

Capítulo 6

Resultados

No presente capítulo são apresentados os resultados obtidos ao longo da realização da dissertação. Para cada modelo, são realizados dois testes em condições idênticas de forma a ser possível realizar uma comparação dos resultados. Para o primeiro teste são apresentadas as ordens de exploração, enquanto que os dados relativos aos preços e às margens de lucro são apresentadas para ambos os testes.

Tal como referido anteriormente, os modelos utilizados foram integralmente implementados em *Matlab*, tendo sido necessário recorrer ao *Excel* para realizar o tratamento e a análise dos resultados.

A realização dos testes cujos resultados serão apresentados em seguida tem como objetivo:

- Avaliar a viabilidade da nova aplicação desenvolvida;
- Avaliar a qualidade das soluções;
- Avaliar a capacidade de convergência da aplicação e do AG.

6.1 Modelo 1

Segundo os testes prévios, cujos resultados estão apresentados em 5.6, o valor colocado no critério de convergência para a máxima diferença relativa entre preços de duas iterações consecutivas era de 0,55%.

Tabela 6.1: Dados de convergência dos testes com Modelo 1

...	Teste 1	Teste 2
Nº de iterações	2	4
Diferença relativa máxima inicial (%)	0,835	0,797
Diferença relativa máxima final (%)	0,547	0,527

Através da Tabela 6.1 é possível verificar que, em ambos os testes, a aplicação converge e apresenta um decréscimo considerável no que concerne à diferença relativa dos preços. No entanto, o número de iterações necessário no 2º teste para a convergência da aplicação é mais elevado.

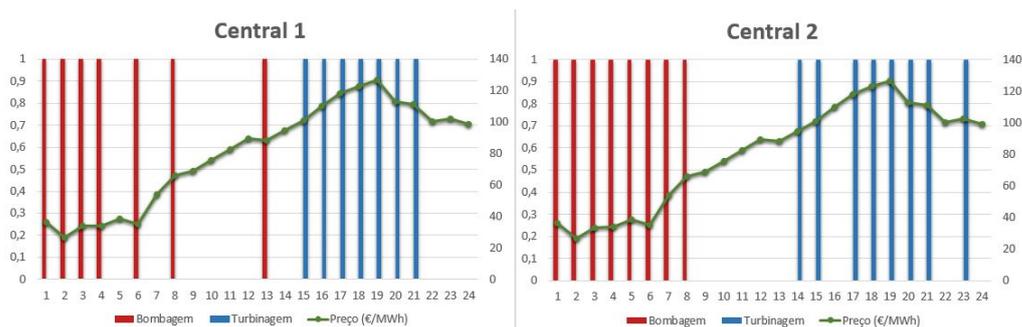


Figura 6.1: Ordens de exploração das centrais para 1^o Teste do Modelo 1 e preços de mercado a verde, escala da direita

Na Figura 6.1 estão apresentadas as ordens de exploração das centrais para o 1^o teste deste modelo, verificando-se que, tal como esperado, de uma forma geral as operações de turbinagem se encontram nas horas em que o preço de mercado é mais elevado e as operações de bombagem nas horas em que o preço de mercado apresenta valores mais baixos.

Tabela 6.2: Resultados dos preços do 1^o Teste com Modelo 1

Hora	Preço Inicial (€/MWh)	Preço Final (€/MWh)	Diferença de Preço (€/MWh)	Diferença Relativa (%)
1	36,563	36,856	0,294	0,797
2	26,635	26,809	0,173	0,647
3	33,725	33,967	0,242	0,713
4	34,148	34,385	0,237	0,689
5	38,587	38,690	0,103	0,266
6	35,238	35,466	0,228	0,642
7	53,883	54,042	0,159	0,294
8	65,921	66,476	0,555	0,835
9	68,746	68,746	0	0
10	75,866	75,866	0	0
11	82,731	82,731	0	0
12	89,319	89,319	0	0
13	88,124	88,605	0,480	0,542
14	94,636	94,391	-0,244	0,259
15	100,836	100,141	-0,695	0,694
16	109,879	109,400	-0,479	0,438
17	117,988	117,152	-0,836	0,713
18	122,907	122,034	-0,873	0,715
19	126,653	125,753	-0,899	0,715
20	112,772	112,007	-0,765	0,683
21	111,304	110,553	-0,751	0,679
22	100,137	100,137	0	0
23	102,239	101,986	-0,253	0,248
24	98,845	98,845	0	0

Tabela 6.3: Potências turbinada e bombada e lucros inicial e final do 1º Teste com Modelo 1

Hora	Potência Turbinada (MW)	Potência Bombada (MW)	Lucro Inicial (€)	Lucro Final (€)
1	0	348,3	-12734,72	-12837,08
2	0	348,3	-9277,13	-9337,51
3	0	348,3	-11746,50	-11830,87
4	0	348,3	-11893,86	-11976,44
5	0	129,7	-5004,70	-5018,04
6	0	348,3	-12273,43	-12352,79
7	0	129,7	-6988,63	-7009,27
8	0	348,3	-22960,24	-23153,51
9	0	0	0	0
10	0	0	0	0
11	0	0	0	0
12	0	0	0	0
13	0	218,6	-19264,01	-19368,97
14	102,2	0	9671,76	9646,77
15	270,5	0	27276,18	27088,10
16	168,3	0	18492,59	18412,01
17	270,5	0	31915,62	31689,60
18	270,5	0	33246,37	33010,27
19	270,5	0	34259,60	34016,30
20	270,5	0	30504,91	30297,93
21	270,5	0	30107,83	29904,63
22	0	0	0	0
23	102,2	0	10448,81	10423,00
24	0	0	0	0
Total			113780,45	111604,13

Nas Tabelas 6.2 e 6.3 estão representados os valores resultantes da operação das centrais previamente apresentadas. De referir novamente que as características das centrais, e em particular as suas potências de bombagem e de turbinagem, se encontram no Anexo B.

Com essas características e as ordens de exploração apresentadas na Figura 6.1, são obtidas as potências bombadas e turbinadas que se encontram expressas na Tabela 6.3. Verifica-se que os períodos em que a diferença entre o preço inicial e o preço final é nula correspondem aos períodos em que ambas as centrais se encontram inativas.

A alteração que estas potências originam no preço de mercado é a prevista, ou seja, nos períodos em que a potência bombada supera a potência turbinada o preço sobe enquanto que nos períodos em que a potência turbinada é superior o preço de mercado decresce. Estas alterações podem, à primeira vista, parecer desprezáveis uma vez que, em nenhum dos casos chega, ao ponto percentual. No entanto, o valor do lucro calculado com os preços iniciais e finais indicam o contrário, apresentando uma diferença considerável, mais concretamente uma diferença de 2176,31 €.

Tabela 6.4: Resultados dos preços do 2º Teste com Modelo 1

Hora	Preço Inicial (€/MWh)	Preço Final (€/MWh)	Diferença de Preço (€/MWh)	Diferença Relativa (%)
1	36,563	36,856	0,294	0,797
2	26,635	26,809	0,173	0,647
3	33,725	33,967	0,242	0,713
4	34,148	34,385	0,237	0,689
5	38,587	38,863	0,276	0,711
6	35,238	35,466	0,228	0,642
7	53,883	54,310	0,427	0,787
8	65,921	66,127	0,207	0,312
9	68,746	68,746	0	0
10	75,866	76,108	0,242	0,318
11	82,731	82,731	0	0
12	89,319	89,319	0	0
13	88,124	87,900	-0,224	0,255
14	94,636	94,636	0	0
15	100,836	100,573	-0,263	0,261
16	109,879	109,588	-0,291	0,265
17	117,988	117,152	-0,836	0,713
18	122,907	122,034	-0,873	0,715
19	126,653	125,753	-0,899	0,715
20	112,772	112,007	-0,765	0,683
21	111,304	110,553	-0,751	0,679
22	100,137	99,893	-0,244	0,244
23	102,239	101,823	-0,416	0,408
24	98,845	98,452	-0,393	0,399

Através da comparação das Tabelas 6.3 e 6.5, conclui-se que as ordens de exploração neste segundo teste são idênticas às do primeiro em aproximadamente metade dos períodos. Além disso é possível confirmar que quando a potência bombada é superior à potência turbinada o preço de mercado aumenta, e que nos períodos em que a potência turbinada é superior à bombada, o preço de mercado diminui.

Analisando a Tabela 6.5, constata-se que, no cômputo geral, os valores horários do lucro são bastante próximos entre os dois testes apesar de existirem alterações nas ordens de exploração e, em alguns períodos, o contributo para o lucro ser extremamente distinto do primeiro para o segundo teste. Além disso, também a diferença entre o lucro inicial e final deste segundo teste apresenta um valor próximo ao alcançado no primeiro teste, sendo neste segundo teste a diferença 2068,48 €. Mais uma vez, constata-se que a consideração do impacto das centrais nos preços de mercado faz com que o lucro para a operação das mesmas diminua.

Em último lugar, e analisando as ordens de exploração do primeiro teste - Figura 6.1 - e a Tabela 6.5 é possível verificar que em ambos os testes e para cada central, o número de operações de turbinagem e de bombagem é idêntico. Este facto deve-se à utilização da restrição de igualdade do volume final e à matriz das afluências ter valores nulos.

Tabela 6.5: Potências turbinada e bombada e lucros inicial e final do 2º Teste com Modelo 1

Hora	Potência Turbinada (MW)	Potência Bombada (MW)	Lucro Inicial (€)	Lucro Final (€)
1	0	348,3	-12734,72	-12837,08
2	0	348,3	-9277,13	-9337,51
3	0	348,3	-11746,50	-11830,87
4	0	348,3	-11893,86	-11976,44
5	0	348,3	-13439,77	-13535,98
6	0	348,3	-12273,43	-12352,79
7	0	348,3	-18767,45	-18916,31
8	0	129,7	-8549,94	-8576,74
9	0	0	0	0
10	0	129,7	-9839,85	-9871,23
11	0	0	0	0
12	0	0	0	0
13	102,2	0	9006,32	8983,38
14	0	0	0	0
15	102,2	0	10305,46	10278,61
16	102,2	0	11229,61	11199,89
17	270,5	0	31915,62	31689,60
18	270,5	0	33246,37	33010,27
19	270,5	0	34259,60	34016,30
20	270,5	0	30504,91	30297,93
21	270,5	0	30107,83	29904,63
22	102,2	0	10234,04	10209,10
23	168,3	0	17206,80	17136,81
24	168,3	0	16635,62	16569,47
Total			126129,53	124061,04

6.2 Modelo 2

Tal como para o Modelo anterior, o valor considerado no critério de convergência foi 0,55%. Tendo isso em conta é possível verificar que, também para este modelo, a aplicação converge para um novo conjunto de preços de mercado.

Além disso é, mais uma vez, de notar a diferença no número de iterações necessárias para alcançar a convergência da aplicação, pese o facto da diferença máxima de preços alcançada tenha valores extremamente próximos.

Tabela 6.6: Dados de convergência dos testes com Modelo 2

...	Teste 1	Teste 2
Nº de iterações	4	2
Diferença relativa máxima inicial (%)	0,797	0,715
Diferença relativa máxima final (%)	0,527	0,524

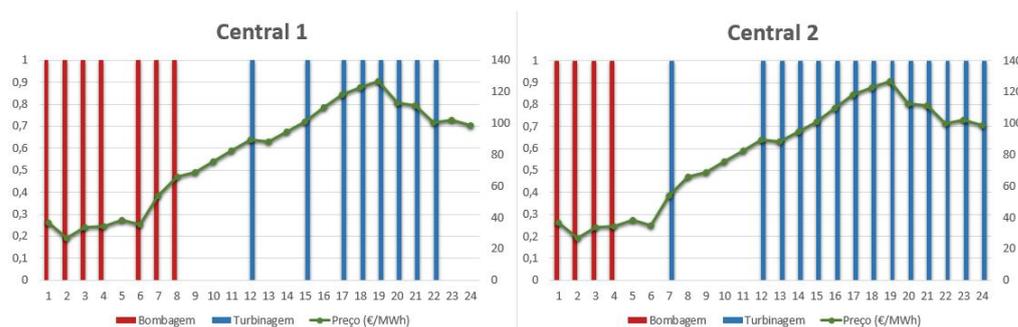


Figura 6.2: Ordens de exploração das centrais para 1º Teste do Modelo 2 e preços de mercado a verde, escala da direita

A consideração das afluências das centrais - Anexo C - faz com que a central 2 não necessite de tantas operações de bombagem como no primeiro modelo estudado e possibilita a realização de um maior número de operações de turbinagem nesta mesma central. No que diz respeito à central 1, verifica-se que esta apresenta apenas uma operação de turbinagem a mais do que de bombagem, o que passa a ser admitido considerando a restrição de desigualdade de volume final.

Tabela 6.7: Resultados dos preços do 1º Teste com Modelo 2

Hora	Preço Inicial (€/MWh)	Preço Final (€/MWh)	Diferença de Preço (€/MWh)	Diferença Relativa (%)
1	36,563	36,856	0,294	0,797
2	26,635	26,809	0,173	0,647
3	33,725	33,967	0,242	0,713
4	34,148	34,385	0,237	0,689
5	38,587	38,587	0	0
6	35,238	35,381	0,143	0,404
7	53,883	54,026	0,143	0,264
8	65,921	66,269	0,348	0,526
9	68,746	68,746	0	0
10	75,866	75,866	0	0
11	82,731	82,731	0	0
12	89,319	88,707	-0,613	0,691
13	88,124	87,900	-0,224	0,255
14	94,636	94,391	-0,244	0,259
15	100,836	100,141	-0,695	0,694
16	109,879	109,588	-0,291	0,265
17	117,988	117,152	-0,836	0,713
18	122,907	122,034	-0,873	0,715
19	126,653	125,753	-0,899	0,715
20	112,772	112,007	-0,765	0,683
21	111,304	110,553	-0,751	0,679
22	100,137	99,491	-0,646	0,649
23	102,239	101,986	-0,253	0,248
24	98,845	98,606	-0,239	0,242

Tabela 6.8: Potências turbinada e bombada e lucros inicial e final do 1º Teste com Modelo 2

Hora	Potência Turbinada (MW)	Potência Bombada (MW)	Lucro Inicial (€)	Lucro Final (€)
1	0	348,3	-12734,72	-12837,08
2	0	348,3	-9277,13	-9337,51
3	0	348,3	-11746,50	-11830,87
4	0	348,3	-11893,86	-11976,44
5	0	0	0	0
6	0	218,6	-7703,05	-7734,31
7	102,2	218,6	-6271,98	-6288,61
8	0	218,6	-14410,30	-14486,43
9	0	0	0	0
10	0	0	0	0
11	0	0	0	0
12	270,5	0	24160,90	23995,17
13	102,2	0	9006,32	8983,38
14	102,2	0	9671,76	9646,77
15	270,5	0	27276,18	27088,10
16	102,2	0	11229,61	11199,89
17	270,5	0	31915,62	31689,60
18	270,5	0	33246,37	33010,27
19	270,5	0	34259,60	34016,30
20	270,5	0	30504,91	30297,93
21	270,5	0	30107,83	29904,63
22	270,5	0	27087,17	26912,39
23	102,2	0	10448,81	10423,00
24	102,2	0	10101,97	10077,57
Total			214979,49	212753,76

Visto que o número de centrais não sofreu qualquer alteração do primeiro para o segundo modelo, era de esperar que o valor da diferença relativa entre o preço inicial e final não sofresse também grandes alterações, facto que é possível constatar através da Tabela 6.7. Esta diferença não atinge 1 % em nenhum dos períodos considerados.

No entanto, embora esta diferença se mantenha dentro dos mesmos valores, os valores dos lucros foram alvo de aumento significativo, como é possível reparar na Tabela 6.8. A razão para este aumento reside no facto da Central 2 não necessitar de tantas operações de bombagem devido às suas afluências, o que resulta num decréscimo do número de períodos em que o preço de mercado final é superior ao inicial. Apesar do menor número de operações de bombagem, a Central 2 é capaz de turbinar em mais períodos e mesmo assim não violar qualquer restrição do problema.

É também importante salientar que mesmo com este aumento do valor do lucro, a diferença entre a situação final e inicial mantém-se próxima do valor obtido para o Modelo 1, sendo para este teste de 2225,73 €.

Tabela 6.9: Resultados dos preços do 2º Teste com Modelo 2

Hora	Preço Inicial (€/MWh)	Preço Final (€/MWh)	Diferença de Preço (€/MWh)	Diferença Relativa (%)
1	36,563	36,747	0,184	0,502
2	26,635	26,809	0,173	0,647
3	33,725	33,967	0,242	0,713
4	34,148	34,385	0,237	0,689
5	38,587	38,863	0,276	0,711
6	35,238	35,466	0,228	0,642
7	53,883	53,883	0	0
8	65,921	66,269	0,348	0,526
9	68,746	69,108	0,362	0,524
10	75,866	75,676	-0,191	0,252
11	82,731	82,519	-0,211	0,256
12	89,319	88,707	-0,613	0,691
13	88,124	87,900	-0,224	0,255
14	94,636	93,989	-0,647	0,688
15	100,836	100,573	-0,263	0,261
16	109,879	109,109	-0,770	0,705
17	117,988	117,152	-0,836	0,713
18	122,907	122,034	-0,873	0,715
19	126,653	125,753	-0,899	0,715
20	112,772	112,007	-0,765	0,683
21	111,304	110,553	-0,751	0,679
22	100,137	99,491	-0,646	0,649
23	102,239	101,986	-0,253	0,248
24	98,845	98,606	-0,239	0,242

É de notar que neste segundo teste a diferença entre o número de operações de turbinagem e de bombagem para ambas as centrais é idêntica à do primeiro teste, sendo no caso da Central 1, uma operação de turbinagem a mais que bombagem e no caso da Central 2, devido às afluições desta central, dez operações de turbinagem a mais do que de bombagem, como é possível concluir através da análise da Figura 6.2 e da Tabela 6.10.

No entanto, e apesar do aumento significativo do lucro que se obtém neste Modelo 2, os resultados continuam a traduzir o esperado e o somatório dos lucros horários finais continua a ser inferior ao somatório dos lucros iniciais, ou seja, caso as centrais fossem consideradas *price takers* os lucros calculados seriam superiores. A diferença dos lucros inicial e final neste teste é de 2578,85 €.

Com estes primeiros 4 testes considerando o Modelo 1 e 2, torna-se possível concluir que embora os lucros aumentem com a consideração das afluições e a restrição de desigualdade do volume final, a diferença entre os lucros iniciais e finais mantém-se na mesma gama de valores para os dois modelos apresentados até agora.

Tabela 6.10: Potências turbinada e bombada e lucros inicial e final do 2º Teste com Modelo 2

Hora	Potência Turbinada (MW)	Potência Bombada (MW)	Lucro Inicial (€)	Lucro Final (€)
1	0	218,6	-7992,56	-8032,88
2	0	348,3	-9277,13	-9337,51
3	0	348,3	-11746,50	-11830,87
4	0	348,3	-11893,86	-11976,44
5	0	348,3	-13439,77	-13535,98
6	0	348,3	-12273,43	-12352,79
7	0	0	0	0
8	0	218,6	-14410,30	-14486,43
9	0	218,6	-15027,94	-15107,07
10	102,2	0	7753,53	7734,04
11	102,2	0	8455,07	8433,46
12	270,5	0	24160,90	23995,17
13	102,2	0	9006,32	8983,38
14	270,5	0	25598,92	25423,90
15	102,2	0	10305,46	10278,61
16	270,5	0	29722,20	29514,03
17	270,5	0	31915,62	31689,60
18	270,5	0	33246,37	33010,27
19	270,5	0	34259,60	34016,30
20	270,5	0	30504,91	30297,93
21	270,5	0	30107,83	29904,63
22	270,5	0	27087,17	26912,39
23	102,2	0	10448,81	10423,00
24	102,2	0	10101,97	10077,57
Total			226613,17	224034,32

6.3 Modelo 3

6.3.1 Sistema produtor com 3 centrais

Em primeiro lugar, o Modelo 3 foi utilizado considerando um sistema produtor com 3 centrais. A Tabela 6.11 inclui os valores relativos à convergência do algoritmo.

Tabela 6.11: Dados de convergência dos testes com Modelo 3 com 3 centrais

...	Teste 1	Teste 2
Nº de iterações	5	4
Diferença relativa máxima inicial (%)	0,954	0,954
Diferença relativa máxima final (%)	0,498	0,539

Tal como mencionado em 5.4, e por este modelo incluir mais que duas centrais, é necessária a criação da população inicial de forma controlada. Este facto, embora garanta a obtenção de

soluções de qualidade, não resolve completamente a questão da robustez do AG. Na verdade, o AG apresenta alguns problemas de robustez para modelos que incluam mais de 2 centrais, sendo necessário um maior número de iterações até que o algoritmo consiga convergir.

No entanto, e pese a falta de robustez do AG, as soluções são de qualidade como pode ser confirmado pela sua coerência, visto que o aumento do número de centrais provoca um aumento na diferença entre preços em relação à iteração inicial. Apesar deste aumento, a aplicação continua a ser capaz de convergir para um novo conjunto de preços de mercado sem ser necessário alterar o valor do critério de convergência adotado como resultado dos testes prévios realizados.

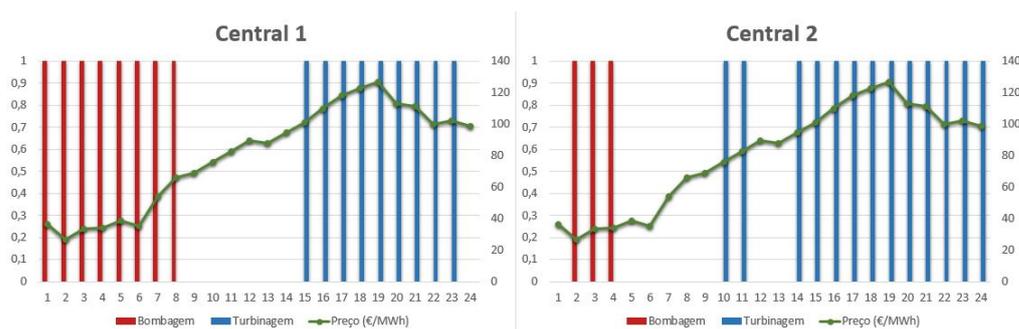


Figura 6.3: Ordens de exploração das centrais 1 e 2 para 1º Teste do Modelo 3 com 3 centrais e preços de mercado a verde, escala da direita

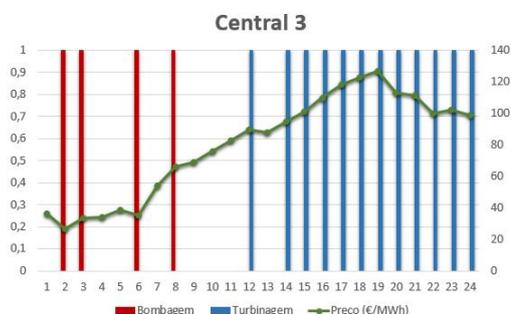


Figura 6.4: Ordens de exploração da central 3 para 1º Teste do Modelo 3 com 3 centrais e preços de mercado a verde, escala da direita

Como é possível verificar na Figura 6.3, as ordens de exploração das Centrais 1 e 2 continuam a satisfazer a restrição de volume final, estando bastante próximas das obtidas nos modelos anteriores. Por outro lado, a Central 3, e tal como a Central 2, apresenta uma maior diferença no número de operações de bombagem e turbinagem devido às suas afluências.

Uma breve consulta destas afluências - Anexo C - e do caudal turbinado por esta central - Anexo B - permite concluir que, além do caudal a mais permitido pela restrição de desigualdade, a Central 3 teria a possibilidade de realizar 7 operações de turbinagem a mais do que de bombagem. Desta forma é também possível concluir que as ordens de exploração obtidas neste teste, e representadas na Figura 6.4 respeitam as restrições do problema e são coerentes, encontrando-se

as operações de turbinagem nas horas com o preço de mercado mais elevado e as operações de bombagem em horas em que o preço de mercado se encontra mais baixo.

Ao longo destes testes verificou-se que a restrição de desigualdade apresenta uma margem, em termos de caudal, muito pequena levando a que sejam realizadas mais operações de bombagem do que são necessárias. Se, por exemplo, fosse permitido um desvio correspondente ao volume associado a três caudais turbinados ou bombados, verificar-se ia uma diminuição no número de operações de bombagem nestas centrais. No entanto, esta alteração na aplicação não foi realizada para este modelo.

Tabela 6.12: Resultados dos preços do 1º Teste com Modelo 3 com 3 centrais

Hora	Preço Inicial (€/MWh)	Preço Final (€/MWh)	Diferença de Preço (€/MWh)	Diferença Relativa (%)
1	36,563	36,747	0,184	0,502
2	26,635	26,865	0,230	0,856
3	33,725	34,046	0,321	0,943
4	34,148	34,385	0,237	0,690
5	38,587	38,760	0,173	0,447
6	35,238	35,455	0,217	0,613
7	53,883	54,151	0,268	0,495
8	65,921	66,450	0,529	0,796
9	68,746	68,746	0	0
10	75,866	75,676	-0,191	0,252
11	82,731	82,519	-0,211	0,256
12	89,319	89,117	-0,202	0,227
13	88,124	88,124	0	0
14	94,636	94,177	-0,458	0,486
15	100,836	99,911	-0,925	0,926
16	109,879	108,855	-1,024	0,941
17	117,988	116,876	-1,112	0,951
18	122,907	121,746	-1,161	0,954
19	126,653	125,456	-1,197	0,954
20	112,772	111,754	-1,018	0,911
21	111,304	110,305	-0,999	0,906
22	100,137	99,278	-0,860	0,866
23	102,239	101,350	-0,889	0,877
24	98,845	98,398	-0,447	0,455

Uma breve análise da Tabela 6.12 permite constatar que, mais uma vez, os resultados são os esperados. Era esperado que, com o aumento do número de centrais, a diferença entre os preços iniciais e finais aumentasse. Embora continue sem alcançar o ponto percentual, com 3 centrais a diferença no preço de mercado já ultrapassa 1 €/MWh em diversas horas.

A inclusão de mais uma central terá ainda um impacto significativo no valor dos lucros, como é possível verificar através da comparação entre os resultados obtidos neste teste - Tabela 6.13 - e os lucros obtidos nos modelos anteriores que apenas consideravam 2 centrais.

O aumento da diferença entre os preços iniciais e finais vai ainda causar um aumento na diferença dos lucros obtidos, obtendo-se neste primeiro teste o valor de 4259,97 €. Em todo o caso, o valor final do lucro continua a ser inferior ao valor inicial.

Tabela 6.13: Potências turbinada e bombada e lucros inicial e final do 1º Teste com Modelo 3 com 3 centrais

Hora	Potência Turbinada (MW)	Potência Bombada (MW)	Lucro Inicial (€)	Lucro Final (€)
1	0	218,6	-7992,56	-8032,88
2	0	461,8	-12300,25	-12406,42
3	0	461,8	-15574,31	-15722,65
4	0	348,3	-11893,86	-11976,45
5	0	218,6	-8435,07	-8472,96
6	0	332,1	-11702,57	-11774,72
7	0	218,6	-11778,82	-11837,46
8	0	332,1	-21892,32	-22068,04
9	0	0	0	0
10	102,2	0	7753,53	7734,05
11	102,2	0	8455,07	8433,47
12	89,4	0	7985,16	7967,06
13	0	0	0	0
14	191,6	0	18132,18	18044,40
15	359,9	0	36290,94	35958,00
16	359,9	0	39545,36	39176,88
17	359,9	0	42463,71	42063,62
18	359,9	0	44234,26	43816,35
19	359,9	0	45582,36	45151,69
20	359,9	0	40586,75	40220,38
21	359,9	0	40058,43	39698,76
22	359,9	0	36039,46	35730,08
23	359,9	0	36795,77	36475,74
24	191,6	0	18938,72	18853,01
Total			321291,90	317031,92

Tabela 6.14: Resultados dos preços do 2º Teste com Modelo 3 com 3 centrais

Hora	Preço Inicial (€/MWh)	Preço Final (€/MWh)	Diferença de Preço (€/MWh)	Diferença Relativa (%)
1	36,563	36,747	0,184	0,502
2	26,635	26,865	0,230	0,856
3	33,725	34,046	0,321	0,943
4	34,148	34,385	0,237	0,690
5	38,587	38,760	0,173	0,447
6	35,238	35,540	0,302	0,850
7	53,883	54,291	0,408	0,751
8	65,921	66,269	0,348	0,526
9	68,746	68,939	0,193	0,280
10	75,866	75,676	-0,191	0,252
11	82,731	82,731	0	0
12	89,319	89,319	0	0
13	88,124	87,704	-0,421	0,480
14	94,636	93,775	-0,861	0,918
15	100,836	99,911	-0,925	0,926
16	109,879	108,855	-1,024	0,941
17	117,988	116,876	-1,112	0,951
18	122,907	121,746	-1,161	0,954
19	126,653	125,456	-1,197	0,954
20	112,772	111,754	-1,018	0,911
21	111,304	110,305	-0,999	0,906
22	100,137	99,278	-0,860	0,866
23	102,239	101,350	-0,889	0,877
24	98,845	98,398	-0,447	0,455

Os resultados obtidos em ambos os testes mostram-se coerentes, sendo possível constatar que as 3 centrais em causa respeitam restrições do problema e que, dessa forma, constituem soluções possíveis e de qualidade.

Este segundo teste vem confirmar os resultados obtidos no primeiro teste, estando tanto a diferença de preços como os lucros obtidos com valores que podem ser considerados próximos. Em último lugar, também a diferença entre os lucros das situações final e inicial, expressos na Tabela 6.15, tem um valor próximo do obtido no primeiro teste, sendo neste caso 4589,85 €.

Os valores das diferenças nos preços iniciais e finais apresentadas na Tabela 6.14 poderiam apresentar uma diferença ainda maior caso fosse considerada a alteração mencionada anteriormente, e na restrição de desigualdade fosse permitido um desvio correspondente ao volume associado a três caudais turbinados ou bombados. Contudo, não só os preços iriam sofrer alterações, mas também os lucros inerentes à exploração das centrais hídricas representados na Tabela 6.15.

É no entanto de esperar que caso esta mudança fosse implementada os resultados do modelo continuariam a ser coerentes, aumentando apenas a diferença em relação aos resultados dos modelos anteriores.

Tabela 6.15: Potências turbinada e bombada e lucros inicial e final do 2º Teste com Modelo 3 com 3 centrais

Hora	Potência Turbinada (MW)	Potência Bombada (MW)	Lucro Inicial (€)	Lucro Final (€)
1	0	218,6	-7992,56	-8032,88
2	0	461,8	-12300,25	-12406,42
3	0	461,8	-15574,31	-15722,65
4	0	348,3	-11893,86	-11976,45
5	0	218,6	-8435,07	-8472,96
6	0	461,8	-16272,95	-16412,48
7	0	332,1	-17894,54	-18029,89
8	0	218,6	-14410,30	-14486,43
9	102,2	218,6	-8002,07	-8024,51
10	102,2	0	7753,53	7734,05
11	0	0	0	0
12	0	0	0	0
13	191,6	0	16884,65	16804,04
14	359,9	0	34059,34	33749,54
15	359,9	0	36290,94	35958,00
16	359,9	0	39545,36	39176,88
17	359,9	0	42463,71	42063,62
18	359,9	0	44234,26	43816,35
19	359,9	0	45582,36	45151,69
20	359,9	0	40586,75	40220,38
21	359,9	0	40058,43	39698,76
22	359,9	0	36039,46	35730,08
23	359,9	0	36795,77	36475,74
24	191,6	0	18938,72	18853,01
Total			326457,34	321867,49

6.3.2 Sistema produtor com 4 centrais

O Modelo 3 foi utilizado também considerando um sistema produtor com 4 centrais, estando os valores relativos à convergência do algoritmo apresentados na Tabela 6.16.

Tabela 6.16: Dados de convergência dos testes com Modelo 3 com 4 centrais

...	Teste 1	Teste 2
Nº de iterações	4	4
Diferença relativa máxima inicial (%)	1,53	1,53
Diferença relativa máxima final (%)	0,485	0,479

Tal como foi mencionado na secção 5.4 desta Dissertação, o Modelo 3 corresponde a uma situação bastante próxima da realidade e sem qualquer simplificação a ser considerada. Além disso, esta versão desse modelo já apresenta o número máximo de centrais com que a aplicação desenvolvida foi testada.

Através da Tabela 6.16 é possível verificar que continuam a ser necessárias, em ambos os testes, o mesmo número de iterações até que a aplicação seja capaz de convergir para um novo conjunto de preços de mercado. Através desta mesma tabela consegue-se constatar que, mais uma vez, e tal como previsto, o aumento do número de centrais provoca também um aumento na diferença relativa máxima inicial.

Embora os resultados dos testes aqui obtidos demonstrem que a aplicação converge, verificou-se que num dos testes complementares para este modelo a aplicação demonstrou-se incapaz de convergir, o que comprova a influência que a falta de robustez do AG utilizado pode ter nos resultados obtidos

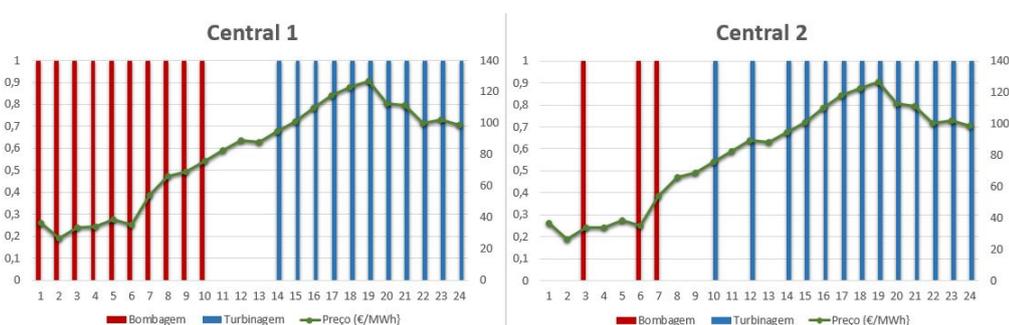


Figura 6.5: Ordens de exploração das centrais 1 e 2 para 1º Teste do Modelo 3 com 4 centrais e preços de mercado a verde, escala da direita

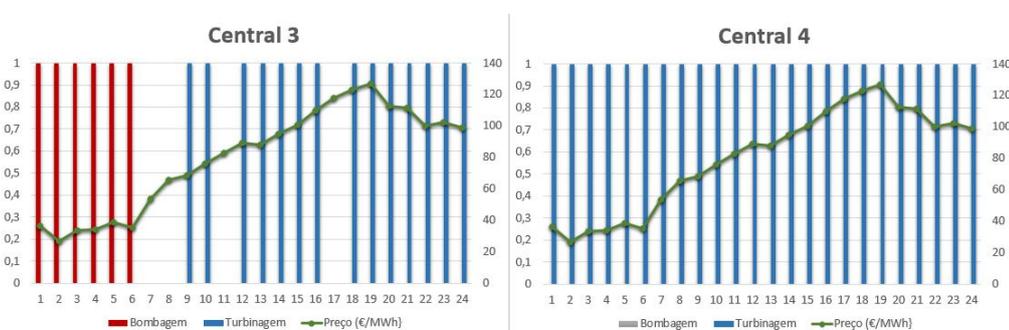


Figura 6.6: Ordens de exploração das centrais 3 e 4 para 1º Teste do Modelo 3 com 4 centrais e preços de mercado a verde, escala da direita

As 3 centrais que já haviam sido previamente consideradas na secção anterior continuam com ordens de exploração coerentes, mantendo a diferença entre operações de bombagem e turbinagem de forma a cumprir as restrições do problema. No caso da Central 1, ocorre uma operação de turbinagem a mais do que de bombagem, sendo esta diferença para a Central 2 de 10 operações e para a Central 3 de 8 operações de turbinagem a mais. Deve salientar-se ainda que essas mesmas operações continuam a ocorrer em períodos adequados.

Quanto às ordens de exploração da Central 4, estas estão diretamente ligadas ao facto do caudal turbinado por esta central e as afluições da mesma serem equivalentes para todos os períodos em

estudo, como se pode confirmar através da consulta dos Anexos B e C. Esta igualdade, além de fazer com que não seja necessário realizar qualquer operação de bombagem por parte desta central, ainda permite a turbinagem permanente por parte da mesma.

Tabela 6.17: Resultados dos preços do 1º Teste com Modelo 3 com 4 centrais

Hora	Preço Inicial (€/MWh)	Preço Final (€/MWh)	Diferença de Preço (€/MWh)	Diferença Relativa (%)
1	36,563	36,661	0,099	0,269
2	26,635	26,694	0,058	0,218
3	33,725	33,897	0,172	0,506
4	34,148	34,228	0,080	0,233
5	38,587	38,679	0,093	0,240
6	35,238	35,399	0,161	0,456
7	53,883	54,046	0,163	0,302
8	65,921	65,926	0,005	0,008
9	68,746	68,604	-0,142	0,208
10	75,866	75,515	-0,351	0,465
11	82,731	82,285	-0,445	0,541
12	89,319	88,398	-0,921	1,042
13	88,124	87,455	-0,669	0,765
14	94,636	93,260	-1,376	1,475
15	100,836	99,358	-1,478	1,488
16	109,879	108,243	-1,636	1,511
17	117,988	116,487	-1,500	1,288
18	122,907	121,052	-1,856	1,533
19	126,653	124,741	-1,912	1,533
20	112,772	111,146	-1,627	1,464
21	111,304	109,707	-1,597	1,456
22	100,137	98,764	-1,374	1,391
23	102,239	100,818	-1,421	1,409
24	98,845	97,502	-1,343	1,377

Com a introdução de uma nova central era esperado que a diferença entre os preços inicial e final aumentasse. Na verdade, a introdução da quarta central no modelo faz com que a diferença nos preços aumente bastante, chegando em alguns períodos a atingir 1,5%, como se pode verificar na Tabela 6.17.

Além disso, era também esperado que os lucros subissem, sendo esse aumento ainda maior devido à turbinagem permanente da Central 4, que diminui de forma significativa o impacto que as operações de bombagem das restantes centrais poderiam ter nos lucros obtidos. Os lucros obtidos para este teste estão apresentados na Tabela 6.18.

Devido ao aumento da diferença entre os preços inicial e final, a diferença entre os lucros finais e iniciais também aumenta, fixando-se em 10606,29 €.

Tabela 6.18: Potências turbinada e bombada e lucros inicial e final do 1º Teste com Modelo 3 com 4 centrais

Hora	Potência Turbinada (MW)	Potência Bombada (MW)	Lucro Inicial (€)	Lucro Final (€)
1	215,2	332,1	-4274,16	-4285,69
2	215,2	332,1	-3113,69	-3120,49
3	215,2	461,8	-8316,64	-8358,94
4	215,2	332,1	-3991,94	-4001,24
5	215,2	332,1	-4510,79	-4521,63
6	215,2	461,8	-8689,71	-8729,50
7	215,2	348,3	-7171,83	-7193,57
8	215,2	218,6	-224,13	-224,15
9	304,6	218,6	5912,18	5899,93
10	406,8	218,6	14278,02	14211,96
11	215,2	0	17803,63	17707,82
12	406,8	0	36335,14	35960,36
13	304,6	0	26842,71	26638,92
14	575,1	0	54424,92	53633,82
15	575,1	0	57990,88	57140,73
16	575,1	0	63191,27	62250,35
17	485,7	0	57306,54	56577,83
18	575,1	0	70683,86	69616,72
19	575,1	0	72838,05	71738,34
20	575,1	0	64855,35	63919,80
21	575,1	0	64011,13	63092,70
22	575,1	0	57589,03	56799,04
23	575,1	0	58797,57	57980,38
24	575,1	0	56845,80	56073,40
Total			739413,18	728806,89

Tabela 6.19: Resultados dos preços do 2º Teste com Modelo 3 com 4 centrais

Hora	Preço Inicial (€/MWh)	Preço Final (€/MWh)	Diferença de Preço (€/MWh)	Diferença Relativa (%)
1	36,563	36,565	0,003	0,008
2	26,635	26,758	0,123	0,459
3	33,725	33,818	0,093	0,274
4	34,148	34,228	0,080	0,233
5	38,587	38,782	0,196	0,504
6	35,238	35,399	0,161	0,456
7	53,883	53,887	0,004	0,008
8	65,921	65,926	0,005	0,008
9	68,746	68,752	0,006	0,008
10	75,866	75,465	-0,401	0,532
11	82,731	82,074	-0,657	0,800
12	89,319	88,398	-0,921	1,042
13	88,124	87,427	-0,697	0,797
14	94,636	93,663	-0,973	1,039
15	100,836	99,358	-1,478	1,488
16	109,879	108,243	-1,636	1,511
17	117,988	116,211	-1,776	1,529
18	122,907	121,052	-1,856	1,533
19	126,653	124,741	-1,912	1,533
20	112,772	111,146	-1,627	1,464
21	111,304	109,707	-1,597	1,456
22	100,137	98,764	-1,374	1,391
23	102,239	100,818	-1,421	1,409
24	98,845	97,502	-1,343	1,377

A solução obtida no 2º teste realizado vem mais uma vez confirmar a solução obtida no primeiro, apresentando resultados bastante próximos e confirmando o aumento da diferença de preços com o aumento do número de centrais.

No que diz respeito aos lucros obtidos, e tal como na situação em que só foram consideradas 3 centrais, a diferença entre os preços finais e iniciais poderia ser superior caso fosse considerada a alteração na restrição de desigualdade.

No entanto, e considerando as condições em que foram realizados os testes, os resultados mostram-se coerentes e os valores dos lucros e respetiva diferença estão próximos dos alcançados no primeiro teste. No caso concreto deste 2º teste, o lucro final é inferior ao inicial em 10639,69 €.

Tabela 6.20: Potências turbinada e bombada e lucros inicial e final do 2º Teste com Modelo 3 com 4 centrais

Hora	Potência Turbinada (MW)	Potência Bombada (MW)	Lucro Inicial (€)	Lucro Final (€)
1	215,2	218,6	-124,31	-124,32
2	215,2	461,8	-6568,30	-6598,58
3	215,2	348,3	-4488,83	-4501,15
4	215,2	332,1	-3991,94	-4001,24
5	215,2	461,8	-9515,50	-9563,74
6	215,2	461,8	-8689,71	-8729,50
7	215,2	218,6	-183,20	-183,22
8	215,2	218,6	-224,13	-224,15
9	215,2	218,6	-233,74	-233,76
10	215,2	0	16326,41	16240,01
11	317,4	0	26258,70	26050,31
12	406,8	0	36335,14	35960,36
13	317,4	0	27970,71	27749,45
14	406,8	0	38497,75	38101,97
15	575,1	0	57990,88	57140,73
16	575,1	0	63191,27	62250,35
17	575,1	0	67854,62	66832,99
18	575,1	0	70683,86	69616,72
19	575,1	0	72838,05	71738,34
20	575,1	0	64855,35	63919,80
21	575,1	0	64011,13	63092,70
22	575,1	0	57589,03	56799,04
23	575,1	0	58797,57	57980,38
24	575,1	0	56845,80	56073,40
Total			746026,59	735386,89

6.4 Modelo 4

O Modelo 4 é o modelo mais complexo entre os que foram estudados ao longo desta dissertação, incluindo a interligação hidráulica entre duas centrais, neste caso as Centrais 1 e 2.

Tabela 6.21: Dados de convergência dos testes com Modelo 4

...	Teste 1	Teste 2
Nº de iterações	4	4
Diferença relativa máxima inicial	1,53	1,53
Diferença relativa máxima final	0,549	0,791

Através da análise e comparação entre as Tabelas 6.16 e 6.21, que incluem os valores obtidos para a convergência da aplicação nos modelos em que são utilizadas 4 centrais, é possível verificar que nos 4 testes a diferença máxima inicial é a mesma.

Além disso, verifica-se que também neste modelo a aplicação seria capaz de convergir caso fosse adotado, para o critério de convergência, um valor idêntico ao dos restantes modelos. No entanto, e como resultado do segundo teste torna-se possível concluir que a adoção de um valor mais elevado, devido à falta de robustez do Algoritmo Genético, também se revelou uma decisão acertada.

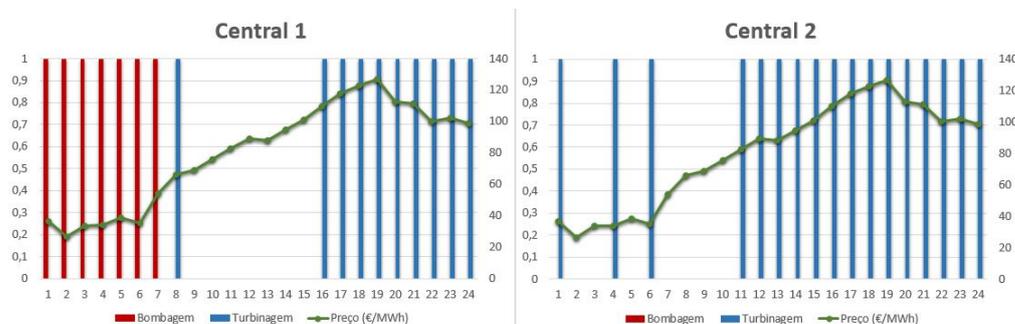


Figura 6.7: Ordens de exploração das centrais 1 e 2 para 1º Teste do Modelo 4 e preços de mercado a verde, escala da direita

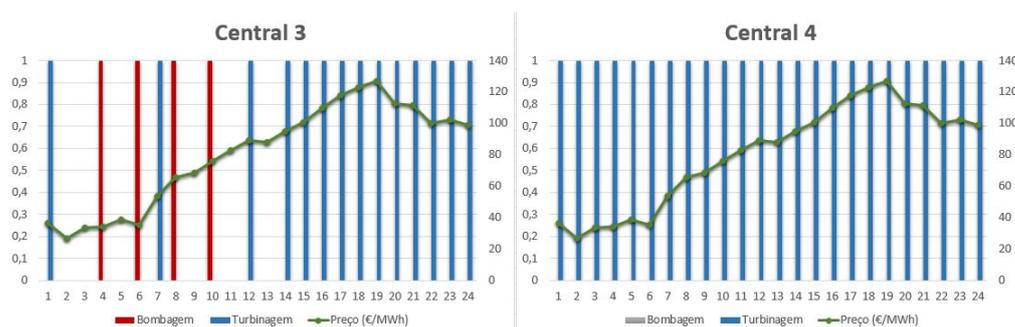


Figura 6.8: Ordens de exploração das centrais 3 e 4 para 1º Teste do Modelo 4 e preços de mercado a verde, escala da direita

As diferenças deste modelo em relação ao anterior residem no facto de ter sido considerada a interligação hidráulica entre as Centrais 1 e 2 e a alteração na restrição de desigualdade mencionada no Ponto 6.3.1, possibilitando o desvio do volume final relativamente ao inicial num valor correspondente a 3 caudais turbinados ou bombados.

Desta forma, a Central 1 poderá realizar mais 3 operações de turbinagem que de bombagem, ao contrário do que sucedia nos modelos anteriores em que a diferença era apenas de 1 operação. Esta alteração na restrição de desigualdade aliada ao facto das centrais 1 e 2 se encontrarem hidráulicamente interligadas, ou seja, a água turbinada pela central 1 fica disponível para operações de turbinagem por parte da segunda central, faz com que a Central 2 não necessite de realizar qualquer operação de bombagem. Além disso, o caudal de turbinagem da Central 1 é significativamente superior ao caudal turbinado pela Central 2 pelo que, por cada operação da turbinagem da Central 1, serão possíveis várias operações de turbinagem por parte da Central 2.

As alterações nas ordens de exploração da Central 3 estão apenas relacionadas com a alteração na restrição de desigualdade, sendo agora possível uma diferença de 10 operações de turbinagem relativamente ao número de operações de bombagem. Quanto à Central 4, as circunstâncias são as expostas no Ponto 6.3.2, sendo o caudal turbinado por esta central exatamente igual às suas aflúncias em todos os períodos estudados, permitindo uma turbinagem permanente.

Tabela 6.22: Resultados dos preços do 1º Teste com Modelo 4

Hora	Preço Inicial (€/MWh)	Preço Final (€/MWh)	Diferença de Preço (€/MWh)	Diferença Relativa (%)
1	36,563	36,404	-0,159	0,436
2	26,635	26,637	0,002	0,006
3	33,725	33,728	0,002	0,007
4	34,148	34,158	0,010	0,029
5	38,587	38,589	0,003	0,007
6	35,238	35,248	0,010	0,027
7	53,883	53,777	-0,106	0,196
8	65,921	65,491	-0,430	0,657
9	68,746	68,390	-0,356	0,521
10	75,866	75,677	-0,190	0,251
11	82,731	82,074	-0,657	0,800
12	89,319	88,398	-0,921	1,042
13	88,124	87,427	-0,697	0,797
14	94,636	93,663	-0,973	1,039
15	100,836	99,791	-1,046	1,048
16	109,879	108,243	-1,636	1,511
17	117,988	116,211	-1,776	1,529
18	122,907	121,052	-1,856	1,533
19	126,653	124,741	-1,912	1,533
20	112,772	111,146	-1,627	1,464
21	111,304	109,707	-1,597	1,456
22	100,137	98,764	-1,374	1,391
23	102,239	100,818	-1,421	1,409
24	98,845	97,502	-1,343	1,377

Através da Tabela 6.22 pode-se confirmar que, devido às alterações introduzidas neste modelo, o número de períodos horários em que o preço de mercado final é superior ao preço de mercado inicial ou seja, os períodos em que a potência bombada é superior à turbinada, é inferior.

Desta forma era esperado um aumento nos lucros em relação ao Modelo 3 com 4 centrais mas, visto que desta vez o número de centrais é o mesmo, não era expectável que o aumento fosse tão significativo como aquele verificado no Modelo 3 quando foi introduzida a quarta central. Este facto pode ser confirmado através da comparação das Tabelas 6.15, 6.20 e 6.23 .

Apesar das alterações introduzidas neste modelo, e visto que nenhuma delas afeta o número de centrais, a diferença dos lucros entre a situação inicial e final continua na ordem dos 10000 €, mais concretamente, 10239,88 €.

Tabela 6.23: Potências turbinada e bombada e lucros inicial e final do 1º Teste com Modelo 4

Hora	Potência Turbinada (MW)	Potência Bombada (MW)	Lucro Inicial (€)	Lucro Final (€)
1	406,8	218,6	6881,06	6851,19
2	215,2	218,6	-90,56	-90,57
3	215,2	218,6	-114,666	-114,674
4	317,4	332,1	-501,98	-502,13
5	215,2	218,6	-131,20	-131,20
6	317,4	332,1	-518,00	-518,14
7	304,6	218,6	4633,94	4624,86
8	383,5	113,5	17798,63	17682,48
9	215,2	0	14794,20	14717,51
10	215,2	113,5	7715,59	7696,30
11	317,4	0	26258,70	26050,31
12	406,8	0	36335,14	35960,36
13	317,4	0	27970,71	27749,45
14	406,8	0	38497,75	38101,97
15	406,8	0	41020,15	40594,83
16	575,1	0	63191,27	62250,35
17	575,1	0	67854,62	66832,99
18	575,1	0	70683,86	69616,72
19	575,1	0	72838,05	71738,34
20	575,1	0	64855,35	63919,80
21	575,1	0	64011,13	63092,70
22	575,1	0	57589,03	56799,04
23	575,1	0	58797,57	57980,38
24	575,1	0	56845,80	56073,40
Total			797216,15	786976,27

Uma vez que o Modelo 4 é o modelo mais completo que foi testado, as ordens de exploração são apresentadas para ambos os testes, tendo em vista uma comparação mais fácil dos resultados obtidos.

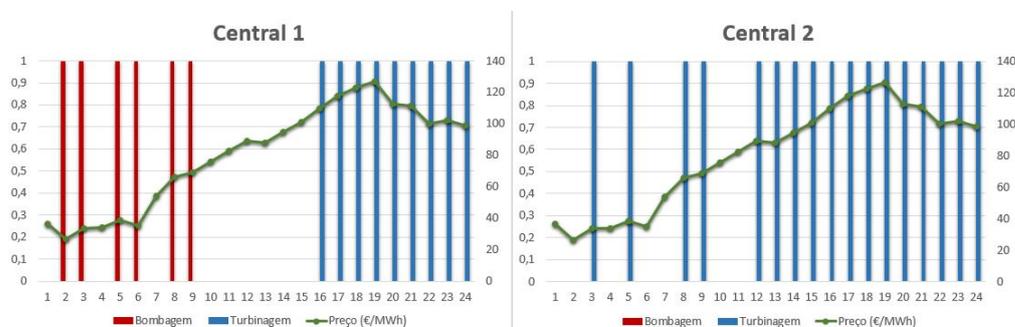


Figura 6.9: Ordens de exploração das centrais 1 e 2 para 2º Teste do Modelo 4 e preços de mercado a verde, escala da direita

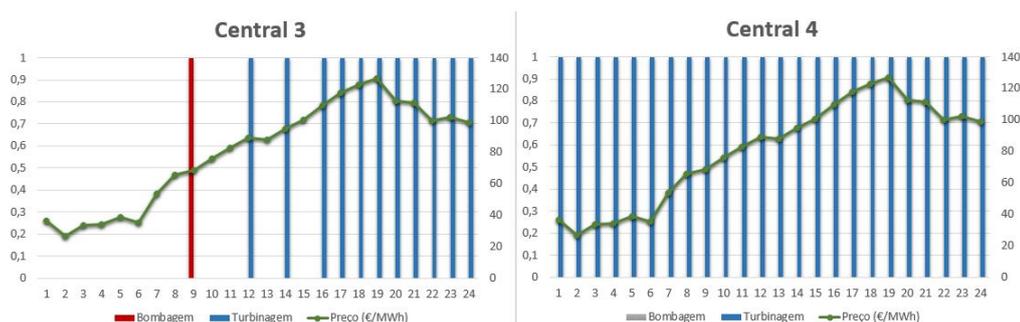


Figura 6.10: Ordens de exploração das centrais 3 e 4 para 2º Teste do Modelo 4 e preços de mercado a verde, escala da direita

Tal como nas ordens de exploração obtidas no primeiro teste, a Central 2 não necessita de qualquer operação de bombagem tendo em conta a interligação hidráulica existente com a Central 1. Assiste-se também a uma diminuição do número de operações de bombagem e, conseqüentemente, do número de operações de turbinagem nas Centrais 1 e 3.

Tabela 6.24: Resultados dos preços do 2º Teste com Modelo 4

Hora	Preço Inicial (€/MWh)	Preço Final (€/MWh)	Diferença de Preço (€/MWh)	Diferença Relativa (%)
1	36,563	36,381	-0,182	0,499
2	26,635	26,637	0,002	0,006
3	33,725	33,657	-0,069	0,204
4	34,148	34,002	-0,146	0,431
5	38,587	38,508	-0,078	0,203
6	35,238	35,240	0,002	0,006
7	53,883	53,619	-0,264	0,493
8	65,921	65,764	-0,157	0,239
9	68,746	68,771	0,024	0,036
10	75,866	75,465	-0,401	0,532
11	82,731	82,285	-0,445	0,541
12	89,319	88,398	-0,921	1,042
13	88,124	87,427	-0,697	0,797
14	94,636	93,663	-0,973	1,039
15	100,836	100,020	-0,816	0,816
16	109,879	108,243	-1,636	1,511
17	117,988	116,211	-1,776	1,529
18	122,907	121,052	-1,856	1,533
19	126,653	124,741	-1,912	1,533
20	112,772	111,146	-1,627	1,464
21	111,304	109,707	-1,597	1,456
22	100,137	98,764	-1,374	1,391
23	102,239	100,818	-1,421	1,409
24	98,845	97,502	-1,343	1,377

Tabela 6.25: Potências turbinada e bombada e lucros inicial e final do 2º Teste com Modelo 4

Hora	Potência Turbinada (MW)	Potência Bombada (MW)	Lucro Inicial (€)	Lucro Final (€)
1	215,2	0	7868,25	7829,17
2	215,2	218,6	-90,56	-90,57
3	317,4	218,6	3332,05	3325,27
4	215,2	0	7348,72	7317,20
5	317,4	218,6	3812,37	3804,63
6	215,2	218,6	-119,81	-119,82
7	215,2	0	11595,62	11538,79
8	317,4	218,6	6512,98	6497,44
9	317,4	332,1	-1010,57	-1010,93
10	215,2	0	16326,41	16240,01
11	215,2	0	17803,63	17707,82
12	406,8	0	36335,14	35960,36
13	317,4	0	27970,71	27749,45
14	406,8	0	38497,75	38101,97
15	317,4	0	32005,40	31746,47
16	575,1	0	63191,27	62250,35
17	575,1	0	67854,62	66832,99
18	575,1	0	70683,86	69616,72
19	575,1	0	72838,05	71738,34
20	575,1	0	64855,35	63919,80
21	575,1	0	64011,13	63092,70
22	575,1	0	57589,03	56799,04
23	575,1	0	58797,57	57980,38
24	575,1	0	56845,80	56073,40
Total			784854,77	774900,99

Mantendo o mesmo número de operações de turbinagem e de bombagem, o contributo das Centrais 2 e 4 para o lucro será aproximadamente o mesmo para ambos os testes.

No entanto, considerando que as operações de turbinagem ocorrem nos períodos em que os preços de mercado são mais elevados e as operações de bombagem em horas em que o preço é mais reduzido, com a redução do número de operações de turbinagem e de bombagem por parte das Centrais 1 e 3 o contributo para as margens de lucro por parte das operações de turbinagem sofrerá um decréscimo mais acentuado que o contributo das operações de bombagem, fazendo com que lucro total obtido neste segundo teste diminua, como é possível confirmar através da comparação das Tabelas 6.23 e 6.25.

Em último lugar, e visto que mais uma vez o número de centrais não sofreu qualquer alteração, a diferença entre os lucros final e inicial continua na mesma gama de valores que os obtidos nos testes anteriores com 4 centrais, situando-se neste caso em 9953,78 €.