	0,00	123	213,04	165	0,00
40	0,00	82	0,00	124	213,04	166	0,00
41	0,00	83	0,00	125	213,04	167	213,04
42	0,00	84	0,00	126	213,04	168	0,00

Figura A.25: Potência horária bombada pela central 1 do Modelo 2 - Caso 2.

Hora	Potência Turbinada (MW)						
1	0,00	43	104,66	85	104,66	127	0,00
2	0,00	44	104,66	86	104,66	128	0,00
3	0,00	45	104,66	87	0,00	129	0,00
4	0,00	46	104,66	88	0,00	130	0,00
5	0,00	47	104,66	89	0,00	131	0,00
6	0,00	48	104,66	90	0,00	132	45,55
7	0,00	49	0,00	91	104,66	133	0,00
8	0,00	50	0,00	92	104,66	134	0,00
9	0,00	51	0,00	93	104,66	135	0,00
10	0,00	52	0,00	94	104,66	136	0,00
11	104,66	53	0,00	95	104,66	137	0,00
12	104,66	54	0,00	96	104,66	138	0,00
13	104,66	55	0,00	97	0,00	139	104,66
14	104,66	56	0,00	98	0,00	140	104,66
15	0,00	57	0,00	99	0,00	141	104,66
16	0,00	58	0,00	100	0,00	142	104,66
17	0,00	59	104,66	101	0,00	143	0,00
18	0,00	60	104,66	102	0,00	144	104,66
19	104,66	61	104,66	103	0,00	145	0,00
20	104,66	62	104,66	104	0,00	146	0,00
21	104,66	63	0,00	105	0,00	147	0,00
22	104,66	64	0,00	106	104,66	148	0,00
23	104,66	65	0,00	107	104,66	149	0,00
24	104,66	66	104,66	108	104,66	150	0,00
25	0,00	67	104,66	109	104,66	151	0,00
26	0,00	68	104,66	110	104,66	152	0,00
27	0,00	69	104,66	111	0,00	153	0,00
28	0,00	70	104,66	112	0,00	154	0,00
29	0,00	71	104,66	113	0,00	155	0,00
30	0,00	72	104,66	114	0,00	156	0,00
31	0,00	73	0,00	115	104,66	157	0,00
32	0,00	74	0,00	116	104,66	158	0,00
33	0,00	75	0,00	117	104,66	159	0,00
34	0,00	76	0,00	118	104,66	160	0,00
35	104,66	77	0,00	119	104,66	161	0,00
36	104,66	78	0,00	120	104,66	162	0,00
37	104,66	79	0,00	121	0,00	163	0,00
38	104,66	80	0,00	122	0,00	164	0,00
39	0,00	81	0,00	123	0,00	165	0,00
40	0,00	82	15,51	124	0,00	166	0,00
41	0,00	83	104,66	125	0,00	167	0,00
42	104,66	84	104,66	126	0,00	168	0,00

Figura A.26: Potência horária turbinada pela central 2 do Modelo 2 - Caso 2.

Hora	Potência Bombada (MW)						
1	0,00	43	0,00	85	0,00	127	126,46
2	126,46	44	0,00	86	0,00	128	0,00
3	126,46	45	0,00	87	0,00	129	126,46
4	126,46	46	0,00	88	0,00	130	0,00
5	126,46	47	0,00	89	0,00	131	0,00
6	126,46	48	0,00	90	0,00	132	0,00
7	126,46	49	0,00	91	0,00	133	0,00
8	0,00	50	126,46	92	0,00	134	0,00
9	0,00	51	126,46	93	0,00	135	0,00
10	0,00	52	126,46	94	0,00	136	126,46
11	0,00	53	126,46	95	0,00	137	0,00
12	0,00	54	126,46	96	0,00	138	0,00
13	0,00	55	126,46	97	0,00	139	0,00
14	0,00	56	0,00	98	126,46	140	0,00
15	0,00	57	0,00	99	126,46	141	0,00
16	0,00	58	0,00	100	126,46	142	0,00
17	0,00	59	0,00	101	126,46	143	0,00
18	0,00	60	0,00	102	126,46	144	0,00
19	0,00	61	0,00	103	126,46	145	126,46
20	0,00	62	0,00	104	0,00	146	126,46
21	0,00	63	0,00	105	0,00	147	126,46
22	0,00	64	0,00	106	0,00	148	126,46
23	0,00	65	0,00	107	0,00	149	126,46
24	0,00	66	0,00	108	0,00	150	126,46
25	0,00	67	0,00	109	0,00	151	126,46
26	126,46	68	0,00	110	0,00	152	126,46
27	126,46	69	0,00	111	0,00	153	126,46
28	126,46	70	0,00	112	0,00	154	126,46
29	126,46	71	0,00	113	0,00	155	126,46
30	126,46	72	0,00	114	0,00	156	126,46
31	126,46	73	0,00	115	0,00	157	126,46
32	0,00	74	126,46	116	0,00	158	126,46
33	0,00	75	126,46	117	0,00	159	126,46
34	0,00	76	126,46	118	0,00	160	126,46
35	0,00	77	126,46	119	0,00	161	126,46
36	0,00	78	126,46	120	0,00	162	126,46
37	0,00	79	126,46	121	73,77	163	0,00
38	0,00	80	0,00	122	126,46	164	0,00
39	0,00	81	0,00	123	126,46	165	0,00
40	0,00	82	0,00	124	126,46	166	0,00
41	0,00	83	0,00	125	126,46	167	126,46
42	0,00	84	0,00	126	126,46	168	126,46

Figura A.27: Potência horária bombada pela central 2 do Modelo 2 - Caso 2.

Hora	Potência Turbinada (MW)						
1	0,00	43	91,58	85	91,58	127	0,00
2	0,00	44	91,58	86	91,58	128	0,00
3	0,00	45	91,58	87	91,58	129	0,00
4	0,00	46	91,58	88	0,00	130	0,00
5	0,00	47	91,58	89	91,58	131	0,00
6	0,00	48	91,58	90	91,58	132	0,00
7	0,00	49	0,00	91	91,58	133	0,00
8	0,00	50	0,00	92	91,58	134	0,00
9	0,00	51	0,00	93	91,58	135	0,00
10	91,58	52	0,00	94	91,58	136	0,00
11	91,58	53	0,00	95	91,58	137	0,00
12	91,58	54	0,00	96	91,58	138	0,00
13	91,58	55	0,00	97	91,58	139	91,58
14	91,58	56	91,58	98	0,00	140	91,58
15	91,58	57	91,58	99	0,00	141	91,58
16	91,58	58	91,58	100	0,00	142	91,58
17	91,58	59	91,58	101	0,00	143	0,00
18	91,58	60	91,58	102	0,00	144	91,58
19	91,58	61	91,58	103	0,00	145	0,00
20	91,58	62	91,58	104	91,58	146	0,00
21	91,58	63	91,58	105	91,58	147	0,00
22	91,58	64	91,58	106	91,58	148	0,00
23	91,58	65	91,58	107	91,58	149	0,00
24	91,58	66	91,58	108	91,58	150	0,00
25	0,00	67	91,58	109	91,58	151	0,00
26	0,00	68	91,58	110	91,58	152	0,00
27	0,00	69	91,58	111	91,58	153	0,00
28	0,00	70	91,58	112	0,00	154	0,00
29	0,00	71	91,58	113	91,58	155	0,00
30	0,00	72	91,58	114	91,58	156	0,00
31	0,00	73	91,58	115	91,58	157	0,00
32	91,58	74	0,00	116	91,58	158	0,00
33	0,00	75	0,00	117	91,58	159	0,00
34	91,58	76	0,00	118	91,58	160	0,00
35	91,58	77	0,00	119	91,58	161	0,00
36	91,58	78	0,00	120	91,58	162	0,00
37	91,58	79	0,00	121	0,00	163	0,00
38	91,58	80	91,58	122	0,00	164	0,00
39	91,58	81	91,58	123	0,00	165	0,00
40	91,58	82	91,58	124	0,00	166	0,00
41	91,58	83	91,58	125	0,00	167	0,00
42	91,58	84	91,58	126	0,00	168	0,00

Figura A.28: Potência horária turbinada pela central 3 do Modelo 2 - Caso 2.

Hora	Potência Bombada (MW)						
1	0,00	43	0,00	85	0,00	127	110,64
2	110,64	44	0,00	86	0,00	128	110,64
3	110,64	45	0,00	87	0,00	129	110,64
4	110,64	46	0,00	88	0,00	130	0,00
5	110,64	47	0,00	89	0,00	131	0,00
6	110,64	48	0,00	90	0,00	132	0,00
7	110,64	49	0,00	91	0,00	133	0,00
8	0,00	50	110,64	92	0,00	134	0,00
9	0,00	51	110,64	93	0,00	135	110,64
10	0,00	52	110,64	94	0,00	136	110,64
11	0,00	53	110,64	95	0,00	137	110,64
12	0,00	54	110,64	96	0,00	138	0,00
13	0,00	55	110,64	97	0,00	139	0,00
14	0,00	56	0,00	98	110,64	140	0,00
15	0,00	57	0,00	99	110,64	141	0,00
16	0,00	58	0,00	100	110,64	142	0,00
17	0,00	59	0,00	101	110,64	143	0,00
18	0,00	60	0,00	102	110,64	144	0,00
19	0,00	61	0,00	103	63,22	145	110,64
20	0,00	62	0,00	104	0,00	146	110,64
21	0,00	63	0,00	105	0,00	147	110,64
22	0,00	64	0,00	106	0,00	148	110,64
23	0,00	65	0,00	107	0,00	149	110,64
24	0,00	66	0,00	108	0,00	150	110,64
25	0,00	67	0,00	109	0,00	151	110,64
26	110,64	68	0,00	110	0,00	152	110,64
27	110,64	69	0,00	111	0,00	153	110,64
28	110,64	70	0,00	112	0,00	154	110,64
29	110,64	71	0,00	113	0,00	155	110,64
30	110,64	72	0,00	114	0,00	156	110,64
31	110,64	73	0,00	115	0,00	157	110,64
32	0,00	74	110,64	116	0,00	158	110,64
33	0,00	75	110,64	117	0,00	159	110,64
34	0,00	76	110,64	118	0,00	160	110,64
35	0,00	77	110,64	119	0,00	161	110,64
36	0,00	78	110,64	120	0,00	162	110,64
37	0,00	79	110,64	121	110,64	163	110,64
38	0,00	80	0,00	122	110,64	164	110,64
39	0,00	81	0,00	123	110,64	165	110,64
40	0,00	82	0,00	124	110,64	166	110,64
41	0,00	83	0,00	125	110,64	167	110,64
42	0,00	84	0,00	126	110,64	168	110,64

Figura A.29: Potência horária bombada pela central 3 do Modelo 2 - Caso 2.

Hora	Potência Turbinada (MW)						
1	0,00	43	172,48	85	172,48	127	0,00
2	0,00	44	172,48	86	172,48	128	0,00
3	0,00	45	172,48	87	0,00	129	0,00
4	0,00	46	172,48	88	0,00	130	0,00
5	0,00	47	0,00	89	0,00	131	0,00
6	0,00	48	172,48	90	0,00	132	140,38
7	0,00	49	0,00	91	172,48	133	0,00
8	0,00	50	0,00	92	172,48	134	0,00
9	0,00	51	0,00	93	172,48	135	0,00
10	0,00	52	0,00	94	172,48	136	0,00
11	172,48	53	0,00	95	0,00	137	0,00
12	172,48	54	0,00	96	172,48	138	0,00
13	172,48	55	0,00	97	0,00	139	172,48
14	0,00	56	0,00	98	0,00	140	172,48
15	0,00	57	0,00	99	0,00	141	172,48
16	0,00	58	0,00	100	0,00	142	172,48
17	0,00	59	172,48	101	0,00	143	0,00
18	0,00	60	172,48	102	0,00	144	172,48
19	172,48	61	172,48	103	0,00	145	0,00
20	172,48	62	172,48	104	0,00	146	0,00
21	172,48	63	0,00	105	0,00	147	0,00
22	172,48	64	0,00	106	0,00	148	0,00
23	172,48	65	0,00	107	172,48	149	0,00
24	172,48	66	0,00	108	172,48	150	0,00
25	0,00	67	172,48	109	172,48	151	0,00
26	0,00	68	172,48	110	172,48	152	0,00
27	0,00	69	172,48	111	0,00	153	0,00
28	0,00	70	172,48	112	0,00	154	0,00
29	0,00	71	0,00	113	0,00	155	0,00
30	0,00	72	172,48	114	0,00	156	0,00
31	0,00	73	0,00	115	172,48	157	0,00
32	0,00	74	0,00	116	172,48	158	0,00
33	0,00	75	0,00	117	172,48	159	0,00
34	0,00	76	0,00	118	172,48	160	0,00
35	172,48	77	0,00	119	0,00	161	0,00
36	172,48	78	0,00	120	172,48	162	0,00
37	172,48	79	0,00	121	0,00	163	172,48
38	0,00	80	0,00	122	0,00	164	32,10
39	0,00	81	0,00	123	0,00	165	172,48
40	0,00	82	0,00	124	0,00	166	0,00
41	0,00	83	172,48	125	0,00	167	0,00
42	0,00	84	172,48	126	0,00	168	0,00

Figura A.30: Potência horária turbinada pela central 1 do Modelo 2 - Caso 3.

Hora	Potência Bombada (MW)						
1	0,00	43	0,00	85	0,00	127	213,04
2	213,04	44	0,00	86	0,00	128	0,00
3	213,04	45	0,00	87	0,00	129	0,00
4	213,04	46	0,00	88	0,00	130	0,00
5	213,04	47	0,00	89	0,00	131	0,00
6	213,04	48	0,00	90	0,00	132	0,00
7	213,04	49	0,00	91	0,00	133	0,00
8	0,00	50	213,04	92	0,00	134	0,00
9	0,00	51	213,04	93	0,00	135	0,00
10	0,00	52	213,04	94	0,00	136	213,04
11	0,00	53	213,04	95	0,00	137	0,00
12	0,00	54	213,04	96	0,00	138	0,00
13	0,00	55	213,04	97	0,00	139	0,00
14	0,00	56	0,00	98	213,04	140	0,00
15	0,00	57	0,00	99	213,04	141	0,00
16	0,00	58	0,00	100	213,04	142	0,00
17	0,00	59	0,00	101	213,04	143	0,00
18	0,00	60	0,00	102	213,04	144	0,00
19	0,00	61	0,00	103	213,04	145	213,04
20	0,00	62	0,00	104	0,00	146	213,04
21	0,00	63	0,00	105	0,00	147	213,04
22	0,00	64	0,00	106	0,00	148	213,04
23	0,00	65	0,00	107	0,00	149	213,04
24	0,00	66	0,00	108	0,00	150	213,04
25	0,00	67	0,00	109	0,00	151	213,04
26	213,04	68	0,00	110	0,00	152	213,04
27	213,04	69	0,00	111	0,00	153	213,04
28	213,04	70	0,00	112	0,00	154	213,04
29	213,04	71	0,00	113	0,00	155	0,00
30	213,04	72	0,00	114	0,00	156	0,00
31	213,04	73	0,00	115	0,00	157	0,00
32	0,00	74	213,04	116	0,00	158	213,04
33	0,00	75	213,04	117	0,00	159	213,04
34	0,00	76	213,04	118	0,00	160	213,04
35	0,00	77	213,04	119	0,00	161	213,04
36	0,00	78	213,04	120	0,00	162	0,00
37	0,00	79	213,04	121	0,00	163	0,00
38	0,00	80	0,00	122	213,04	164	0,00
39	0,00	81	0,00	123	213,04	165	0,00
40	0,00	82	0,00	124	213,04	166	0,00
41	0,00	83	0,00	125	213,04	167	213,04
42	0,00	84	0,00	126	213,04	168	0,00

Figura A.31: Potência horária bombada pela central 1 do Modelo 2 - Caso 3.

Hora	Potência Turbinada (MW)						
1	0,00	43	104,66	85	104,66	127	0,00
2	0,00	44	104,66	86	104,66	128	0,00
3	0,00	45	104,66	87	104,66	129	0,00
4	0,00	46	104,66	88	0,00	130	104,66
5	0,00	47	104,66	89	104,66	131	104,66
6	0,00	48	104,66	90	104,66	132	104,66
7	0,00	49	0,00	91	104,66	133	104,66
8	0,00	50	0,00	92	104,66	134	104,66
9	0,00	51	0,00	93	104,66	135	0,00
10	104,66	52	0,00	94	104,66	136	0,00
11	104,66	53	0,00	95	104,66	137	0,00
12	104,66	54	0,00	96	104,66	138	0,00
13	104,66	55	0,00	97	104,66	139	104,66
14	104,66	56	104,66	98	0,00	140	104,66
15	104,66	57	104,66	99	0,00	141	104,66
16	104,66	58	104,66	100	0,00	142	104,66
17	104,66	59	104,66	101	0,00	143	0,00
18	104,66	60	104,66	102	0,00	144	104,66
19	104,66	61	104,66	103	0,00	145	0,00
20	104,66	62	104,66	104	104,66	146	0,00
21	104,66	63	104,66	105	104,66	147	0,00
22	104,66	64	50,39	106	104,66	148	0,00
23	104,66	65	104,66	107	104,66	149	0,00
24	104,66	66	104,66	108	104,66	150	0,00
25	0,00	67	104,66	109	104,66	151	0,00
26	0,00	68	104,66	110	104,66	152	0,00
27	0,00	69	104,66	111	104,66	153	0,00
28	0,00	70	104,66	112	0,00	154	0,00
29	0,00	71	104,66	113	104,66	155	0,00
30	0,00	72	104,66	114	104,66	156	0,00
31	0,00	73	104,66	115	104,66	157	0,00
32	104,66	74	0,00	116	104,66	158	0,00
33	0,00	75	0,00	117	104,66	159	0,00
34	104,66	76	0,00	118	104,66	160	0,00
35	104,66	77	0,00	119	104,66	161	0,00
36	104,66	78	0,00	120	104,66	162	0,00
37	104,66	79	0,00	121	0,00	163	104,66
38	104,66	80	104,66	122	0,00	164	0,00
39	104,66	81	104,66	123	0,00	165	104,66
40	104,66	82	104,66	124	0,00	166	0,00
41	104,66	83	104,66	125	0,00	167	0,00
42	104,66	84	104,66	126	0,00	168	0,00

Figura A.32: Potência horária turbinada pela central 2 do Modelo 2 - Caso 3.

Hora	Potência Bombada (MW)						
1	0,00	43	0,00	85	0,00	127	126,46
2	126,46	44	0,00	86	0,00	128	0,00
3	126,46	45	0,00	87	0,00	129	0,00
4	126,46	46	0,00	88	0,00	130	0,00
5	126,46	47	0,00	89	0,00	131	0,00
6	126,46	48	0,00	90	0,00	132	0,00
7	126,46	49	0,00	91	0,00	133	0,00
8	0,00	50	126,46	92	0,00	134	0,00
9	0,00	51	126,46	93	0,00	135	0,00
10	0,00	52	126,46	94	0,00	136	71,42
11	0,00	53	126,46	95	0,00	137	0,00
12	0,00	54	126,46	96	0,00	138	0,00
13	0,00	55	126,46	97	0,00	139	0,00
14	0,00	56	0,00	98	126,46	140	0,00
15	0,00	57	0,00	99	126,46	141	0,00
16	0,00	58	0,00	100	126,46	142	0,00
17	0,00	59	0,00	101	126,46	143	0,00
18	0,00	60	0,00	102	126,46	144	0,00
19	0,00	61	0,00	103	126,46	145	126,46
20	0,00	62	0,00	104	0,00	146	126,46
21	0,00	63	0,00	105	0,00	147	126,46
22	0,00	64	0,00	106	0,00	148	126,46
23	0,00	65	0,00	107	0,00	149	126,46
24	0,00	66	0,00	108	0,00	150	126,46
25	0,00	67	0,00	109	0,00	151	126,46
26	126,46	68	0,00	110	0,00	152	126,46
27	126,46	69	0,00	111	0,00	153	126,46
28	126,46	70	0,00	112	0,00	154	126,46
29	126,46	71	0,00	113	0,00	155	126,46
30	126,46	72	0,00	114	0,00	156	126,46
31	126,46	73	0,00	115	0,00	157	126,46
32	0,00	74	126,46	116	0,00	158	126,46
33	0,00	75	126,46	117	0,00	159	126,46
34	0,00	76	126,46	118	0,00	160	126,46
35	0,00	77	126,46	119	0,00	161	126,46
36	0,00	78	126,46	120	0,00	162	126,46
37	0,00	79	126,46	121	0,00	163	0,00
38	0,00	80	0,00	122	126,46	164	0,00
39	0,00	81	0,00	123	126,46	165	0,00
40	0,00	82	0,00	124	126,46	166	0,00
41	0,00	83	0,00	125	126,46	167	126,46
42	0,00	84	0,00	126	126,46	168	0,00

Figura A.33: Potência horária bombada pela central 2 do Modelo 2 - Caso 3.

Hora	Potência Turbinada (MW)						
1	91,58	43	91,58	85	91,58	127	0,00
2	0,00	44	91,58	86	91,58	128	0,00
3	0,00	45	91,58	87	91,58	129	0,00
4	0,00	46	91,58	88	91,58	130	0,00
5	0,00	47	91,58	89	91,58	131	0,00
6	0,00	48	91,58	90	91,58	132	91,58
7	0,00	49	91,58	91	91,58	133	10,18
8	91,58	50	0,00	92	91,58	134	0,00
9	91,58	51	0,00	93	91,58	135	0,00
10	91,58	52	0,00	94	91,58	136	0,00
11	91,58	53	0,00	95	91,58	137	0,00
12	91,58	54	0,00	96	91,58	138	0,00
13	91,58	55	0,00	97	91,58	139	91,58
14	91,58	56	91,58	98	0,00	140	91,58
15	91,58	57	91,58	99	0,00	141	91,58
16	91,58	58	91,58	100	0,00	142	91,58
17	91,58	59	91,58	101	0,00	143	0,00
18	91,58	60	91,58	102	0,00	144	91,58
19	91,58	61	91,58	103	0,00	145	0,00
20	91,58	62	91,58	104	91,58	146	0,00
21	91,58	63	91,58	105	91,58	147	0,00
22	91,58	64	91,58	106	91,58	148	0,00
23	91,58	65	91,58	107	91,58	149	0,00
24	91,58	66	91,58	108	91,58	150	0,00
25	91,58	67	91,58	109	91,58	151	0,00
26	0,00	68	91,58	110	91,58	152	0,00
27	0,00	69	91,58	111	91,58	153	0,00
28	0,00	70	91,58	112	91,58	154	0,00
29	0,00	71	91,58	113	91,58	155	0,00
30	0,00	72	91,58	114	91,58	156	0,00
31	0,00	73	91,58	115	91,58	157	0,00
32	91,58	74	0,00	116	91,58	158	0,00
33	91,58	75	0,00	117	91,58	159	0,00
34	91,58	76	0,00	118	91,58	160	0,00
35	91,58	77	0,00	119	91,58	161	0,00
36	91,58	78	0,00	120	91,58	162	0,00
37	91,58	79	0,00	121	0,00	163	0,00
38	91,58	80	91,58	122	0,00	164	0,00
39	91,58	81	91,58	123	0,00	165	0,00
40	91,58	82	91,58	124	0,00	166	0,00
41	91,58	83	91,58	125	0,00	167	0,00
42	91,58	84	91,58	126	0,00	168	0,00

Figura A.34: Potência horária turbinada pela central 3 do Modelo 2 - Caso 3.

Hora	Potência Bombada (MW)						
1	0,00	43	0,00	85	0,00	127	110,64
2	0,00	44	0,00	86	0,00	128	0,00
3	0,00	45	0,00	87	0,00	129	0,00
4	0,00	46	0,00	88	0,00	130	0,00
5	0,00	47	0,00	89	0,00	131	0,00
6	0,00	48	0,00	90	0,00	132	0,00
7	0,00	49	0,00	91	0,00	133	0,00
8	0,00	50	0,00	92	0,00	134	0,00
9	0,00	51	0,00	93	0,00	135	0,00
10	0,00	52	0,00	94	0,00	136	110,64
11	0,00	53	0,00	95	0,00	137	0,00
12	0,00	54	0,00	96	0,00	138	0,00
13	0,00	55	0,00	97	0,00	139	0,00
14	0,00	56	0,00	98	0,00	140	0,00
15	0,00	57	0,00	99	0,00	141	0,00
16	0,00	58	0,00	100	0,00	142	0,00
17	0,00	59	0,00	101	0,00	143	0,00
18	0,00	60	0,00	102	110,64	144	0,00
19	0,00	61	0,00	103	0,00	145	110,64
20	0,00	62	0,00	104	0,00	146	110,64
21	0,00	63	0,00	105	0,00	147	110,64
22	0,00	64	0,00	106	0,00	148	110,64
23	0,00	65	0,00	107	0,00	149	110,64
24	0,00	66	0,00	108	0,00	150	110,64
25	0,00	67	0,00	109	0,00	151	110,64
26	0,00	68	0,00	110	0,00	152	110,64
27	0,00	69	0,00	111	0,00	153	110,64
28	0,00	70	0,00	112	0,00	154	110,64
29	0,00	71	0,00	113	0,00	155	110,64
30	12,29	72	0,00	114	0,00	156	110,64
31	0,00	73	0,00	115	0,00	157	110,64
32	0,00	74	0,00	116	0,00	158	110,64
33	0,00	75	0,00	117	0,00	159	110,64
34	0,00	76	0,00	118	0,00	160	110,64
35	0,00	77	0,00	119	0,00	161	110,64
36	0,00	78	0,00	120	0,00	162	110,64
37	0,00	79	0,00	121	0,00	163	0,00
38	0,00	80	0,00	122	110,64	164	110,64
39	0,00	81	0,00	123	110,64	165	110,64
40	0,00	82	0,00	124	110,64	166	110,64
41	0,00	83	0,00	125	110,64	167	110,64
42	0,00	84	0,00	126	110,64	168	110,64

Figura A.35: Potência horária bombada pela central 3 do Modelo 2 - Caso 3.

Hora	Potência Turbinada (MW)						
1	0,00	43	92,60	85	0,00	127	0,00
2	0,00	44	0,00	86	0,00	128	0,00
3	0,00	45	0,00	87	0,00	129	0,00
4	0,00	46	0,00	88	0,00	130	0,00
5	0,00	47	0,00	89	0,00	131	0,00
6	0,00	48	0,00	90	0,00	132	0,00
7	0,00	49	0,00	91	68,40	133	0,00
8	0,00	50	0,00	92	0,00	134	0,00
9	0,00	51	0,00	93	0,00	135	0,00
10	0,00	52	0,00	94	0,00	136	0,00
11	0,00	53	0,00	95	0,00	137	0,00
12	0,00	54	0,00	96	0,00	138	0,00
13	0,00	55	0,00	97	0,00	139	0,00
14	0,00	56	0,00	98	0,00	140	0,00
15	0,00	57	0,00	99	0,00	141	0,00
16	0,00	58	0,00	100	0,00	142	0,00
17	0,00	59	0,00	101	0,00	143	0,00
18	0,00	60	0,00	102	0,00	144	0,00
19	55,07	61	0,00	103	0,00	145	0,00
20	0,00	62	0,00	104	0,00	146	0,00
21	0,00	63	0,00	105	0,00	147	0,00
22	0,00	64	0,00	106	0,00	148	0,00
23	0,00	65	0,00	107	0,00	149	0,00
24	0,00	66	0,00	108	0,00	150	0,00
25	0,00	67	92,60	109	0,00	151	0,00
26	0,00	68	0,00	110	0,00	152	0,00
27	0,00	69	0,00	111	0,00	153	0,00
28	0,00	70	0,00	112	0,00	154	0,00
29	0,00	71	0,00	113	0,00	155	0,00
30	0,00	72	0,00	114	0,00	156	0,00
31	0,00	73	0,00	115	0,00	157	0,00
32	0,00	74	0,00	116	0,00	158	0,00
33	0,00	75	0,00	117	0,00	159	0,00
34	0,00	76	0,00	118	0,00	160	0,00
35	0,00	77	0,00	119	0,00	161	0,00
36	0,00	78	0,00	120	0,00	162	0,00
37	0,00	79	0,00	121	0,00	163	0,00
38	0,00	80	0,00	122	0,00	164	0,00
39	0,00	81	0,00	123	0,00	165	0,00
40	0,00	82	0,00	124	0,00	166	0,00
41	0,00	83	0,00	125	0,00	167	0,00
42	0,00	84	0,00	126	0,00	168	0,00

Figura A.36: Potência horária turbinada pela central A do Modelo 3.

Hora	Potência Turbinada (MW)						
1	0,00	43	148,77	85	0,00	127	0,00
2	0,00	44	148,77	86	0,00	128	0,00
3	0,00	45	148,77	87	0,00	129	0,00
4	0,00	46	148,77	88	0,00	130	0,00
5	0,00	47	0,00	89	0,00	131	0,00
6	0,00	48	0,00	90	0,00	132	0,00
7	0,00	49	0,00	91	148,77	133	0,00
8	0,00	50	0,00	92	148,77	134	0,00
9	0,00	51	0,00	93	148,77	135	0,00
10	0,00	52	0,00	94	148,77	136	0,00
11	0,00	53	0,00	95	0,00	137	0,00
12	0,00	54	0,00	96	0,00	138	0,00
13	0,00	55	0,00	97	0,00	139	69,79
14	0,00	56	0,00	98	0,00	140	0,00
15	0,00	57	0,00	99	0,00	141	113,61
16	0,00	58	0,00	100	0,00	142	0,00
17	0,00	59	0,00	101	0,00	143	0,00
18	0,00	60	0,00	102	0,00	144	0,00
19	148,77	61	0,00	103	0,00	145	0,00
20	148,77	62	0,00	104	0,00	146	0,00
21	148,77	63	0,00	105	0,00	147	0,00
22	148,77	64	0,00	106	0,00	148	0,00
23	0,00	65	0,00	107	0,00	149	0,00
24	148,77	66	0,00	108	0,00	150	0,00
25	0,00	67	148,77	109	0,00	151	0,00
26	0,00	68	148,77	110	0,00	152	0,00
27	0,00	69	148,77	111	0,00	153	0,00
28	0,00	70	142,82	112	0,00	154	0,00
29	0,00	71	0,00	113	0,00	155	0,00
30	0,00	72	0,00	114	0,00	156	0,00
31	0,00	73	0,00	115	148,77	157	0,00
32	0,00	74	0,00	116	148,77	158	0,00
33	0,00	75	0,00	117	148,77	159	0,00
34	0,00	76	0,00	118	148,77	160	0,00
35	0,00	77	0,00	119	0,00	161	0,00
36	0,00	78	0,00	120	0,00	162	0,00
37	0,00	79	0,00	121	0,00	163	56,80
38	0,00	80	0,00	122	0,00	164	0,00
39	0,00	81	0,00	123	0,00	165	22,72
40	0,00	82	0,00	124	0,00	166	0,00
41	0,00	83	0,00	125	0,00	167	0,00
42	0,00	84	0,00	126	0,00	168	0,00

Figura A.37: Potência horária turbinada pela central B do Modelo 3.

Hora	Potência Turbinada (MW)						
1	0,00	43	181,09	85	0,00	127	0,00
2	0,00	44	181,09	86	0,00	128	0,00
3	0,00	45	181,09	87	0,00	129	0,00
4	0,00	46	181,09	88	0,00	130	0,00
5	0,00	47	0,00	89	0,00	131	0,00
6	0,00	48	0,00	90	0,00	132	0,00
7	0,00	49	0,00	91	181,09	133	0,00
8	0,00	50	0,00	92	181,09	134	0,00
9	0,00	51	0,00	93	181,09	135	0,00
10	0,00	52	0,00	94	0,00	136	0,00
11	0,00	53	0,00	95	0,00	137	0,00
12	0,00	54	0,00	96	0,00	138	0,00
13	0,00	55	0,00	97	0,00	139	62,80
14	0,00	56	0,00	98	0,00	140	0,00
15	0,00	57	0,00	99	0,00	141	102,23
16	0,00	58	0,00	100	0,00	142	0,00
17	0,00	59	0,00	101	0,00	143	0,00
18	0,00	60	0,00	102	0,00	144	0,00
19	181,09	61	0,00	103	0,00	145	0,00
20	181,09	62	0,00	104	0,00	146	0,00
21	181,09	63	0,00	105	0,00	147	0,00
22	166,86	64	0,00	106	0,00	148	0,00
23	0,00	65	0,00	107	0,00	149	0,00
24	0,00	66	0,00	108	0,00	150	0,00
25	0,00	67	181,09	109	0,00	151	0,00
26	0,00	68	181,09	110	0,00	152	0,00
27	0,00	69	181,09	111	0,00	153	0,00
28	0,00	70	0,00	112	0,00	154	0,00
29	0,00	71	0,00	113	0,00	155	0,00
30	0,00	72	0,00	114	0,00	156	0,00
31	0,00	73	0,00	115	181,09	157	0,00
32	0,00	74	0,00	116	181,09	158	0,00
33	0,00	75	0,00	117	181,09	159	0,00
34	0,00	76	0,00	118	181,09	160	0,00
35	0,00	77	0,00	119	0,00	161	0,00
36	0,00	78	0,00	120	0,00	162	0,00
37	0,00	79	0,00	121	0,00	163	51,11
38	0,00	80	0,00	122	0,00	164	0,00
39	0,00	81	0,00	123	0,00	165	20,45
40	0,00	82	0,00	124	0,00	166	0,00
41	0,00	83	0,00	125	0,00	167	0,00
42	0,00	84	0,00	126	0,00	168	0,00

Figura A.38: Potência horária turbinada pela central C do Modelo 3.

Hora	Potência Turbinada (MW)						
1	0,00	43	207,48	85	0,00	127	0,00
2	0,00	44	207,48	86	0,00	128	0,00
3	0,00	45	207,48	87	0,00	129	0,00
4	0,00	46	207,48	88	0,00	130	0,00
5	0,00	47	0,00	89	0,00	131	0,00
6	0,00	48	207,48	90	0,00	132	0,00
7	0,00	49	0,00	91	207,48	133	0,00
8	0,00	50	0,00	92	207,48	134	0,00
9	0,00	51	0,00	93	207,48	135	0,00
10	0,00	52	0,00	94	207,48	136	0,00
11	0,00	53	0,00	95	0,00	137	0,00
12	0,00	54	0,00	96	207,48	138	0,00
13	0,00	55	0,00	97	0,00	139	207,48
14	0,00	56	0,00	98	0,00	140	39,44
15	0,00	57	0,00	99	0,00	141	207,48
16	0,00	58	0,00	100	0,00	142	0,00
17	0,00	59	0,00	101	0,00	143	0,00
18	0,00	60	0,00	102	0,00	144	0,00
19	207,48	61	0,00	103	0,00	145	0,00
20	207,48	62	0,00	104	0,00	146	0,00
21	207,48	63	0,00	105	0,00	147	0,00
22	207,48	64	0,00	106	0,00	148	0,00
23	0,00	65	0,00	107	0,00	149	0,00
24	207,48	66	0,00	108	0,00	150	0,00
25	0,00	67	207,48	109	0,00	151	0,00
26	0,00	68	207,48	110	0,00	152	0,00
27	0,00	69	207,48	111	0,00	153	0,00
28	0,00	70	207,48	112	0,00	154	0,00
29	0,00	71	0,00	113	0,00	155	0,00
30	0,00	72	54,54	114	0,00	156	0,00
31	0,00	73	0,00	115	207,48	157	0,00
32	0,00	74	0,00	116	207,48	158	0,00
33	0,00	75	0,00	117	207,48	159	0,00
34	0,00	76	0,00	118	207,48	160	0,00
35	0,00	77	0,00	119	0,00	161	0,00
36	0,00	78	0,00	120	207,48	162	0,00
37	0,00	79	0,00	121	0,00	163	155,98
38	0,00	80	0,00	122	0,00	164	0,00
39	0,00	81	0,00	123	0,00	165	118,90
40	0,00	82	0,00	124	0,00	166	0,00
41	0,00	83	0,00	125	0,00	167	0,00
42	0,00	84	0,00	126	0,00	168	0,00

Figura A.39: Potência horária turbinada pela central D do Modelo 3.

Hora	Potência Turbinada (MW)						
1	0,00	43	69,52	85	0,00	127	0,00
2	0,00	44	69,52	86	0,00	128	0,00
3	0,00	45	69,52	87	0,00	129	0,00
4	0,00	46	69,52	88	0,00	130	0,00
5	0,00	47	0,00	89	0,00	131	0,00
6	0,00	48	69,52	90	0,00	132	0,00
7	0,00	49	0,00	91	69,52	133	0,00
8	0,00	50	0,00	92	69,52	134	0,00
9	0,00	51	0,00	93	69,52	135	0,00
10	0,00	52	0,00	94	69,52	136	0,00
11	0,00	53	0,00	95	0,00	137	0,00
12	0,00	54	0,00	96	69,52	138	0,00
13	0,00	55	0,00	97	0,00	139	65,35
14	0,00	56	0,00	98	0,00	140	8,25
15	0,00	57	0,00	99	0,00	141	69,52
16	0,00	58	0,00	100	0,00	142	0,00
17	0,00	59	0,00	101	0,00	143	0,00
18	0,00	60	0,00	102	0,00	144	0,00
19	69,52	61	53,54	103	0,00	145	0,00
20	69,52	62	0,00	104	0,00	146	0,00
21	69,52	63	0,00	105	0,00	147	0,00
22	69,52	64	0,00	106	0,00	148	0,00
23	0,00	65	0,00	107	0,00	149	0,00
24	69,52	66	0,00	108	0,00	150	0,00
25	0,00	67	69,52	109	0,00	151	0,00
26	0,00	68	69,52	110	0,00	152	0,00
27	0,00	69	69,52	111	0,00	153	0,00
28	0,00	70	69,52	112	0,00	154	0,00
29	0,00	71	0,00	113	0,00	155	0,00
30	0,00	72	69,52	114	0,00	156	0,00
31	0,00	73	0,00	115	69,52	157	0,00
32	0,00	74	0,00	116	69,52	158	0,00
33	0,00	75	0,00	117	69,52	159	0,00
34	0,00	76	0,00	118	69,52	160	0,00
35	0,00	77	0,00	119	0,00	161	0,00
36	0,00	78	0,00	120	69,52	162	0,00
37	0,00	79	0,00	121	0,00	163	49,13
38	0,00	80	0,00	122	0,00	164	0,00
39	0,00	81	0,00	123	0,00	165	37,45
40	0,00	82	0,00	124	0,00	166	0,00
41	0,00	83	0,00	125	0,00	167	0,00
42	0,00	84	0,00	126	0,00	168	0,00

Figura A.40: Potência horária turbinada pela central E do Modelo 3.

Hora	Potência Turbinada (MW)						
1	0,00	43	31,40	85	0,00	127	0,00
2	0,00	44	0,00	86	0,00	128	0,00
3	0,00	45	0,00	87	0,00	129	0,00
4	0,00	46	0,00	88	0,00	130	0,00
5	0,00	47	0,00	89	0,00	131	0,00
6	0,00	48	0,00	90	0,00	132	0,00
7	0,00	49	0,00	91	31,40	133	0,00
8	0,00	50	0,00	92	0,00	134	0,00
9	0,00	51	0,00	93	0,00	135	0,00
10	0,00	52	0,00	94	0,00	136	0,00
11	0,00	53	0,00	95	0,00	137	0,00
12	0,00	54	0,00	96	0,00	138	0,00
13	0,00	55	0,00	97	0,00	139	0,00
14	0,00	56	0,00	98	0,00	140	0,00
15	0,00	57	0,00	99	0,00	141	0,00
16	0,00	58	0,00	100	0,00	142	0,00
17	0,00	59	0,00	101	0,00	143	0,00
18	0,00	60	0,00	102	0,00	144	0,00
19	31,40	61	0,00	103	0,00	145	0,00
20	0,00	62	0,00	104	0,00	146	0,00
21	0,00	63	0,00	105	0,00	147	0,00
22	0,00	64	0,00	106	0,00	148	0,00
23	0,00	65	0,00	107	0,00	149	0,00
24	0,00	66	0,00	108	0,00	150	0,00
25	0,00	67	31,40	109	0,00	151	0,00
26	0,00	68	0,00	110	0,00	152	0,00
27	0,00	69	29,66	111	0,00	153	0,00
28	0,00	70	0,00	112	0,00	154	0,00
29	0,00	71	0,00	113	0,00	155	0,00
30	0,00	72	0,00	114	0,00	156	0,00
31	0,00	73	0,00	115	31,40	157	0,00
32	0,00	74	0,00	116	0,00	158	0,00
33	0,00	75	0,00	117	31,40	159	0,00
34	0,00	76	0,00	118	0,00	160	0,00
35	0,00	77	0,00	119	0,00	161	0,00
36	0,00	78	0,00	120	0,00	162	0,00
37	0,00	79	0,00	121	0,00	163	0,00
38	0,00	80	0,00	122	0,00	164	0,00
39	0,00	81	0,00	123	0,00	165	0,00
40	0,00	82	0,00	124	0,00	166	0,00
41	0,00	83	0,00	125	0,00	167	0,00
42	0,00	84	0,00	126	0,00	168	0,00

Figura A.41: Potência horária turbinada pela central F do Modelo 3.

Hora	Potência Turbinada (MW)						
1	0,00	43	210,08	85	210,08	127	0,00
2	0,00	44	210,08	86	210,08	128	0,00
3	0,00	45	210,08	87	210,08	129	0,00
4	0,00	46	210,08	88	0,00	130	0,00
5	0,00	47	210,08	89	210,08	131	0,00
6	0,00	48	210,08	90	210,08	132	210,08
7	0,00	49	0,00	91	210,08	133	0,00
8	0,00	50	0,00	92	210,08	134	0,00
9	0,00	51	0,00	93	210,08	135	0,00
10	210,08	52	0,00	94	210,08	136	0,00
11	210,08	53	0,00	95	210,08	137	0,00
12	210,08	54	0,00	96	210,08	138	0,00
13	210,08	55	0,00	97	0,00	139	210,08
14	210,08	56	0,00	98	0,00	140	210,08
15	210,08	57	0,00	99	0,00	141	210,08
16	0,00	58	210,08	100	0,00	142	210,08
17	0,00	59	210,08	101	0,00	143	0,00
18	210,08	60	210,08	102	0,00	144	84,03
19	210,08	61	210,08	103	0,00	145	0,00
20	210,08	62	210,08	104	0,00	146	0,00
21	210,08	63	210,08	105	0,00	147	0,00
22	210,08	64	0,00	106	210,08	148	0,00
23	210,08	65	0,00	107	210,08	149	0,00
24	210,08	66	210,08	108	210,08	150	0,00
25	0,00	67	210,08	109	210,08	151	0,00
26	0,00	68	210,08	110	210,08	152	0,00
27	0,00	69	210,08	111	210,08	153	0,00
28	0,00	70	210,08	112	0,00	154	0,00
29	0,00	71	210,08	113	210,08	155	0,00
30	0,00	72	210,08	114	210,08	156	162,06
31	0,00	73	0,00	115	210,08	157	0,00
32	0,00	74	0,00	116	210,08	158	0,00
33	0,00	75	0,00	117	210,08	159	0,00
34	210,08	76	0,00	118	210,08	160	0,00
35	210,08	77	0,00	119	210,08	161	0,00
36	210,08	78	0,00	120	210,08	162	0,00
37	210,08	79	0,00	121	0,00	163	210,08
38	210,08	80	0,00	122	0,00	164	0,00
39	0,00	81	0,00	123	0,00	165	84,03
40	0,00	82	210,08	124	0,00	166	0,00
41	166,73	83	210,08	125	0,00	167	0,00
42	210,08	84	210,08	126	0,00	168	0,00

Figura A.42: Potência horária turbinada pela central G do Modelo 3.

Hora	Potência Bombada (MW)						
1	0,00	43	0,00	85	0,00	127	200,18
2	200,18	44	0,00	86	0,00	128	0,00
3	200,18	45	0,00	87	0,00	129	0,00
4	200,18	46	0,00	88	0,00	130	0,00
5	200,18	47	0,00	89	0,00	131	0,00
6	200,18	48	0,00	90	0,00	132	0,00
7	200,18	49	0,00	91	0,00	133	0,00
8	0,00	50	200,18	92	0,00	134	0,00
9	0,00	51	200,18	93	0,00	135	0,00
10	0,00	52	200,18	94	0,00	136	200,18
11	0,00	53	200,18	95	0,00	137	0,00
12	0,00	54	200,18	96	0,00	138	0,00
13	0,00	55	200,18	97	0,00	139	0,00
14	0,00	56	0,00	98	200,18	140	0,00
15	0,00	57	0,00	99	200,18	141	0,00
16	0,00	58	0,00	100	200,18	142	0,00
17	0,00	59	0,00	101	200,18	143	0,00
18	0,00	60	0,00	102	200,18	144	0,00
19	0,00	61	0,00	103	200,18	145	0,00
20	0,00	62	0,00	104	0,00	146	200,18
21	0,00	63	0,00	105	0,00	147	0,00
22	0,00	64	0,00	106	0,00	148	0,00
23	0,00	65	0,00	107	0,00	149	0,00
24	0,00	66	0,00	108	0,00	150	163,11
25	0,00	67	0,00	109	0,00	151	0,00
26	200,18	68	0,00	110	0,00	152	0,00
27	200,18	69	0,00	111	0,00	153	0,00
28	200,18	70	0,00	112	0,00	154	0,00
29	200,18	71	0,00	113	0,00	155	0,00
30	200,18	72	0,00	114	0,00	156	0,00
31	200,18	73	0,00	115	0,00	157	0,00
32	0,00	74	200,18	116	0,00	158	0,00
33	0,00	75	200,18	117	0,00	159	0,00
34	0,00	76	200,18	118	0,00	160	200,18
35	0,00	77	200,18	119	0,00	161	0,00
36	0,00	78	200,18	120	0,00	162	0,00
37	0,00	79	200,18	121	0,00	163	0,00
38	0,00	80	0,00	122	200,18	164	0,00
39	0,00	81	0,00	123	200,18	165	0,00
40	0,00	82	0,00	124	200,18	166	0,00
41	0,00	83	0,00	125	200,18	167	0,00
42	0,00	84	0,00	126	200,18	168	0,00

Figura A.43: Potência horária bombada pela central G do Modelo 3.

Hora	Potência Turbinada (MW)						
1	0,00	43	137,98	85	137,98	127	0,00
2	0,00	44	137,98	86	0,00	128	0,00
3	0,00	45	137,98	87	0,00	129	0,00
4	0,00	46	137,98	88	0,00	130	0,00
5	0,00	47	0,00	89	0,00	131	0,00
6	0,00	48	137,98	90	0,00	132	137,98
7	0,00	49	0,00	91	137,98	133	25,01
8	0,00	50	0,00	92	137,98	134	0,00
9	0,00	51	0,00	93	137,98	135	0,00
10	0,00	52	0,00	94	137,98	136	0,00
11	137,98	53	0,00	95	0,00	137	0,00
12	137,98	54	0,00	96	137,98	138	0,00
13	137,98	55	0,00	97	0,00	139	137,98
14	0,00	56	0,00	98	0,00	140	137,98
15	0,00	57	0,00	99	0,00	141	137,98
16	0,00	58	0,00	100	0,00	142	137,98
17	0,00	59	137,98	101	0,00	143	0,00
18	0,00	60	0,00	102	0,00	144	42,69
19	137,98	61	137,98	103	0,00	145	0,00
20	137,98	62	0,00	104	0,00	146	0,00
21	137,98	63	0,00	105	0,00	147	0,00
22	137,98	64	0,00	106	0,00	148	0,00
23	137,98	65	0,00	107	137,98	149	0,00
24	137,98	66	0,00	108	0,00	150	0,00
25	0,00	67	137,98	109	137,98	151	0,00
26	0,00	68	137,98	110	0,00	152	0,00
27	0,00	69	137,98	111	0,00	153	0,00
28	0,00	70	137,98	112	0,00	154	0,00
29	0,00	71	0,00	113	0,00	155	0,00
30	0,00	72	137,98	114	0,00	156	108,23
31	0,00	73	0,00	115	137,98	157	0,00
32	0,00	74	0,00	116	137,98	158	0,00
33	0,00	75	0,00	117	137,98	159	0,00
34	0,00	76	0,00	118	137,98	160	0,00
35	137,98	77	0,00	119	0,00	161	0,00
36	137,98	78	0,00	120	137,98	162	0,00
37	137,98	79	0,00	121	0,00	163	137,98
38	0,00	80	0,00	122	0,00	164	0,00
39	0,00	81	0,00	123	0,00	165	137,98
40	0,00	82	0,00	124	0,00	166	0,00
41	0,00	83	137,98	125	0,00	167	0,00
42	0,00	84	0,00	126	0,00	168	0,00

Figura A.44: Potência horária turbinada pela central H do Modelo 3.

Hora	Potência Bombada (MW)						
1	133,68	43	0,00	85	0,00	127	133,68
2	133,68	44	0,00	86	0,00	128	0,00
3	133,68	45	0,00	87	0,00	129	0,00
4	133,68	46	0,00	88	56,04	130	0,00
5	133,68	47	0,00	89	0,00	131	0,00
6	133,68	48	0,00	90	0,00	132	0,00
7	133,68	49	0,00	91	0,00	133	0,00
8	133,68	50	133,68	92	0,00	134	0,00
9	114,09	51	133,68	93	0,00	135	0,00
10	0,00	52	133,68	94	0,00	136	133,68
11	0,00	53	133,68	95	0,00	137	0,00
12	0,00	54	133,68	96	0,00	138	0,00
13	0,00	55	133,68	97	0,00	139	0,00
14	0,00	56	0,00	98	133,68	140	0,00
15	0,00	57	0,00	99	133,68	141	0,00
16	0,00	58	0,00	100	133,68	142	0,00
17	0,00	59	0,00	101	133,68	143	0,00
18	0,00	60	0,00	102	133,68	144	0,00
19	0,00	61	0,00	103	133,68	145	0,00
20	0,00	62	0,00	104	0,00	146	133,68
21	0,00	63	0,00	105	0,00	147	73,50
22	0,00	64	0,00	106	0,00	148	0,00
23	0,00	65	0,00	107	0,00	149	0,00
24	0,00	66	0,00	108	0,00	150	133,68
25	133,68	67	0,00	109	0,00	151	0,00
26	133,68	68	0,00	110	0,00	152	0,00
27	133,68	69	0,00	111	0,00	153	0,00
28	133,68	70	0,00	112	133,68	154	0,00
29	133,68	71	0,00	113	0,00	155	0,00
30	133,68	72	0,00	114	0,00	156	0,00
31	133,68	73	0,00	115	0,00	157	0,00
32	0,00	74	133,68	116	0,00	158	0,00
33	133,68	75	133,68	117	0,00	159	0,00
34	0,00	76	133,68	118	0,00	160	133,68
35	0,00	77	133,68	119	0,00	161	0,00
36	0,00	78	133,68	120	0,00	162	0,00
37	0,00	79	133,68	121	0,00	163	0,00
38	0,00	80	0,00	122	133,68	164	0,00
39	0,00	81	0,00	123	133,68	165	0,00
40	0,00	82	0,00	124	133,68	166	0,00
41	0,00	83	0,00	125	133,68	167	0,00
42	0,00	84	0,00	126	133,68	168	0,00

Figura A.45: Potência horária bombada pela central H do Modelo 3.

Referências

- [1] J. P. Tomé Saraiva e J. L. P. Pereira da Silva e M. T. Ponce de Leão. *Mercados de Electricidade- Regulação e Tarifação de Uso das Redes*. FEUP edições, 1ª edição, 2002.
- [2] PNBEPH. Enquadramento estratégico. Disponível em <http://pnbeph.inag.pt/np4/sobre>.
- [3] José C.V. Sousa. Estimativa da remuneração de centrais hídricas em mercados de eletricidade. Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008.
- [4] EDP. Centros produtores. Disponível em http://www.a-nossa-energia.edp.pt/centros_produtores.
- [5] Governo da República Portuguesa. Desenvolvimento da economia verde permitirá reduzir dependência energética do exterior. Disponível em <http://www.portugal.gov.pt/pt/os-ministerios/ministerio-do-ambiente-ordenamento-do-territorio-e-energia/mantenha-se-atualizado/20131022-maote-economia-verde.aspx>.
- [6] REN. Hidroelectricidade em portugal – memória e desafio, 2002.
- [7] ERSE. Mibel – construção e desenvolvimento. Disponível em <http://www.erse.pt/pt/mibel/construcaoedesenvolvimento/Paginas/default.aspx>.
- [8] MIBEL. Disponível em <http://www.mibel.com/index.php?mod=pags&mem=detalle&relmenu=9&relcategoria=1026&idpag=67>.
- [9] OMIP. Mibel. Disponível em <http://www.omip.pt/OMIP/MIBEL/tabid/72/language/pt-PT/Default.aspx>.
- [10] REN. Acoplamento do mercado diário. Disponível em <http://www.mercado.ren.pt/PT/Electr/ProjInter/RegionalInit/PCR/Paginas/default.aspx>.
- [11] Carlos A.P.C.A. Guerreiro. Otimização da exploração de centrais hídricas em ambiente de mercado, considerando o impacto nos preços. Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2014.
- [12] André S. C. Pacheco. Otimização da exploração de centrais hídricas utilizando epso, em ambiente de mercado. Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2013.
- [13] Gil S. Sampaio. Optimização da exploração de centrais hídricas utilizando algoritmos genéticos, em ambiente de mercado. Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2012.

- [14] Expresso. Renováveis estão a reduzir dependência energética de Portugal. Disponível em <http://expresso.sapo.pt/renovaveis-estao-a-reduzir-dependencia-energetica-de-portugal=f811581>.
- [15] REN. Renováveis abastecem 68 semestre. Disponível em https://www.ren.pt/media/comunicados/detalhe/renovaveis_abastecem_68__do_consumo_de_electricidade_no_1__semestre/.
- [16] Bruno P.C.R. Santos. Otimização da exploração de centrais hídricas em ambiente de mercado utilizando algoritmos genéticos. Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2013.
- [17] V. T. Mendes J. C. Sousa e J. T. Saraiva. Estimation of the remuneration of hydro plants in a market environment using an iterative under-relaxation approach. *PowerTech, IEEE Bucharest*, 2009.
- [18] João P. S. Catalão. Planeamento operacional de curto prazo de sistemas de energia hidroeléctricos. Tese de mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2003.
- [19] António J. S. Martins. Análise de sistemas hidroeléctricos por modelos de programação linear e de programação quadrática. Tese de mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2012.