

**Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto**



**FEUP**

**Otimização da exploração de centrais hídricas  
utilizando Algoritmos Genéticos, em ambiente de  
mercado**

Gil Silva Sampaio

VERSÃO FINAL

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

Orientador: Professor Doutor João Paulo Tomé Saraiva

Julho de 2012



# Resumo

A dissertação que se apresenta neste documento aborda a problemática envolvida no planeamento de exploração de centrais hídricas. Pretendia-se com este trabalho aplicar a esse problema, enquadrado no novo paradigma introduzido pelos Mercados de Eletricidade, uma metodologia de otimização baseada em Algoritmos Genéticos.

A complexidade característica do problema de planeamento da exploração de centrais hídricas deve-se principalmente à relação não linear entre a potência, o caudal e a altura da queda, e à interligação hidráulica entre os aproveitamentos dispostos no mesmo curso de água. Mas, também se deve a outros fatores como a possibilidade de reverter os grupos produtores, às restrições de balanço de água, ao valor a atribuir à água, aos custos fixos e variáveis de operação de cada central e às incertezas na previsão das afluências e dos preços de mercado.

Devido ao considerável benefício económico associado à sua exploração, as empresas detentoras de ativos de produção hídrica procuram desenvolver metodologias de otimização para realizar o planeamento da geração das suas centrais, com o objetivo de aumentar os seus proveitos perante um nível adequado de risco. Daqui se justifica que uma pesquisa pela literatura sobre este tema revele a existência de variadas abordagens ao problema. Com efeito, várias técnicas de otimização têm sido aplicadas a este problema, que se distinguem pelas simplificações introduzidas, porém sem nunca se ter encontrado uma clara vantagem para alguma delas.

Nesta dissertação aplicou-se uma metodologia de resolução baseada em Algoritmos Genéticos a um modelo que discretiza o problema relativamente a períodos horários e relativamente a estados de operação dos grupos geradores, mas que permite considerar as principais características de funcionamento das centrais hídricas. Além disso, introduziu-se ainda uma inovação em relação a anteriores abordagens que permite considerar o efeito associado à apresentação de propostas, por parte destas centrais, nomeadamente no preço de fecho do mercado. Os resultados obtidos perspetivam que metodologias com base em Algoritmos Genéticos serão uma boa aposta para desenvolvimentos futuros desta temática.



# Abstract

*The dissertation which is presented on this document deals with the problematic related to the scheduling of hydroelectric plants. With this work, we proposed to apply to that problem, framed in the new paradigm introduced by Electricity Markets, an optimization methodology based on Genetic Algorithms.*

*The characteristic complexity of the hydroelectric generation scheduling problem is mainly due to the nonlinear relationship between the electrical power, the water discharge and the plant's head, and due to the hydraulic connection between hydro plants. It is also due to others factors such as the possibility of reverting the generation groups, the water balance constraints, the operational fixed and variable costs of each plant, and the uncertainty in the forecast of natural inflows and market prices.*

*Due to the considerable economic benefit associated to its operation, the companies holding actives in hydro generation seek to develop optimization methodologies to the hydroelectric scheduling, with the goal of increasing their profits under an appropriated level of risk. Hence, it is justified that a search in the literature about this subject reveals the existence of a variety of approaches to this problem. Indeed, several optimization techniques have been applied to this problem, which are differentiated by the simplifications considered, however without finding a clear advantage to any of them.*

*In this dissertation, we applied a solution approach based on Genetic Algorithms to a model that discretizes the problem relatively to hourly periods and relatively to operation stages of the generation groups, but allows considering the major hydroelectric plants functioning characteristics. Moreover, it introduces an innovation regarding to previous approaches that permits to consider the effect that submitting offers by these plants has in the market clearing price. The results indicate that methods based on Genetic Algorithms are a good step for future developments about this subject.*



# Agradecimentos

Ao Professor João Paulo Tomé Saraiva, orientador desta dissertação, desejo expressar o meu maior agradecimento, pela postura assertiva que sempre usou para transmitir a sua opinião e pela agradável receptividade com que me recebeu nas diversas vezes que o consultei. O empenho que demonstra para com as suas responsabilidades profissionais inspira-me, e incutiu-me desde o início o desejo de criar um trabalho digno das suas expectativas.

À EDP, expresso a minha gratidão, nomeadamente ao Engenheiro Virgílio Mendes e ao Engenheiro José Carlos Sousa, por proporem e me permitirem realizar um trabalho com significado e importância prática. Espero sinceramente que os resultados obtidos contribuam de alguma forma para o sucesso da empresa.

Sendo este um documento que simboliza o fim do meu percurso académico, aproveitaria para expressar também aqui o meu agradecimento...

À minha família, aos meus Pais e ao meu Irmão, pelo ambiente familiar que desde sempre me proporcionaram para que eu fosse bem-sucedido nos vários desafios da minha vida.

A todas as pessoas que se cruzaram comigo desde que entrei na Faculdade, por de alguma forma contribuírem para a formação da pessoa que sou hoje.

À Rafaela, que mais de perto acompanhou os meus passos nos últimos anos, por sempre acreditar em mim e me contagiar com esse pensamento.





# Índice

<b>RESUMO</b> .....	<b>III</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>V</b>
<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE</b> .....	<b>IX</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>XI</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>XIII</b>
<b>ABREVIATURAS E SÍMBOLOS</b> .....	<b>XV</b>
<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
INTRODUÇÃO .....	1
1.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	1
1.2 - OBJETIVOS E CAMPO DE APLICAÇÃO .....	2
1.3 - ENQUADRAMENTO GERAL .....	3
1.3.1 - <i>O produto Eletricidade</i> .....	3
1.3.2 - <i>Os recursos hídricos e a energia hidroelétrica</i> .....	3
1.3.3 - <i>O valor da água nos aproveitamentos hidroelétricos</i> .....	4
1.4 - ORGANIZAÇÃO DO TEXTO .....	5
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>7</b>
CONTEXTUALIZAÇÃO E ESTADO DA ARTE .....	7
2.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	7
2.2 - ORGANIZAÇÃO DO SECTOR ELÉTRICO .....	8
2.3 - MERCADOS DE ELETRICIDADE .....	10
2.4 - APROVEITAMENTOS HÍDROELÉTRICOS .....	14
2.5 - OTIMIZAÇÃO DA EXPLORAÇÃO DE APROVEITAMENTOS HÍDRICOS .....	18
2.5.1 - <i>Enquadramento temporal</i> .....	20
2.5.2 - <i>Técnicas utilizadas</i> .....	22
2.5.3 - <i>Função objetivo e restrições</i> .....	25
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>29</b>
ALGORITMOS GENÉTICOS .....	29
3.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	29
3.2 - META-HEURÍSTICAS .....	29
3.3 - COMPUTAÇÃO EVOLUCIONÁRIA .....	30
3.4 - OS ALGORITMOS GENÉTICOS .....	31
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>39</b>
DESCRIÇÃO DO PROBLEMA E MODELOS DE ABORDAGEM .....	39
4.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	39
4.2 - DESCRIÇÃO DO PROBLEMA .....	40
4.2.1 - <i>Aspetos gerais</i> .....	40
4.2.2 - <i>Formulação do problema</i> .....	44
4.3 - METODOLOGIA BASEADA EM ALGORITMOS GENÉTICOS .....	48
4.4 - MODELOS CONSIDERADOS .....	52
4.4.1 - <i>Modelo 1</i> .....	52
4.4.2 - <i>Modelo 2</i> .....	53
4.4.3 - <i>Modelo 3</i> .....	54
4.4.4 - <i>Modelo 4</i> .....	54

<b>CAPÍTULO 5 .....</b>	<b>57</b>
APLICAÇÃO DA METODOLOGIA.....	57
5.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	57
5.1.1 - <i>Estruturação dos testes</i> .....	57
5.1.2 - <i>Ferramenta computacional utilizada</i> .....	58
5.2 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E RESULTADOS .....	59
5.2.1 - <i>Modelo 1</i> .....	59
5.2.2 - <i>Modelo 2</i> .....	75
5.2.3 - <i>Modelo 3</i> .....	79
5.2.4 - <i>Modelo 4</i> .....	82
<b>CAPÍTULO 6 .....</b>	<b>87</b>
CONCLUSÕES E PERSPETIVAS DE DESENVOLVIMENTO .....	87
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>91</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>95</b>

# Lista de figuras

<b>FIGURA 2.1</b> - EVOLUÇÃO DA POTÊNCIA INSTALADA EM PORTUGAL E REPARTIÇÃO PERCENTUAL PARA O ANO DE 2010. ....	10
<b>FIGURA 2.2</b> - CRUZAMENTO DAS PROPOSTAS DE COMPRA DE ENERGIA COM AS DE VENDA. ....	11
<b>FIGURA 2.3</b> - EVOLUÇÃO DO PREÇO DE MERCADO PARA PORTUGAL E ESPANHA. ....	13
<b>FIGURA 2.4</b> - REPRESENTAÇÃO DAS VARIÁVEIS DE FLUXO DE ÁGUA CARACTERÍSTICAS DE UMA CENTRAL HÍDRICA. ....	16
<b>FIGURA 2.5</b> - VARIÁVEIS DE FLUXO DE ÁGUA ASSOCIADAS A UM APROVEITAMENTO EM CASCATA. ....	16
<b>FIGURA 2.6</b> - PESO DE CADA UM DOS TIPOS DE CENTRAIS HÍDRICAS EM 2010. ....	17
<b>FIGURA 2.7</b> - CURVAS NÃO LINEARES DA POTÊNCIA EM FUNÇÃO DO CAUDAL PARA DIFERENTES VALORES DE QUEDA. ....	27
<b>FIGURA 3.1</b> - ESQUEMA EVOLUTIVO DE UM ALGORITMO GENÉTICO. ....	33
<b>FIGURA 3.2</b> - ILUSTRAÇÃO DO MECANISMO DE CRUZAMENTO. ....	37
<b>FIGURA 3.3</b> - ILUSTRAÇÃO DO MECANISMO DE MUTAÇÃO. ....	37
<b>FIGURA 4.1</b> - RELAÇÃO ENTRE A POTÊNCIA, O CAUDAL E A QUEDA. ....	42
<b>FIGURA 4.2</b> - RELAÇÃO NÃO LINEAR ENTRE A POTÊNCIA E O CAUDAL PARA VÁRIOS NÍVEIS DE QUEDA. ....	43
<b>FIGURA 4.3</b> - IMPACTO DA PERDA DE CARGA NO VALOR DA POTÊNCIA. ....	43
<b>FIGURA 4.4</b> - FLUXOGRAMA DO CICLO DE FUNÇÕES UTILIZADO PELO PROGRAMA. ....	49
<b>FIGURA 4.5</b> - EXEMPLO DO PROCEDIMENTO DE DESCODIFICAÇÃO UTILIZADO. ....	50
<b>FIGURA 5.1</b> - EXEMPLO DE PERFIL DE PREÇO DE MERCADO. ....	59
<b>FIGURA 5.2</b> - QUADROS COM DADOS DAS POTÊNCIAS DE TURBINAGEM E DE BOMBAGEM, E OS PREÇOS DE MERCADO, UTILIZADOS PARA A METODOLOGIA DESCRITA. ....	61
<b>FIGURA 5.3</b> - ORDENS DE TURBINAGEM E BOMBAGEM ÓTIMAS PARA O PROBLEMA DO MODELO 1. ....	61
<b>FIGURA 5.4</b> - REPRESENTAÇÃO DO MELHOR INDIVÍDUO AO LONGO DE TODO O PROCESSO EVOLUTIVO. ....	62
<b>FIGURA 5.5</b> - REPRESENTAÇÃO DO MELHOR INDIVÍDUO EM CADA GERAÇÃO. ....	62
<b>FIGURA 5.6</b> - ORDENS DE EXPLORAÇÃO PARA A CENTRAL 1. ....	62
<b>FIGURA 5.7</b> - ORDENS DE EXPLORAÇÃO PARA A CENTRAL 2. ....	63
<b>FIGURA 5.8</b> - MELHOR INDIVÍDUO EM TODO O PROCESSO EVOLUTIVO E MELHOR INDIVÍDUO EM CADA GERAÇÃO. ....	63
<b>FIGURA 5.9</b> - ORDENS DE EXPLORAÇÃO PARA A CENTRAL 1. ....	64
<b>FIGURA 5.10</b> - ORDENS DE EXPLORAÇÃO PARA A CENTRAL 2. ....	64
<b>FIGURA 5.11</b> - MELHOR INDIVÍDUO DE TODO O PROCESSO EVOLUTIVO E MELHOR INDIVÍDUO EM CADA GERAÇÃO PARA UMA TAXA DE SELEÇÃO DE 0,7. ....	66
<b>FIGURA 5.12</b> - MELHOR INDIVÍDUO DE TODO O PROCESSO EVOLUTIVO E MELHOR INDIVÍDUO EM CADA GERAÇÃO PARA UMA TAXA DE SELEÇÃO DE 0,8. ....	66
<b>FIGURA 5.13</b> - MELHOR INDIVÍDUO DURANTE O PROCESSO EVOLUTIVO E MELHOR INDIVÍDUO DE CADA GERAÇÃO PARA UMA TAXA DE SELEÇÃO DE 0,7. ....	67
<b>FIGURA 5.14</b> - MELHOR INDIVÍDUO DURANTE O PROCESSO EVOLUTIVO E MELHOR INDIVÍDUO DE CADA GERAÇÃO PARA UMA TAXA DE SELEÇÃO DE 0,8. ....	67
<b>FIGURA 5.15</b> - EVOLUÇÃO DO MELHOR INDIVÍDUO DE SEMPRE E DO MELHOR INDIVÍDUO DE CADA GERAÇÃO. ....	68
<b>FIGURA 5.16</b> - MELHOR INDIVÍDUO DE TODO O PROCESSO EVOLUTIVO E MELHOR INDIVÍDUO DE CADA GERAÇÃO. ....	69
<b>FIGURA 5.17</b> - ORDENS DE EXPLORAÇÃO PARA A CENTRAL 1. ....	70
<b>FIGURA 5.18</b> - ORDENS DE EXPLORAÇÃO PARA A CENTRAL 2. ....	70
<b>FIGURA 5.19</b> - EVOLUÇÃO DO MELHOR INDIVÍDUO DE SEMPRE E DO MELHOR DE CADA GERAÇÃO. ....	71
<b>FIGURA 5.20</b> - EVOLUÇÃO DO MELHOR INDIVÍDUO DE SEMPRE E DO MELHOR DE CADA GERAÇÃO. ....	72
<b>FIGURA 5.21</b> - ORDENS DE EXPLORAÇÃO PARA A CENTRAL 1. ....	72
<b>FIGURA 5.22</b> - ORDENS DE EXPLORAÇÃO PARA A CENTRAL 2. ....	72
<b>FIGURA 5.23</b> - ORDENS DE EXPLORAÇÃO PARA A CENTRAL 3. ....	72
<b>FIGURA 5.24</b> - ORDENS DE EXPLORAÇÃO PARA A CENTRAL 4. ....	73
<b>FIGURA 5.25</b> - DISTRIBUIÇÃO DAS DIVERSAS COMBINAÇÕES DE ACORDO COM O TEMPO DE CÁLCULO E O PROVEITO OBTIDO. ....	74
<b>FIGURA 5.26</b> - DEMONSTRAÇÃO DA RESTRIÇÃO DE VOLUME FINAL. ....	76
<b>FIGURA 5.27</b> - ORDENS DE EXPLORAÇÃO PARA A CENTRAL 1. ....	77
<b>FIGURA 5.28</b> - ORDENS DE EXPLORAÇÃO PARA A CENTRAL 2. ....	77
<b>FIGURA 5.29</b> - ORDENS DE EXPLORAÇÃO PARA A CENTRAL 1. ....	78
<b>FIGURA 5.30</b> - ORDENS DE EXPLORAÇÃO PARA A CENTRAL 2. ....	78
<b>FIGURA 5.31</b> - ORDENS DE EXPLORAÇÃO PARA A CENTRAL 1. ....	80

<b>FIGURA 5.32</b> - ORDENS DE EXPLORAÇÃO PARA A CENTRAL 2.....	80
<b>FIGURA 5.33</b> - CURVAS TÍPICAS DE PROCURA E OFERTA DE ENERGIA.....	82
<b>FIGURA 5.34</b> - ORDENS DE EXPLORAÇÃO PARA A CENTRAL 1.....	83
<b>FIGURA 5.35</b> - ORDENS DE EXPLORAÇÃO PARA A CENTRAL 2.....	83
<b>FIGURA 5.36</b> - ORDENS DE EXPLORAÇÃO PARA A CENTRAL 3.....	84
<b>FIGURA 5.37</b> - ORDENS DE EXPLORAÇÃO PARA A CENTRAL 4.....	84
<b>FIGURA 5.38</b> - INCREMENTOS DE CARGA EM PONTOS DIFERENTES DA CURVA DE OFERTAS DE VENDA.....	86

# Lista de tabelas

<b>TABELA 2.1</b> - QUADRO RESUMO DA CADEIA DE VALOR DO SECTOR ELÉTRICO EM PORTUGAL. ....	8
<b>TABELA 4.1</b> - VARIÁVEIS CONSIDERADAS NOS MODELOS DO PROBLEMA. ....	45
<b>TABELA 5.1</b> - TEMPO DE COMPUTAÇÃO PARA CADA SIMULAÇÃO. ....	63
<b>TABELA 5.2</b> - RESULTADOS MÉDIOS OBTIDOS PARA SIMULAÇÕES DE DIFERENTES VALORES DE TAXA DE SELEÇÃO. ....	65
<b>TABELA 5.3</b> - RESULTADOS DE SIMULAÇÕES PARA DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE TAXA DE SELEÇÃO E DE TAXA DE MUTAÇÃO. ....	67
<b>TABELA 5.4</b> - RESULTADOS MÉDIOS DE SIMULAÇÕES COM DIFERENTES VALORES DE TAXA DE MUTAÇÃO. ....	69
<b>TABELA 5.5</b> - RESULTADO DA REMUNERAÇÃO E DO TEMPO DE COMPUTAÇÃO PARA PROBLEMAS COM DIFERENTE NÚMERO DE CENTRAIS. ....	71
<b>TABELA 5.6</b> - RESULTADOS DE DIVERSAS COMBINAÇÕES DE PARÂMETROS PARA O ALGORITMO. ....	73
<b>TABELA 5.7</b> - RESULTADOS DE UMA SIMULAÇÃO PARA A CENTRAL 1 COM DEMONSTRAÇÃO DA VARIAÇÃO DE ALGUMAS VARIÁVEIS. ....	79
<b>TABELA 5.8</b> - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE PROBLEMAS COM E SEM RESTRIÇÃO DE CARGA. ....	81
<b>TABELA 5.9</b> - ORDENS DE EXPLORAÇÃO PARA A CENTRAL 1 E VARIAÇÃO DO PREÇO HORÁRIO EM MERCADO. ....	85



# Abreviaturas e Símbolos

## Lista de abreviaturas

AG	Algoritmos Genéticos;
AT	Alta Tensão;
BT	Baixa Tensão;
BTE	Baixa Tensão Especial;
CAE	Contratos de Aquisição de Energia;
CMEC	Custos de Manutenção do Equilíbrio Contratual;
CNE	<i>Comisión Nacional de Energia;</i>
DGEG	Direção Geral de Energia e Geologia;
EDP	Energias de Portugal;
ENE	Estratégia Nacional para a Energia;
ERSE	Entidade Reguladora do Sector Energético;
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto;
GA	<i>Genetic Algorithms;</i>
GP	Garantia de Potência;
MAT	Muito Alta Tensão ;
MT	Média Tensão;
SEE	Sistema Elétrico de Energia;
SEN	Sistema Elétrico Nacional;
REN	Redes Energéticas Nacionais;
RND	Rede Nacional de Distribuição;
RNT	Rede Nacional de Transportes;
PRE	Produção em Regime Especial.

## Lista de símbolos

$t_c$	Taxa de cruzamento;
$t_m$	Taxa de mutação;
$t_s$	Taxa de seleção;
$E_1$	Energia hidráulica à entrada de uma turbomáquina;
$E_2$	Energia hidráulica à saída de uma turbomáquina;
$W$	Trabalho produzido no veio de uma turbomáquina;
$H$	Queda bruta num aproveitamento hidroelétrico;
$h$	Queda útil num aproveitamento hidroelétrico;
$\rho$	Massa volúmica;
$g$	Aceleração gravítica;
$Q$	Caudal;
$I$	Número total de centrais hidroelétricas;
$K$	Número total de períodos do horizonte de planeamento;
$\lambda_k$	Preço previsto da energia no período $k$ ;

$P_{T,ik}$	Potência turbinada pela central $i$ , no período $k$ ;
$P_{B,ik}$	Potência bombada pela central $i$ , no período $k$ ;
$vol_{min,i}$	Volume mínimo lançado pela central $i$ ;
$vol_{max,i}$	Volume máximo lançado pela central $i$ ;
$v_{ik}$	Volume da albufeira $i$ , no período $k$ ;
$a_{ik}$	Afluência natural à albufeira $i$ , no período $k$ ;
$q_{T,ik}$	Caudal turbinado pela central $i$ , no período $k$ ;
$s_{ik}$	Caudal descarregado pela central $i$ , no período $k$ ;
$q_{B,ik}$	Caudal bombado pela central $i$ , no período $k$ ;
$\underline{v}_i$	Volume mínimo da albufeira $i$ ;
$\bar{v}_i$	Volume máximo da albufeira $i$ ;
$q_{Tn,i}$	Caudal nominal de turbinagem da central $i$ ;
$q_{Bn,i}$	Caudal nominal de bombagem da central $i$ ;
$h_{Tn,i}$	Queda nominal de turbinagem da central $i$ ;
$h_{Bn,i}$	Queda nominal de bombagem da central $i$ ;
$\delta_i$	Coefficiente de bombagem da central $i$ ;
$v_{iK}$	Volume armazenado na central $i$ , no último período do horizonte de planeamento;
$vol_{f_i}$	Volume final definido para a central $i$ ;
$m$	Índice associado a cada uma das centrais imediatamente a montante da central $i$ ;
$j$	Índice associado a cada uma das centrais imediatamente a jusante da central $i$ ;
$M$	Número de centrais a montante da central $i$ ;
$J$	Número de centrais a jusante da central $i$ .



# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 - Considerações gerais

O objetivo de um Sistema Elétrico de Energia, normalmente complexo e de grande dimensão, consiste em satisfazer a carga pedida em cada instante com níveis adequados de qualidade de serviço e segurança. A satisfação deste objetivo deve ser atingida através do bom aproveitamento dos recursos disponíveis. A importância da energia elétrica é evidente, o que faz com que o estudo dos Sistemas Elétricos de Energia seja uma área largamente divulgada na literatura especializada.

O advento da eletrônica dos computadores foi possivelmente o que de mais revolucionário aconteceu na história da ciência e da tecnologia. Esta constante revolução está a aumentar profundamente a capacidade humana de prever e controlar a natureza, em formas que eram inconcebíveis apenas há meio século atrás. A fusão com paradigmas atualmente aceites pela Biologia permitiram criar uma nova área conceptual que permite desenvolver soluções para diversos problemas através de métodos baseados em processos naturais, a Inteligência Artificial.

A produção de eletricidade por recurso a aproveitamentos hidroelétricos apresenta várias particularidades. A energia primária resulta das afluências que manifestam uma característica estocástica. Desta maneira, a produção de energia elétrica nas centrais hídricas depende da hidraulicidade e da capacidade de armazenamento. Pode acontecer que a água afluyente não fique toda disponível, pois a capacidade de armazenamento depende, por sua vez, dos limites de operação das albufeiras, de retiradas de água para regas e consumos, caudais ecológicos, etc. Aliado a estes fatores existe sempre o risco de descarregamento, já que usualmente a distribuição das afluências ao longo do tempo não é constante, sendo imprevisível e normalmente concentrada em determinados meses. Existe ainda o problema da interdependência entre diversos aproveitamentos hidroelétricos, quando interligados numa cascata, partilhando o mesmo curso de água.

Tradicionalmente, o planeamento da produção elétrica resumia-se a decidir a forma mais eficiente de utilizar os recursos hídricos para reduzir os custos com a produção de origem térmica. Com o advento dos Mercados de Eletricidade, cada produtor tem de gerir os seus ativos de forma independente mas em ambiente concorrencial. Em relação às centrais

hídricas, procurarão obter o máximo proveito através de uma estratégia pautada por previsões dos preços da energia e das afluências, as quais introduzem incerteza ao problema. A decisão de guardar a água para turbinar em períodos mais vantajosos pode parecer evidente. Contudo, aumenta o risco de surgirem elevadas afluências que obriguem a realizar descarregamentos e, conseqüente, perda de energia. Além disso, essa decisão basear-se-ia em previsões de preço que poderiam vir a não se verificar. Desta forma, pode ser formulado o seguinte problema de otimização: como realizar a gestão de um conjunto de aproveitamentos hidroelétricos, tendo em conta o novo paradigma de exploração dos Sistemas Elétricos de Energia, os Mercados de Eletricidade.

### 1.2 - Objetivos e campo de aplicação

O presente trabalho tem como principal objetivo o desenvolvimento de uma ferramenta computacional capaz de gerir um conjunto de centrais hídricas considerando a não linearidade entre a potência, o caudal e a queda, a possibilidade de os grupos realizarem bombagem e o efeito que as propostas de compra e venda de energia têm no preço do mercado. O resultado desta gestão será o planeamento da exploração das centrais que permite obter lucros mais elevados, num horizonte temporal definido. A resolução deste problema complexo estará ao encargo de uma metodologia baseada em Algoritmos Genéticos.

A otimização da exploração dos sistemas hídricos assume cada vez mais importância para as empresas produtoras de energia elétrica pelo valor económico que pode acrescentar, podendo representar proveitos volumosos quando a exploração é realizada de forma adequada. Existe assim grande interesse no desenvolvimento de melhores ferramentas computacionais que contribuam tecnicamente para se adotarem decisões ótimas.

Apesar da intenção que acompanha o estabelecimento de Mercados de Energia relativamente à criação de um regime de concorrência, verifica-se que a maior parte da produção se encontra distribuída por apenas alguns *players*, numa tendência de funcionamento em oligopólio. Deste modo, faz todo o sentido que uma ferramenta de apoio à gestão dos ativos de produção não considere as centrais como *price takers*, uma vez que as propostas que estas apresentadas revelam uma certa influência no preço de fecho do Mercado de Eletricidade.

O principal campo de aplicação da metodologia apresentada neste trabalho ocorre na ajuda à decisão em empresas que possuam centrais hídricas e que tenham de fazer as suas propostas de compra e venda em mercados de eletricidade. Desta forma, a complexidade e especificidade deste problema, a necessidade das empresas operarem a um nível de eficiência máxima, a escassez dos recursos naturais que cada vez mais se tem evidenciado, assim como as preocupações ambientais constituem factores motivadores para o estudo do problema.

Ficam fora do âmbito desta dissertação os estudos que se prendem com:

- Interligação hidráulica de aproveitamentos;
- Horizontes temporais superiores que abarcam o médio e o longo prazo;
- Custos fixos e variáveis decorrentes do funcionamento das centrais;
- Previsão das propostas de compra e venda de energia.

## 1.3 - Enquadramento geral

### 1.3.1 - O produto Eletricidade

Atualmente, é indiscutível a dependência da sociedade em relação à energia elétrica. Nas habitações, nos hospitais, nas escolas ou na indústria, das tarefas mais básicas às mais complexas, a importância da eletricidade é tal que se toma por um bem adquirido. Porém, o elevado nível de qualidade e fiabilidade deve-se à rigorosa e específica estrutura organizativa do sector elétrico.

A eletricidade é um produto com propriedades que o diferenciam de qualquer outro:

- Não tem a capacidade de ser diretamente armazenada em grande escala, pelo que a oferta deve igualar exatamente a procura em cada instante;
- A energia elétrica circula nas linhas e noutros componentes elétricos respeitando leis físicas rígidas, as Leis de Kirchoff;
- A sua procura varia diariamente, semanalmente, mensalmente e até de ano para ano, consoante os ciclos económicos e meteorológicos;
- A potência instalada, quer de produção quer de transmissão, necessária para fazer face aos períodos de maior consumo (ponta), fica subutilizada nos períodos de menor consumo (vazio);
- Existe a necessidade da presença de serviços auxiliares de sistema, assegurando a regulação de frequência e o controlo de tensão;
- Exige a necessidade de possuir potência excedentária para compensar quer aumentos do lado da procura, quer flutuações do lado da produção, como por exemplo, proveniente de energias renováveis sujeitas a uma elevada volatilidade do recurso primário.

Por todas as razões mencionadas, a otimização da operação dos Sistemas Elétricos de Energia, assim com o funcionamento dos Mercados de Eletricidade, apresentam características muito especiais que não devem ser negligenciadas.

### 1.3.2 - Os recursos hídricos e a energia hidroelétrica

A água constitui um recurso natural que o homem utiliza em seu favor para vários fins: abastecimento doméstico de água potável, utilização industrial, produção de energia hidroelétrica, irrigação de campos agrícolas, atividades recreativas e culturais, entre outros. Destas diversas aplicações resultam efeitos que podem ser de diferente natureza, sendo que algumas das utilizações implicam o consumo de uma certa quantidade de água que não é diretamente restituída às fontes de abastecimento iniciais, como por exemplo o abastecimento urbano e a irrigação. Outras utilizações podem não implicar redução da quantidade de água mas apenas a deterioração da sua qualidade ocasionada pela poluição, como por exemplo a resultante do abastecimento a certas indústrias. Outras ainda, como a produção de energia hidroelétrica, não causam praticamente prejuízo nem na quantidade nem na qualidade do recurso utilizado.

O advento da utilização da água, como meio de produção de energia elétrica, ocorreu, a nível mundial, em meados do século XIX e, em Portugal, no final desse século. Até ao início dos anos 30, a hidroeletricidade limitava-se a suprir as necessidades dos consumos locais,

como alimentação de pequenas instalações de iluminação pública e pequenas indústrias. Com o desenvolvimento económico e industrial, após 1930, a energia de origem hídrica ganha uma nova dimensão, voltada para a industrialização. No entanto, é a partir de 1950 que se assiste ao prosperar da energia de origem hídrica com a construção de grandes aproveitamentos hidroelétricos. Mais recentemente surge o Plano Nacional de Barragens com Elevado Potencial Hidroelétrico (PNBEPH) com o objectivo de identificar e definir quais os investimentos mais apropriados em termos de aproveitamentos hidroelétricos entre 2007 e 2020, de forma a atingir um valor de capacidade instalada superior a 7000 MW para este tipo de produção.

A construção de aproveitamentos hidroelétricos, para além da produção de energia eléctrica a partir de uma fonte renovável e endógena, possibilita amenizar problemas decorrentes das utilizações atrás referidas, através de um controlo mais eficiente de cheias, criando albufeiras que podem ser utilizadas para fins múltiplos e, acima de tudo, permite uma melhor gestão deste recurso cada vez mais escasso. Mas, como todas as grandes obras, a construção de grandes aproveitamentos hidroelétricos tem grandes impactes ambientais que é sempre necessário ter em conta, nomeadamente a interrupção dos cursos de água, e a inundação de largas áreas de terreno.

### 1.3.3 - O valor da água nos aproveitamentos hidroelétricos

O planeamento da exploração de centrais hídricas constitui-se como um problema a partir do momento em que o seu recurso primário, a água, tem um valor que varia ao longo do tempo. Tradicionalmente, este valor relacionava-se com o custo decorrente da utilização de centrais térmicas mas, no presente, o valor da água depende das transações de energia ocorridas em mercado. Qualquer que seja a metodologia de otimização aplicada ao problema, se nada for definido a respeito do valor da água, o resultado seria simplesmente o de turbinar o máximo de água possível.

Como se sabe, o preço horário que se obtém no fecho do Mercado de Eletricidade depende tanto da procura de energia (consumo) como da oferta (produção). Cada uma destas parcelas dependerá, por sua vez, de fatores como a sazonalidade do consumo, as condições climatéricas e os preços dos combustíveis. Se for fornecido ao programa que determina o planeamento um perfil de preços (previstos) apenas para o horizonte temporal desse planeamento, e as centrais tiverem as albufeiras cheias, o resultado seria novamente o de turbinar sempre. Porém, se o programa soubesse que no dia seguinte os preços seriam mais elevados, guardaria alguma água para turbinar no dia seguinte. Nessa situação, se a albufeira contivesse pouca água, o programa poderia inclusive bombear quando os preços fossem baixos para poder turbinar quando fossem elevados. Em suma, a metodologia de otimização deverá ter alguma informação sobre o valor do seu recurso para não o desperdiçar.

Pode-se então dizer que o valor da água se traduz no custo de oportunidade que surge das transações de energia resultantes da exploração de uma central hídrica. Por outras palavras, o valor da água corresponderá à vantagem económica que se adquire em manter o bem água e o utilizar num momento futuro mais proveitoso. Apesar de se estabelecer uma possível definição, a análise mais detalhada revelará que o seu tratamento não é simples. Por exemplo, num período futuro poderá parecer muito atrativo para turbinar se o preço previsto de mercado for elevado. Contudo, existe um limite máximo de caudal que cada central é capaz de turbinar. Além disso, a capacidade de armazenamento da albufeira não permite

acumular toda a água que se deseje levando a possíveis descarregamentos, independentemente do seu valor. Desta forma, torna-se difícil avaliar o correto benefício da utilização da água visto que não é possível transformar todo o recurso em energia instantaneamente.

Note-se que esta questão do valor da água terá menos importância quanto mais alargado for o horizonte de planeamento, pois o programa que planeia a exploração das centrais terá acesso a uma grande quantidade de preços para turbinar e bombear, permitindo uma gestão mais segura. Para o planeamento de curto prazo ou se inclui de alguma forma o valor da água ou então é necessário fornecer ao algoritmo informação sobre os limites de armazenamento de água na albufeira no fim do horizonte temporal considerado. Neste último caso, os limites serão fornecidos por um outro programa dedicado ao planeamento da operação num horizonte de médio ou longo prazo.

## 1.4 - Organização do texto

O texto desta dissertação está organizado em seis capítulos. No presente capítulo, Introdução, apresentam-se sucintamente os objetivos da dissertação, a motivação e o campo de aplicação. Faz-se ainda um enquadramento geral da temática onde são expostos alguns assuntos relacionados com esta.

Com o segundo capítulo, Contextualização e Estado da Arte, descreve-se a organização típica do sector elétrico com enfoque nos Mercados de Eletricidade onde se enquadra o problema de planeamento tratado neste trabalho. Apresenta-se também alguma informação relativa a aspetos construtivos e de funcionamento de centrais hídricas. Por fim, apresenta-se o resultado de uma pesquisa sobre os trabalhos que têm vindo a ser realizados relacionados com o tema abordado.

O terceiro capítulo, Algoritmos Genéticos, expõe os conceitos teóricos necessários e mais relevantes para que se possa implementar uma metodologia de otimização baseada em Algoritmos Genéticos.

No quarto capítulo, Descrição do Problema e Modelos de Abordagem, pretende-se fazer uma apresentação matemática do problema e descreve-se a sequência de modelos utilizados para abordar o problema.

O quinto capítulo, Aplicação da Metodologia, reúne e descreve o procedimento utilizado no estudo do problema e os resultados obtidos. São também apresentadas as devidas interpretações obtidas pela análise desses resultados.

Finalmente, no sexto capítulo apresentam-se as conclusões obtidas ao longo de todo o percurso do trabalho e expõem-se algumas perspetivas de desenvolvimento do estudo realizado.

Na parte final deste texto, foram ainda colocados alguns anexos com os dados utilizados para o procedimento experimental.



# Capítulo 2

## Contextualização e Estado da Arte

### 2.1 - Considerações gerais

Os Sistemas Eléctricos de Energia são complexos e de elevada dimensão. O seu objetivo consiste em satisfazer a solicitação de carga em cada instante, com boa qualidade de serviço e em condições aceitáveis de segurança. Para que a energia eléctrica esteja sempre disponível, na altura em que é necessária, pelas diversas necessidades da civilização humana (atividades económicas, de desenvolvimento e de bem-estar social), é fundamental que a operação do sistema seja constantemente planeada [1].

A estratégia que cada empresa assume deve ser baseada em cenários fundamentados relativos ao sector em que a sua atividade se desenvolve. No caso particular das empresas incluídas na cadeia de valor do sector eléctrico, a constante dinâmica das variáveis aliada às mais recentes alterações de paradigma tornam as decisões cada vez mais arriscadas. Portanto, é crescente a necessidade destas empresas se dotarem de meios adequados que possam contribuir para delinear estratégias de maximização de proveitos com aceitável exposição ao risco.

Com o desenvolvimento dos Mercados de Eletricidade e com a possibilidade de concorrência, as empresas têm hoje em dia de encarar os seus investimentos com uma maior racionalidade, quer maximizando os seus recursos, quer otimizando os seus investimentos, sempre com o objetivo de maximizar as receitas. Assim sendo, o recurso a ferramentas matemáticas e computacionais tem sido cada vez mais comum, pois o nível de complexidade dos problemas ultrapassa largamente o empirismo e a capacidade humana [2].

Portugal é um país com uma forte componente hídrica na produção de energia eléctrica. Sendo este tipo de produção um recurso endógeno e renovável, as empresas produtoras têm a responsabilidade e o interesse de desenvolver ferramentas capazes de otimizar a utilização do recurso água de uma forma eficiente.

Apesar da existência de alguns trabalhos a respeito do planeamento de recursos hídricos, as recentes alterações no paradigma do sector, como por exemplo, a introdução de mecanismos de mercado, alteraram o âmbito do problema. Por este motivo, é claramente conveniente que o presente trabalho seja devidamente enquadrado.

## 2.2 - Organização do sector elétrico

Na sua fase inicial, o sector elétrico era formado por redes elétricas de pequena potência e extensão geográfica devido não apenas ao valor diminuto das potências de carga envolvidas, mas também às tecnologias então disponíveis [4]. A grande evolução que se verificou levou à criação progressiva de empresas de elevada dimensão integrando todas as atividades da cadeia de valor do sector. Posteriormente, vários acontecimentos de carácter económico, político e ambiental determinaram a reestruturação do sector com vista à sua liberalização e implementação de mecanismos de mercado.

Existem, assim, as seguintes cinco atividades principais no sector elétrico em Portugal [5]:

**Tabela 2.1** - Quadro resumo da cadeia de valor do sector elétrico em Portugal.

<b>Produção</b>	<p>A produção de eletricidade está sujeita a licenciamento, é desenvolvida num contexto de concorrência e divide-se em dois regimes:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Regime especial: corresponde à produção de eletricidade a partir de fontes endógenas e renováveis (excepto grandes centrais hidroelétricas) e a cogeração;</li> <li>• Regime ordinário: abrange todas as outras fontes, incluindo as grandes centrais hidroelétricas;</li> </ul> <p>A energia produzida nos centros eletroprodutores é entregue à rede de transporte, que a canaliza para as redes de distribuição que, por sua vez, a veiculam até às instalações dos consumidores. Uma parte da energia produzida, nomeadamente a proveniente de energias renováveis, é injetada diretamente nas redes de distribuição de média e alta tensão em função da tecnologia de produção associada.</p>
<b>Transporte</b>	<p>A atividade de transporte de eletricidade é desenvolvida através da Rede Nacional de Transporte (RNT) em alta e muito alta tensão, ao abrigo de uma concessão exclusiva atribuída pelo Estado Português à REN. No âmbito desta concessão atribuída por 50 anos, com início em 2007, a REN é responsável pelo planeamento, implementação e operação da rede nacional de transporte, da infraestrutura associada e de todas as interconexões e outras facilidades necessárias à sua operação. A concessão também prevê que a REN coordene a gestão técnica global do Sistema Elétrico Nacional (programação e monitorização constante do equilíbrio entre a oferta das unidades de produção e a procura global de energia elétrica) para garantir a operação integrada e eficiente do sistema e, bem assim, a continuidade e a segurança do abastecimento de eletricidade. A RNT assegura o escoamento da energia elétrica produzida nas centrais eletroprodutoras até às redes de distribuição, as quais conduzem essa energia até às instalações dos consumidores finais, existindo alguns casos em que estes consumidores (grandes consumidores) estão ligados diretamente à rede de transporte, por questões técnicas e económicas. A rede de transporte está igualmente interligada com a rede espanhola em vários pontos do território nacional, permitindo a realização de trocas de eletricidade</p>



	com Espanha.
<b>Distribuição</b>	A distribuição de eletricidade é feita através da Rede Nacional de Distribuição (RND) em média e alta tensão e das redes municipais de distribuição, em baixa tensão. No caso da RND, a atividade é regulada e é exercida através de concessão atribuída pelo Estado Português à EDP Distribuição. No caso das redes de baixa tensão, a atividade é exercida ao abrigo de contratos de concessão firmados mediante concursos públicos lançados pelos municípios, os quais estão atribuídos na quase totalidade à EDP Distribuição, com exceção de 10 pequenas cooperativas.
<b>Comercialização</b>	<p>A comercialização de eletricidade está aberta à livre concorrência, sujeita apenas a um regime de licenciamento, pelo que os comercializadores podem comprar e vender eletricidade livremente, acedendo às redes de transporte e distribuição mediante o pagamento de tarifas de acesso fixadas pela ERSE.</p> <p>Atualmente, exercem atividade em Portugal os seguintes comercializadores em regime de mercado (tarifa de energia e de comercialização não regulada): EDP Comercial, EGL Energia Iberia, Endesa, Galp Power, Iberdrola, Unión Fenosa Comercial e Fortia (desde Março de 2010).</p> <p>Paralelamente, existe a figura do Comercializador de Último Recurso (CUR), cuja finalidade é de garantir fornecimento de eletricidade aos consumidores, em condições de qualidade e de continuidade do serviço, cobrando a tarifa regulada. Esta função é desempenhada pela EDP - Serviço Universal, S.A. e pelas 10 pequenas cooperativas já referidas. De acordo com o DL 104/2010 de 29 de Setembro, a partir de 01 de Janeiro de 2011 as tarifas reguladas de venda de eletricidade a clientes finais com consumos em MAT, AT, MT e BTE foram extintas, aplicando-se a estes clientes uma tarifa de venda transitória agravada, caso os mesmos não tenham contratado em mercado livre. Assim, as tarifas reguladas apenas continuaram a ser aplicáveis aos clientes com potências contratadas até 41,4 kW. Até ao final de 2012 serão também abrangidos os clientes em BTN</p>
<b>Consumo</b>	Os consumidores são livres de escolher o seu fornecedor, podendo adquirir eletricidade no mercado regulado e no mercado liberalizado.

Verifica-se, desta forma, que existem duas atividades abertas à concorrência, a produção e a comercialização, e duas atividades exercidas em monopólios, o transporte e a distribuição.

Constitui objetivo fundamental das atividades que integram o Sistema Elétrico Nacional (SEN), a disponibilização de energia elétrica em termos adequados às necessidades dos consumidores, quer qualitativa quer quantitativamente, a concretizar com base em princípios de racionalidade e eficiência dos meios a utilizar em todas as atividades que integram o sector elétrico desde a produção de eletricidade até ao seu fornecimento ao consumidor final.

A energia elétrica, constituindo-se como um bem essencial, está sujeita a obrigações de serviço público, da responsabilidade de todos os intervenientes do sector elétrico, de entre as quais se destacam: (i) a segurança, a regularidade e a qualidade do seu abastecimento; (ii) a garantia da universalidade de prestação do serviço; (iii) a garantia da ligação de todos os clientes às redes e (iv) a proteção dos consumidores, designadamente quanto a tarifas e preços.

A todos os intervenientes nas diversas atividades que dinamizam a indústria da eletricidade são assegurados: (i) liberdade de acesso ao exercício das atividades; (ii) não discriminação; (iii) igualdade de tratamento e de oportunidades; (iv) imparcialidade nas decisões; (v) transparência e objetividade das regras e decisões; (vi) acesso à informação e salvaguarda da confidencialidade da informação comercial considerada sensível e (vii) liberdade de escolha do comercializador de eletricidade [4].

Os gráficos seguintes apresentam a evolução da potência instalada em Portugal para produção de energia elétrica e a repartição percentual verificada em 2010 [5].

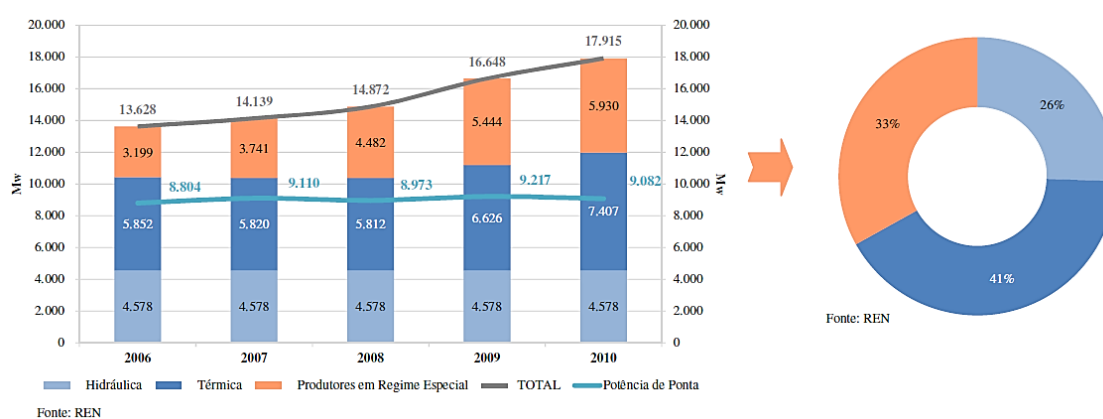


Figura 2.1 - Evolução da potência instalada em Portugal e repartição percentual para o ano de 2010.

Em termos de potência instalada total, verifica-se que no período de 2006 a 2010, se registou uma taxa de crescimento média anual (TMCA) de 7,08%, resultante da combinação de TMCA distintas conforme o tipo de produção: (i) 0,00% na energia hidráulica; (ii) 6,07% na energia térmica; e (iii) 16,68% na Produção em Regime Especial (PRE). Atingiu-se, assim, no final de 2010, um peso de 33,1% da Produção em Regime Especial no total da potência instalada.

Os principais *players* do sector elétrico encontram-se enumerados e descritos em [5].

## 2.3 - Mercados de Eletricidade

Uma das formas de relacionamento entre empresas produtoras, por um lado, e comercializadores ou consumidores elegíveis, por outro, corresponde aos mercados *spot* centralizados, normalmente conhecidos como mercados *Pool*. Este tipo de mercado integra mecanismos de curto prazo com os quais se pretende equilibrar a produção e o consumo através de propostas comunicadas pelos produtores e pelas cargas. São mercados que funcionam para o dia seguinte, sendo por isso normalmente conhecidos por *Day-Ahead*

*Markets* ou Mercados *Spot* de energia elétrica e podem ser simétricos ou assimétricos, voluntários ou obrigatórios [2].

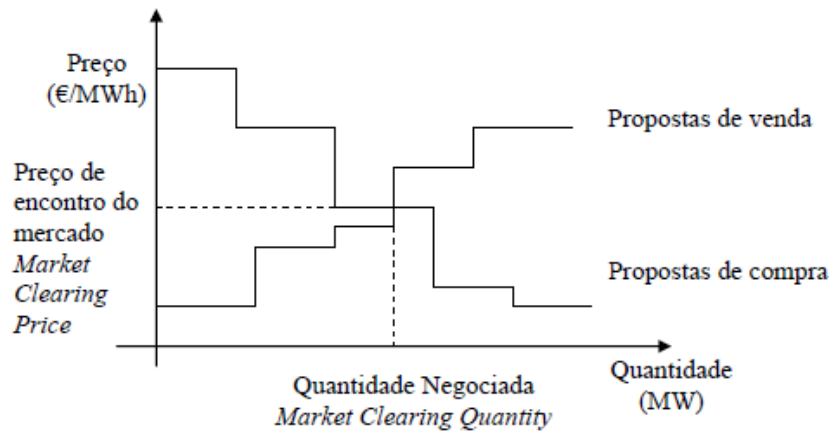


Figura 2.2 - Cruzamento das propostas de compra de energia com as de venda.

As ofertas apresentadas podem ou não incluir condições de complexidade, mas incluem tipicamente o preço e a quantidade disponível. No final, e se o despacho for viável tecnicamente, os geradores são pagos e as cargas pagam o denominado *Market Clearing Price* que corresponde ao preço de encontro de mercado. Os geradores que oferecerem acima desse preço e as cargas abaixo desse preço não serão despachados no mercado. A **Figura 2.2** ilustra este mecanismo de mercado para uma hora ou meia hora do dia seguinte.

A coordenação da exploração do sistema é assegurada pelos Operadores de Mercado e de Sistema. O Operador de Mercado administra o mercado para o dia seguinte e deverá receber propostas de compra/venda de energia elétrica por parte dos agentes autorizados a atuar no mercado. Para cada um dos intervalos de tempo em que o dia se encontra discretizado, o Operador de Mercado organiza as propostas de compra e de venda de forma adequada, de modo a identificar as propostas de venda para as quais existem propostas de compra com preço de compra superior ao preço de venda. O resultado deste encontro corresponderá a uma forma eficiente do ponto de vista económico de alocar a produção à carga [3].

Os despachos puramente económicos obtidos devem em seguida ser comunicados ao Operador de Sistema. Esta entidade realiza um conjunto de estudos para avaliar a viabilidade técnica desses despachos, atendendo, por exemplo, à existência de restrições associadas aos limites de capacidade dos equipamentos. Existindo congestionamentos, o despacho não é viável e terá de ser realizado um mecanismo de ajuste. Se não existirem congestionamentos a exploração do sistema é viável do ponto de vista técnico, seguindo-se a contratação dos serviços auxiliares.

O funcionamento do mercado grossista de eletricidade prevê quatro modalidades de contratação que se caracterizam, segundo a ERSE, da seguinte forma [5]:

- Um mercado de contratação à vista, com uma componente de contratação diária e uma componente de ajustes intradiários, em que se estabelecem programas de venda e de compra de eletricidade para o dia seguinte ao da negociação;
- Um mercado de contratação a prazo, em que se estabelecem compromissos a futuro de produção e de compra de eletricidade. Este mercado pode efetuar liquidação física (entrega da energia), o que se reflete nos volumes de energia transaccionada

no mercado de contratação à vista de forma a permitir a respectiva liquidação, ou liquidação financeira (compensação dos valores monetários subjacentes à negociação);

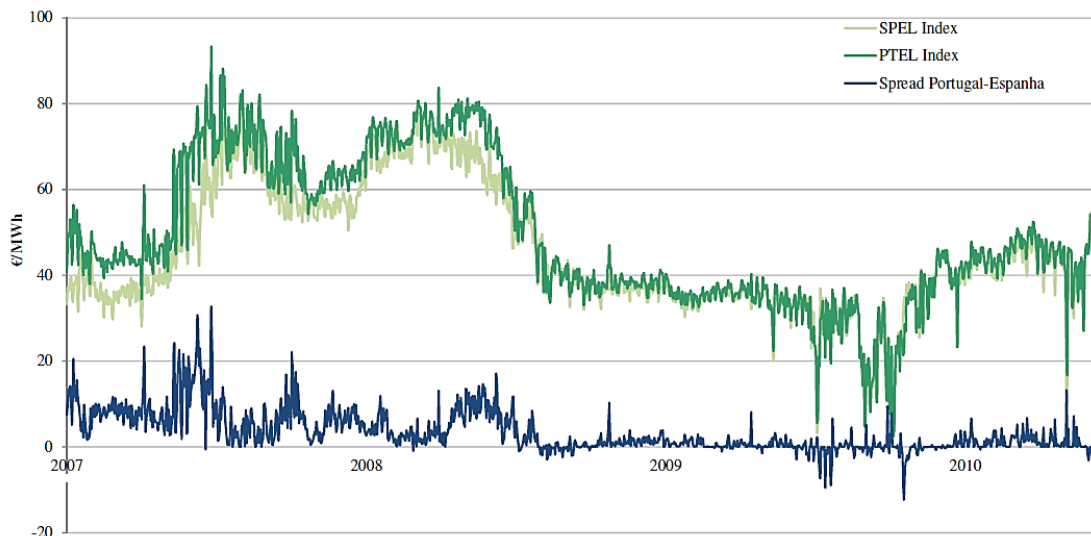
- Mercados de serviços de sistema em que se pretende contratar alguns “produtos” que contribuam para assegurar o funcionamento seguro do sistema;
- Um mercado de contratação bilateral, em que os agentes contratam para os diversos horizontes temporais a compra e a venda de eletricidade.

Do processo de encontro de ofertas podem resultar duas situações [5]:

- Se, do encontro de ofertas (de compra e de venda) resultar um trânsito na interligação que é inferior ou igual à capacidade comercial disponível, o preço de encontro é único para o sistema ibérico, já que tem viabilidade económica (conferida pelo encontro de oferta e procura) e técnica (conferida pela existência de capacidade nas redes para concretizar o despacho económico). Nesta circunstância existe integração de mercado;
- Se, do encontro de ofertas (de compra e de venda) resultar um trânsito na interligação que é superior à capacidade comercial, a solução inicial de mercado não é exequível, pelo que as duas áreas de mercado são tratadas em separado com curvas agregadas de procura e de oferta específicas a cada área. Contudo, na curva de procura para o sistema exportador é colocada uma quantidade correspondente à capacidade comercial na interligação no sentido exportador e, na curva de oferta para o sistema importador consta uma quantidade equivalente. Do encontro das curvas de procura e de oferta agregadas de cada um dos sistemas resultarão os preços para cada uma das áreas de mercado. Nesta situação diz-se que se está em regime de *market splitting*.

O gráfico da **Figura 2.3** apresenta a comparação de preços Portugal/ Espanha no mercado à vista, verificando-se que, desde 01 de Julho de 2007, na maior parte dos casos, o preço em Portugal é superior ao de Espanha (77% das observações), havendo apenas 11% de observações em que o preço de Espanha iguala o de Portugal, de onde se conclui que o regime de *market splitting* tem predominado.

Por outro lado, é notória a tendência de redução do *spread* entre os preços de Portugal e Espanha, o que, de acordo com a ERSE e a *Comisión Nacional de Energia* (CNE), se deve aos seguintes factores: (i) convergência tecnológica em ambos países da margem de reserva, (ii) capacidade de produção conjunta de centrais de ciclo combinado a gás natural e da PRE cresceu em proporções similares nos dois países, o que significa que nos dois sistemas o preço tende a formar-se no limiar de tecnologias semelhantes, gerando uma menor pressão nas interligações e conseqüentemente menos utilização do mecanismo de *market splitting*, e (iii) coincidência no aumento da produção hidráulica e eólica. Em termos históricos, o período de *spread* mais elevado coincidiu com momentos em que o fuelóleo, com custos de produção muito superiores, por exemplo, ao de uma central de ciclo combinado, se posicionou como tecnologia marginal em Portugal [5].



Fonte: OMEL

**Figura 2.3** - Evolução do preço de mercado para Portugal e Espanha.

Uma particularidade deste tipo de mercados está relacionada com a integração das centrais hídricas. Este tipo de centrais pode apostar como se de uma central térmica se tratasse, desta forma tentando substituir a última central térmica que foi despachada. Isto pode significar que os aproveitamentos hidroelétricos obtenham remunerações elevadas com custos muito reduzidos, especialmente se já tiverem sido amortizadas. Esta situação revela-se ainda mais crítica considerando as centrais que tiveram concessões durante períodos regulados.

Outra característica das centrais hídricas resulta do facto de obterem o seu recurso primário com custo que, sob certas salvaguardas, pode ser considerado nulo. Ora se estas centrais apresentassem um preço nulo rapidamente seriam despachadas o que levaria a um esvaziamento completo das albufeiras. Surge então o problema, como referido no Capítulo 1, de como atribuir um valor à água. No entanto, a dificuldade de integrar as centrais hídricas nos mercados não se resume apenas ao valor da água. O facto de existirem aproveitamentos hidroelétricos que se apresentam interligados em cascata, e eventualmente pertencentes a companhias diferentes, faz com que não seja fácil de gerir as centrais hídricas [2]. Outro aspeto está relacionado com o facto de grande parte da produção ser propriedade de poucas companhias. Desta forma, estas empresas poderão conseguir alterar o preço do mercado com as propostas que fazem. Assim, não será de interesse para uma companhia com um grande volume de ativos de produção hídrica apresentar propostas simultâneas de venda de energia de todas as suas centrais se, com esta ação, contribuir para um excessivo abaixamento do preço de fecho do mercado.

Outras características poderiam ser enumeradas em relação a este tipo de mercados. Contudo, não sendo o principal objeto de estudo deste trabalho, apenas se pretendeu fazer um breve enquadramento da realidade em que surge o problema alvo de estudo nesta dissertação.

## 2.4 - Aproveitamentos hídrolétricos

A energia obtida nas grandes barragens resulta do aproveitamento do fluxo das águas que movimentam mecanismos no interior da barragem que estão ligados a geradores, convertendo a energia do movimento em energia elétrica. Este processo recorre a um sistema de turbinas que é atravessado por grandes massas de água, que as fazem mover, acionando alternadores que produzem corrente elétrica.

A água de um rio pode ser acumulada num reservatório através de uma barragem, permitindo criar uma albufeira. Quando se quer produzir energia elétrica, encaminha-se a água do reservatório, por efeito da gravidade, através de um circuito hidráulico para a central elétrica onde estão instaladas uma ou mais turbinas. A energia potencial armazenada na água da albufeira transforma-se assim em energia cinética, devido à velocidade que a água adquire na queda. As turbinas, cujas pás são impulsionadas pelo movimento da água, são máquinas que transformam essa energia cinética em energia mecânica que, por sua vez, atua sobre um gerador elétrico que transforma a energia mecânica em energia elétrica [2].

Os aproveitamentos hídrolétricos podem ser projetados para outras finalidades além da de produção de energia elétrica, como o armazenamento de água para abastecimento doméstico, industrial e para regas, o controlo de cheias, e as atividades desportivas e de lazer.

A classificação dos aproveitamentos hídrolétricos, segundo as características das centrais hídricas e a sua capacidade de armazenamento, é realizada normalmente da seguinte forma [1]:

- 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 aflúncias 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 aflúncias 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 [1]:

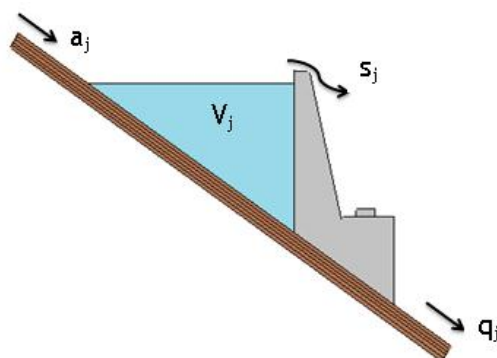
- Cascata - quando os aproveitamentos estão instalados nos mesmos cursos de água, sendo o caudal turbinado, bombado e o descarregado aflúncias do aproveitamento imediatamente a jusante;
- Independentes - quando estão isolados hidráulicamente, apenas interligados do ponto de vista elétrico.

O circuito hidráulico de uma central hídrica é constituído por [6]:

- Câmara de carga ou de pressão - Quando a diferença de cota entre a tomada de água e as turbinas é superior a 15m 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 jactos 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 fluído 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

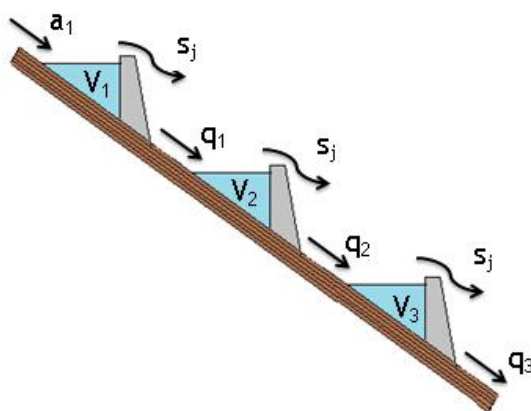
eixo horizontal e o alternador (são instalados muitas vezes em aproveitamentos de muito baixa queda).

Na **Figura 2.4** está representado um sistema muito simplificado onde são expostas algumas das variáveis de fluxo de água relacionadas com o funcionamento de uma central hídrica, em que  $j$  representa o intervalo,  $r_j$  a afluência no intervalo  $j$ ,  $V_j$  o volume de água armazenado no fim do período  $j$ ,  $q_j$  o caudal turbinado no intervalo  $j$ , e  $s_j$  é a descarga de água no intervalo  $j$ .



**Figura 2.4** - Representação das variáveis de fluxo de água características de uma central hídrica.

Para um curso de água com vários aproveitamentos, ou seja, em cascata, teremos:



**Figura 2.5** - Variáveis de fluxo de água associadas a um aproveitamento em cascata

A descarga proveniente de qualquer aproveitamento a montante pode ser considerada que é imediatamente sentida pelo aproveitamento a jusante, ou seja, não existe qualquer atraso entre o caudal de saída de um e a afluência do seguinte. Desta forma, podem-se escrever as seguintes equações de continuidade hidráulica [7]:

$$V_{1j} = V_{1j-1} + (a_{1j} - s_{1j} - q_{1j})n_j \quad (2.1)$$

$$V_{2j} = V_{2j-1} + (q_{1j} + s_{1j} - s_{2j} - q_{2j})n_j \quad (2.2)$$

$$V_{3j} = V_{3j-1} + (q_{2j} + s_{2j} - s_{3j} - q_{3j})n_j \quad (2.3)$$



onde,  $n_j$  representa o número de horas de cada período  $j$ .

O volume de água armazenado num determinado reservatório dependerá quer das suas afluências naturais, quer do volume de água utilizado para produção de electricidade ou de descarga no próprio reservatório e nos localizados a montante deste. Existe, portanto, uma interdependência dos trânsitos numa cascata de tal forma que as decisões que afetem o estado de um reservatório afetarão igualmente os reservatórios a jusante deste. No caso de existir bombagem existirá também outra afetação para os aproveitamentos a montante.

Em termos de capacidade, a potência hidroelétrica instalada em Portugal, no final de 2010, era de 4.578 MW o que representa 25,5% da potência total instalada em Portugal, sendo responsável, em ano médio, pela satisfação de 27,5% do consumo de energia elétrica.

Relativamente ao tipo de centrais hídricas em Portugal verifica-se praticamente uma paridade da potência instalada entre centrais de albufeira e centrais a fio de água (Figura 2.6).

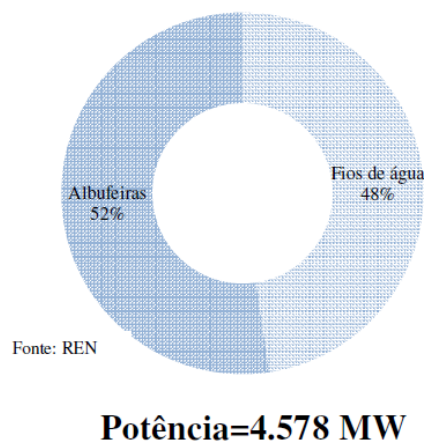


Figura 2.6 - Peso de cada um dos tipos de centrais hídricas em 2010.

O Plano Nacional de Barragens de Elevado Potencial Hidroelétrico insere-se nas políticas governamentais consubstanciadas na Estratégia Nacional para a Energia 2020 (ENE 2020), tendo como objetivo aumentar a potência instalada em centrais hidroelétricas até àquela data em cerca 2000 MW, contribuindo desta forma para o cumprimento do objetivo estabelecido pelo Governo em termos de produção de energia com origem em fontes renováveis para o ano 2020. Assim, prevê-se que a potência instalada ascenda a mais de 7.000 MW.

Como receita, na maior parte das barragens, a tarifa de venda era inicialmente regulada pelos CAE (Contratos de Aquisição de Energia), segundo os quais os produtores recebiam: (i) pagamento de disponibilidade para cobrir custos fixos de operação e de manutenção, amortizações, bem como proporcionar um determinado nível de rentabilidade acionista, independentemente da produção de energia requerida pela REN e (ii) pagamento variável para cobrir custos variáveis da produção de energia. Com a liberalização do mercado, os CAE foram rescindidos, tendo sido criados os CMEC (Custos de Manutenção do Equilíbrio Contratual), segundo os quais os produtores recebem, para além do preço de mercado pela venda de electricidade, compensações designadas por CMEC, que têm por objectivo assegurar a equivalência económica relativamente à posição de cada parte nos CAE. A central do

Alqueva, concessionada à EDP, encontra-se em regime de mercado beneficiando ainda do mecanismo de garantia de potência (GP).

## 2.5 - Otimização da exploração de aproveitamentos hídricos

O planeamento em Sistemas Elétricos de Energia é uma área que normalmente apresenta problemas bastantes complexos, quer seja na produção, no transporte ou na distribuição de energia elétrica. Na maior parte das vezes, existe a necessidade de se dispor de previsões de diversas grandezas, tais como preços de combustíveis, consumo de energia elétrica, aflúncias, ou preços de mercado, sendo por isso uma área caracterizada por alguma incerteza e risco.

O planeamento do sistema eletroprodutor pode ser separado em duas grandes vertentes: planeamento operacional e o planeamento da expansão. Abrange normalmente diferentes escalas temporais (curto, médio e longo prazo), e é um problema que pode envolver diversos critérios de decisão, muitas das vezes contraditórios, como por exemplo a minimização dos custos, versus a maximização da segurança de abastecimento.

No caso da otimização de aproveitamentos hidroelétricos, o planeamento operacional corresponde à definição da estratégia ótima para a colocação da energia disponível, num espaço de tempo que, no curto prazo, poderá ir de um dia até uma semana, enquanto que o planeamento da expansão está relacionado com estudo de novas centrais, ou de novos reforços de potência com horizontes temporais de vários anos. Estes estudos podem ter diversos objetivos, desde minimização de custos, satisfação dos clientes, maximização da segurança de abastecimento e qualidade de serviço, entre outros [2].

A produção de eletricidade através de aproveitamentos hidroelétricos apresenta várias particularidades. A energia primária resulta das aflúncias, que manifestam uma característica aleatória e, se disponível, da bombagem. Desta maneira, a produção de energia elétrica nas centrais hídricas depende da hidraulicidade e da capacidade de armazenamento. Pode acontecer que essa água afluyente não fique toda disponível, pois a capacidade de armazenamento depende dos limites de operação das albufeiras, de retiradas de água para regas e consumos, caudais ecológicos, etc. Aliado a estes factores existe sempre o risco de descarregamento, pois usualmente a distribuição das aflúncias ao longo do tempo não é constante, sendo normalmente concentrada em determinados meses. Esta particularidade leva a que parte da aflúncia possa ser perdida por descarregamento, devido à capacidade limitada de armazenamento. Existe ainda o problema da interdependência entre diversos aproveitamentos hidroelétricos, quando interligados numa cascata, partilhando os mesmos cursos de água.

Assim, a decisão de produzir mais eletricidade a partir da energia hídrica e menos de origem térmica, de modo a poupar combustível, pode resultar em custos de produção mais baixos a curto prazo, mas também pode resultar em custos de produção mais elevados a médio prazo se as aflúncias forem reduzidas. Em contrapartida, usar mais intensamente produção térmica pode resultar em descarregamentos nas albufeiras e conseqüente perda de energia. Desta maneira, pode ser formulado nesta área um problema de otimização com o qual se pretende obter a forma mais adequada de gerir um conjunto de aproveitamentos hidroelétricos, tendo em conta o novo paradigma de exploração dos sistemas elétricos, os Mercados de Eletricidade.

Além da gestão operacional, é também importante realizar estudos de otimização para um ano completo, estimando a remuneração anual prevista para os aproveitamentos hidroelétricos. Assim, é possível avaliar economicamente novas centrais a construir, reforços de potência ou reequipamentos de centrais já existentes. A dificuldade do problema aumenta quando são integrados os Mercados de Eletricidade [2].

A coordenação sistemática da operação de um conjunto de centrais hidroelétricas é normalmente mais complexa do que o planeamento de sistemas integrando apenas centrais térmicas [7]. Isto porque as centrais hidroelétricas podem estar conectadas tanto eletricamente (todas servem a mesma carga) como hidraulicamente (o caudal de saída de uma central pode afetar significativamente a afluência de centrais a jusante desta), e também devido à aleatoriedade das suas afluências.

Tradicionalmente utilizado, o problema de planeamento de coordenação hidrotérmica é formulado como um problema de otimização onde o objetivo consiste em determinar o escalonamento e o pré-despacho de todas as centrais térmicas do sistema de forma a minimizar os custos de produção, garantido a alimentação da carga e uma reserva adequada.

Num ambiente de mercado competitivo, o objetivo das empresas detentoras de ativos de produção hídrica é o de maximizar o valor de produção hidroelétrica para um horizonte de tempo considerado, satisfazendo todas as restrições hidráulicas, e, obrigatoriamente, maximizar os proveitos com a venda da energia. A gestão ótima da água disponível nos reservatórios para produção de energia elétrica, sem afetar a operação futura, representa a maior vantagem para as companhias hidroelétricas competirem.

Uma pesquisa na literatura especializada mostra que o problema do planeamento de recursos hídricos encontra-se bastante explorado por diversos autores. O que se verifica é que, apesar da elevada variedade de documentos sobre o assunto, todos diferem em um ou outro aspeto. Os estudos mais pioneiros que se realizaram, e a grande maioria existente, consideravam a integridade vertical do sistema elétrico. Mais recentemente, o problema tem sido adaptado ao novo paradigma introduzido pela adoção de mecanismos de mercado. A escala temporal também é um factor que pode distinguir os trabalhos, já que uns se dedicam ao enquadramento do problema para um horizonte temporal próximo, e outros o integram num horizonte mais alargado tendo em vista, claramente, objetivos diferentes. Pode também ser feita uma distinção dos trabalhos relativamente às simplificações assumidas. Com efeito, o problema revela-se bastante complexo e exigente pelo que cada autor considera certas variáveis como constantes quando, na realidade, se verifica não ser esta a descrição mais exata. Outros, procedem à linearização de algumas variáveis quando na realidade o seu comportamento é não linear. E, também se verifica que, de modo a tornar o modelo menos exigente, se ignoram algumas variáveis. Por fim, pode-se também distinguir os trabalhos através dos métodos de otimização que têm vindo a ser utilizados. Uns optam por métodos mais tradicionais de otimização, outros por meta-heurísticas, e alguns utilizam modelos mistos.

O problema torna-se complexo devido, principalmente [1]:

- aos efeitos de propagação temporal;
- às incertezas;
- ao efeito que a variação da altura de queda tem na eficiência de operação;
- à configuração hidráulica do sistema;
- ao efeito da bombagem [2].

Nesta dissertação, a complexidade do problema também se deve à consideração do impacto que apresentar propostas em mercado tem no preço de encontro das curvas de oferta de compra e venda de energia.

### **2.5.1 - Enquadramento temporal**

Os sistemas hidroelétricos podem ter topologias muito complexas com vários reservatórios em cascata. Os reservatórios podem ter diferentes capacidades de armazenamento com significativo tempo de deslocação da água o que torna as decisões acopladas entre alguns períodos. Por outras palavras, as decisões assumidas para um intervalo de tempo têm forte impacto no que é possível fazer em períodos seguintes.

Para alguns sistemas com grande capacidade de armazenamento do recurso água, o alcance temporal do planeamento da exploração de centrais hídricas poderá incluir horizontes temporais de alguns anos. Normalmente o problema é decomposto em subproblemas de longo, de médio e de curto prazo, sendo cada um deles resolvido com modelos e técnicas próprias.

#### **Longo e médio prazo**

O problema do planeamento da exploração de aproveitamentos hídricos de longo e médio prazo envolve previsões de longo prazo sobre a disponibilidade de água e a definição de limites para uso desta, para um prazo que depende da capacidade do reservatório [7]. Tipicamente, o alcance deste planeamento vai desde uma semana a um ou vários anos. Para as centrais com capacidade de armazenar o recurso água por várias estações, este problema de planeamento de longo prazo inclui análises meteorológicas e estatísticas das variáveis com significância.

Uma das questões que se coloca para resolução deste problema relaciona-se com definir se a água usada será substituída a uma taxa média obtida pelos dados estatísticos ou se será conveniente considerar o pior cenário possível. No primeiro caso pode ser possível estimar um maior proveito financeiro do uso da água se se turbinar elevados volumes de água quando o preço do mercado for favorável. Se, por outro lado, for assumida uma política preventiva, serão minimizados os riscos de violação de alguma das restrições hidrológicas (por exemplo, caudais ecológicos e caudais para manutenção de outras de atividades existentes).

Em sistemas onde alguns reservatórios têm considerável capacidade de armazenamento, o uso dos recursos a curto prazo tem de estar ligado às estratégias tomadas para um planeamento a médio ou a longo prazo. Mas não é praticável tomar decisões de curto prazo no mesmo modelo que determina decisões para longo prazo devido à modelização da incerteza [16]. O problema deve ser decomposto num planeamento hierárquico onde os modelos com maior alcance temporal fornecem condições fronteira para os modelos de prazo mais curto. O planeamento de longo prazo é normalmente realizado utilizando modelos estocásticos que definem uma estratégia ótima de operação. Para os produtores, os modelos de longo prazo podem ser utilizados para programar os próprios recursos em ambiente de mercado, ou para fazer previsão de preços. Neste último caso, é conveniente utilizar uma modelização completa do sistema [16].

Os modelos de longo prazo têm de usar formulações que agregam os reservatórios não sendo possível fornecer com suficiente rigor metas para os modelos de curto-prazo. Por isso, consideram-se por vezes modelos de médio prazo similares aos de curto prazo mas com um horizonte temporal típico de um ano.

Um ponto importante de ligação entre os modelos hierárquicos corresponde ao custo marginal da água, ou valor da água [16]. Existem dois grandes princípios para ligar os modelos de longo prazo com os de curto prazo: o volume dos reservatórios e o custo dos recursos. Com o primeiro é definido um limite para cada reservatório que servirá de entrada para o modelo de curto prazo. A vantagem desta opção reside na maior flexibilidade aquando da escolha do método matemático para resolução do problema de curto prazo. Porém, surgem vários problemas para os sistemas com aproveitamentos em cascata. Isto porque existe uma dependência hidráulica entre os vários aproveitamentos o que cria dificuldades em controlar, com algum rigor, os limites estabelecidos. O princípio de usar um acoplamento entre os modelos baseado no valor da água revela-se mais interessante. No entanto, neste caso os reservatórios devem ser descritos por funções de valor marginal da água armazenada. Estas funções, representam o valor esperado de armazenar uma unidade adicional de volume de água. Uma grande vantagem deste tipo de modelos resulta do facto de o volume de água turbinado ser função do preço do mercado. Isto também confere mais flexibilidade ao processo de escalonamento e tende a reduzir o número de ciclos de arranque e de paragem.

Nos modelos de planeamento de longo prazo os grupos geradores de uma central são frequentemente agregados em um equivalente. Porém, quando se realiza o escalonamento com o objetivo de identificar a melhor estratégia para cada grupo gerador, a topologia da central não pode ser ignorada. Por exemplo, nas centrais com túneis partilhados todos os grupos contribuem para perdas no circuito hidráulico. A mesma situação se passa para as condutas forçadas comuns para mais do que um grupo produtor. Estas perdas afetam o valor da queda que, por sua vez, limita o valor potência produzida. Portanto, cada grupo produtor, em cada central, deve ter curvas de eficiência individuais para que seja possível contabilizar o máximo e o mínimo de produção assim como a dependência da eficiência com a queda.

### **Curto prazo**

Tradicionalmente, o planeamento da exploração de curto prazo, numa escala temporal de um dia a uma semana, envolvia a alocação dos meios de produção necessários para alimentar a carga ao mais baixo custo possível. Neste problema, a carga, os caudais, os volumes armazenados e as disponibilidades das centrais eram as entradas, assumindo-se, então, conhecidos. Em ambiente de mercado as empresas detentoras de ativos na produção hídrica pretendem obter o máximo lucro através da apresentação de propostas de venda de energia em horas em que o preço de fecho de mercado seja elevado. Se as centrais destas empresas possuírem capacidade para realizar bombagem, então será de interesse apresentar propostas de compra de energia em períodos em que o preço da energia é mais reduzido.

Para o problema de planeamento a curto prazo, com um horizonte de um a sete dias, realiza-se normalmente uma discretização em períodos horários. O problema é tratado como determinístico apesar das entradas dos modelos terem natureza estocástica provenientes de previsões [8]. Em [9], por exemplo, a incerteza de mercado é introduzida no modelo por via de cenários e a aversão ao risco é considerada para limitar a volatilidade dos proveitos previstos. Existem ainda outros autores que recorrem à teoria dos conjuntos difusos de forma

a liderar com esta incerteza. Com este tipo de modelos pretende-se obter uma formulação mais realista e mais próxima da estratégia desejada por uma empresa sujeita ao risco de mercado.

Na exploração de um sistema hidroelétrico complexo, num mercado competitivo, os riscos operacionais e financeiros são elevados. Tradicionalmente, o principal objetivo do operador de sistema consistia em assegurar um fornecimento estável de energia elétrica cumprindo restrições físicas e operacionais. O principal critério de decisão era o de assegurar a disponibilidade de capacidade de produção suficiente para dar resposta à solicitação de carga e respeitar as restrições do sistema. Teoricamente falando, num mercado de energia competitivo existe um preço horário para a transação da energia sendo estes preços os principais fatores a considerar para a operação das centrais [10].

Os autores em [8] resolvem o problema do planeamento de produção de centrais hídricas para curto prazo considerando um sistema em cascata, ou seja, com vários aproveitamentos no mesmo curso de água, e não desprezando o efeito da variação da queda. Nesse trabalho, o modelo proposto considera que a produção de uma central é dependente do caudal turbinado e da queda, e que a potência máxima que se pode produzir é afetada pela variação da queda. Este modelo procura otimizar a exploração das centrais hídricas em ambiente de mercado recorrendo a programação não-linear.

Em [11] procura-se realizar o planeamento ótimo de uma central com vários grupos geradores considerando os custos decorrentes do arranque de um grupo, utilizando previsões de preços da eletricidade e de afluências. O modelo apresentado considera o efeito de variação da queda através de uma técnica de linearização que se revela mais eficiente que as que têm sido descritas na literatura. Neste modelo as companhias são consideradas *price-takers* que pretendem otimizar a operação de uma central para um horizonte de um dia a uma semana.

Os custos causados pelo do arranque dos grupos geradores e o seu impacto no planeamento de curto prazo da operação das centrais são também estudados em [13]. Estes autores identificaram como principais aspetos a considerar nos custos de arranque a perda de água durante a manutenção, os desgastes mecânicos dos equipamentos durante o arranque, os desgastes das estruturas devido à variação de temperatura durante o arranque, a perda de água durante o arranque e as avarias no arranque das máquinas. No entanto, admitem a complexidade e dificuldade de calcular com algum rigor todos estes custos.

O principal desafio associado a este problema de planeamento de curto prazo consiste em identificar um bom equilíbrio entre a eficiência das centrais hídricas e os recursos disponíveis incluindo uma sequência de escalonamento ótima. Este problema corresponde então a um problema não linear com dependência de estados introduzida pela relação entre reservatórios e as variáveis de decisão. Um exemplo destas dependências corresponde a eficiência da central que depende do valor da queda que, por sua vez, depende do volume do reservatório. Este, por sua vez, depende de variáveis de decisão que o modelo irá disponibilizar [16].

### 2.5.2 - Técnicas utilizadas

O problema de planeamento de operação de centrais hídricas é um problema de otimização de larga escala que tem recebido bastante atenção por parte de académicos e empresas intervenientes no sector elétrico. A literatura inclui publicações utilizando várias técnicas para resolver este problema: programação não linear [1][8][9][16], programação

linear [1][10], programação linear inteira mista [11][12][20], enxames de partículas [15][18], redes neurais [17], Algoritmos Genéticos [19], entre outros.

Apesar das características de todos os métodos serem diferentes, todos são propostos com o objetivo de diminuir os requisitos de memória e de reduzir o tempo de computação com que se obtém uma boa estratégia de exploração.

### **Programação não linear**

Os modelos baseados em programação não linear foram utilizados em vários estudos como em [8]. Estes modelos não lineares têm muitas vantagens relativamente aos lineares pois exprimem de forma mais apurada e realista as características de um sistema hídrico. Os modelos do problema resolvidos por programação linear consideram que a potência produzida por um aproveitamento é linearmente dependente do caudal turbinado, ignorando o efeito da variação da queda para evitar as não linearidades.

Em [8] pretende-se mostrar a melhor eficiência de um modelo de programação não-linear aplicado a um sistema realista de reservatórios em cascata em relação aos modelos clássicos que não consideram a variação da queda.

Porém, os modelos não lineares podem não conseguir evitar descargas de água em períodos proibidos e podem gerar ordens para turbinar que sejam inaceitáveis do ponto de vista de operação [9]. Além disso são muito complexos e de lenta resolução.

### **Programação linear**

A programação linear tem sido bastante aplicada em problemas de planeamento de recursos hídricos visto que existe uma grande variedade de implementações comerciais de código. O modelo de fluxo de rede aplicado a estes problemas corresponde a uma aproximação natural ao problema que é normalmente resolvido por linearização, tirando partido da estrutura do sistema hídrico [8].

No entanto, 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.

### **Programação dinâmica**

A programação dinâmica encontra-se entre os métodos mais aplicados ao problema de planeamento de curto prazo [9]. Contudo, a aplicação direta de programação dinâmica em sistemas hídricos em cascata é impraticável devido à maldição da dimensionalidade. Em [14] é apresentado um modelo de planeamento de longo prazo para uma central hídrica em que os autores concluem que a aplicação daquele modelo a um sistema com alguma dimensão iria aumentar o tempo de computação consideravelmente.

### **Programação linear inteira mista**

O problema de planeamento de operação apresenta uma estrutura não linear inteira mista o que o torna de muito difícil resolução com as técnicas matemáticas tradicionais [11]. No entanto, *software* recente de programação não linear inteira mista tem permitido atingir

níveis de alta eficiência, tanto em termos da precisão de solução como de tempo de computação. O modelo proposto em [11] permite representar eficazmente as principais características técnicas e de operação de uma central hídrica com capacidade de bombagem, tornando o problema computacionalmente solucionável para um horizonte de uma semana. Para esse trabalho são consideradas diversas características não lineares como rampas de transição de estados, modo de operação em bombagem e o efeito da queda, a partir da sua linearização.

### **Redes Neurais**

Assim que uma rede tenha sido adequadamente treinada, estas metodologias permitem obter de imediato uma nova geração de escalonamento correspondendo a um novo cenário de operação. Contudo, a rede deverá ser treinada de novo se ocorrerem alterações significativas do modelo ou dos cenários de operação.

### **Particle Swarm Optimization (PSO)**

O algoritmo PSO devido à sua simplicidade, rápida convergência, entre outras características, tem sido largamente utilizado para otimizar funções, treinar redes neurais artificiais, etc [18]. Tem sido desenvolvido rapidamente nos últimos anos e tem-se tornado um tópico de estudo internacional no campo da Computação Evolucionária.

Dentro de todos os métodos estocásticos de pesquisa, o PSO produz uma resposta aceitável num reduzido tempo de computação [15]. Este algoritmo inicia a otimização com um grupo de partículas construídas de forma aleatória e depois faz evoluir as partículas de acordo com determinadas regras de movimento. O movimento de cada partícula inclui uma componente dada pela inércia que esta adquiriu, outra componente de memória e outra de cooperação. Em [15], cada partícula é modelizada de modo a incluir informação sobre a produção térmica, hídrica, a taxa de descarga ou o volume do reservatório. Este trabalho mostra que a utilização de uma metodologia PSO consegue produzir melhores resultados que as técnicas de otimização tradicionais quando aplicadas a problemas de natureza combinatória.

### **Algoritmos Genéticos**

Os Algoritmos Genéticos são técnicas globais de pesquisa e representam uma ferramenta poderosa para resolução de problemas de otimização baseando-se nos mecanismos naturais de seleção genética. Estes algoritmos pesquisam uma solução ótima para o problema por manipulação de uma população de *strings* que representam diferentes potenciais soluções, cada uma correspondendo a um ponto no espaço de pesquisa. Nos Algoritmos Genéticos, cada parâmetro é representado por uma estrutura em *string*. Isto é similar à estrutura dos cromossomas nos genes naturais. Um grupo de *strings* é denominado de população. Uma população quando mutada e/ou cruzada produz uma nova geração. Cada geração é avaliada pela função de adaptação (*fitness function*) e os indivíduos (*strings*) com maior adaptação têm mais hipóteses de serem transmitidos à próxima geração [19].

Os Algoritmos Genéticos tornam-nos diferentes das restantes técnicas de pesquisa devido a vários aspetos. Ao trabalharem com um conjunto de indivíduos em paralelo, os Algoritmos



Genéticos reduzem a possibilidade de ficarem presos em mínimos locais. Em vez de inspecionarem apenas um caminho em cada pesquisa, estes algoritmos inspecionam vários em cada iteração. Outro aspeto relevante deve-se ao facto dos Algoritmos Genéticos trabalharem com uma codificação dos parâmetros em vez dos próprios parâmetros. A codificação dos parâmetros ajuda o operador genético a passar de um estado para outro com o mínimo peso de computação. Uma outra vantagem destas metodologias resulta de não existir necessidade de utilizar derivadas ou outros dados adicionais. O espaço de pesquisa é explorado, nomeadamente, nas zonas onde a probabilidade de obter melhores resultados se mostra mais elevada [19].

Esta meta-heurística será estudada de forma mais profunda em outro capítulo desta dissertação visto ser a ferramenta computacional de otimização que foi utilizada para resolução do problema de planeamento da exploração de centrais hídricas a curto prazo tratado neste trabalho.

### 2.5.3 - Função objetivo e restrições

#### Função objetivo

Para um sistema hidroelétrico com significativo armazenamento interanual, o principal objetivo do problema de planeamento consiste em garantir a alimentação do consumo solicitado e depois procurar o *trade-off* mais adequado entre os benefícios expressos pelos proveitos obtidos com a venda de energia a curto prazo e o potencial esperado a médio prazo dos recursos expresso pelo valor marginal da água armazenada nos reservatórios [10]. O valor marginal da água e valores limite para uso da água são predeterminados por estudos de planeamento de longo prazo.

O objetivo do problema de coordenação hidrotérmica, utilizado em sistemas integrados, consiste em minimizar o custo de produção térmica satisfazendo as restrições hídricas e térmicas [15]. Os trabalhos desenvolvidos sobre o planeamento de operação de centrais hídricas em sistemas integrados com gestão centralizada utilizam como função objetivo a minimização das funções custo da produção térmica considerando a disponibilidade de produção hídrica.

Num modelo de planeamento de curto prazo baseado nos proveitos obtidos no mercado diário, o objetivo é o de maximizar o proveito da empresa através da venda de energia no mercado de eletricidade [8]. A função objetivo a maximizar pode ser expressa por:

$$Max \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \lambda_k p_{ik} + \sum_{i=1}^I \Psi_i (v_{ik}) \quad (2.4)$$

O primeiro termo refere-se às receitas de cada central no sistema hídrico durante o horizonte temporal considerado e o último termo expressa o valor futuro da água armazenada no reservatório na última hora  $K$ . Como referido anteriormente, o problema de determinar o valor futuro da água armazenada é já por si um problema muito complexo pelo que a função objetivo apresentada pode incluir apenas o primeiro termo, relativo às receitas, e serem impostos limites de volume para a operação que resultaram de um problema de planeamento de longo prazo.

Em [1] é considerada uma função objetivo semelhante ao primeiro termo da expressão apresentada. O segundo termo não é considerado visto que, como já salientado anteriormente, a atribuição de um valor ao recurso existente pode ser substituída pela definição de limites de volumes a turbinar, dados por estudos económicos de longo prazo. Ainda nesse documento, ao invés de ser utilizado o valor da energia transacionada em mercado, é utilizado o custo de produção da mesma quantidade de energia se esta fosse gerada numa central térmica. Aliás, esta é prática comum nos trabalhos que não enquadram o problema no ambiente competitivo estabelecido pelo mercado da eletricidade.

Outra variante de função objetivo para o problema de planeamento é apresentada em [2]. Neste caso, a função objectivo procura maximizar os proveitos de venda de energia em mercado considerando a possibilidade de comprar energia para realizar bombagem e atribuindo uma penalidade à solução no caso de ocorrer descarga de água. Tradicionalmente, a capacidade de uma central de realizar bombagem mostrava-se vantajosa para criar uma coordenação hidrotérmica com claros benefícios económicos para o sistema integrado. Em ambiente de mercado, a possibilidade de comprar energia para realizar bombagem e acumular água nas albufeiras revela-se também, apesar de ser utilizada de forma diferente, um importante benefício económico avaliado no projeto de novas centrais.

Os autores de [17] propõem uma função objetivo que apenas procura maximizar o valor de produção das centrais hídricas sem utilizar qualquer critério económico. Esta formulação do problema é utilizada por outros autores mas revela-se excessivamente simplista. Com efeito, esta abordagem seria mesmo pouco adequada para um sistema integrado com despacho centralizado visto que as centrais térmicas apresentam uma curva de custo não linear, sendo interessante poder utilizar as centrais hídricas quando as térmicas estão a funcionar numa zona de custo elevado. Nesse documento, os autores acabam ainda por incluir na função objetivo uma parcela referente à garantia de existência de um volume de água no reservatório para atividades de irrigação, em que cada parcela é ponderada por um determinado peso.

Os custos de arranque podem também estar incluídos na função objetivo. Em [20] os autores definiram uma função objetivo que procura maximizar as receitas de cada central, minimizar os custos de arranque e considerar o valor futuro da água armazenada. Os custos de arranque são considerados constantes e dependentes do tipo de central, e são atribuídos a desgastes dos equipamentos mecânicos e problemas nos equipamentos de controlo.

## Restrições

### *Restrições hídricas*

O valor ótimo da função objetivo é obtido considerando restrições de igualdade e de desigualdade ou simples limites nas variáveis [8]. As decisões são normalmente discretizadas em períodos horários.

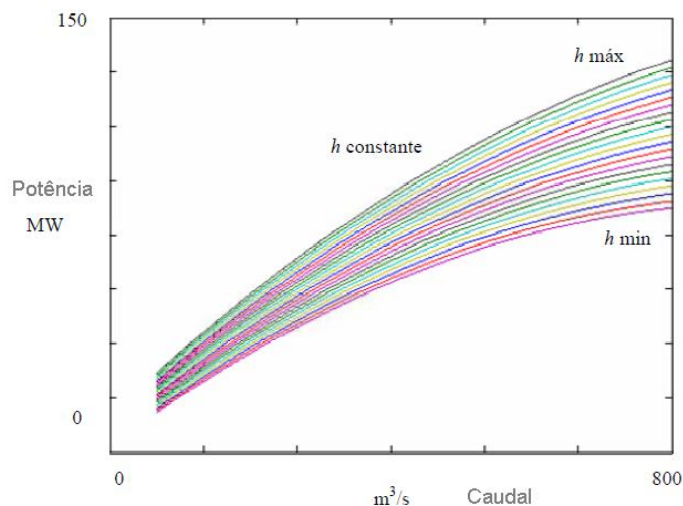
Em [8] é formulada uma equação de balanço da água para cada reservatório do sistema tal como ( 2.5 ). Nesta equação  $v_{ik}$  representa o volume da central  $i$  no período  $k$ ,  $a_{ik}$  a afluência da central  $i$  no período  $k$ ,  $q_{ik}$  o caudal turbinado pela central  $i$  no período  $k$ ,  $s_{ik}$  o caudal descarregado pela central  $i$  no período  $k$ , e o índice  $m$  refere-se às centrais localizadas a montante da central  $i$  e  $M$  é o número de centrais a montante.

$$v_{ik} = v_{i,k-1} + a_{ik} + \sum_{m \in M} (q_{mk} + s_{mk}) - q_{ik} - s_{ik} \quad \forall i \in I, \forall k \in K \quad (2.5)$$

Nesse trabalho, assumiu-se que o tempo necessário requerido para a água passar de um reservatório mais abaixo é inferior a um período horário. Repare-se que a expressão anterior não considera a realização de bombagem. Mais à frente será apresentada uma outra que faz essa consideração. Ainda em [8], o modelo considerado utiliza uma expressão da potência produzida em função do caudal turbinado e da eficiência da conversão ( 2.6 ). Nesta expressão  $p_{ik}$  é a potência produzida pela central  $i$  no período  $k$ ,  $\eta_{ik}$  é o rendimento de conversão da central  $i$  no período  $k$  que depende da altura da queda  $h_{ik}$ .

$$p_{ik} = q_{ik} \eta_{ik}(h_{ik}) \quad \forall i \in I, \forall k \in K \quad (2.6)$$

A eficiência é expressa como o quociente entre a potência gerada e o caudal turbinado, que variará com a queda. A característica de produção hídrica pode ser graficamente representada por uma família de curvas não lineares. Cada curva é referente a um valor específico de queda tal como se ilustra na **Figura 2.8**. Em [12] é apresentada uma abordagem em que as curvas não lineares do efeito da queda são linearizados por segmentos, permitindo a utilização de heurísticas lineares.



**Figura 2.7** - Curvas não lineares da potência em função do caudal para diferentes valores de queda.

Centrais com uma pequena capacidade de armazenamento são conhecidas como centrais a fio-de-água. Devido à sua reduzida capacidade, a eficiência de operação a produção é sensível à queda.

Em [20], para todas as centrais, a relação entre a queda do reservatório, a água turbinada e a potência de saída é simplificada pela representação de apenas algumas curvas, nomeadamente, correspondentes a um baixo, médio e alto nível do reservatório. Para considerar as não linearidades das curvas de forma simples é utilizada uma linearização destas curvas através de segmentos de reta.

A queda é considerada em [8] como função do nível do reservatório superior e do nível do reservatório inferior que por sua vez dependem do volume de água armazenada em cada um.

O volume de água armazenada em cada reservatório tem limite inferior e superior tal como se indica em ( 2.7 ) [8], onde  $\underline{v}_i$  e  $\bar{v}_i$  representam, para a central  $i$ , os limites de volume inferior e superior, respetivamente.

$$\underline{v}_i \leq v_{ik} \leq \bar{v}_i \quad \forall i \in I, \forall k \in K \quad (2.7)$$

Para a água turbinada é considerado um valor nulo para mínimo, mas o limite superior pode ser diferente em cada hora  $k$  de acordo com o valor da queda tal como se indica em ( 2.8 ).

$$0 \leq q_{ik} \leq \bar{q}_i(h_{ik}) \quad \forall i \in I, \forall k \in K \quad (2.8)$$

A água que é descarregada sem aproveitamento apresenta um limite mínimo nulo correspondendo a ( 2.9 ).

$$s_{ik} \geq 0 \quad \forall i \in I, \forall k \in K \quad (2.9)$$

Estas descargas podem ocorrer sem que o armazenamento máximo de água atinja o seu limite máximo como medida de segurança.

Finalmente, em [17] são também incluídas restrições relativas a níveis mínimos para atividades de irrigação e de recreio uma vez que grande parte dos aproveitamentos hídricos possui outros objetivos além do de permitir armazenar água para produção de energia elétrica. Os autores desse trabalho aprofundam um pouco a questão da inclusão destas restrições. Com efeito, os limites mínimos para irrigação poderão por vezes não permitir obter uma solução para o problema que origine proveitos. Estes autores propõem incluir na função objetivo uma parcela referente à irrigação, sendo que todas as parcelas da função objetivo são afetadas por pesos que procuram representar um *trade-off* entre produção de energia e garantia de água para outras atividades.

Baseada nos vários trabalhos enunciados, será apresentada no Capítulo 4 uma formulação para o problema do planeamento da exploração de centrais hídricas a curto prazo, em ambiente de mercado.

# Capítulo 3

## Algoritmos Genéticos

### 3.1 - Considerações gerais

Várias têm sido as metodologias aplicadas aos problemas de otimização do planeamento da exploração de centrais hídricas. Algumas delas foram já brevemente descritas no capítulo anterior deste texto. Verifica-se que a complexidade do problema justifica esta variedade de abordagens, pois nenhuma se revelou claramente superior a todas as outras. Enquanto que certos métodos se apresentam superiores relativamente ao tempo de computação, outros são os que apresentam mais precisão e robustez dos resultados. Uns exigem que sejam realizadas determinadas simplificações ao problema para o resolver, mas outros mostram-se mais capazes de lidar com a complexidade dos modelos.

Nas décadas de 50 e de 60 do século passado vários cientistas ligados à computação estudaram, em iniciativas independentes, sistemas evolucionários com a ideia de que a evolução poderia ser usada como ferramenta de otimização para problemas de engenharia. A ideia associada a todos estes sistemas era a de fazer evoluir uma população de soluções candidatas para determinado problema, recorrendo a operadores inspirados na diversidade genética e na seleção natural.

Estando estabelecido o objetivo de aplicar uma metodologia baseada em Algoritmos Genéticos para a resolução do problema estudado nesta dissertação, pretende-se com este capítulo aprofundar alguns conhecimentos teóricos a respeito deste tipo de meta-heurística.

### 3.2 - Meta-Heurísticas

Uma meta-heurística pode ser definida como um processo de geração iterativo que guia uma heurística subordinada por combinação inteligente de diferentes conceitos de exploração e aprofundamento de espaços de pesquisa utilizando estratégias de aprendizagem para estruturar a informação de forma a encontrar eficientemente soluções próximas do ótimo [28]. Por outras palavras, as meta-heurísticas correspondem a uma classe de métodos de aproximação que estão direcionados para a resolução de problemas de natureza combinatória onde as heurísticas clássicas mostram falhas para os resolver, e de forma eficiente. A otimização combinatória corresponde ao estudo matemático de encontrar uma combinação

ótima, agrupamento, ordenação, ou seleção discreta de objetos usualmente finitos em número. Estes problemas são normalmente fáceis de descrever mas difíceis de resolver.

As meta-heurísticas fornecem um conjunto de ferramentas que permitem criar métodos híbridos combinando diferentes conceitos derivados de heurísticas clássicas, inteligência artificial, evolução biológica, sistemas neuronais, fenômenos geológicos e mecânicas estatísticas. Esta família de aproximações inclui *Genetic Algorithms*, *Greedy Random Adaptive Search*, *Tabu Search*, *Artificial Neural Networks*, *Threshold Algorithms*, *Simulated Annealing Algorithm*, entre outros [28].

De notar, que existem demonstrações teóricas da convergência de algumas meta-heurísticas se acompanhadas de determinadas considerações iniciais. No entanto, estas considerações não podem ser satisfeitas ou aproximadas na maioria das aplicações práticas. Assim, a possibilidade de provar a otimalidade fica prejudicada e as soluções obtidas são em geral aproximações. Apesar disso, as meta-heurísticas têm sido altamente bem-sucedidas na pesquisa de soluções ótimas, ou perto das ótimas, para muitos problemas práticos de otimização em diversas áreas, funcionando melhor que as suas heurísticas subordinadas [28].

### 3.3 - Computação Evolucionária

A Computação Evolucionária inspira-se nos paradigmas da evolução biológica atualmente aceites, embora não se deixe limitar pelas realizações biológicas [25], e constitui uma importante categoria das heurísticas de pesquisa [28].

A evolução Darwinista traduz intrinsecamente um mecanismo de otimização e pesquisa robusta. Os organismos vivos demonstram, um comportamento complexo otimizado a todos os níveis: a célula, o organismo, o indivíduo, e a população. Os problemas que as espécies biológicas solucionaram no sentido da sua sobrevivência e adaptação foram originados pelo caos, oportunidade, temporalidade, e interatividade [27]. Muita inspiração pode ser retirada dos modelos biológicos para aplicar a problemas que provaram ser especialmente intratáveis com os métodos clássicos de otimização e que aparecem rotineiramente na área dos Sistemas Elétricos de Energia.

A evolução natural revela ser um processo hipotético de otimização baseado numa população que enfrenta a sobrevivência e a adaptação. Simular este processo num computador resulta numa técnica de otimização estocástica que oferece frequentemente melhores resultados que os métodos tradicionais de otimização, quando aplicado a problemas reais [27].

A primeira vantagem da Computação Evolucionária é a simplicidade conceptual. O algoritmo consiste numa etapa de inicialização, que pode ser uma amostra puramente aleatória de soluções, seguida de uma iterativa variação e seleção baseadas num índice de performance. A comunidade da Computação Evolucionária usa vulgarmente o termo algoritmo evolucionário para descrever os paradigmas que utilizam modelos computacionais para simular processos evolucionários. Todos esses paradigmas partilham a base conceptual de simular a evolução via processos de seleção recorrendo a certos operadores genéticos [30].

É importante notar que o campo da Computação Evolucionária é apenas uma pequena parte de um universo científico muito complexo que incorpora também, por exemplo, os sistemas difusos e as redes neuronais artificiais, sendo referido por alguns autores como Inteligência Computacional [26].

Qual o interesse de Algoritmos Evolucionários em Sistemas Elétricos de Energia? Estas abordagens têm-se mostrado adaptadas para lidar com problemas que normalmente representam verdadeiros pesadelos para os investigadores: variáveis inteiras, funções não-convexas, funções não diferenciáveis, domínios não conectados, funções com mau comportamento, múltiplos ótimos, informação difusa. Além disso, estes algoritmos não estão necessariamente limitados a lidar com modelos matemáticos, permitindo a construção de modelos híbridos que incluem conhecimentos sob a forma de regras. Esta complexidade é o que é necessário para construir modelos para os sistemas elétricos com maior proximidade à realidade. Em situações muito complexas, estes são por vezes a única ferramenta prática disponível para obter uma otimização global [26].

Neste quadro geral, os diversos métodos de Computação Evolucionária distinguem-se uns dos outros, fundamentalmente, no seguinte [25]:

- na forma de representação (cromossoma) de uma solução ou indivíduo;
- na forma de decodificação dos cromossomas;
- na forma de efetuar a seleção;
- na forma de efetuar a reprodução (ou geração de novos indivíduos).

É geralmente aceite que qualquer Algoritmo Evolucionário para resolver um problema deverá incluir cinco componentes básicas [28]:

- uma representação genética de soluções do problema;
- uma forma de criar uma população inicial de soluções;
- uma função de avaliação, organizando as soluções em termos de adaptação;
- operadores genéticos que alteram a composição dos novos indivíduos durante a reprodução;
- valores para os parâmetros (dimensão da população, probabilidade de aplicar operadores genéticos, etc.)

### 3.4 - Os Algoritmos Genéticos

Os Algoritmos Genéticos (AG) foram concebidos por John Holland na década de 60 do século XX, e foram desenvolvidos por este e pelos seus alunos e colegas na Universidade de Michigan. Em contraste com as Estratégias de Evolução e a Programação Evolucionária (técnicas de otimização baseadas em processos biológicos introduzidas por outros investigadores nessa mesma altura) o principal objetivo de Holland não era o de construir algoritmos para resolver problemas específicos, mas estudar formalmente os fenómenos de adaptação como ocorrem na natureza e desenvolver formas de os recriar nos sistemas computacionais [29].

Otimização é o conceito básico por trás da aplicação de Algoritmos Genéticos, ou qualquer outro algoritmo evolucionário, em qualquer campo de interesse. As técnicas de otimização tradicionais iniciavam-se com um único candidato enquanto que os Algoritmos Genéticos recorrem a uma população de candidatos para pesquisar em diversas áreas do espaço de soluções, simultaneamente [27].

Os Algoritmos Genéticos são um método da família evolucionária e, portanto, quanto ao princípio geral não apresentam segredos e não diferem essencialmente das Estratégias de Evolução e da Programação Evolucionária. O elemento diferenciador original foi, na verdade,

o conceito de cromossoma como representação binária das soluções e esse elemento constitui-se num factor notável de marketing da própria técnica, pela sua ligação inevitável aos conceitos biológicos da genética e da codificação do ADN. Para além disso, a geração de soluções novas pelo mecanismo do cruzamento (*crossover*) encontrou imediata analogia nos fenómenos que ocorrem nas células, pelo que a sensação de imitação da natureza deve, com certeza, ter aumentado o poder de atracção da técnica sobre os investigadores e, em particular sobre os jovens. Como instrumento de marketing, é quase perfeito: se a Natureza é tão bem sucedida a otimizar, a sua imitação decerto é um instrumento de sucesso [25].

A introdução por Holland de cruzamento, inversão (não muito utilizado atualmente) e mutação num algoritmo baseado na evolução de uma população foram as principais inovações [29].

Um Algoritmo Genético é um algoritmo de pesquisa baseado na conjectura atualmente aceite da seleção natural e da genética [27]. Cada indivíduo é uma potencial solução para um dado problema e é tipicamente codificado utilizando uma *string* binária de comprimento fixo, em analogia com um cromossoma.

O Algoritmo Genético visa, primariamente, encontrar a solução ótima de um problema, qualquer que seja a natureza das suas variáveis. Para isso, constitui-se uma população, ou conjunto de soluções possíveis (indivíduos) para o problema. Cada indivíduo é avaliado por uma função a otimizar e os melhores ficam selecionados para o que se chama de reprodução. Segue-se um procedimento que produz novos indivíduos a partir dos selecionados, constituindo-se uma nova geração. Os indivíduos da nova geração são, por sua vez, avaliados para eliminar os de pior desempenho e segue-se nova fase de reprodução originando uma geração subsequente. Este processo repete-se geração após geração, e a população deverá, em princípio, ir melhorando, ou seja, ir-se enriquecendo de indivíduos com melhor avaliação, até que um certo critério de paragem fica satisfeito. O melhor indivíduo encontrado no processo é adotado, então, como a solução do problema de otimização em causa [25].

### Características próprias dos Algoritmos Genéticos

As características de um Algoritmo Genético são diferentes das de outras técnicas de pesquisa em vários aspetos. Primeiro, o algoritmo realiza várias pesquisas em paralelo em diferentes direções, reduzindo a possibilidade de se aprisionar num ótimo local. Segundo, os AG trabalham com uma codificação dos seus parâmetros em vez dos seus próprios valores. A codificação de um parâmetro ajudará o operador genético a evoluir do estado atual para o próximo com o mínimo de computação. Terceiro, o AG avalia o nível de adaptação de cada *string* para guiar a sua busca em vez da função de otimização. Não existe a necessidade de calcular derivadas ou outros conhecimentos adicionais, diminuindo a exigência computacional. Finalmente, a estratégia utilizada por esta técnica explora a pesquisa no espaço de soluções onde a probabilidade de encontrar um melhor desempenho é mais elevada [27].

A característica mais distintiva dos AG, no início da expansão da sua utilização, foi a representação de soluções na forma de um cromossoma composto por uma sequência de bits (*string*). Alegava-se que as variáveis binárias ficavam representadas com naturalidade, as inteiras podiam ser representadas em numeração binária e as reais em representação binária em vírgula flutuante. Por isso, toda a representação de um problema se poderia codificar num cromossoma de bits [25].



Sobre cromossomas assim constituídos, incidem as operações de recombinação e de mutação. A recombinação começou por ser apenas cruzamento simples entre dois cromossomas, com troca de partes de cada cromossoma (executado com probabilidade alta, tipicamente de 0,8) e mais tarde evoluiu para outras formas. A mutação começou por ser uma simples inversão do valor de um bit, condicionada por dada probabilidade em geral baixa (por exemplo, 1 em cada 500 bits).

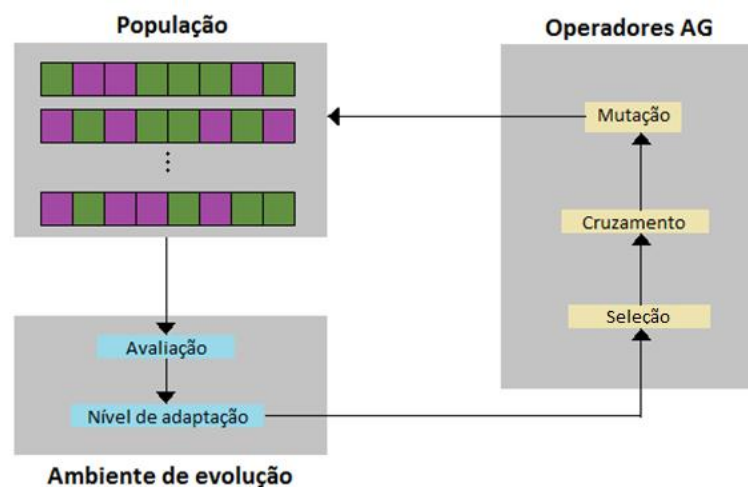
Embora bastante investigação se tenha efectuado sobre modelos com cromossomas de comprimentos variáveis, a verdade é que, na prática, a grande maioria das aplicações usa cromossomas de comprimento fixo.

Anos atrás, afirmava-se que o que diferenciava os Algoritmos Genéticos clássicos dos métodos de otimização tradicionais seria o seguinte [25]:

- Os AG codificam as variáveis de um problema numa sequência de bits e não como valores naturais das variáveis. O significado dos bits é indiferente para a operação do algoritmo;
- Os AG efetuam uma pesquisa no espaço de solução a partir de múltiplos pontos no espaço em vez de apenas um ponto;
- Os AG apenas precisam da definição de uma função objectivo (habitualmente designada como função de adaptação ou de aptidão) e dispensam conhecimento de derivadas ou outras informações sobre a estrutura do problema;
- Os AG usam regras de transição probabilística (cruzamento, mutação) em vez de regras determinísticas para fazer progredir o processo.

Hoje em dia, a apreciação do desempenho dos AG levou a alguma evolução nestes conceitos. Por exemplo, presentemente é assumido que a incorporação de informação suplementar sobre as características dos problemas pode conduzir a maior eficiência na sua resolução.

Num AG canónico usam-se, pois, três operadores genéticos (selecção, cruzamento e mutação) e cromossomas de comprimento fixo, lineares e binários. Cada nova geração é criada pelo operador selecção e alterada por cruzamento e mutação. A primeira população é criada de forma aleatória. Este processo está ilustrado na **Figura 3.1**.



**Figura 3.1** - Esquema evolutivo de um Algoritmo Genético.

Cada cromossoma representa uma possível solução do problema e deve ser representado por uma sequência binária. Por exemplo, no intervalo de inteiros [1, 31], pode-se codificar uma variável usando 5 bits (como, por exemplo, 10110 ou 00011). Se as variáveis forem binárias, então basta um bit por variável. Num problema com múltiplas variáveis, todas têm que ter representação binária no cromossoma.

Cada solução deve ser avaliada pela função de adaptação para produzir um valor. Se quisermos, num problema, maximizar a função  $f(x) = x^2$ , teremos que o cromossoma 10110 recebe o valor de adaptação  $22^2$  enquanto que o cromossoma 00011 recebe o valor  $3^2$ , sendo, portanto, um indivíduo pior, em relação ao objectivo. Ou seja, é um indivíduo menos adaptado ao ambiente criado pela função de adaptação, sendo um indivíduo menos apto [25].

Em muitos casos, bastaria assimilar o conceito de função de adaptação ao de função objectivo da optimização clássica. Todavia, um excessivo desejo de imitar conceitos biológicos tem feito com que alguns investigadores transformem as funções objectivo dos seus problemas de modo a trabalharem com funções de adaptação crescentes (com a ideia de que um maior valor de adaptação é preferível). Este exercício é completamente inútil, porém, a não ser que o processo de selecção tenha em conta o valor da adaptação para dar maior probabilidade de sobrevivência em função dele. É o caso da selecção por roleta, em que a probabilidade de selecção para a geração seguinte é proporcional ao valor da adaptação. Já não é o caso do torneio estocástico, que é o processo presentemente mais usado, em que a probabilidade de selecção depende apenas da relação de ordem entre os indivíduos comparados - no torneio estocástico mais simples, um par de cromossomas é sorteado e comparado e sobrevive o indivíduo de melhor adaptação, com uma alta probabilidade (tipicamente 0,8) [25].

A função de adaptação, como em qualquer algoritmo evolucionário, não precisa de ser numérica, podendo incluir aspectos qualitativos, desde que a selecção adote processos de torneio estocástico.

Para a eficiência de um Algoritmo Genético é muito importante que poucas ou nenhuma solução inviáveis sejam geradas pelo processo de reprodução. Os modelos que geram elevada percentagem de indivíduos inviáveis convergem muito lentamente ou mesmo não convergem.

Existem três técnicas básicas de controlar a presença de indivíduos inviáveis:

- pela aplicação de penalidades;
- pela definição de uma codificação que implicitamente inclua as restrições, de tal forma que mutações ou recombinações só gerem descendentes viáveis;
- e pelo controlo dos processos de mutação e recombinação, para o mesmo efeito.

O processo menos eficiente é o primeiro. Se for adotado em vez dos dois últimos, o algoritmo evolucionário terá muito menos possibilidades de ter uma boa convergência. Compreende-se que nos Algoritmos Genéticos a aplicação das duas últimas técnicas possa ser mais difícil, porque é também mais difícil compreender os efeitos de mutações ou recombinações, quando incidindo sobre os bits.

### Codificação

De modo a aplicar um AG a um problema, a primeira decisão relaciona-se com o tipo de genótipo que o problema necessita. Isto significa que deve ser tomada uma decisão sobre de que forma os parâmetros do problema serão mapeados numa *string* finita de símbolos,

conhecidos como genes, codificando uma possível solução num dado problema no espaço. A selecção de uma apropriada representação é crucial para a pesquisa. Normalmente são utilizados caracteres binários, embora já se tenham usado codificações com valores reais.

Muitas das aplicações dos AG usam a linguagem binária, e o comprimento das *strings* é constante durante o processo evolucionário. Também se considera que todos os parâmetros descodificam a mesma gama de valores e estão alocados os mesmos números de bits por gene na *string*. No entanto, alguns problemas podem surgir como, por exemplo, se os valores reais que se pretendem para solução do problema não forem potências de 2. Desta forma, encontram-se na bibliografia especializada várias abordagens para a questão da codificação que se revelam mais adaptadas a certos tipos de problemas.

Em conclusão, devido à complexidade que pode surgir com a codificação dos parâmetros, é aconselhável que para cada problema o utilizador dos Algoritmos Genéticos procure o esquema mais adequado ao problema para o qual pretende aplicar esta heurística.

### Função de adaptação (fitness)

Cada *string* é avaliada e é-lhe atribuído um valor de adaptação depois de criada a população inicial. É importante fazer uma distinção entre a função objetivo e a função de adaptação utilizada pelo algoritmo genético. A função objetivo fornece uma medida da performance com respeito a conjunto particular de valores de genes, independente de qualquer outra *string*. A função de adaptação transforma a medida da performance em oportunidade de reprodução, isto é, a adaptação de uma *string* é definida em relação a outros membros da população corrente. Depois de descodificar os cromossomas, isto é, transformar o genótipo em fenótipo, a cada *string* é atribuído um valor de adaptação. O fenótipo é usado como entrada para a função de adaptação. Depois, os valores de adaptação são aplicados para ponderar relativamente a importância de cada indivíduo na população.

Especificar uma apropriada função de adaptação é crucial para a correta operação dos AG. Como ferramenta de optimização, os AG enfrentam a tarefa de lidar com restrições dos problemas. O cruzamento e a mutação, que são os mecanismos de perturbação dos AG, normalmente não têm em conta a região de soluções admissíveis. A violação de restrições é frequente podendo ser enumeradas algumas técnicas básicas para lidar com soluções não admissíveis. A mais simples é a de simplesmente rejeitar esses cromossomas. Uma outra estratégia é reparar o cromossoma para o tornar viável. Outra possibilidade é a de criar operadores genéticos específicos para preservar a viabilidade dos cromossomas.

Contudo, estas técnicas produzem soluções muito pobres para problemas de grande dimensão como é o caso dos Sistemas Eléctricos de Energia. Isto justifica-se pelo facto de que normalmente as soluções para estes problemas se encontram na fronteira da região admissível de soluções. Uma possibilidade é a de aplicar a técnica de reparar o cromossoma apenas a uma fração (10% por exemplo) da população violadora. Em [22] os autores aplicaram este método de reparação para tratamento de soluções inviáveis num problema de coordenação hidrotérmica utilizando Algoritmos Genéticos.

Tem também sido sugerido que se possa lidar com as restrições permitindo a busca em regiões não admissíveis do espaço. A justificação é que uma solução inviável próxima da solução ótima é melhor e contém muito mais informação do que uma solução viável muito afastada da ideal. Isto é realizado por aplicação de funções de penalização, o que por si só

poderá corresponder a um problema muito complexo. Uma descrição mais detalhada sobre este assunto pode ser encontrada em [27].

A função de adaptação é uma caixa negra para os AG. Internamente pode ser construída por uma função matemática, um programa de simulação, ou um perito humano que avalia a qualidade da *string*. No início do processo iterativo de pesquisa, os valores da função de adaptação são distribuídos de forma aleatória e generalizados para o domínio do problema. À medida que a pesquisa evolui, valores particulares de cada gene começam a dominar. A variância da adaptação diminui com a convergência da população. Aqui podem também surgir problemas como a convergência prematura e a aproximação lenta à solução ótima [27].

### Operadores genéticos

Os operadores genéticos a que os AG recorrem na sua execução são a seleção, o cruzamento e a mutação. A seleção implementa a sobrevivência do mais adaptado (*fittest*) de acordo com a função de adaptação definida. Assim, indivíduos com grande adaptação têm maior oportunidade de se reproduzirem, enquanto os menos adaptados tem maior probabilidade de serem eliminados. A seleção por si só não introduz novos indivíduos na população, ou seja, não pode encontrar novos pontos no espaço de soluções. O cruzamento e a mutação são utilizados para explorar esse espaço de soluções.

A seleção, mais do que o cruzamento e a mutação, é o operador responsável por determinar a característica de convergência do AG. A pressão da seleção favorece os melhores indivíduos. Contudo, um valor muito elevado de pressão aumenta a probabilidade de o algoritmo convergir prematuramente para uma má solução. Muitos esquemas de seleção estão correntemente em uso, nomeadamente [27]:

- Seleção por torneio;
- Seleção por truncagem;
- Seleção por ranking linear;
- Seleção por ranking exponencial;
- Seleção elitista;
- Seleção proporcional.

Neste trabalho utilizou-se um mecanismo de seleção baseado em torneios estocásticos, que é o processo presentemente mais usado, em que a probabilidade de seleção depende da relação de ordem entre os indivíduos comparados. Na sua versão mais simples, um par de cromossomas é sorteado e comparado, e sobrevive o indivíduo mais adaptado, com uma alta probabilidade (definida no Capítulo 4 como taxa de seleção).

O cruzamento (*crossover*) representa a combinação de dois indivíduos e é realizada pela troca de partes das duas *string* para formar um novo indivíduo (**Figura 3.2**). O ponto de separação para criar cada *substring* é determinado aleatoriamente. Este operador é aplicado com uma certa probabilidade permitindo ao processo mover-se na direção de zonas prometedoras do espaço de solução. Desta forma, vão-se criando cada vez melhores indivíduos recombinação porções dos melhores existentes [27]. Existem diferentes métodos de realizar o cruzamento além da troca a partir de um ponto de cada *string*. Um exemplo de outra forma de cruzamento pode ser encontrado em [24], onde os autores utilizam uma *string* adicional que define os pontos, aleatoriamente, em que haverá troca de genes entres os progenitores, para originar os descendentes.

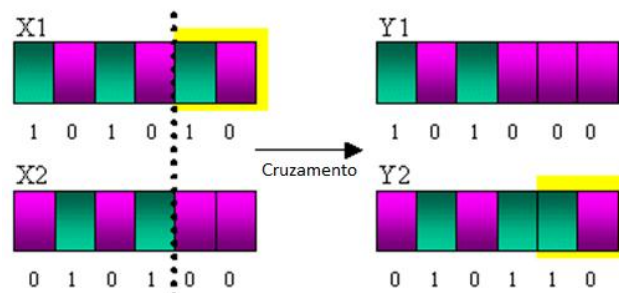


Figura 3.2 - Ilustração do mecanismo de cruzamento.

O propósito da mutação (*mutation*) é o de manter a diversidade de uma população e inibir a convergência prematura para ótimos locais. Esta técnica é implementada através de uma procura aleatória de novos pontos no espaço de pesquisa. O operador de mutação é mais importante nas finais gerações quando a maioria dos indivíduos apresentam qualidades similares. Assim, a utilização de uma taxa de mutação variável pode ser muito importante para a eficiência da pesquisa. No caso da codificação binária, a mutação é assegurada pela alteração aleatória de um bit, com uma pequena probabilidade (normalmente no intervalo [0,001;0,05]) [27] (Figura 3.3).

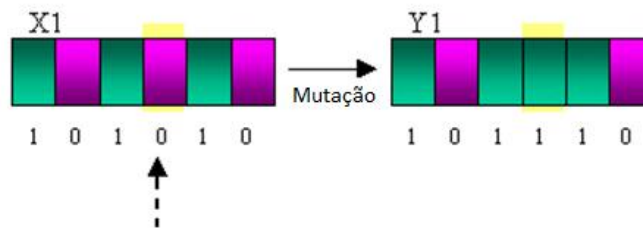


Figura 3.3 - Ilustração do mecanismo de mutação.

### Parâmetros dos Algoritmos Genéticos

Os Algoritmos Genéticos possuem alguns parâmetros que podem ser sujeitos a uma certa regulação com impacto no desempenho do método de pesquisa. Porém, os melhores valores para a taxa de mutação, para a taxa de cruzamento e para outros parâmetros são específicos para cada problema não sendo possível criar qualquer regra que se aplique à totalidade das situações. No entanto, algumas generalizações podem ser feitas. Se o número de indivíduos de cada geração é muito pequeno, relativamente ao espaço de soluções, será difícil para o algoritmo fazer uma busca eficiente por toda a região. Também se pode afirmar que altas taxas de mutação serão contraproducentes com o efeito desejado de convergência obtido pelo processo de cruzamento. Um bom ponto de partida, segundo os estudos, será utilizar uma população de 30 indivíduos, uma taxa de cruzamento de 60%, e uma taxa de mutação de 3% [32].

Tipicamente, estes parâmetros interagem entre si de forma não linear, não podendo ser otimizados de uma só vez [29]. Na literatura é grande a discussão em torno da melhor abordagem para adaptação dos parâmetros a um problema de otimização. Isto porque não existem resultados conclusivos sobre qual o melhor método de os configurar.

### Convergência prematura

Um problema frequente dos Algoritmos Genéticos é a possibilidade de um pequeno número de indivíduos bastante adaptados, comparativamente à restante população, poder rapidamente assumir um papel demasiado dominante causando convergência para um ótimo local ou simplesmente uma estagnação da pesquisa num local qualquer do espaço. Assim que a população tenha convergido, a capacidade do algoritmo de encontrar melhores soluções é quase eliminada. O cruzamento de indivíduos semelhantes produz gerações semelhantes sendo o processo de mutação o único mecanismo de perturbação que permitirá explorar novas regiões do espaço de pesquisa [27].

### Um Algoritmo Genético simples

Dado um problema adequadamente definido para ser resolvido e uma codificação binária para cada solução, um AG funciona da seguinte forma:

1. Iniciar com uma população gerada aleatoriamente com  $n$  cromossomas;
2. Calcular a adaptação de cada cromossoma na população;
3. Repetir os seguintes passos até que uma geração de  $n$  indivíduos tenha sido criada:
  - a. Selecionar um par de cromossomas pais da população sendo a seleção influenciada pela função de adaptação e por uma probabilidade  $t_s$ . O mesmo cromossoma pode ser selecionado mais do que uma vez para ser pai;
  - b. Com uma probabilidade  $t_c$  fazer cruzamento do par num ponto escolhido aleatoriamente (com uma distribuição uniforme) para formar dois descendentes (existem versões em que se fazem cruzamentos em múltiplos pontos). Se o cruzamento não ocorrer, formam-se dois descendentes que são cópias exatas dos seus pais;
  - c. Mutar os dois descendentes num bit a sortear com uma probabilidade  $t_m$ , e incluir os cromossomas resultantes na nova população. Se  $n$  for ímpar, um dos membros da nova população pode ser eliminado;
4. Substituir a população progenitora pela nova população;
5. Regressar ao ponto 2.

Finalmente, convém referir que os Algoritmos Genéticos não resolvem todos os problemas, apesar de haver muitas experiências que demonstram a sua elevada eficiência na resolução de determinados problemas muito complexos. No entanto, e apesar das suas limitações, os investigadores continuam a procurar novas aplicações para os Algoritmos Genéticos numa grande variedade de disciplinas.

# Capítulo 4

## Descrição do Problema e Modelos de Abordagem

### 4.1 - Considerações gerais

Conforme havia já sido descrito, o problema do planejamento da exploração de centrais hídricas apresenta-se de complexa resolução. Porém, a importância que os recursos hídricos representam para as várias entidades cuja atividade deles depende, justifica a realização de vários estudos sobre o assunto.

Pretende-se neste capítulo descrever com algum detalhe as implicações que surgem no tratamento do problema do planejamento da exploração de centrais hídricas em que, por um lado, é necessário lidar com a não linearidade das variáveis e, por outro, existe um considerável número de restrições que crescem com o número de centrais incluídas no problema e com o número de períodos para o qual se pretende fazer o planejamento. As restrições incrementam ainda mais a complexidade do problema quando são consideradas as dependências decorrentes da existência de aproveitamentos em cascata.

Devido à subjacente complexidade de tratamento do problema, a sua análise incluirá o acompanhamento de diferentes casos de estudo. Procura-se com isto apresentar diferentes abordagens a esta temática de modo a poder avaliar o desempenho que a metodologia baseada em Algoritmos Genéticos terá com o aumento de exigência de caso para caso. Ou seja, serão estabelecidos vários modelos para o problema em que progressivamente serão feitas considerações adicionais que aumentam a complexidade da resolução do problema, mas que aproximam a abordagem em estudo às condições reais de exploração. Pretende-se que os resultados obtidos ao longo do desenvolvimento do programa permitam chegar a um modelo final que considere as principais não linearidades associadas e, em que se verifique uma interação entre o planejamento definido e o preço de fecho do mercado. Por outras palavras, o programa final deverá permitir obter uma solução que possibilite gerir um conjunto de centrais de modo a maximizar as receitas, sendo que cada decisão tomada afetará o preço da energia transacionada em mercado.

## 4.2 - Descrição do problema

### 4.2.1 - Aspetos gerais

A otimização do planeamento de exploração de centrais hídricas torna-se complexa devido, principalmente:

- aos efeitos de propagação temporal;
- às incertezas associadas;
- à relação não linear entre a potência, o caudal e a queda;
- à configuração hidráulica de cada central;
- à existência de bombagem;
- ao impacto que cada proposta tem no preço de fecho de mercado.

O problema dos efeitos de propagação temporal surge porque as decisões tomadas para determinado período de operação exercem influência nas decisões seguintes. Uma incorreta gestão dos recursos de um aproveitamento hídrico pode levar à sua excessiva utilização em determinado período, comprometendo a sua utilização no futuro e resultando num impacto negativo para os proveitos da empresa. Por outro lado, pode também acontecer uma situação de excessiva acumulação de água nos reservatórios com a ocorrência de desperdícios de energia, devido à libertação de água sem aproveitamento, originando ainda custos de operação acrescidos.

As propostas apresentadas a mercado pelos agentes responsáveis pelas centrais hídricas são baseadas em previsões, o que introduz incerteza no problema e, conseqüentemente, risco. As entidades produtoras têm de fazer não só previsão da carga que se apresentará em cada período a mercado, como também das ofertas de venda de energia apresentadas pelos seus concorrentes. A incerteza no planeamento também se deve à evidente dependência destes centros eletroprodutores em relação às condições climatéricas que, só por si, envolvem uma metodologia de previsão muito complexa. Nestes aproveitamentos é necessário ter em atenção que o elemento primário para a produção de energia, a afluência hídrica, para além de descrever um comportamento incerto, terá de ser imediatamente utilizado sob o risco de se perder, exceto se se dispuser de capacidade de retenção que, de todo o modo, é sempre limitada. Além disto, a integração do problema num contexto de mercado competitivo origina que o valor da água seja uma variável que depende do resultado de fecho do mercado. Esta dificuldade acrescida para o planeamento é normalmente tratada em problemas de planeamento de maior horizonte temporal para que, no problema de planeamento de exploração de curto prazo, considerado nesta dissertação, as afluências se assumam como grandezas determinísticas e não estocásticas.

A operação de uma unidade hídrica é caracterizada pela relação não linear entre três variáveis: potência, caudal e altura da queda. Facilmente se visualiza que quando uma central está a turbinar, o volume de água do reservatório a montante diminui e o volume do reservatório a jusante aumenta, provocando uma diminuição progressiva do valor de altura da queda. A admissão de água à turbina corresponde a um controlo disponível para produzir a potência elétrica desejada, o que se traduz numa variação do caudal. Por sua vez, o caudal máximo encontra-se limitado pelo valor de altura da queda. Estas não linearidades constituem as principais características dos modelos utilizados para descrever o problema de



planeamento de exploração de centrais hídricas, condicionando a metodologia a usar para o resolver.

O problema de otimização da gestão destes recursos complica-se também com a configuração hidráulica do conjunto de aproveitamentos considerados no problema. A disposição dos aproveitamentos em cascata cria uma interligação hidráulica e uma interligação temporal. Com efeito, existe uma influência na gestão de um aproveitamento quando a montante deste existe um ou mais aproveitamentos cuja operação irá afetar, de alguma forma, o recurso do primeiro, e vice-versa. Por exemplo, para o caso de existirem apenas dois aproveitamentos num mesmo curso de água, a turbinagem e a bombagem do aproveitamento que estiver a montante afetarão o volume de água do que estiver a jusante, sendo o contrário também verdade em relação ao que está a montante. O problema torna-se extremamente complexo quando são considerados diferentes valores para a propagação temporal destes efeitos.

Uma característica muito importante destes aproveitamentos é a capacidade de a central vir a poder realizar bombagem. De facto, num ambiente concorrencial, esta capacidade revela-se um ponto-chave para a análise da viabilidade económica de um projeto desta natureza. Para o problema de planeamento da exploração, a bombagem, se disponível, tem de ser considerada visto que o seu propósito se relaciona diretamente com o objetivo do problema que é o de maximizar os proveitos obtidos com a exploração da central.

O planeamento da exploração de uma central, com vista à maximização das receitas, pode ser baseado em previsões de preços da energia para o horizonte temporal do problema. Contudo, se esta gestão incluir um conjunto de centrais com considerável potência instalada, as decisões daí decorrentes podem alterar substancialmente o preço de mercado previsto para cada hora do planeamento. Sendo assim, à medida que se introduzem mais centrais no problema, é crescente a importância de considerar o efeito que cada proposta de exploração tem no preço de fecho do mercado.

Para um aproveitamento hidroelétrico a queda bruta,  $H$ , é o desnível entre as superfícies livres da água a montante e a jusante em instalações de turbinas. Se a esta for subtraída a totalidade das perdas de carga verificadas no circuito hidráulico obtém-se a queda útil,  $h$ . A perda de carga depende de fatores como o diâmetro da tubulação, a vazão, ou velocidade de escoamento, a rugosidade das condutas e as singularidades do circuito hidráulico.

O trabalho necessário para elevar numa distância  $\Delta Z$  um corpo de massa  $m$  é dado por  $m \cdot g \cdot \Delta Z$  em que  $g$  é a aceleração gravítica. Considerando o escoamento de um líquido, em que a massa deslocada na unidade de tempo é  $\rho \cdot q$ , onde  $\rho$  é a massa volúmica do fluido e  $q$  é o caudal, ter-se-á que o trabalho correspondente à queda útil e realizado num intervalo unitário, ou seja, a potência útil,  $P_u$ , é definido por:

$$P_u = \rho \cdot q \cdot g \cdot h \quad (4.1)$$

e virá expressa em watts se as variáveis se encontrarem em unidades do sistema internacional.

Uma central hídrica armazena na sua albufeira energia sob a forma de energia potencial gravítica. Considerando que o circuito hidráulico apresenta perdas de carga adicionais devido ao aumento do caudal ( 4.2 ), e que a densidade da água é de aproximadamente  $1000 \text{ kg/m}^3$ , a potência elétrica gerada por uma unidade de uma central é dada pela expressão ( 4.3 ) [2].

$$\Delta h = \beta \cdot q^2 \quad (4.2)$$

$$P_T = 9,8 \cdot q \cdot (h - \beta \cdot q^2) \cdot \mu_T / 1000 \quad (\text{MW}) \quad (4.3)$$

Nestas expressões:

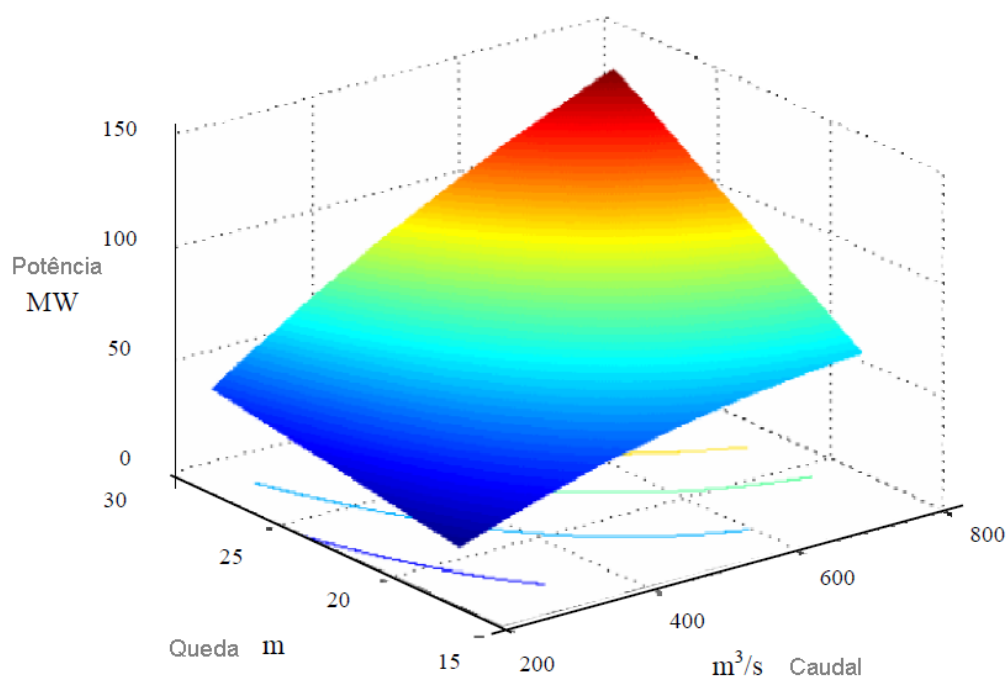
$q$  - Caudal em  $\text{m}^3/\text{s}$ ;

$h$  - Queda em metros;

$\beta$  - Coeficiente de perda de carga do circuito hidráulico;

$\mu_T$  - Rendimento de turbinagem.

O gráfico da **Figura 4.1** representa graficamente a equação anterior ilustrando a dependência entre a potência gerada por um aproveitamento hidroelétrico, a queda e o caudal.



**Figura 4.1** - Relação entre a potência, o caudal e a queda.

As curvas projetadas no plano caudal-queda representam a relação destas duas variáveis para valores fixos de potência. Assim, a interpretação a fazer pode ser: se o valor da queda diminuir, para que a potência se mantenha constante, é necessário que o caudal seja aumentado. Contudo, o incremento ao caudal tem de ser cada vez mais significativo ao longo do processo.

Considerando apenas a potência gerada em função do caudal turbinado obtém-se um conjunto de curvas semelhantes às que estão representadas na **Figura 4.2**. Cada uma destas curvas descreve a relação entre a potência e o caudal para um valor fixo de altura de queda.

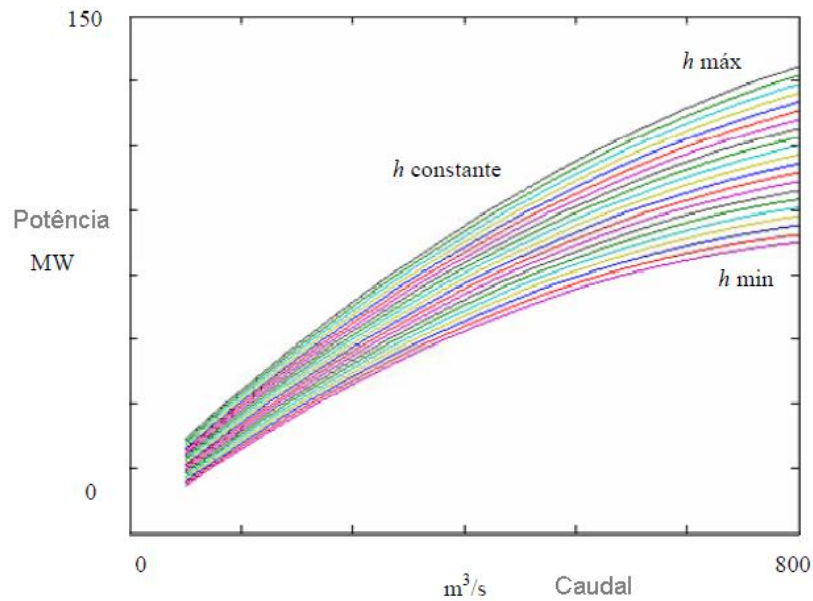


Figura 4.2 - Relação não linear entre a potência e o caudal para vários níveis de queda.

A característica não linear descrita por cada uma das curvas com a altura de queda constante representa o efeito de perda de carga. De facto, com o aumento do caudal turbinado aumenta a perda de carga no circuito hidráulico, resultando num aumento não diretamente proporcional da potência gerada. Esta não linearidade mostra que o impacto de perda de carga é maior para caudais elevados do que para caudais turbinados reduzidos. Existem diferentes formas de considerar o efeito de perda de carga que passam por simplesmente o desprezar, usar um valor médio constante para cada valor de caudal, ou admitir sempre o seu valor máximo. Finalmente, poderá também ser utilizada a expressão não linear completa que permitirá calcular a perda de carga em cada iteração. Na Figura 4.3 ilustram-se estas situações.

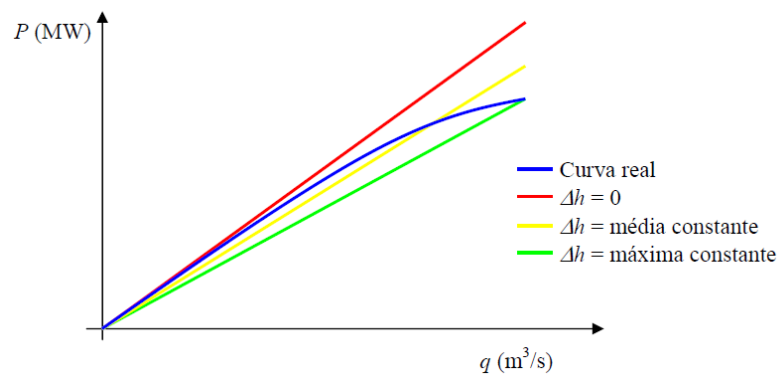


Figura 4.3 - Impacto da perda de carga no valor da potência.

Para o primeiro modelo implementado na abordagem ao problema tratado nesta dissertação é admitido um valor máximo e constante de caudal turbinado ou bombado. Considerar um valor máximo para o caudal tem justificação uma vez que nestas condições as máquinas estarão a trabalhar na máxima eficiência de conversão, o que representa a tendência que se verifica na prática. Também se pode justificar a utilização de um valor

constante uma vez que, para centrais com grande capacidade de armazenamento, a variação da queda é pequena não ocorrendo grande alteração do caudal máximo.

Nos restantes modelos utiliza-se uma expressão para atualizar o valor do caudal máximo em função da variação da altura da queda já que, para centrais com pequena capacidade de armazenamento de água, é importante considerar o efeito que essa variação tem no caudal máximo e na potência. Este efeito apresenta, como se constatou na **Figura 4.1**, uma característica não linear.

Se capacidade de bombagem for considerada, a potência consumida será dada por ( 4.4 ) [2].

$$P_B = 9,8 \cdot q \cdot (h + \beta \cdot q^2) / (\mu_B \cdot 1000) \quad (\text{MW}) \quad (4.4)$$

Nesta expressão:

$q$  - Caudal em  $\text{m}^3/\text{s}$ ;

$h$  - Queda em metros;

$\beta$  - Coeficiente de perda de carga do circuito hidráulico;

$\mu_B$  - Rendimento de bombagem.

Tipicamente, nos modelos em que se inclui a possibilidade de os grupos realizarem bombagem admite-se que a reversibilidade entre os estados de funcionamento (turbinar ou bombar) ocorre em tão curto período de tempo que esse intervalo de tempo se despreza. Na prática, esta situação não está muito longe da realidade, pois em Portugal já há centrais que o fazem em poucos minutos [2].

Neste trabalho foi também considerado que cada central possui apenas um grupo gerador. Para simplificação, no caso da existência de vários grupos geradores, poderia ser utilizado um modelo agregado representado por apenas um grupo. Senão, seria necessário atribuir a cada um uma curva característica de funcionamento.

#### 4.2.2 - Formulação do problema

Tradicionalmente, o planeamento da exploração dos sistemas de produção era realizado em ambiente centralizado em que o operador, conhecendo todos os custos das centrais disponíveis, procurava minimizar o custo global de operação, mantendo um nível de segurança adequado e cumprindo todas as restrições do sistema. Com o novo paradigma do sector elétrico, as empresas produtoras têm de apresentar produtos competitivos em mercado, para maximizar os seus lucros.

A apresentação de propostas por parte dos agentes intervenientes no mercado parte da utilização de previsões dos preços de mercado, caracterizados por uma certa volatilidade. Portanto, admitindo que as empresas são tomadoras de preço e que utilizam previsões desse preço, o problema do planeamento da exploração de centrais hídricas pode ser representado por um modelo genérico de otimização com uma formulação representada por uma função, que se pretende maximizar, sujeita a um conjunto de restrições que a solução deve respeitar. Nos próximos parágrafos serão detalhados diversos aspetos relativos a esta formulação.

## Variáveis

As variáveis utilizadas para resolução de um problema de otimização genérico podem ser de três tipos:

- Variáveis de estado -  $x_{ik}$  - são variáveis que descrevem o sistema de forma completa, ou seja, se os seus valores forem conhecidos para todos os estádios do problema então é possível conhecer o comportamento do sistema;
- Variáveis de decisão ou de controlo -  $u_{ik}$  - correspondem às variáveis cujos valores se pretendem determinar de forma a afetar o sistema para que este assuma as variáveis de estado pretendidas;
- Variáveis de perturbação ou parâmetros -  $p_{ik}$  - referem-se normalmente a dados que são introduzidos no problema e correspondem a elementos exógenos ao controlo do sistema.

A **Tabela 4.1** apresenta as principais variáveis consideradas no problema de planeamento de exploração de centrais hídricas estudado nesta dissertação. Porém, atente-se que em cada modelo considerado no estudo do problema a classificação das variáveis poderá não ser exatamente a que consta nesta tabela, devido a algumas simplificações introduzidas.

**Tabela 4.1** - Variáveis consideradas nos modelos do problema.

Tipo de variável	Variáveis	Descrição
Decisão - $u_{ik}$	$P_{T,ik}$	Potência turbinada pela central $i$ na hora $k$
	$P_{B,ik}$	Potência bombada pela central $i$ na hora $k$
Estado - $x_{ik}$	$q_{T,ik}$	Caudal turbinado pela central $i$ na hora $k$
	$q_{B,ik}$	Caudal bombado pela central $i$ na hora $k$
	$v_{ik}$	Volume armazenado pela central $i$ na hora $k$
	$s_{ik}$	Volume descarregado pela central $i$ na hora $h$
	$h_{ik}$	Altura da queda da central $i$ na hora $k$
Parâmetros - $p_{ik}$	$a_{ik}$	Afluência da albufeira da central $i$ na hora $k$
	$\lambda_k$	Preço de mercado na hora $k$
	$v_i^0$	Volume inicial da albufeira da central $i$
	$v_i^f$	Volume final da albufeira da central $i$
	$\mu_{T,ik}$	Rendimento de turbinagem da central $i$ na hora $k$
	$\mu_{B,ik}$	Rendimento de bombagem da central $i$ na hora $k$

Nesta descrição  $i \in \{1, 2, \dots, I\}$  e  $k \in \{1, 2, \dots, K\}$  sendo  $I$  o número total de centrais hídricas consideradas no modelo do problema e  $K$  o número de períodos em que se discretizou o horizonte temporal para o qual se faz o estudo.

### Restrições

Os aproveitamentos hidroelétricos estão sujeitos a diversas condicionantes durante a sua operação, que são designadas por restrições no âmbito dos problemas de otimização. A totalidade das restrições incluídas em cada modelo matemático do problema define a região admissível de soluções. O método de resolução aplicado ao problema deve procurar a melhor solução possível, ou uma próxima da melhor, dentro desta região.

No âmbito deste trabalho pode-se distinguir dois tipos de restrições: restrições operacionais e restrições globais. As restrições operacionais relacionam-se com os limites de cada variável, enquanto as globais se referem a todo o sistema.

São várias as restrições operacionais envolvidas neste problema. Em cada reservatório, existem limites mínimos e máximos para o volume da albufeira, e que estão relacionados com o controlo de cheias, mínimos técnicos para funcionamento das máquinas, ou volumes obrigatórios salvaguardados para outras atividades ligadas aos recursos hídricos.

Os caudais turbinados e bombados também estão sujeitos a limites, assim como a potência produzida pelos geradores. No caso dos modelos que foram desenvolvidos neste trabalho considerou-se que se utiliza sempre o caudal máximo para turbinar e para bombear, o que vai de encontro ao que acontece na exploração real destas centrais. Contudo, como anteriormente visto, este valor máximo do caudal pode estar limitado pela altura de queda do aproveitamento com o qual apresenta uma relação não linear. A altura de queda, por sua vez, depende do volume de água armazenado.

Para os caudais descarregados apenas existe limite inferior e este será igual a zero, ou seja, apenas pode tomar valores não negativos. No problema aqui estudado, esta variável serve de acerto à equação de balanço da água. Assim, sempre que uma solução encontrada pelo algoritmo de pesquisa indique um volume na albufeira superior ao seu limite máximo, causado pela afluência ou pela bombagem, esse excesso será eliminado por um descarregamento.

A altura de queda é dada pelo volume de água na albufeira e, portanto, limitada implicitamente pelos limites de volume de armazenamento em cada reservatório.

As afluências naturais de cada uma das centrais consideradas no problema apresentam-se como dados de entrada, assim como os valores iniciais e finais de volume armazenado em cada albufeira. O volume final serve de entrada ao problema de planeamento de exploração para curto prazo mas a sua determinação resulta de um outro problema de planeamento num enquadramento temporal mais alargado. O seu valor está relacionado com o tratamento do valor futuro da água armazenada, que não é objeto de estudo neste trabalho.

Relativamente às restrições globais, a restrição mais importante refere-se à equação do balanço de água para cada período  $k$  que traduz a dependência temporal e hidráulica das ações ocorridas nas centrais de um sistema ( 4.5 ). Nesta dissertação, contrariamente à grande maioria dos trabalhos sobre este tema, o enfoque não estará nos aproveitamentos em cascata, pelo que uma parte da expressão ( 4.5 ) não será considerada.

$$v_{ik} = v_{i,k-1} + a_{ik} - q_{T,ik} - s_{ik} + q_{B,ik} + \sum_{m=1}^M (q_{T,mk} + s_{mk}) + \sum_{j=1}^J q_{B,jk} \quad (4.5)$$

Nesta equação:

- $v_{ik}$  - volume da albufeira  $i$ , no período  $k$ ;
- $a_{ik}$  - afluência natural à albufeira  $i$ , no período  $k$ ;
- $q_{T,ik}$  - caudal turbinado pela central  $i$ , no período  $k$ ;
- $s_{ik}$  - caudal descarregado pela central  $i$ , no período  $k$ ;
- $q_{B,ik}$  - caudal bombado pela central  $i$ , no período  $k$ ;
- $m$  - índice associado a cada uma das centrais imediatamente a montante da central  $i$ ;
- $j$  - índice associado a cada uma das centrais imediatamente a jusante da central  $i$ ;
- $M$  - número de centrais a montante da central  $i$ ;
- $J$  - número de centrais a jusante da central  $i$ .

Outra restrição global, referente a todo um sistema hidráulico interligado, considera limites relativos à variação dos volumes de água em cada período. De outra forma, implica que em cada período o volume da albufeira não varia mais do que dentro de certos limites, o que na prática representa a garantia de condições especiais do recurso hídrico como os caudais ecológicos e retiradas para regas.

### Formulação completa

A função objetivo é responsável por fazer corresponder a cada decisão um número real, permitindo desta forma comparar soluções. Para este problema ela traduzirá o benefício económico obtido por um conjunto de ordens de exploração que correspondem a uma solução para o problema. Apresenta-se a seguir a formulação completa para o problema estudado, mas chama-se já a atenção para o facto de no Modelo 4, que será apresentado mais à frente, se utilizar uma função objetivo diferente. Também se relembra que a principal motivação para este trabalho era a de criar uma ferramenta capaz de lidar com curvas de ofertas de compra e venda em mercado. Por isso, para simplificar esta nova abordagem, optou-se por não considerar o encadeamento de aproveitamentos em cascata.

$$\text{Máx} \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \lambda_k (P_{T,ik} - P_{B,ik}) \quad (4.6)$$

sujeito a:

$$v_{ik} = v_{i,k-1} + a_{ik} - q_{T,ik} - s_{ik} + q_{B,ik} + \sum_{m=1}^M (q_{T,mk} + s_{mk}) + \sum_{j=1}^J q_{B,jk} \quad (4.7)$$

$$vol_{min,i} \leq q_{T,ik} + s_{ik} - q_{B,ik} \leq vol_{max,i} \quad (4.8)$$

$$\underline{v}_i \leq v_{ik} \leq \bar{v}_i \quad (4.9)$$

$$q_{T,ik} \in \left\{ 0, q_{Tn,i} \cdot \sqrt{\frac{h_{ik}}{h_{Tn,i}}} \right\} \quad (4.10)$$

$$q_{B,ik} \in \{0, q_{Bn,i} - \delta_i \cdot (h_{ik} - h_{Bn,i})\} \quad (4.11)$$

$$0 \leq s_{ik} \leq \infty \quad (4.12)$$

$$v_{iK} = volf_i \quad (4.13)$$

Nesta formulação:

- $I$  - número total de centrais hidroelétricas;
- $K$  - número total de períodos de planeamento;
- $\lambda_k$  - preço previsto da energia no período  $k$ ;
- $P_{T,ik}$  - potência turbinada pela central  $i$ , no período  $k$ ;
- $P_{B,ik}$  - potência bombada pela central  $i$ , no período  $k$ ;
- $vol_{min,i}$  - volume mínimo lançado pela central  $i$ , em cada período;
- $vol_{max,i}$  - volume máximo lançado pela central  $i$ , em cada período;
- $v_{ik}$  - volume da albufeira  $i$ , no período  $k$ ;
- $a_{ik}$  - afluência natural à albufeira  $i$ , no período  $k$ ;
- $q_{T,ik}$  - caudal turbinado pela central  $i$ , no período  $k$ ;
- $s_{ik}$  - caudal descarregado pela central  $i$ , no período  $k$ ;
- $q_{B,ik}$  - caudal bombado pela central  $i$ , no período  $k$ ;
- $\underline{v}_i$  - volume mínimo da albufeira  $i$ ;
- $\bar{v}_i$  - volume máximo da albufeira  $i$ ;
- $q_{Tn,i}$  - caudal nominal de turbinagem da central  $i$ ;
- $q_{Bn,i}$  - caudal nominal de bombagem da central  $i$ ;
- $h_{Tn,i}$  - queda nominal de turbinagem da central  $i$ ;
- $h_{Bn,i}$  - queda nominal de bombagem da central  $i$ ;
- $\delta_i$  - Coeficiente de bombagem da central  $i$ ;
- $v_{iK}$  - volume armazenado na central  $i$ , no último período;
- $volf_i$  - volume final definido para a central  $i$ ;
- $m$  - índice associado a cada uma das centrais imediatamente a montante da central  $i$ ;
- $j$  - índice associado a cada uma das centrais imediatamente a jusante da central  $i$ ;
- $M$  - número de centrais a montante da central  $i$ ;
- $J$  - número de centrais a jusante da central  $i$ .

### 4.3 - Metodologia baseada em Algoritmos Genéticos

Para resolver o problema proposto nesta dissertação foi desenvolvido um programa cujo código se baseia nos fundamentos dos Algoritmos Genéticos, e que se esquematiza no fluxograma da **Figura 4.4**. Importa salientar que quando se trabalha com AG's não existe um modo único de implementar o algoritmo. Os AG's são uma classe de procedimentos com um conjunto de passos distintos e bem especificados, em que cada um desses passos possui diversas variações. Sendo assim, torna-se necessário definir o procedimento baseado em AG's que foi utilizado para resolução da problemática.



O código foi desenvolvido na aplicação *Visual Basic for Applications (VBA)* disponível como suplemento ao *Microsoft Excel*. Os dados de entrada do programa são inseridos através de uma folha *Excel* e incluem os parâmetros próprios dos Algoritmos Genéticos, como o número de indivíduos e o número máximo de gerações, assim como os dados que caracterizam o modelo usado para o problema.

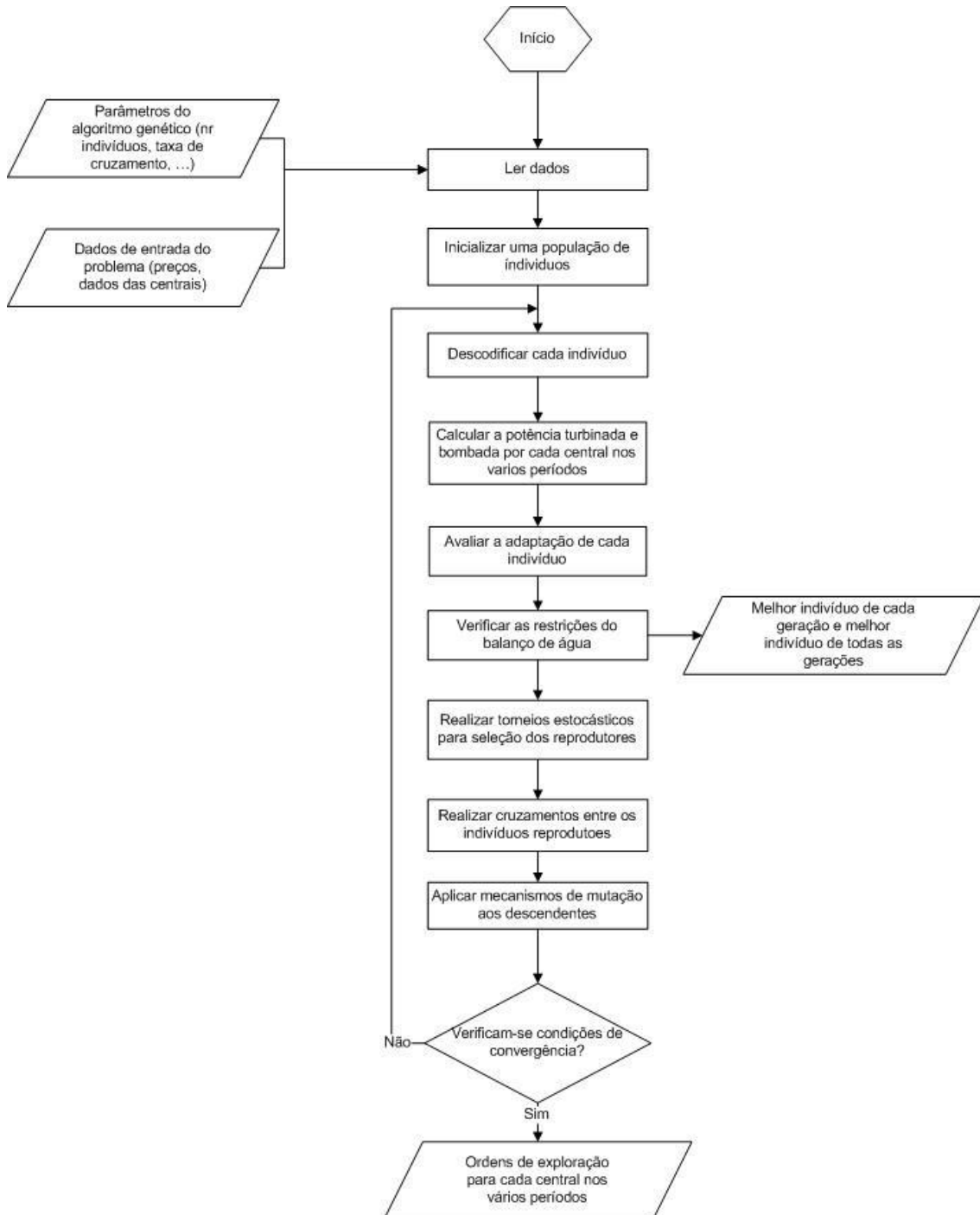


Figura 4.4 - Fluxograma do ciclo de funções utilizado pelo programa.

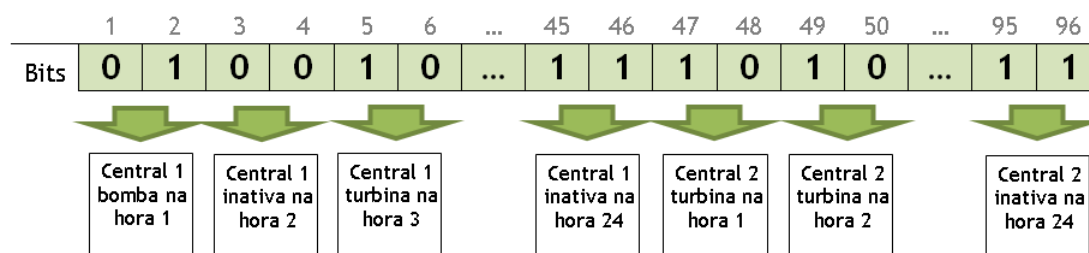
Logo que o programa é iniciado, surge uma mensagem que pede ao utilizador para introduzir o número de centrais a incluir no problema e o número de períodos horários a considerar. Estes dois parâmetros são utilizados para dimensionar todas as matrizes e vetores utilizados no algoritmo adaptando-o à problemática que se pretende estudar.

A primeira função característica de um AG é a criação de uma população inicial, que se implementou através da geração aleatória de bits. Cada indivíduo é constituído por uma sequência de zeros e de uns, aleatória inicialmente, que se vai alterando com a evolução da população levando à criação de descendentes cada vez mais adaptados às condições do problema.

A sequência de bits constituintes de cada indivíduo só tem significado se for estabelecida uma codificação. Desta forma, após um novo indivíduo ser criado é necessário traduzir a sua informação genética, que é uma solução do problema, por um processo que se designa de decodificação. Para o problema objeto de estudo nesta dissertação foi definida uma codificação que se fundamenta nos seguintes pontos:

- Considerando que quem detém uma central a procura explorar da forma mais eficiente possível, o que significa que quando turbina ou bomba funciona com valores de potência máxima, existem apenas três possíveis estados de funcionamento: turbinar, bombar e inativa;
- A simplificação que se considerou implica que, para cada hora, e para cada central, apenas sejam necessários 2 bits para descrever o estado;
- Os estados possíveis para cada central foram então definidos da seguinte forma:
  - 00 - Inativa
  - 01 - Bombar
  - 10 - Turbinar
  - 11 - Inativa

Segundo a codificação utilizada, por exemplo, se o problema a resolver se enquadrar num horizonte diário e forem consideradas 2 centrais, cada indivíduo (possível solução do problema) será constituído por 96 bits (24 períodos  $\times$  2 centrais  $\times$  2 bits). Na **Figura 4.5** representa-se parte de um possível indivíduo (solução) para esse problema.



**Figura 4.5** - Exemplo do procedimento de decodificação utilizado.

Agora que se possui as ordens de turbinagem e bombagem de cada indivíduo é necessário avaliar a qualidade da solução. Esta avaliação é realizada pelo valor dos proveitos originados por essa solução e, para tal, é necessário calcular a potência de turbinagem e de bombagem para cada período e para cada central. Os valores de potência serão obtidos pelas expressões ( 4.3 ) e ( 4.4 ).

Com os valores de potência calculados determina-se a adaptação de cada indivíduo através da função objetivo do problema (expressão 4.6). Como o problema é de maximização, os indivíduos melhor adaptados originarão maiores proveitos que os menos adaptados. Contudo, é ainda necessário verificar se cada solução se encontra na região admissível de soluções.

Para este efeito, procede-se a seguir a uma série de testes que permitem obter informação sobre a viabilidade de cada solução. Estes testes não são mais do que simples verificações das restrições estabelecidas para o problema com respetivo tratamento em caso de incumprimento, e que se podem descrever da seguinte forma:

1. É calculado o volume final em cada albufeira originado pela solução;
2. Se esse volume final ultrapassar o limite máximo de armazenamento da albufeira realiza-se um descarregamento correspondente a esse excesso;
3. Se o volume final for inferior ao limite mínimo imposto atribui-se uma penalização à avaliação dessa solução. A penalização é realizada pela subtração ao valor de adaptação do indivíduo de um termo proporcional ao quadrado da violação multiplicado por um número bastante elevado;
4. Para a resolução deste problema estabeleceu-se que o valor final de volume de água armazenado na albufeira constituiria um dado de entrada obtido por um estudo de planeamento de longo prazo não abordado no âmbito desta dissertação. Se o volume final associado a uma solução não coincidir com o limite definido procede-se a uma penalização da solução. Novamente, esta penalização é realizada por subtração ao valor de adaptação do indivíduo de um termo proporcional ao quadrado da violação multiplicado por um número bastante elevado.

Com os indivíduos devidamente avaliados quanto à sua viabilidade e qualidade para solução do problema, realizam-se torneios estocásticos de forma a constituir um conjunto de reprodutores que originarão a próxima descendência da população. Em cada torneio enfrentam-se dois indivíduos que são selecionados aleatoriamente na população. Deste confronto, o indivíduo melhor adaptado tem uma probabilidade mais alta (definida como taxa de seleção) de entrar para a lista de reprodutores. Ou seja, o indivíduo mais fraco tem uma certa probabilidade, ainda que baixa, de se conseguir reproduzir. Note-se que um indivíduo, mesmo que considerado fraco em relação a outro, pode conter informação genética importante a ser utilizada na criação de novos indivíduos. Se a pressão da seleção, estabelecida pelo valor da taxa de seleção, for muito elevada, aumenta a possibilidade de convergência prematura.

Selecionados os potenciais reprodutores da próxima geração de indivíduos, procede-se à sua reprodução. Neste processo são selecionados de forma aleatória dois indivíduos dos que constituem a lista criada de reprodutores. Aleatoriamente, é também selecionado um ponto a partir do qual o código de um indivíduo é partido e cruzado com o do outro originando uma nova sequência de bits. De cada cruzamento, ocorrido com uma probabilidade fixada pelo valor de taxa de cruzamento, resultam dois indivíduos e o processo continua até que uma nova população esteja constituída. Se um cruzamento não ocorrer, formam-se dois descendentes que são cópias exatas dos seus pais.

Para introduzir diversidade na evolução de uma população recorre-se ainda a mecanismos de mutação. Desta forma, em cada indivíduo é selecionado um dos bits constituintes do seu material genético. Esse bit está sujeito a uma probabilidade, baixa e definida inicialmente

como parâmetro do Algoritmo Genético (taxa de mutação), de ser modificado. Ou seja, se for um 1 passará a 0, e se for 0 passa a 1.

Os indivíduos criados constituem a nova população que será sujeita ao mesmo processo pelo qual os seus progenitores lhes deram origem. O ciclo continuará até que sejam verificadas as condições de convergência do algoritmo.

No final de toda a evolução, a melhor solução gerada é utilizada para definir as operações de turbinagem e de bombagem de cada central hídrica no plano temporal considerado.

## 4.4 - Modelos considerados

A complexidade do problema tratado neste trabalho, referida por várias vezes ao longo deste texto, justifica a necessidade e o interesse em realizar diferentes abordagens com sucessivos incrementos de dificuldade. O objetivo é o de, por um lado, permitir iniciar o tratamento de um problema complexo de forma mais simples e com menor margem para erros na escrita do código do programa e, por outro, criar sensibilidade para as simplificações que, consideradas ou não, têm maior impacto na qualidade e robustez da solução.

Este modo de tratamento do problema também faz sentido de utilizar quando se aplica um método novo de resolução. Com efeito, no início deste trabalho pouco se podia afirmar sobre a viabilidade e o desempenho de uma metodologia baseada em Algoritmos Genéticos para resolução do problema de otimização da exploração de centrais hídricas. Deste modo, a utilização de modelos mais simples para fazer a primeira abordagem ao problema revela-se adequada para a construção de código livre de erros e, também, para criar sensibilidade e obter conclusões sobre o desempenho do algoritmo com o aumento de complexidade dos modelos.

Os Algoritmos Genéticos podem ser aplicados a uma grande variedade de problemas de otimização mas, para cada um, existe um conjunto de parâmetros próprios do algoritmo que devem ser adaptados. Ou seja, parâmetros como a taxa de mutação e o número de indivíduos em cada geração têm impactos diretos no desempenho do método de otimização e, portanto, devem ser afinados para cada problema. Por exemplo, enquanto que para certos problemas poderá ser interessante considerar um elevado número de indivíduos em cada geração de modo a ter uma maior cobertura do espaço de soluções, para outros poderá significar um excessivo aumento do tempo de computação. Este ajuste de parâmetros deve, assim, permitir estabelecer um compromisso entre várias características do desempenho da metodologia de otimização como a convergência, a robustez e qualidade da solução, o tempo de computação, entre outras.

### 4.4.1 - Modelo 1

Neste primeiro modelo pretende-se construir uma versão muito simples do problema de planeamento de exploração de centrais hídricas num ambiente competitivo de mercado de eletricidade. A simplicidade desta primeira versão é justificada, por um lado, para se iniciar de forma mais aligeirada a abordagem a este complexo problema e, por outro, tornar também mais simples o estudo da performance dos Algoritmos Genéticos permitindo realizar um ajuste dos seus parâmetros a esta problemática.

Para este modelo, assim como para os seguintes, será considerado constante durante cada período o caudal de turbinagem e de bombagem, como referido e justificado anteriormente, tendo este valor sido fixado no seu valor máximo. Ou seja, assume-se que, se em determinada hora a central turbinava, em todo esse período será turbinada água com o caudal máximo, não se verificando uma diminuição desse valor porque se despreza a variação da altura da queda. Porém, nos modelos seguintes a altura da queda será atualizada no fim de cada período, alterando o valor de caudal máximo.

O efeito da variação da queda no valor de potência produzida em turbinagem ou no valor de potência consumida em bombagem será desprezado, ou seja, assume-se que o seu valor é constante (o que não está muito distante da realidade para centrais com grande capacidade de armazenamento).

Nesta primeira experiência são desprezadas as afluências de forma a simplificar o problema. Esta consideração tem também a vantagem de permitir observar o comportamento do algoritmo na medida em que a solução gerada terá tantos períodos de turbinagem como de bombagem. Efetivamente, se for utilizado o mesmo valor de caudal para turbinar e para bombear, para que no final a albufeira contenha armazenada tanta água como a que tinha armazenado no início, por cada ação de turbinagem é necessário realizar uma ação de bombagem. Só desta forma é que a solução obtida estará em condição de se poder considerar viável. A estratégia ótima será baseada num perfil de preços previstos fornecido ao algoritmo como dados de entrada.

Em suma, para este modelo, temos que:

- O caudal é constante e máximo em cada período do planeamento, sendo o caudal de turbinagem igual ao de bombagem;
- A altura de queda é constante;
- As afluências são nulas;
- Os preços são determinísticos;

#### 4.4.2 - Modelo 2

Na segunda abordagem ao problema do planeamento da exploração de centrais hídricas, foi criado um outro modelo mais completo e que traduz de forma mais realista o problema. Procurou-se também para este modelo realizar alguns testes, que se diferenciam pelo grau de complexidade introduzido ao problema.

A primeira alteração, em relação ao modelo anterior, deve-se à consideração de um caudal de bombagem diferente do caudal de turbinagem. No Modelo 1 estes dois caudais eram iguais de forma a simplificar os testes iniciais. Dessa forma, o número de períodos em que se turbinava era obrigatoriamente o mesmo que o número de períodos em que se bombava (desprezando as afluências). Na prática, procura-se colocar as máquinas a funcionar na sua potência nominal, mas como é superior o trabalho de colocar água na albufeira em relação à turbinagem, o caudal de bombagem é menor. Por outras palavras, para a mesma potência de funcionamento as máquinas bombam um menor caudal do que o que turbinam.

Como segunda alteração, incluiu-se neste modelo o valor da afluência horária de cada albufeira. Com isto, para que no fim do horizonte temporal de planeamento a quantidade de água armazenada seja a mesma que no início pode acontecer que a central realize um maior

número de turbinagens do que bombagens. Note-se que o problema foi discretizado pelo que se considera que o valor da afluência é constante em cada período de horário.

Por último, foi introduzida neste modelo a relação não linear entre a potência, a queda e o caudal. Desta forma, estabeleceu-se um modelo para o problema com características bastante próximas do que se verifica nos sistemas reais.

#### 4.4.3 - Modelo 3

Neste modelo implementou-se uma situação que reflete de certa forma a realidade envolvente do planeamento de centrais hídricas quando o detentor destas possui considerável potência instalada. Pode surgir uma situação em que a carga leiloada em mercado é de tal forma baixa que a potência somada das centrais de um produtor seja superior. Nestes casos, como as centrais não apresentam características iguais seria vantajoso para o produtor apresentar em mercado propostas das suas centrais que permitam obter um valor mais elevado de proveitos. Portanto, serão priorizadas centrais que obtêm uma maior receita a partir de menos recursos.

Contudo, o rendimento de conversão da central não será o único critério que o algoritmo utilizará para escalonar as centrais em cada período horário. Por exemplo, uma central pode até possuir um menor rendimento mas se, nas suas afluências, receber uma grande afluência natural poderá ser escolhida em detrimento de outra mais eficiente. Isto porque se a primeira tiver pouca capacidade de armazenamento, e se a segunda tiver capacidade elevada, ocorrerá provavelmente desperdício forçado de água se não for utilizada.

Com este modelo, em cada hora, será obtido o escalonamento e o pré-despacho de cada central de modo que a potência total somada das centrais não seja superior à carga. Aqui pode-se chamar a atenção para uma das limitações do modelo que se deve à própria construção do Algoritmo Genético. Aquando da implementação do código foi considerado que o algoritmo trabalharia com estados discretos de funcionamento das centrais, a central turbinaria ou bombaria com o máximo caudal ou estaria desligada. Assim, não é possível impor uma restrição ao problema que force a igualdade de potência entre produção e carga uma vez que a combinação de centrais resulta em valores discretos de produção. Ou seja, a restrição introduzida apenas obriga a que a produção total seja inferior à carga.

Os testes realizados para este modelo dividem-se em dois grupos. O primeiro grupo de testes resulta de um programa que obriga que a totalidade de produção em cada período horário não supere a previsão de carga. O segundo grupo inclui, adicionalmente, a consideração da potência de bombagem como uma carga a alimentar, ou seja, a potência produzida pelas centrais não pode ultrapassar o valor previsto de carga somado da potência de bombagem.

#### 4.4.4 - Modelo 4

Por fim, implementou-se um modelo que pretende corresponder a uma melhoria dos anteriores no sentido de aproximar as simulações à realidade em que se desenrola o planeamento da exploração de centrais hídricas. Na prática, o proprietário de uma grande capacidade de potência de produção realiza o planeamento das suas centrais com a noção de que o preço a que será remunerada a energia transacionada em mercado dependerá das

propostas apresentadas por todos os intervenientes. Para este produtor poderá não ser interessante apresentar propostas de venda de energia para todas as suas centrais no mesmo período uma vez que existe o risco de o preço se reduzir de forma substancial. A explicação é simples, se aumentar a oferta, o preço cairá. A redução dependerá do aumento da oferta, mas também da elasticidade das curvas de venda e de procura.

Para este modelo definiu-se uma curva de ofertas de venda com uma estrutura típica das curvas deste tipo. Relativamente à procura foi considerado que esta tinha um comportamento totalmente inelástico, ou seja, aceita qualquer preço que resulte do cruzamento entre a oferta e a procura. A curva de oferta é construída pelas propostas de venda de energia que os produtores apresentam em mercado. Deste modo, o resultado do planeamento da operação das centrais provocará uma alteração nessa curva.

Como foi explicado no segundo capítulo desta dissertação, a estratégia ideal que os produtores devem seguir no mercado de eletricidade é a de apresentarem propostas baseadas no custo marginal de produção da central. Ora, se o custo marginal das centrais hídricas é praticamente nulo existe uma forte probabilidade de uma central destas ser despachada, e o efeito que provoca na curva de oferta traduz-se, aproximadamente, por uma deslocação da curva de ofertas de venda para a direita. No caso de a proposta ser de compra de energia, para realizar bombagem, não será tão simples expressar o efeito da proposta na curva de procura pois o preço de compra pretendido poderá assumir vários valores. Contudo, para simplificação considerar-se-á neste modelo que o preço da proposta é suficientemente elevado para que o efeito na curva da procura seja o de uma deslocação para a direita, devido ao aumento da procura.

O algoritmo terá como dados de entrada, entre outros, um perfil de carga para o horizonte de planeamento. Será então necessário decidir quais os períodos em que as centrais devem turbinar e bombar de modo a maximizar os proveitos. A tarefa será agora ainda mais complicada porque o volume de energia apresentada pelo programa para transacionar afetará o preço de fecho do mercado de eletricidade.

A função objetivo do problema será alterada para que no cálculo da remuneração das centrais não seja utilizada uma previsão de preços fixa, mas antes uma expressão que exprima o preço de fecho de mercado em função das propostas das centrais geridas pelo programa ( 4.14 ). A função  $p(P_{Lk}, P_{T,ik}, P_{B,ik})$  devolve uma previsão do preço de fecho do mercado tendo como variáveis de entrada a carga prevista em cada hora,  $P_{Lk}$ , e as ordens de exploração emitidas pelo Algoritmo Genético. No Capítulo 5, a propósito da realização de simulações utilizando este modelo, será descrita a abordagem considerada para modelizar esta função.

$$Max Z = \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K p(P_{Lk}, P_{T,ik}, P_{B,ik}) \cdot (P_{T,ik} - P_{B,ik}) \quad ( 4.14 )$$





# Capítulo 5

## Aplicação da Metodologia

### 5.1 - Considerações gerais

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos no decorrer do estudo do problema de planeamento da exploração de centrais hídricas. Para este estudo foram realizadas várias simulações que se dividem em conjuntos diferenciáveis pelas considerações feitas para cada modelo do problema. Como descrito no capítulo anterior, estabeleceram-se vários modelos para abordar o problema. O objetivo foi o de aumentar progressivamente a complexidade do problema, num sentido de aproximação às condições reais de exploração.

A acompanhar os resultados dos diversos testes encontram-se também as respetivas interpretações. Além disso, ao longo do texto realizam-se algumas observações com o objetivo de estabelecer uma análise mais completa e coesa desta problemática.

#### 5.1.1 - Estruturação dos testes

Para além da aplicação de uma metodologia baseada em Algoritmos Genéticos ao problema, pretendia-se também realizar estudos sobre a viabilidade de tal abordagem. De facto, apesar de os AG's se terem revelado bastante bem sucedidos em várias problemáticas, é sabido que as meta-heurísticas possuem um comportamento que depende muito do problema a que são aplicadas. Ou seja, uma meta-heurística pode-se apresentar muito vantajosa quando aplicada a determinado problema de otimização mas ser incapaz de fornecer soluções com qualidade para problemas de natureza diferente.

O primeiro modelo criado para abordar o problema para além de utilizar uma formulação simplificada, de modo a criar uma progressiva sensibilidade sobre a temática, tinha por objetivo realizar alguns testes ao algoritmo implementado e proceder a algumas afinações para que melhor se adaptasse ao problema. Estas afinações procuram encontrar uma combinação de parâmetros do AG que permita a obtenção de soluções boas e robustas. A taxa de cruzamento não foi sujeita a este estudo uma vez que, devido á forma como foi implementado o algoritmo, não sugerir ter tanto peso no processo evolutivo como a taxa de seleção e a taxa de mutação. Por este motivo, a sua referência é por vezes omitida.

O segundo modelo apresenta-se como uma evolução do primeiro na medida em que introduz adicionalmente as relações não lineares características do funcionamento das centrais hídricas. Ainda neste modelo, o programa é agora também sujeito à gestão das afluências naturais de cada albufeira.

Para o terceiro modelo é considerada a possibilidade de as centrais competirem pela alimentação da carga. Este modelo obriga o programa a gerir as centrais de forma integrada. Repare-se que nos anteriores, as ordens de exploração resultantes para cada central são independentes entre si. Agora, o programa tem de gerir as centrais com vista a obter a maior remuneração possível, limitado por um perfil de carga. Esta tarefa fica bastante complicada quando se tem de gerir, adicionalmente, as afluências de cada central de modo a respeitar as restrições de volume final de água armazenado.

O quarto e último modelo expõe uma abordagem inovadora ao problema que se desenvolve em ambiente competitivo de mercado. Pretendia-se com este modelo verificar o comportamento do algoritmo quando este, ao invés de basear as suas decisões num perfil de preços previsto, utiliza curvas de compra e de venda de energia previstas para o mercado de eletricidade. A decisão torna-se assim mais complexa porque é necessário emitir ordens de exploração para as centrais sendo que cada ação tem impacto no preço de encontro do mercado.

Sumariamente, os objetivos dos diversos testes realizados encontram-se nos seguintes pontos:

- Verificar a viabilidade que uma metodologia baseada em AG's tem quando aplicada ao problema da otimização da exploração de centrais hídricas;
- Estudar a robustez das soluções - verificar qual a consistência dos resultados;
- Avaliar a qualidade das soluções - comparar os resultados com os obtidos por outros métodos;
- Avaliar a influência de parâmetros do AG - concluir sobre qual a melhor combinação para os parâmetros (nr. de indivíduos, nr. de gerações, taxa de seleção, taxa de cruzamento e taxa de mutação);
- Avaliar a viabilidade temporal do programa - fazer testes e obter informação sobre o tempo de computação;
- Avaliar a prestação do programa na resolução do problema considerando as suas características não lineares;
- Estudar o desempenho do programa perante um problema com características realistas e muito próximas da prática;
- Estudar *trade-offs* entre o tempo de computação e a qualidade das soluções;
- Analisar o comportamento do algoritmo à necessidade de colocar as centrais em competição por uma carga;
- Estudar e verificar a possibilidade de o algoritmo interagir e responder a curvas de compra e venda de energia.

### 5.1.2 - Ferramenta computacional utilizada

Como referido antes neste texto, para resolução do problema proposto para esta dissertação implementou-se um código na ferramenta de programação *Visual Basic for*

*Applications* do *Microsoft Excel*. Os dados utilizados para o algoritmo e a análise dos resultados são realizados em folhas *Excel*.

O computador em que foram realizados os diversos estudos possuía as seguintes características:

- Sistema operativo: *Microsoft 7 Professional (service pack 1)*;
- Processador: Intel® Core™2 Duo CPU E6300 1.86GHz;
- Memória RAM: 2,00 Ghz;
- Tipo de sistema: Sistema operativo de 32 bits.

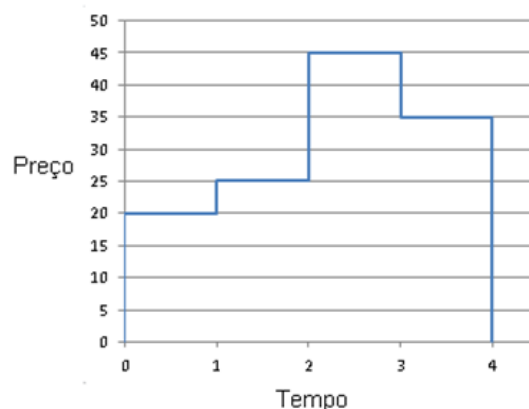
## 5.2 - Procedimento experimental e resultados

### 5.2.1 - Modelo 1

O primeiro modelo desenvolvido constitui uma versão bastante simplificada do problema de planeamento da exploração de centrais hídricas que foi justificada previamente neste texto. Porém, para além das razões que levaram à utilização de uma abordagem mais simples, foi desta forma obtido um modelo que permite que seja facilmente determinada a solução ótima do problema. Assim, será possível avaliar facilmente a performance do Algoritmo Genético.

Para avaliar a qualidade da solução fornecida pelo programa desenvolvido é importante poder ter uma ideia da proximidade dessa solução à solução ótima do problema. Apresenta-se de seguida uma metodologia de cálculo, desenvolvida no estudo da problemática do tema desta dissertação, e que pode ser utilizada para obter a melhor solução deste, e apenas deste, modelo.

Considere-se o gráfico representado na **Figura 5.1** que exemplifica a evolução do preço de mercado num horizonte temporal dividido em quatro períodos.



**Figura 5.1** - Exemplo de perfil de preço de mercado.

Se se pretendesse realizar o planeamento de exploração de uma central hídrica com base na evolução dos preços da figura anterior poderíamos ser tentados a dizer que a solução ótima consistiria em turbinar nos dois últimos períodos e realizar bombagem nos dois primeiros. Contudo, esta solução poderia não ser a melhor, como a seguir se irá verificar.

Considerando o modelo que foi desenvolvido pode-se com toda a certeza afirmar que se não forem consideradas as afluições naturais da albufeira e se o caudal de turbinagem for o mesmo que o de bombagem, para que no final da operação a albufeira contenha tanto volume de água como no início, é necessário que o número de períodos de bombagem seja igual ao número de períodos de turbinagem. Assim, por cada período que é selecionado para realizar turbinagem, existirá outro em que é necessário fazer bombagem para repor o volume de água da albufeira.

O método desenvolvido consiste então em selecionar o período de preço mais elevado e o de preço mais baixo para turbinagem e bombagem, respetivamente. De seguida, escolhe-se mais um par de preços e o processo continua até que não exista vantagem económica em realizar turbinagem e bombagem. Esta vantagem económica, traduzida em proveitos de operação, resulta do facto de ser utilizada mais energia para bombar do que para turbinar a mesma quantidade de água. Ou seja, turbinar-se em determinado período se houver outro em que o custo de bombar a água de novo para a albufeira é menor que o proveito obtido pelo primeiro.

Considerando um par de períodos de turbinagem/bombagem, o benefício económico de operar, será dada por ( 5.1 ), em que  $\rho$  representa o preço da energia do período,  $P$  representa o valor de potência e os índices  $T$  e  $B$  referem-se ao processo de turbinar e bombar, respetivamente. Desta forma, como a potência obtida na turbinagem é menor do que a que é consumida para bombar, verifica-se que a decisão de turbinar e de bombar um par de períodos depende do cumprimento da condição ( 5.2 ).

$$Z = \rho_T P_T - \rho_B P_B \quad ( 5.1 )$$

$$\frac{P_T}{P_B} \geq \frac{\rho_B}{\rho_T} \quad ( 5.2 )$$

Aplicando este resultado ao problema associado ao Modelo 1, deverá começar por se determinar a razão entre a potência de turbinagem e a potência de bombagem para cada uma das centrais. Foram consideradas 2 centrais e as suas características podem ser encontradas em anexo a este texto. De seguida, ordenam-se os preços do horizonte temporal considerado. Constituem-se pares turbinagem/bombagem e calcula-se a razão entre o preço para bombar e o preço para turbinar. Os pares que respeitarem a condição anterior representam ordens de ação a considerar e o proveito é calculado utilizando a função objetivo do problema. Na **Figura 5.2** representam-se os cálculos efetuados considerando os dados que se apresenta do lado esquerdo e a sequência de preços do lado direito. Os preços estão ordenados de forma a formar possíveis pares de períodos em que se turbinar e bomba. Os pares cuja razão entre preços é superior à razão entre as potências de turbinagem e de bombagem contribuem negativamente para os proveitos, por isso não entram para o planeamento.

	Central 1	Central 2
$P_T$ (MW)	172,48	104,66
$P_B$ (MW)	213,04	126,45
$P_T/P_B$	0,8096	0,8277

Turbinar?	$\rho_T$ (€)	Bombar?	$\rho_B$ (€)	$\rho_B/\rho_T$
18	90,60	1	45,00	0,49669
19	85,00	3	45,44	0,53459
20	85,00	5	45,51	0,53541
21	80,47	4	45,52	0,56568
23	79,72	6	45,58	0,57175
10	72,50	2	46,50	0,64138
12	72,42	0	55,00	0,75946
11	71,74	7	55,49	0,77349
22	70,00	8	56,16	0,80229
13	66,25	16	58,50	0,88302
17	62,00	15	58,95	0,95081
9	61,75	14	61,07	0,98899

Figura 5.2 - Quadros com dados das potências de turbinagem e de bombagem, e os preços de mercado, utilizados para a metodologia descrita.

Desta análise resulta que o proveito máximo para este problema será de 46619,78 € e que a estratégia de funcionamento será igual para ambas as centrais. No gráfico da Figura 5.3 representa-se a solução ótima que é possível obter.

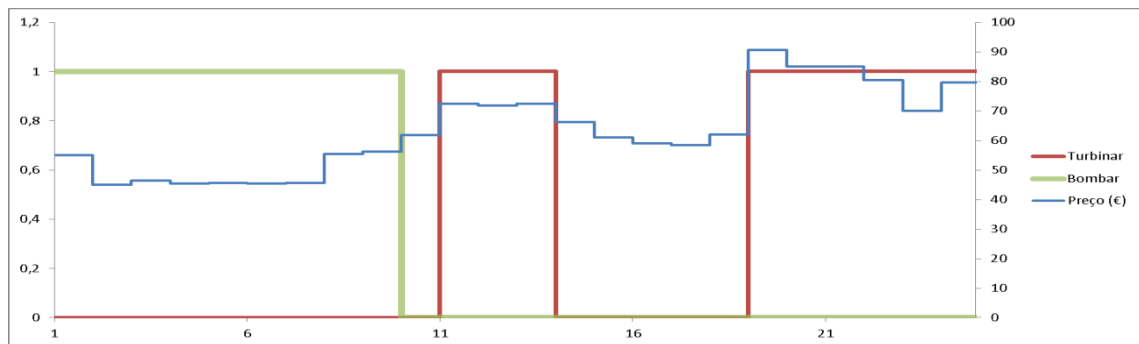


Figura 5.3 - Ordens de turbinagem e bombagem ótimas para o problema do Modelo 1.

Agora, utilizando o algoritmo construído para resolução do problema, foram realizados alguns testes para obter diversas conclusões acerca do seu comportamento. Os dados sobre as características das centrais podem ser consultados em anexo a este texto.

### Conjunto de Testes 1

Com estes testes pretende-se estudar a consistência dos resultados obtidos pelo programa pelo que o código foi executado quatro vezes sempre com a mesma configuração (10000 gerações, 20 indivíduos por geração, taxas de seleção e de cruzamento de 0,8 e taxa de mutação de 0,05). Na Figura 5.4 apresenta-se a evolução do melhor indivíduo ao longo do processo iterativo e na Figura 5.5 apresenta-se a evolução da melhor solução de cada geração.

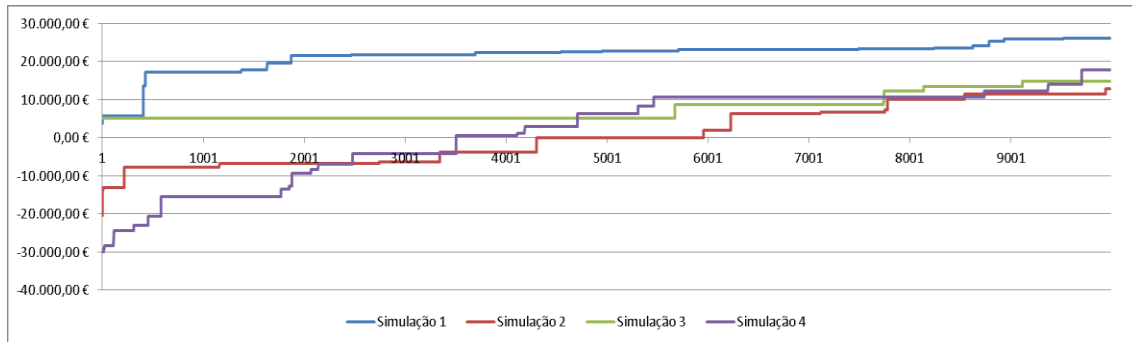


Figura 5.4 - Representação do melhor indivíduo ao longo de todo o processo evolutivo.

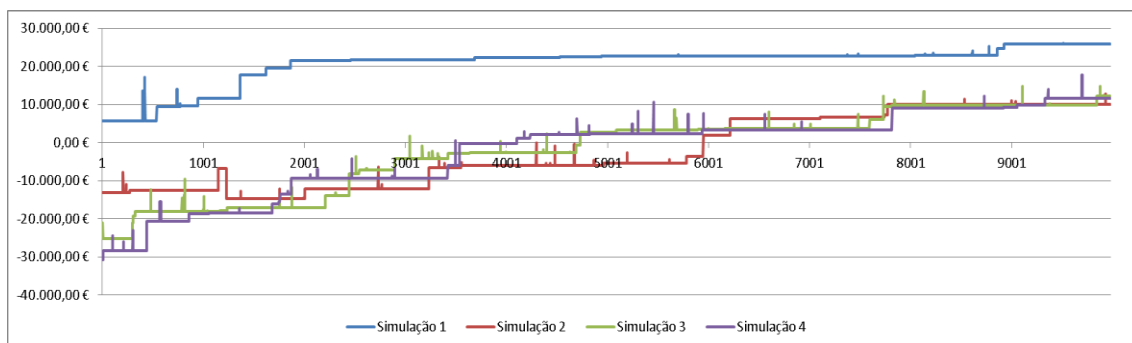


Figura 5.5 - Representação do melhor indivíduo em cada geração.

Como se pode verificar pelos gráficos anteriores, a primeira solução de cada simulação pode ser muito diferente de execução para execução. Isto deve-se ao facto de não ser utilizada qualquer estratégia para que o algoritmo se inicie com uma população especificada, sendo esta gerada aleatoriamente. Apesar disso, à exceção da Simulação 1, as várias simulações parecem convergir ao fim de algumas iterações para valores semelhantes. De qualquer modo, as soluções obtidas não podem ser consideradas satisfatórias verificando-se que seriam necessárias mais iterações, uma vez que a solução ótima teria um valor da função objetivo de 46619,78 €, como se referiu anteriormente. As Figuras 5.6 e 5.7 apresentam as ordens de exploração associadas à melhor solução obtida no conjunto das quatro simulações, para as duas centrais consideradas.

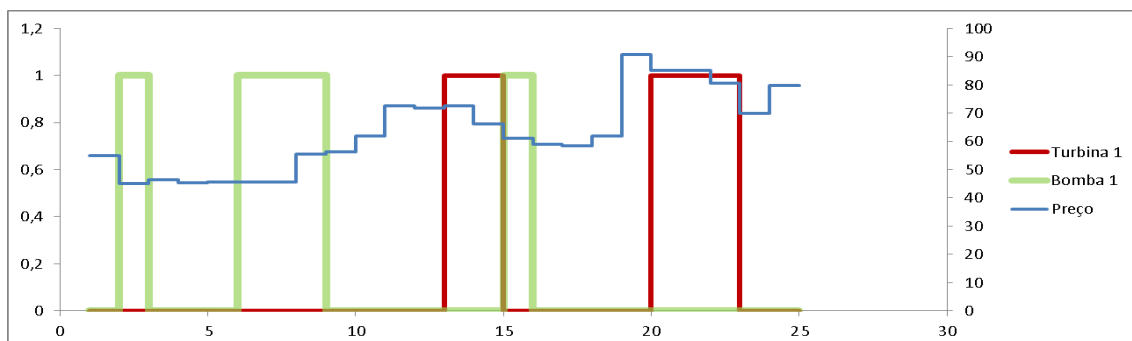


Figura 5.6 - Ordens de exploração para a Central 1.

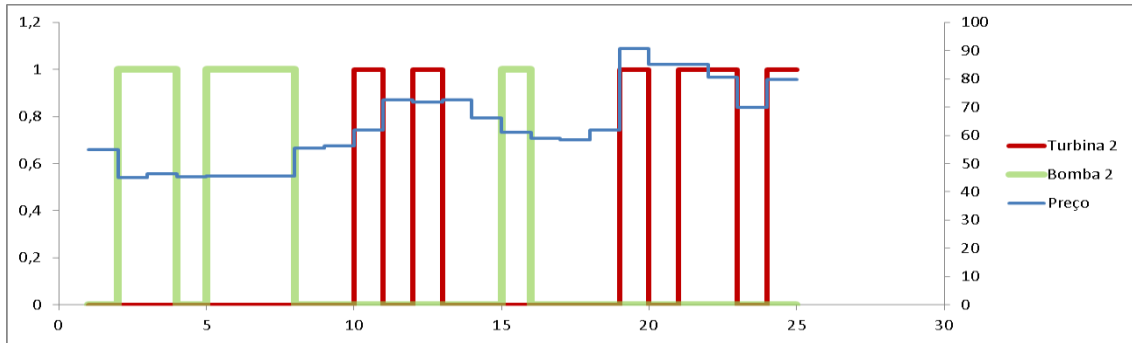


Figura 5.7 - Ordens de exploração para a Central 2.

Apesar de não corresponder à solução ideal, verifica-se que a forma da solução obtida se aproxima da ideal, com tendência para turbinar em períodos em que o preço de mercado é mais elevado, e bombear quando o preço se apresenta mais baixo. Note-se que para esta simulação foi utilizada uma configuração do algoritmo genético não otimizada. Certamente que se, por exemplo, fosse aumentado o número de indivíduos por geração se verificaria uma melhor solução ao fim de 10000 gerações, mas com conseqüente aumento do tempo de computação. Na Tabela 5.1 apresentam-se os tempos de computação para cada simulação realizada.

Tabela 5.1 - Tempo de computação para cada simulação.

	Tempo (s)
Simulação 1	52,05
Simulação 2	49,52
Simulação 3	46,32
Simulação 4	48,85

De modo a obter uma melhor solução procedeu-se a mais uma simulação com a diferença de agora se realizarem 20000 gerações. Nas figuras seguintes apresentam-se a evolução dos melhores indivíduos e a melhor solução de exploração alcançada referente a um proveito de 31916,14 €.

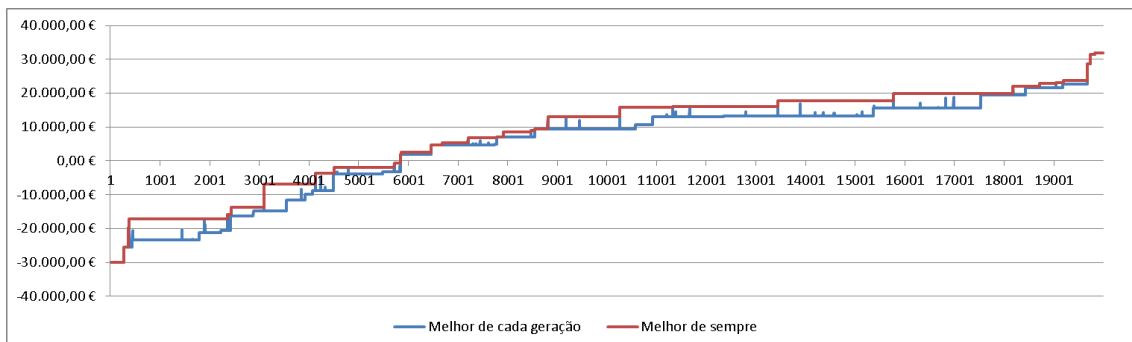


Figura 5.8 - Melhor indivíduo em todo o processo evolutivo e melhor indivíduo em cada geração.

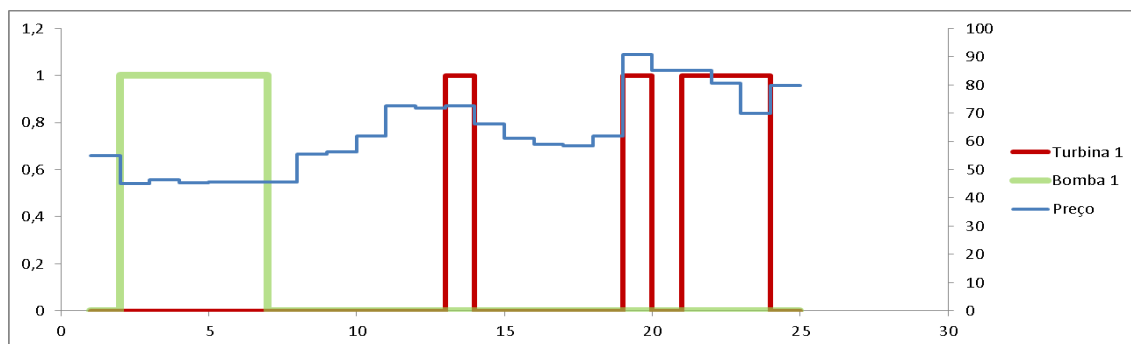


Figura 5.9 - Ordens de exploração para a Central 1.

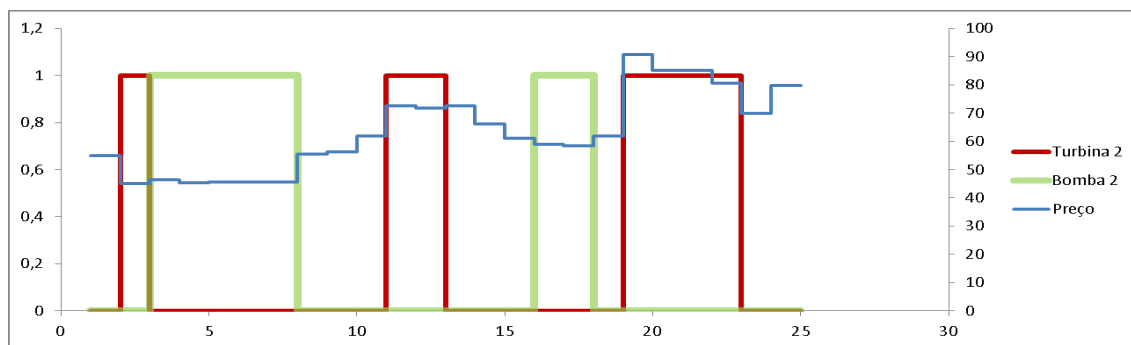


Figura 5.10 -Ordens de exploração para a Central 2.

Como seria de esperar a solução agora obtida é um pouco melhor do que as obtidas com metade das iterações. Porém, o programa necessitou de 102,02 segundos para a obter e não se pode afirmar que a solução seja bastante satisfatória. Aliás, após realizar 10000 iterações, esta última simulação apresentava resultados consideravelmente piores do que as simulações realizadas anteriormente (Figura 5.8). Assim, pode concluir-se que existe falta de consistência na configuração atual do programa.

De qualquer modo, mesmo para uma versão otimizada do programa existe sempre a necessidade de estabelecer um compromisso entre a qualidade da solução e o tempo de computação. Este compromisso só pode ser definido através de um *trade-off* estabelecido pelo agente de decisão relacionado com a resposta à seguinte questão: Em quanto se está disposto a sacrificar a qualidade da solução para obter um menor tempo de computação?

## Conjunto de Testes 2

No sentido de obter alguma afinação dos parâmetros do Algoritmo Genético executaram-se algumas simulações em que o valor da taxa de seleção foi alterado. Lembra-se que o valor da taxa de seleção, no caso da realização de torneios estocásticos, estabelece a probabilidade que um indivíduo mais adaptado tem de vir a ser escolhido para se reproduzir mas, também, a de um indivíduo menos adaptado vir a integrar essa lista de reprodutores. Se este valor for demasiado elevado diz-se que a pressão na seleção é forte, o que pode originar uma convergência prematura do AG. Isto acontece porque existe a possibilidade de um pequeno número de indivíduos bastante adaptados, comparativamente à restante população, poder rapidamente assumir um papel demasiado dominante. A taxa de cruzamento, conforme explicado no Capítulo 4, não se alterou em nenhum dos testes realizados neste trabalho mantendo um valor de 0,8.



Nestes testes realizaram-se algumas simulações para diferentes valores da taxa de seleção com o objetivo não só de obter melhores soluções mas também de tornar os resultados mais consistentes. A consistência foi avaliada pelo cálculo do desvio médio da remuneração das soluções no conjunto das quatro simulações para cada um dos valores de taxa de seleção. Na **Tabela 5.2** é possível observar um resumo dos resultados obtidos.

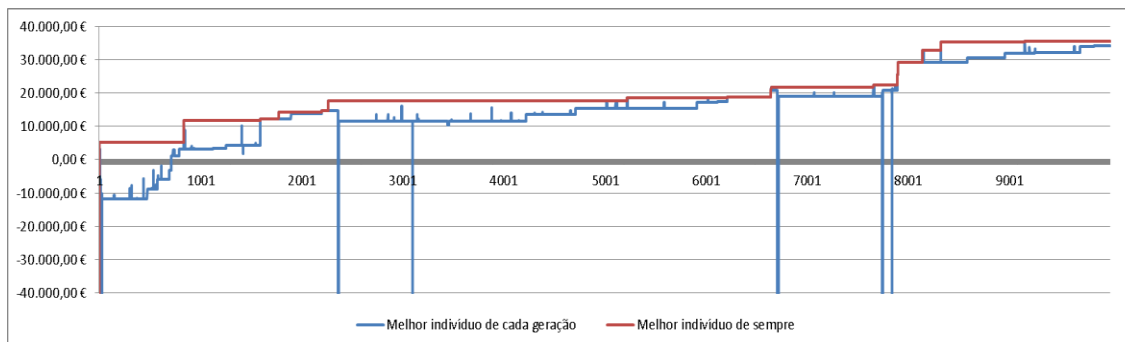
**Tabela 5.2** - Resultados médios obtidos para simulações de diferentes valores de taxa de seleção.

Taxa de seleção	0,6	0,7	0,8	0,9
Remuneração Média (€)	12299,68	26225,42	17840,26	7404,21
Desvio médio (€)	3239,78	6080,95	4068,22	8128,85

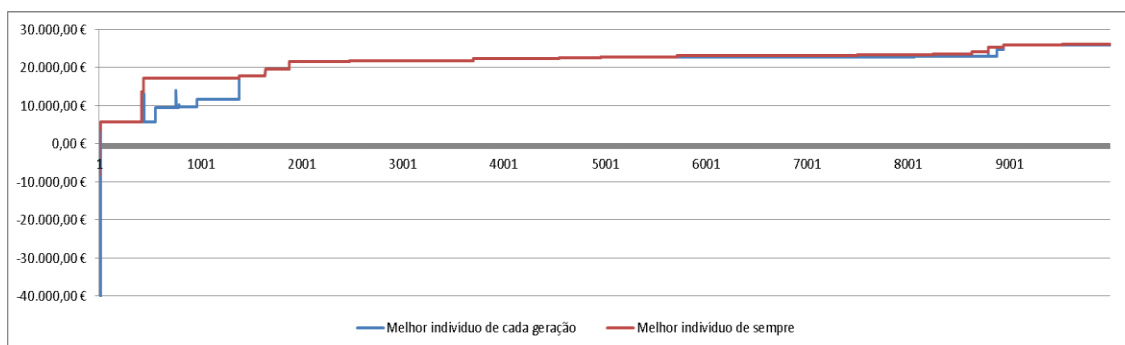
Os resultados obtidos indicam que com uma taxa de seleção de 0,7 se consegue obter em média melhores soluções. Por outro lado, a consistência de resultados é muito importante e segundo este aspeto uma taxa de seleção de 0,7 não seria a mais adequada. Além disso, chama-se novamente a atenção para o facto de a realização de apenas quatro simulações para cada valor de taxa de seleção propiciar a obtenção de conclusões incorretas. Para que se pudessem realizar afirmações com razoável certeza seria necessário realizar bastantes mais simulações. Não sendo o principal objetivo deste trabalho o estudo da parametrização do Algoritmo Genético, pretende-se apenas criar alguma sensibilidade para a problemática e obter alguma afinação desses parâmetros.

Voltando à questão da qualidade das soluções, utilizando a perspetiva do detentor de ativos de produção hídricos, parece importante que a consistência de resultados permita obter um elevado grau de confiança acerca das decisões a tomar. Com efeito, apesar de os resultados obtidos indicarem melhores soluções para uma taxa de 0,7, o desvio dos valores obtidos nas várias simulações pode ser problemático e constituir um risco acrescido para o planeamento. Além disso, constata-se a existência de outra possível complicação para a afinação. As simulações realizadas possuem um parâmetro relativo à taxa de cruzamento e outro relativo à taxa de mutação que foram definidos sem qualquer critério. Ou seja, por exemplo, a utilização de uma taxa de mutação de 0,05 pode permitir obter bons resultados para a taxa de seleção de 0,7 mas isto não se verificar para outro valor de taxa de mutação. Aliás, considerando os resultados obtidos e também o resultado ótimo (46619,78 €) verifica-se que estes ficam demasiado aquém das expectativas. É verdade que podem ser necessárias mais iterações, mas também é possível que as combinações de taxas consideradas (seleção, cruzamento e mutação) contribuam para a convergência do algoritmo para um mínimo local não permitindo obter a solução ideal (nem soluções próximas).

Outro efeito que se constatou com este conjunto de testes relaciona-se com a evolução dos melhores indivíduos ao longo do processo. Nas **Figuras 5.11** e **5.12** apresentam-se as soluções obtidas durante a evolução da simulação que obteve a melhor solução para uma taxa de seleção de 0,7 e de 0,8.



**Figura 5.11** - Melhor indivíduo de todo o processo evolutivo e melhor indivíduo em cada geração para uma taxa de seleção de 0,7.



**Figura 5.12** - Melhor indivíduo de todo o processo evolutivo e melhor indivíduo em cada geração para uma taxa de seleção de 0,8.

Observando o primeiro gráfico, verifica-se que a utilização de uma taxa de seleção menor leva a que, em certas gerações, não se produza um único indivíduo viável o que pode ser observado pelos traços verticais no gráfico que não são mais do que pontos com função de avaliação de valor muito negativo originado pela penalização atribuída a indivíduos inviáveis. Isto significa que possivelmente se está a conferir demasiada probabilidade aos indivíduos menos adaptados de se reproduzirem. Contudo, não se pode afirmar que este efeito seja um aspeto negativo e que venha a prejudicar a evolução da população. No sentido de se estudar o efeito referido numa população com mais gerações obtiveram-se os gráficos para os mesmos parâmetros mas com 20000 gerações. Apresentam-se a seguir os melhores resultados obtidos após algumas simulações. Assim, na **Figura 5.13** apresenta-se a evolução da população com uma taxa de seleção de 0,7 e taxa de mutação de 0,05, e na **Figura 5.14** a evolução para uma taxa de seleção de 0,8 e taxa de mutação de 0,05. A taxa de cruzamento foi sempre mantida em 0,8 uma vez que, devido á forma como foi implementado o algoritmo, não indicar ter tanto peso no processo evolutivo como a taxa de seleção e a taxa de mutação.

Analisando os gráficos seguintes pouco se pode afirmar sobre qual a combinação de parâmetros mais adequada. De qualquer modo, podem-se fazer algumas observações, apesar de arriscadas, sobre a performance de cada combinação. Na **Figura 5.13** verifica-se a existência de gerações ao longo do processo evolutivo de onde resultaram na sua totalidade indivíduos “maus” (valores muito negativos de proveitos), o que já não acontece se a taxa de seleção for aumentada para 0,8 (**Figura 5.14**). Mas, mais uma vez, não se pode afirmar que esta situação constitua um aspeto positivo ou negativo visto que ao fim das 20000 iterações se obtiveram resultados não muito distantes entre si.

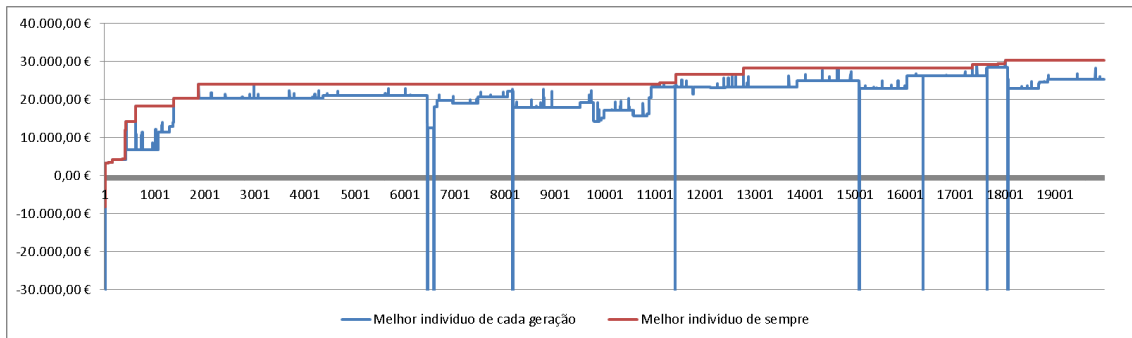


Figura 5.13 - Melhor indivíduo durante o processo evolutivo e melhor indivíduo de cada geração para uma taxa de seleção de 0,7.

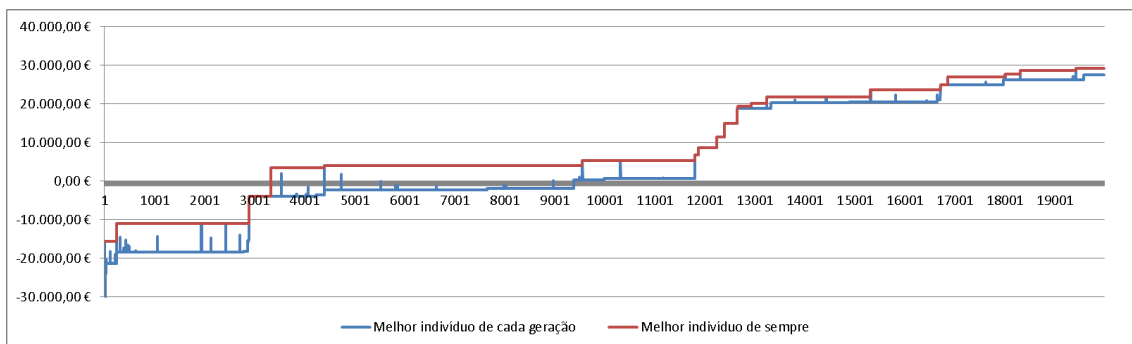


Figura 5.14 - Melhor indivíduo durante o processo evolutivo e melhor indivíduo de cada geração para uma taxa de seleção de 0,8.

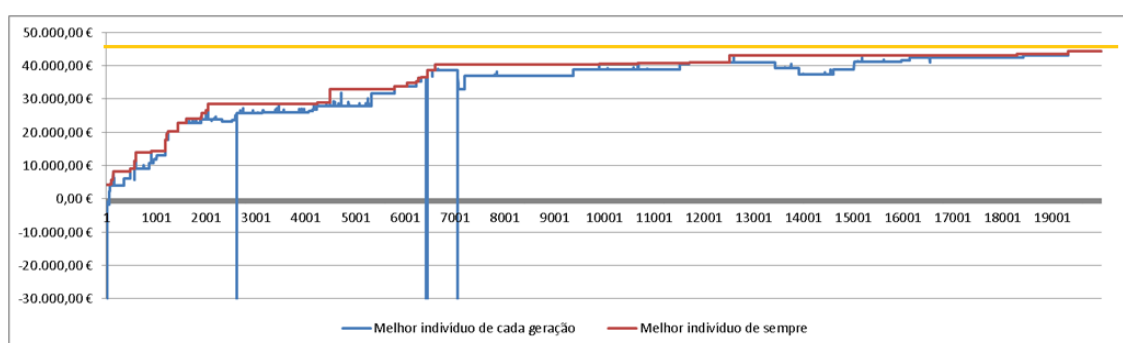
Relembrando que a solução ótima associada a este problema simplificado seria de 46619,78 € pode-se dizer que os resultados obtidos não são totalmente satisfatórios. Efetivamente, verifica-se que o algoritmo parece estar bem construído, ocorrendo a tendência esperada de se turbinar em horas de preço mais elevado e bombar em horas de preço mais baixo. Contudo, o elevado número de iterações necessário para obter uma solução satisfatória chamou a atenção para o facto de que, possivelmente, a taxa de mutação utilizada estaria a prejudicar os resultados. Para comprovar esta hipótese realizaram-se algumas simulações com 20000 gerações com uma taxa de mutação mais elevada e os resultados foram algo surpreendentes, como se pode verificar pela Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Resultados de simulações para diferentes configurações de taxa de seleção e de taxa de mutação.

	Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3	Simulação 4	Simulação 5	Média	Desvio médio
ts=0,7 tm=0,05	24258,07	30170,60	26760,65	26760,65	25124,31	26614,85	1538,93
ts=0,7 tm=0,1	34654,91	28421,66	29019,21	32689,65	30362,15	31029,52	2114,21
ts=0,8 tm=0,05	21844,16	29107,58	27323,96	24438,88	24828,83	25508,68	2165,67
ts=0,8 tm=0,1	42072,51	40773,51	45284,68	45900,91	44638,36	43733,99	1848,79
ts=0,9 tm=0,05	23661,91	437,36	1437,17	4080,39	16811,73	9285,71	8760,89
ts=0,9 tm=0,1	40094,67	41999,88	42071,85	36723,93	43245,39	40827,14	1934,27

Constatou-se que os melhores resultados para o problema se obtinham para uma taxa de seleção de 0,8 se a taxa de mutação for de 0,1. Este resultado contraria o que se podia concluir das anteriores simulações com taxa de mutação de 0,05, as quais indicavam preferência para uma taxa de seleção de 0,7. Porém, estes últimos testes revelam uma possível combinação de taxas que resulta em soluções muito próximas da ideal. Sendo assim, deste segundo conjunto de testes, conclui-se que a utilização de uma taxa de seleção de 0,8 é uma boa opção no sentido de se alcançar resultados bons e consistentes, para o problema em questão.

Na **Figura 5.15** representa-se uma das evoluções dadas pelo algoritmo com uma taxa de seleção de 0,8 e uma taxa de mutação de 0,1 em que se pode constatar a proximidade entre a solução obtida pelo programa e a solução ótima determinada pelo método analítico.



**Figura 5.15** - Evolução do melhor indivíduo de sempre e do melhor indivíduo de cada geração

Relativamente ao tempo necessário para realizar cada simulação foram necessários, em média, 108 segundos para 10000 gerações e aproximadamente o dobro para 20000 gerações, não se revelando diferenças significativas provocadas pela alteração da taxa de seleção.

Depois destes últimos resultados pode-se apresentar uma justificação para o facto de, inicialmente, uma taxa de seleção menor apresentar um melhor desempenho. Acontece que a taxa de mutação, responsável por criar diversidade na população, era para este problema muito reduzida. Deste modo, a possibilidade de introduzir indivíduos diferentes na reprodução e, com isso, gerar melhores soluções, advinha de uma maior probabilidade de introduzir indivíduos menos adaptados estabelecendo assim alguma diversidade. Note-se que um indivíduo pode revelar menores potencialidades mas possuir no seu material genético algumas boas características. Contudo, a natureza discreta e combinatória do problema tratado nesta dissertação parece indicar a necessidade de introdução de diversidade na evolução da população através de um mecanismo de mutação mais forte, o que significa uma busca mais alargada pelo espaço de soluções.

A partir deste ponto, será utilizado nas simulações seguintes um valor de taxa de seleção igual a 0,8 mas chama-se a atenção para o facto de não ser pretensão destes testes afirmar que este corresponde ao valor ideal. A combinação ideal destes parâmetros não está incluída no âmbito desta dissertação, procurando-se apenas identificar uma boa combinação.

### Conjunto de Testes 3

Procura-se agora obter uma aproximação ao valor mais adequado de taxa de mutação para este problema. Para tal utiliza-se o melhor valor obtido anteriormente para a taxa de seleção e foram realizadas várias simulações para diferentes valores da taxa de mutação.

Para cada simulação foi considerada uma taxa de seleção de 0,8 e realizaram-se 20000 reproduções. Na Tabela 5.4 encontram-se sumariados os resultados obtidos.

Tabela 5.4 - Resultados médios de simulações com diferentes valores de taxa de mutação.

Taxa de mutação	0,05	0,08	0,1	0,12
Remuneração Média (€)	25508,68	37398,09	42715,99	41672,60
Desvio médio (€)	2165,67	1537,47	1032,16	1408,06

Com os resultados obtidos verifica-se que as taxas de mutação com valores de 0,1 e de 0,12 são boas opções a utilizar para este problema. Recaindo uma aparente vantagem para a taxa de 0,1, será este o valor para a taxa de mutação a utilizar nas simulações seguintes para resolver o problema do planeamento da exploração de centrais hídricas.

Para alguém familiarizado com as metodologias de otimização baseadas em Algoritmos Genéticos este valor de taxa de mutação poderá parecer bastante elevado. Com efeito, na literatura são frequentes as indicações para uma taxa de mutação na ordem dos 1-3%. Por outro lado, é também frequente a referência de que estes valores dependem muito das características do problema, e este trabalho é realmente um exemplo da utilização de uma taxa de mutação mais elevada.

Depois destas observações, decorrentes da realização de alguns testes para se inferir a respeito de uma boa escolha de parâmetros para o algoritmo, realizou-se um último para verificar a evolução da população com a configuração de parâmetros encontrada. Desta vez, utilizaram-se 30 indivíduos por geração ao invés dos 20 considerados em todas as simulações anteriores. Nas figuras seguintes apresenta-se a evolução da população e as ordens de turbinagem/bombagem obtidas.

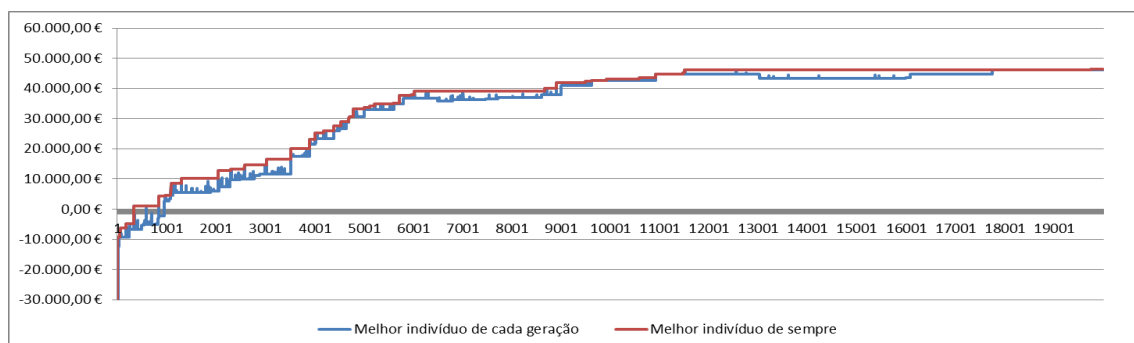


Figura 5.16 - Melhor indivíduo de todo o processo evolutivo e melhor indivíduo de cada geração.

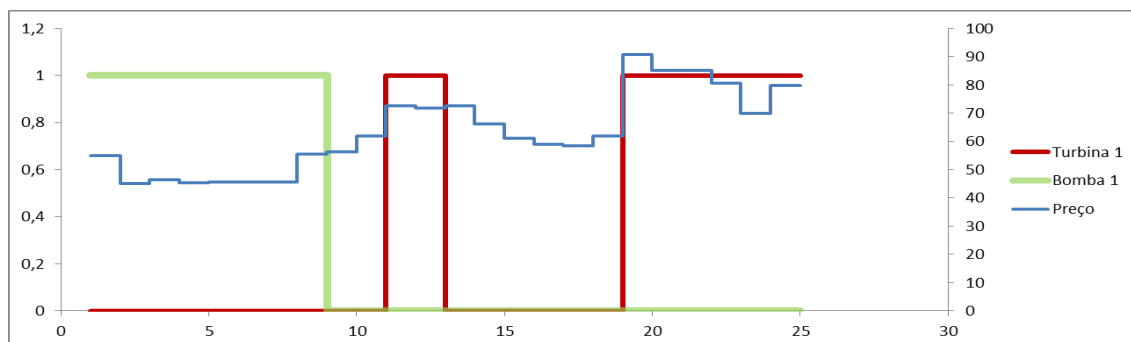


Figura 5.17 - Ordens de exploração para a Central 1.

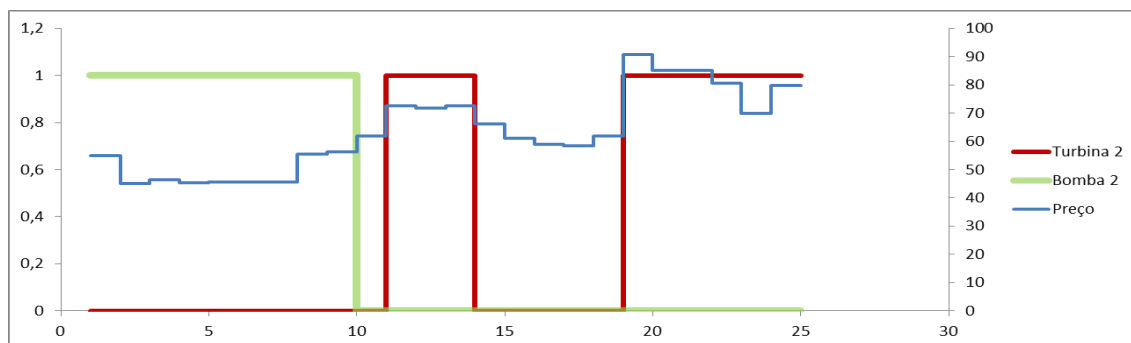


Figura 5.18 - Ordens de exploração para a Central 2.

Os resultados obtidos permitem afirmar que o desempenho do algoritmo é bastante satisfatório. A solução obtida corresponde a um proveito de 46510,70 €, em 153,20 segundos, quando a solução ótima, determinada no início deste estudo, é de 46619,78 €. Efetivamente, as ordens de exploração obtidas para a Central 2 são exatamente as mesmas que as determinadas para a solução ótima. A diferença de proveitos é explicada pelas ordens de exploração da Central 1 que diferem ligeiramente da solução ótima devido à não utilização de um par de períodos para turbinar e bombar.

#### Conjunto de Testes 4

Neste conjunto de testes procurou-se avaliar o comportamento do AG implementado quando se incluíam mais centrais no problema. Com esse intuito o programa tinha sido inicialmente já construído de modo a poder receber por parte do utilizador o número de centrais a considerar no exercício de planeamento.

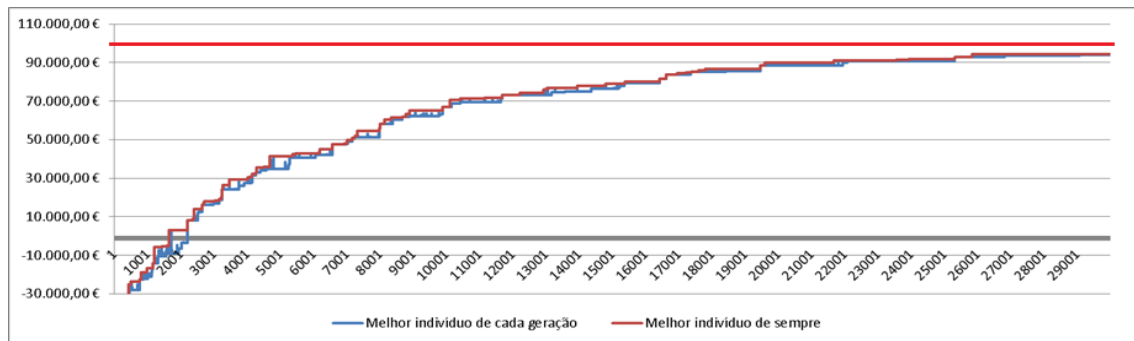
Apresentam-se na **Tabela 5.5** os resultados obtidos com diferentes números de centrais e diferentes números de indivíduos por geração mas com iguais valores para os restantes parâmetros do algoritmo (20000 gerações, taxas de seleção e de cruzamento de 0,8 e taxa de mutação de 0,1). As quatro centrais são diferentes e as suas características podem ser encontradas em anexo a este texto.

**Tabela 5.5** - Resultado da remuneração e do tempo de computação para problemas com diferente número de centrais.

	1 Central	2 Centrais	3 Centrais	4 Centrais
<b>20 Indivíduos</b>	28.130,16 €	43.052,14 €	46.150,92 €	65.820,91 €
	93,07 seg	106,36 seg	160,12 seg	173,96 seg
<b>30 Indivíduos</b>	28.239,24 €	43.516,11 €	50.520,29 €	73.205,41 €
	139,31seg	153,94 seg	207,64 seg	221,35 seg
<b>40 Indivíduos</b>	28.239,24 €	46.038,62 €	57.540,87 €	80.406,22 €
	172,54 seg	196,60 seg	242,94 seg	283,87 seg
<b>Solução ótima</b>	28.239,24 €	46.619,78 €	62.702,76 €	102.728,82 €

Com base nos resultados da tabela anterior pode-se afirmar que o grau de satisfação, do ponto de vista de qualidade da solução, é maior quando o planeamento inclui um número menor de centrais. O mesmo se pode afirmar em relação a um maior número de indivíduos utilizado por geração. Contudo, sacrifica-se um considerável ganho de tempo com esse aumento. Considerando uma população de 40 indivíduos por geração os resultados podem ser considerados bons, com exceção da solução obtida para o problema que inclui 4 centrais. Neste último, a solução distancia-se bastante (cerca de 20%) da solução ótima que é possível obter pelo método analítico inicialmente descrito para este Modelo 1.

Com o objetivo de melhorar a solução para o problema que inclui as quatro centrais realizou-se mais uma simulação mas agora utilizando 30000 gerações e 50 indivíduos por geração. O resultado, obtido em 478,33 segundos, apresenta-se na **Figura 5.19**.



**Figura 5.19** - Evolução do melhor indivíduo de sempre e do melhor de cada geração.

Na **Figura 5.19** é de facto possível verificar a convergência do algoritmo para uma solução muito próxima da ideal. Relativamente ao tempo de computação, parece longo mas apenas comparando com outros métodos se poderiam retirar algumas conclusões.

Neste momento decidiu-se realizar uma nova simulação com os mesmos parâmetros da última mas agora considerando uma horizonte temporal de 48 horas. Os resultados, após 905 segundos apresentam-se nas figuras seguintes.

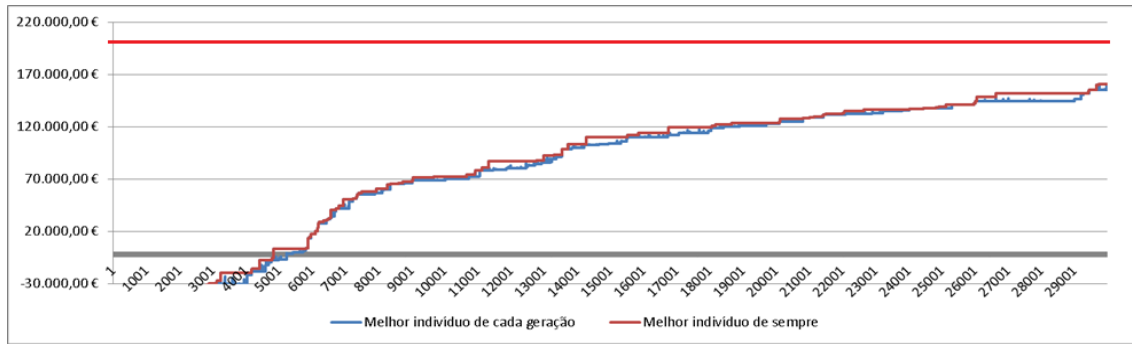


Figura 5.20 - Evolução do melhor indivíduo de sempre e do melhor de cada geração.

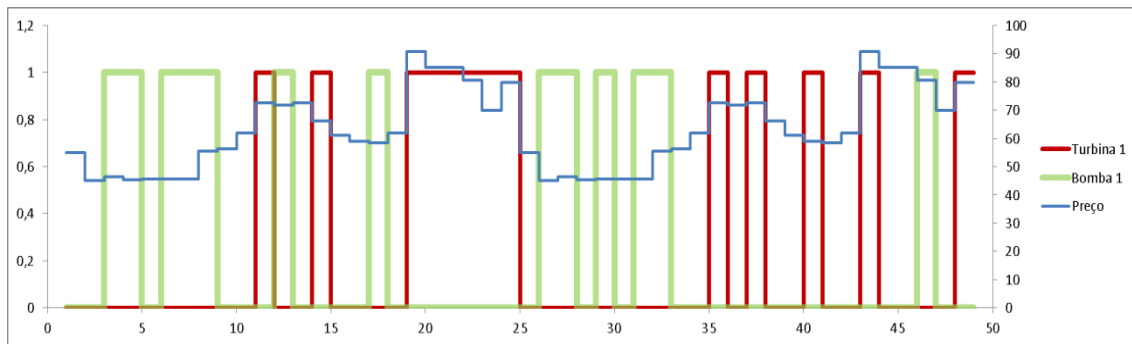


Figura 5.21 - Ordens de exploração para a Central 1.

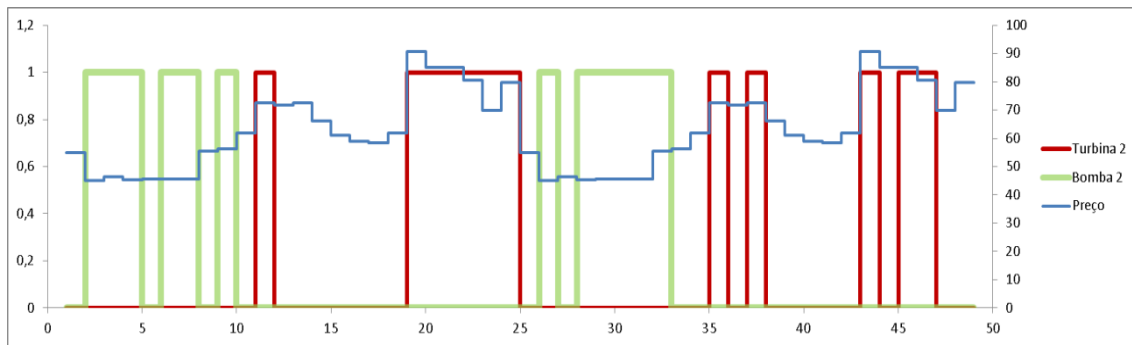


Figura 5.22 - Ordens de exploração para a Central 2.

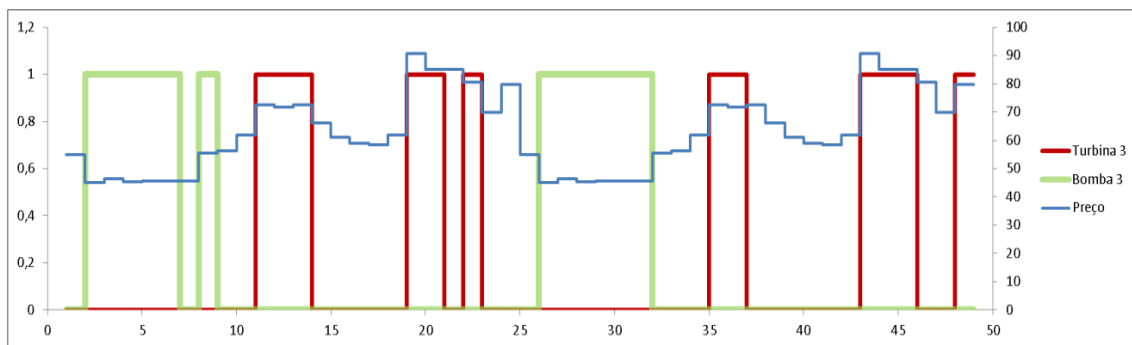


Figura 5.23 - Ordens de exploração para a Central 3.



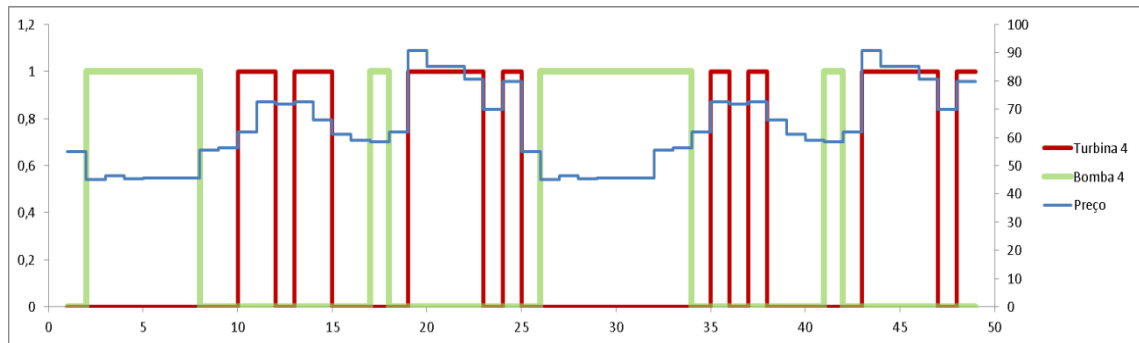


Figura 5.24 - Ordens de exploração para a Central 4.

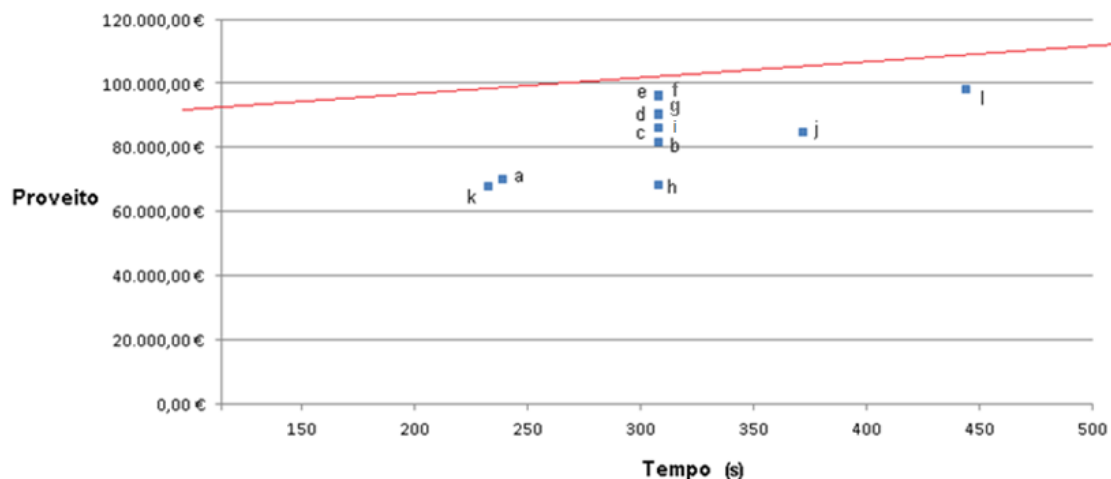
Os gráficos obtidos revelam alguma dificuldade para o Algoritmo Genético encontrar a solução ótima, ou pelo menos se aproximar. Efetivamente, a melhor solução obtida corresponde a um proveito de 160512 € quando o valor ótimo seria aproximadamente de 205000 €. Porém, é inegável a tendência para turbinar nos períodos de preço mais elevado e bombear quando o preço desce.

Depois de todos estes testes conclui-se que o problema associado ao Modelo 1 seria resolvido de forma mais eficiente se o algoritmo resolvesse o problema de cada central separadamente. Ou seja, seria obtida a solução para a primeira central, depois para a segunda e assim consecutivamente até à última.

Perante esta situação, no sentido de encontrar uma resposta e uma possível solução para melhorar os resultados das últimas simulações, procurou-se verificar se não seria novamente a falta de afinação dos parâmetros do algoritmo que estariam a afetar os resultados. Para isso realizaram-se uma série de simulações do exercício de planeamento de 4 centrais para 24 horas, com diferentes combinações de parâmetros, e que se apresentam resumidamente na Tabela 5.6. Importa relembrar que para esse problema a solução ótima corresponde a um proveito de 102.728,82 €. Na Figura 5.25 encontram-se distribuídas num gráfico as configurações simuladas em função do proveito alcançado e do tempo necessário para o calcular. Observe-se que algumas opções correspondem a um proveito tão próximo que no gráfico não é possível distingui-las.

Tabela 5.6 - Resultados de diversas combinações de parâmetros para o algoritmo.

Gerações	20000										30000	
	30	40								50	20	40
ts	0,8							0,7	0,9	0,8		
tm	0,1	0,1	0,12	0,14	0,15	0,16	0,17	0,16	0,16	0,1	0,1	0,16
Tempo médio (s)	239	308									233	444
Proveito médio (€)	70039	81362	86116	90512	96152	96365	95773	68132	89867	84409	67678	97898
Solução	a	b	c	d	e	f	g	h	i	J	k	l



**Figura 5.25** - Distribuição das diversas combinações de acordo com o tempo de cálculo e o proveito obtido.

Como foi anteriormente referido, o principal objetivo do problema de planeamento de exploração de centrais hídricas é maximizar os proveitos obtidos tendo em conta as propostas apresentadas em mercado. Para resolver este problema é necessário alguma metodologia de resolução, o que implica, por sua vez, tempo. As meta-heurísticas surgem muitas vezes como alternativas vantajosas em problemas com elevada complexidade. Estas permitem em geral obter soluções adequadas mas, em contrapartida, não fornecem garantia de obtenção da solução ideal. Neste contexto, pode-se afirmar que ao problema de maximizar os proveitos se adiciona um outro critério, o de minimizar o tempo de computação.

Quando se tem de tomar uma decisão existem alguns procedimentos que se seguem de forma mais ou menos sistemática: identificam-se as alternativas, verifica-se a sua viabilidade e definem-se critérios de avaliação.

As dificuldades surgem quando a decisão se baseia em vários critérios, pois estes são normalmente conflituosos, ou seja, não é habitual a existência de uma alternativa que seja melhor que as outras em todos os critérios simultaneamente. Não há, portanto, em problemas multicritério, uma solução ótima que pudesse ser escolhida sem suscitar controvérsia, mas sim uma solução preferida que poderá ser diferente para diferentes agentes de decisão, sem que se possa dizer que um está certo e os outros errados [33].

Para o caso do problema tratado nesta dissertação, o agente de decisão terá de definir a taxa de substituição (*trade-off*) de forma a exprimir em quanto está disposto sacrificar o proveito para resolver o problema num menor tempo. De notar que a taxa de substituição pode não ser constante em todo o espaço de decisão, o que se verifica em muitas situações. Isto significa que a importância que o agente de decisão atribui a um critério pode variar para diferentes níveis de satisfação desse critério.

Visualizando as opções do gráfico representado na **Figura 5.25** verifica-se de imediato quais as soluções dominadas. Ou seja, para as opções b, c, d, e, g, h, i e j existem outras que são melhores que elas em ambos os critérios, ou iguais para um critério e melhores no outro. Sendo assim, as opções a, f, k e l representam possíveis configurações que não se podem ordenar segundo uma preferência sem o *trade-off* definido pelo agente de decisão.

Na **Figura 5.25** representou-se um possível *trade-off* através de uma reta. Se o agente de decisão optasse por um *trade-off* que privilegiasse mais o critério do tempo, o que significava

que estava disposto a aceitar uma maior redução nos seus proveitos em troca de uma diminuição do tempo de computação, a reta teria um maior declive. O contrário seria também verdade se o proveito fosse muito valorizado.

No presente resultado, o tempo de computação não é suficientemente longo para que o agente de decisão tivesse qualquer dúvida sobre a opção a escolher. Contudo, esta análise faz todo o sentido quando o problema se torna muito complexo exigindo consideráveis períodos para se encontrar uma solução. De facto, a opção por resolver um problema por recurso a uma meta-heurística, como é o caso dos Algoritmos Genéticos, pressupõe desde logo uma deterioração da qualidade da solução em troca de menores tempos de computação. Nesse caso, cabe ao agente de decisão avaliar e validar a utilização de determinada metodologia baseando-se então na satisfação dos critérios de avaliação definidos.

Atribuindo então grande importância ao critério proveito, as opções f e l são as mais atrativas para o problema. Atentando na **Tabela 5.6** pode-se ver que ambas as opções correspondem à mesma configuração do algoritmo, diferindo apenas no número de gerações.

Utilizando então uma configuração com taxa de seleção igual a 0,8 e taxa de mutação igual a 0,16 com uma população de 40 indivíduos e 30000 descendências resolveu-se novamente o problema deste modelo, com 4 centrais para um horizonte temporal de 48 horas. A solução obtida origina um proveito de 182710,74 € quando a solução ótima seria de 205457,64 €, sendo obtida em 774,7 segundos. Resolvendo para um horizonte temporal de 24 horas foi obtida em 455,19 segundos a solução de 97692,31 € quando o máximo proveito seria de 102728,82 €. Estes últimos resultados permitem afirmar que esta nova taxa de mutação se revela mais vantajosa para utilizar na resolução do problema. Deste modo, nos próximos testes será sempre utilizado valor de 0,16 para a taxa de mutação.

### 5.2.2 - Modelo 2

Neste segundo modelo foram introduzidas algumas características próprias do problema de planeamento da exploração de centrais hídricas, que haviam sido simplificadas no modelo anterior.

Os conjuntos de testes apresentados de seguida correspondem a um progressivo aumento da complexidade do problema, causado pela consideração de diferentes caudais para a turbinagem e para a bombagem, pela inclusão de aflúências e pela introdução da relação não linear entre a potência, a queda e o caudal.

No modelo anterior, como se desprezava a aflúência de cada albufeira e era considerado igual valor para os caudais de turbinagem e de bombagem, o volume final seria exatamente igual ao inicial se fossem realizadas tantas bombagens como turbinagens. Importa lembrar que em todos os testes realizados até este ponto se assumiu que o volume no final do planeamento seria igual ao inicial. Neste novo modelo, os valores dos caudais são diferentes o que pode reduzir bastante as soluções que respeitem essa restrição, ou mesmo inviabilizar a resolução. Por isso mesmo, a restrição deve ser “flexibilizada” de modo a não comprometer a resolução do problema.

Uma forma de estabelecer uma restrição não tão restritiva para o problema poderia ser a de definir uma percentagem de desvio do volume final, por exemplo, uma margem de 1%. Porém, esta margem poderia revelar-se demasiado exagerada no caso de a albufeira possuir

uma grande capacidade de armazenamento. Por outro lado, se a capacidade da albufeira for muito pequena a margem definida poderá continuar a ser demasiado restritiva.

Sendo assim, procurou-se estabelecer um intervalo de viabilidade de volume que se adaptasse conforme as características da albufeira e da central a que se aplicava. Definiu-se então uma margem igual ao volume horário de bombagem de cada central em torno do valor inicial. Na **Figura 5.26** pretende-se ilustrar como que esta restrição estabelece um intervalo que garante a existência de uma solução viável. Considerando a inexistência de afluências, sempre que se realiza um par turbinagem/bombagem o volume da albufeira diminui, sendo então necessário realizar bombagens até que o volume final se situe dentro dos limites estabelecidos.

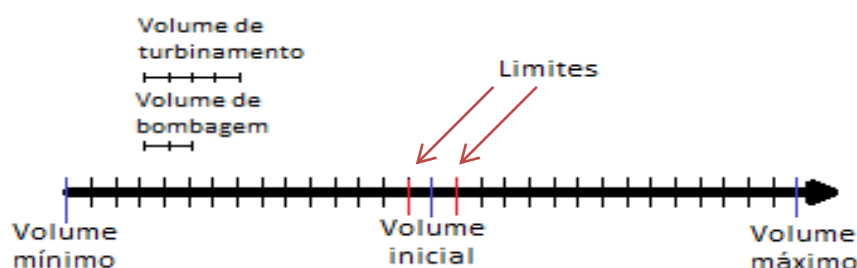


Figura 5.26 - Demonstração da restrição de volume final.

### Conjunto de Testes 5

Nestes testes foi utilizado um modelo que considera valores diferentes para os caudais de turbinagem e de bombagem. Não será de estranhar se o resultado do problema levar a um maior número de bombagens do que turbinagens já que o caudal de bombagem é menor do que o caudal de turbinagem.

Utilizando 30000 gerações com 40 indivíduos em cada geração, uma taxa de seleção de 0,8 e uma taxa de mutação de 0,16 realizaram-se várias simulações para o problema com 2 centrais e com 4 centrais, num horizonte temporal de 24 horas.

Para o problema com 2 centrais obteve-se um resultado médio bastante consistente de 47127,10 € num tempo de computação médio próximo a 307 segundos. Já para as 4 centrais o resultado médio foi de 102372,35 €, em cerca de 450 segundos.

Comparando, por exemplo, o resultado para o problema com 2 centrais nestes testes com o calculado como ótimo para o Modelo 1, verifica-se que os proveitos aumentaram. Este comportamento poderá parecer um pouco estranho mas a este propósito convirá recordar que neste modelo o caudal de bombagem é menor pelo que se poderá realizar bombagem em períodos de preço mais desfavorável (mais elevado). Contudo, como a variação dos preços de bombagem não é muito significativa (**Figura 5.2**), o aumento de custos não é muito elevado. De qualquer forma, a remuneração acabaria por diminuir. No entanto, a remuneração aumenta devido à possibilidade de se utilizar um pouco mais de água tendo em conta a margem permitida na restrição de volume.

Nas **Figuras 5.27** e **5.28** apresentam-se os esquemas de exploração resultantes do problema para 2 centrais. Pode-se observar que em ambas as centrais se realiza mais 1 hora de bombagem do que turbinagem, 6 horas de turbinagem e 7 de bombagem para a primeira

central, e 7 horas de turbinagem e 8 de bombagem para a segunda. No fim deste exercício a primeira central possui 899524800 m<sup>3</sup> armazenados e a segunda central possui 19856000 m<sup>3</sup>.

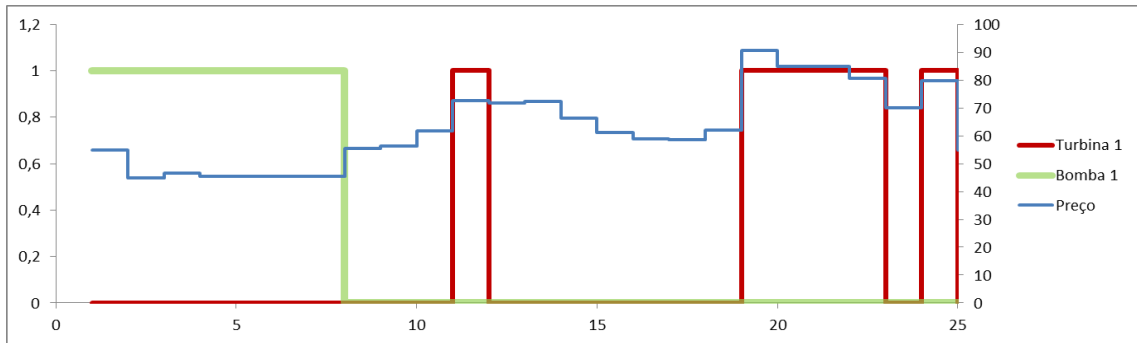


Figura 5.27 - Ordens de exploração para a Central 1.

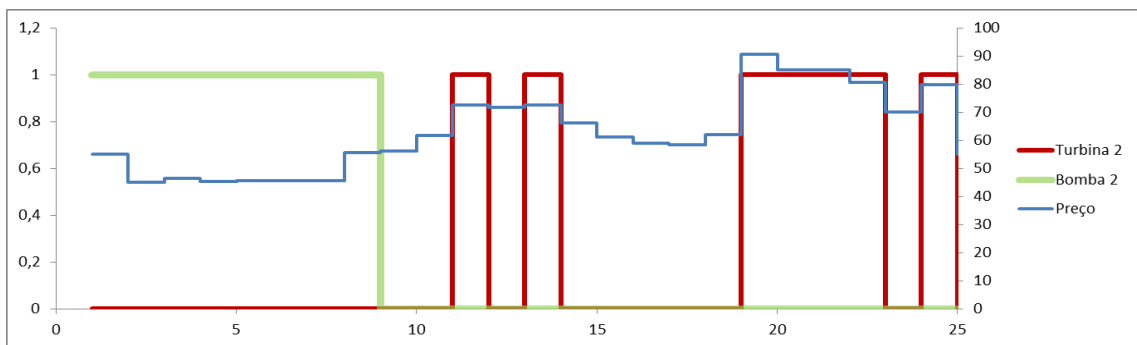


Figura 5.28 - Ordens de exploração para a Central 2.

### Conjunto de Testes 6

No conjunto de testes que agora se apresenta foi incluída uma previsão das afluências de cada albufeira em cada hora do horizonte temporal do planeamento. Estas previsões podem ser consultadas em anexo a este texto.

Em relação a estes testes foram realizadas várias simulações com uma configuração similar ao conjunto de testes anteriores. No caso de serem consideradas 2 centrais o algoritmo aponta para um proveito médio de 126338,11 € em 315 segundos. Considerando 4 centrais obtém-se um proveito médio de 216481,58 € num tempo médio de 446 segundos.

Nas Figuras 5.29 e 5.30 pode-se observar o resultado do problema de planeamento para 2 centrais. Principalmente para a segunda central é claro o aumento dos períodos de turbinagem e a diminuição das bombagens, como seria já espectável. Este efeito justifica os elevados valores de remuneração obtidos, quando comparados com os obtidos nas simulações em que se desprezavam as afluências.

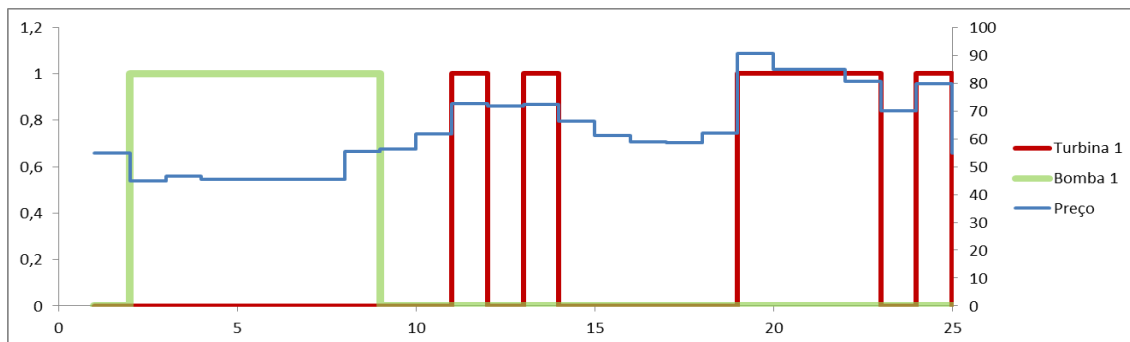


Figura 5.29 - Ordens de exploração para a Central 1.

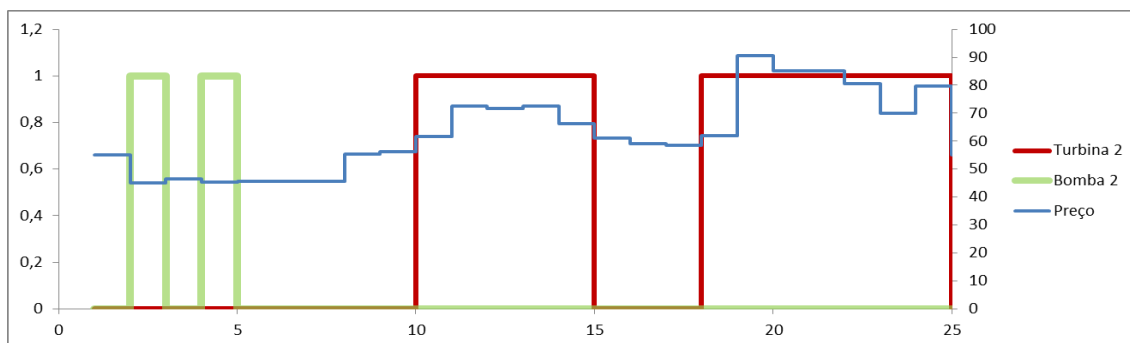


Figura 5.30 - Ordens de exploração para a Central 2.

## Conjunto de Testes 7

Finalmente, completou-se este Modelo 2 com a inclusão da relação não linear entre a potência, a queda e o caudal. O modelo construído procura assumir-se como uma boa aproximação das características físicas reais que afetam o funcionamento de uma central hídrica.

Utilizando a configuração dos conjuntos de testes anteriores obteve-se um proveito de 126638,86 € para o problema com 2 centrais em 393 segundos e de 234837,47 € em 629 segundos considerando 4 centrais.

Na Tabela 5.7 estão reunidos os valores de diversas variáveis do problema onde se pode verificar o impacto das não linearidades agora incluídas no planeamento da exploração de uma das centrais.

Observando a tabela seguinte verifica-se que agora as variáveis potência, queda e caudal não se mantêm constantes como anteriormente. Por exemplo, em períodos em que se turbinava consecutivamente a potência obtida na conversão vai diminuindo, como seria de esperar. Isto acontece porque a queda e o caudal máximo também diminuem. No caso da bombagem verifica-se o oposto, isto é, em períodos consecutivos de bombagem é possível verificar que cada vez é necessário mais potência para bombear. Também se pode verificar que a queda é afetada pelas ações de turbinagem e de bombagem. Aliás, é a variação da altura da queda que afeta o valor máximo dos caudais.

Tabela 5.7- Resultados de uma simulação para a Central 1 com demonstração da variação de algumas variáveis.

Hora	Potência turbinada durante cada hora	Potência bombada durante cada hora	Afluência para cada hora	Volume armazenado no fim de cada hora	Queda no início de cada hora	Caudal máximo de turbinamento no início de cada hora	Caudal máximo de bombagem no início de cada hora
1	0,00	163,94	100	901526400,00	47,50	400,00	324,00
2	0,00	164,05	100	903052662,62	47,54	400,34	323,96
3	0,00	164,16	100	904578787,88	47,58	400,68	323,92
4	0,00	164,27	100	906104775,79	47,61	401,02	323,89
5	0,00	164,39	0	907270626,36	47,65	401,35	323,85
6	0,00	164,47	0	908436372,01	47,68	401,61	323,82
7	0,00	164,56	0	909602012,73	47,71	401,87	323,79
8	0,00	0,00	0	909602012,73	47,74	402,13	323,76
9	0,00	0,00	0	909602012,73	47,74	402,13	323,76
10	0,00	0,00	0	909602012,73	47,74	402,13	323,76
11	165,56	0,00	0	908154351,51	47,74	402,13	323,76
12	0,00	0,00	0	908154351,51	47,70	401,81	323,80
13	165,30	0,00	0	906707842,75	47,70	401,81	323,80
14	0,00	0,00	0	906707842,75	47,67	401,49	323,83
15	0,00	0,00	0	906707842,75	47,67	401,49	323,83
16	0,00	0,00	0	906707842,75	47,67	401,49	323,83
17	0,00	0,00	0	906707842,75	47,67	401,49	323,83
18	0,00	0,00	0	906707842,75	47,67	401,49	323,83
19	165,05	0,00	0	905262486,44	47,67	401,49	323,83
20	164,79	0,00	0	903818282,59	47,63	401,17	323,87
21	164,53	0,00	0	902375231,20	47,60	400,85	323,90
22	164,28	0,00	0	900933332,27	47,56	400,53	323,94
23	0,00	0,00	0	900933332,27	47,52	400,21	323,98
24	164,02	0,00	0	899492585,80	47,52	400,21	323,98

### 5.2.3 - Modelo 3

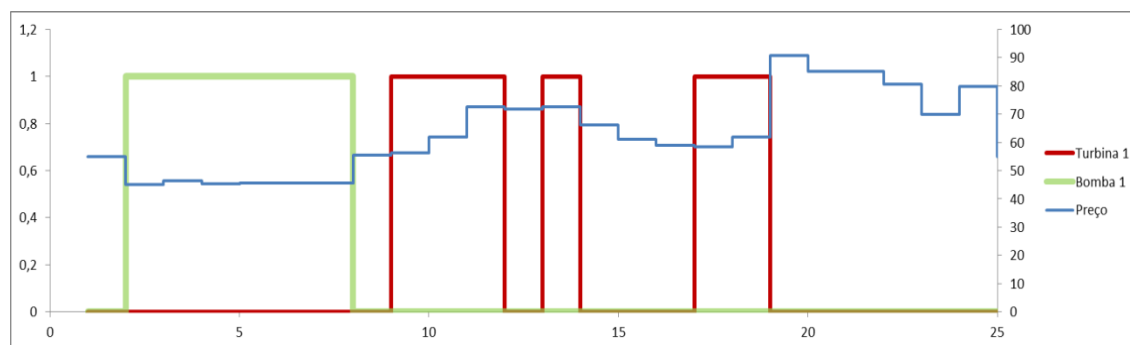
Com este modelo introduz-se uma abordagem pouco explorada na literatura relacionada com o planeamento de exploração de centrais hídricas em ambiente de mercado. Pretende-se agora que as centrais compitam entre si para alimentar uma carga prevista. Um modelo com estas características pretende simular um efeito real que os detentores de várias centrais hídricas experienciam quando pretendem realizar o escalonamento das suas centrais.

#### Conjunto de Testes 8

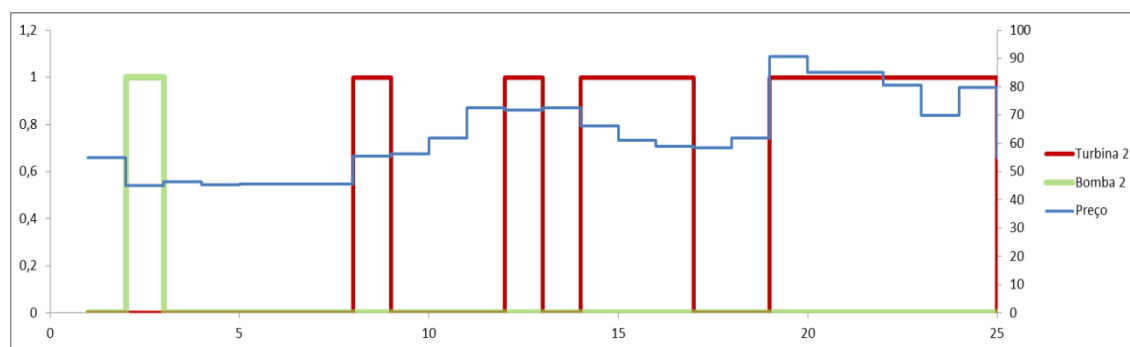
Relativamente ao conjunto de testes anterior, estes diferenciam-se pelo facto de considerarem um perfil de carga a alimentar. O resultado de cada simulação corresponde ao escalonamento do grupo de centrais para cada hora, de tal forma que a potência total por

estas produzida não ultrapasse a carga prevista em cada período horário. O objetivo do programa continua a ser o de procurar o esquema de exploração destas centrais que permita obter a maximização dos proveitos.

Com a configuração utilizada nos testes anteriores realizaram-se algumas simulações para observar o comportamento do algoritmo. De forma a verificar se efetivamente o algoritmo procurava uma solução que respeitasse a condição de carga, foi utilizado um valor de carga suficientemente baixo para obrigar a que, em cada período, o algoritmo utilizasse apenas uma das centrais para turbinar. Na **Figura 5.31** e na **Figura 5.32** apresentam-se as ordens de exploração resultantes para o problema com 2 centrais.



**Figura 5.31** - Ordens de exploração para a Central 1.



**Figura 5.32** - Ordens de exploração para a Central 2.

Como se pode ver nas figuras anteriores, em nenhum período do horizonte de planeamento as centrais turbinam simultaneamente.

Na **Tabela 5.8** procura-se mais uma vez mostrar o comportamento do algoritmo mas desta vez considerando 4 centrais no problema e utilizando um perfil de carga previsto. Nas simulações com limite de produção foi obtido em média um proveito de 202950,70 € com um tempo médio de computação de 762 segundos.

A **Tabela 5.8** reúne os resultados de duas simulações. Na primeira delas utilizou-se o Modelo 2 na sua última versão e na segunda foi incluída a imposição de limite de produção.

Na coluna com a soma das potências produzidas em cada hora, no modelo sem a restrição de carga, foram realçadas algumas células. Os valores contidos nessas células violam a restrição de limite de carga mas, que ainda não era considerada no Modelo 2. Após a inclusão dessa condição no problema, nenhum valor total de potência horária ultrapassa o valor de carga definido, como se pode ver na última coluna da tabela. Atentando um pouco no escalonamento originado pelas duas diferentes simulações, constata-se que a nova restrição origina o turbinamento em certos períodos em que antes não se turbinava, para compensar



limite o de produção imposto pela restrição. Verifica-se que as centrais acabam por turbinar o mesmo número de horas que antes da restrição ser considerada. Porém, fazem-no em períodos diferentes originando uma menor remuneração (antes obteve-se em média uma remuneração de 234837,47 €). Portanto, verifica-se a viabilidade da metodologia de desenvolvida para realizar de forma integrada a gestão da exploração de um conjunto de centrais.

Tabela 5.8 - Comparação dos resultados de problemas com e sem restrição de carga.

Hora	Potência produzida s/ limite					Carga	Potência produzida c/ limite				
	Central 1	Central 2	Central 3	Central 4	Total		Central 1	Central 2	Central 3	Central 4	Total
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	350	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	277	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	288	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	280	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	281	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	280	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	281	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	353	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	358	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	399	0,0	107,5	0,0	0,0	107,5
11	165,6	108,0	91,0	226,7	591,3	477	0,0	106,8	91,0	226,7	424,5
12	0,0	107,3	90,6	0,0	197,9	471	165,4	106,0	90,6	0,0	362,0
13	165,3	106,5	90,2	224,0	586,1	476	165,1	0,0	0,0	224,0	389,1
14	0,0	105,8	89,8	0,0	195,6	431	164,8	105,8	90,2	0,0	360,9
15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	394	0,0	105,1	0,0	0,0	105,1
16	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	378	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
17	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	375	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
18	0,0	106,5	0,0	0,0	106,5	400	0,0	105,3	92,1	0,0	197,4
19	165,0	105,8	92,3	227,6	590,7	608	164,8	104,6	92,3	227,6	589,2
20	164,8	105,1	91,9	224,9	586,6	568	164,5	0,0	91,9	224,9	481,3
21	164,5	104,3	91,5	222,3	582,6	568	0,0	104,4	91,5	222,3	418,1
22	0,0	103,6	91,1	0,0	194,7	535	0,0	103,6	91,1	219,7	414,4
23	164,3	102,9	90,7	0,0	357,8	459	164,3	102,9	90,7	0,0	357,9
24	164,0	102,2	90,3	219,7	576,2	529	164,0	102,2	90,3	0,0	356,5

### Conjunto de Testes 9

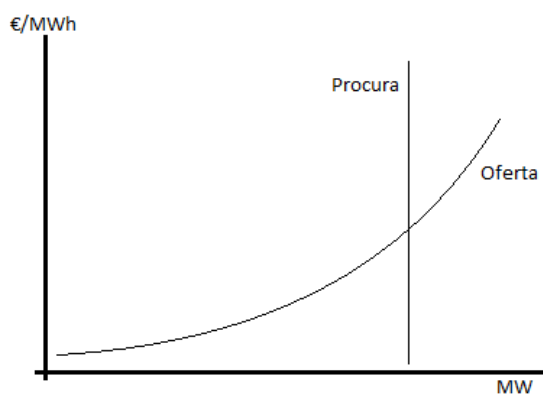
O conjunto de testes que agora se apresenta adiciona ao conjunto anterior a funcionalidade de considerar a bombagem das centrais como uma carga adicional. Ou seja, em cada período do planeamento, cada central pode, para além de contribuir para satisfazer a carga prevista, produzir energia a utilizar por outras para fazer bombagem.

Foram realizadas algumas simulações para testar o programa, mas não se obtiveram resultados suficientemente ilustrativos desta última alteração. Esperava-se que a inclusão de bombagem na carga se traduzisse num aumento dos limites de turbinagem com conseqüente aumento de potência produzida em períodos em que a carga estava a limitar a produção. Acontece que os períodos em que o algoritmo vê vantagem em bombar não coincidem com períodos em que seja bom turbinar. Assim, apesar dos aumentos de carga em alguns períodos, os resultados obtidos são os mesmos que no conjunto de testes anterior. O esquema de preços e de carga teria de ser diferente para se verificar um período em que uma central turbinaria para vender energia a outra que realizaria a operação contrária.

#### 5.2.4 - Modelo 4

O último modelo considerado nesta dissertação tem por objetivo, além dos incluídos nos pontos anteriores, introduzir no problema do planeamento o impacto associado à apresentação de propostas de venda e de compra de energia em mercado, nomeadamente no preço de fecho do mercado à vista.

As curvas de ofertas de venda resultantes das propostas em mercado têm uma estrutura aproximada da representada na **Figura 5.33**. Neste modelo considera-se que a procura tem um comportamento inelástico o que pode ser representado por uma reta vertical como se vê também na **Figura 5.33**.



**Figura 5.33** - Curvas típicas de procura e oferta de energia.

Em relação às ofertas de venda foi considerada uma curva representada por um polinómio de 3º grau para descrever a relação entre o preço e a quantidade. Esta curva será a mesma para todos os períodos mas poderia ser definida uma para cada período não existindo limitações apresentadas pelo Algoritmo Genético a este nível. Aliás, mesmo que cada curva fosse representada por outra expressão matemática, tal não constituiria dificuldade acrescida para o programa devido ao modo como este a usa. Note-se que o Algoritmo Genético usa a função objetivo apenas para avaliar os indivíduos de cada geração, ou seja, após uma geração se estabelecer, cada indivíduo é avaliado e o mais adaptado será, neste caso, o que origina um maior volume de proveitos.

As ordens de exploração para cada central, dadas por um indivíduo (solução), afetarão as curvas de compra e de venda. A entrada de mais energia para vender em mercado provocará um abaixamento do preço devido a uma deslocação da curva de ofertas de venda para a

direita, como explicado no Capítulo 4. Note-se que o resultado seria o mesmo se essa deslocação fosse aplicada na curva da procura mas seria em sentido contrário. Por outro lado, ocorrerá uma deslocação da curva da procura para a direita, aumentando o preço da intersecção com a curva de ofertas de venda, se forem consideradas propostas de compra de energia para bombagem.

Uma função cúbica para descrever a curva de oferta cria um efeito característico do comportamento do mercado que não poderia ser obtido se essa função fosse, por exemplo, linear. Repare-se que um incremento de carga quando esta é baixa origina um aumento de preço diferente do que teria o mesmo incremento da potência da carga quando a carga é mais elevada. Este efeito é perfeitamente visível na prática e deve-se ao mix de produção que vai a mercado. Quando a carga é elevada, um incremento de necessidade de potência será respondido por centrais térmicas que possuem um custo marginal mais elevado. Desta forma, o impacto no preço será superior ao que ocorreria se a carga fosse baixa.

### Conjunto de Testes 10

O programa desenvolvido até este ponto foi novamente alterado para agora incluir o efeito no preço resultante da entrada de propostas de compra/venda de energia, por parte das centrais consideradas. A alteração realiza-se através da modificação da função objetivo do problema, a qual é utilizada para avaliar todos os indivíduos (soluções) gerados pelo algoritmo. Estas alterações foram já abordadas na secção 4.4.4.

Nestes testes utilizou-se uma configuração do algoritmo similar à utilizada nos testes anteriores (30000 gerações, 40 indivíduos, taxas de seleção e de cruzamento de 0,8 e taxa de mutação de 0,16). As figuras seguintes mostram a capacidade do programa resolver este problema. Observa-se que as ordens de exploração obtidas apresentam uma clara tendência para turbinar em períodos de preço mais elevado e bombear quando o preço é mais baixo.

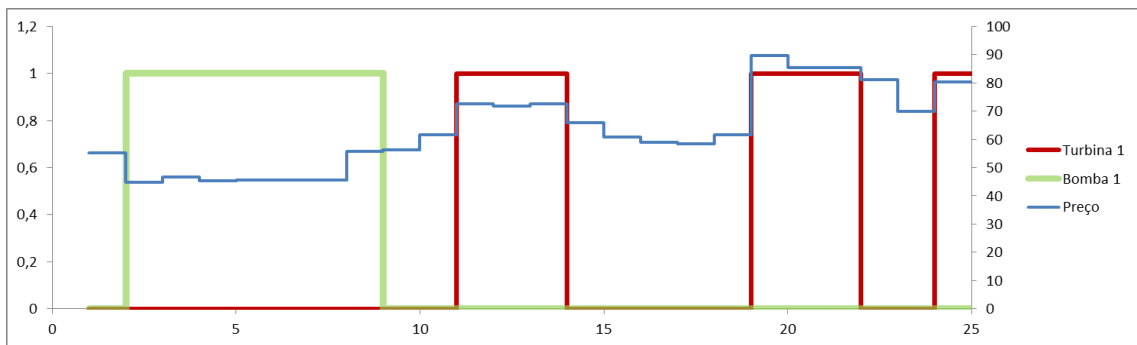


Figura 5.34 - Ordens de exploração para a Central 1.

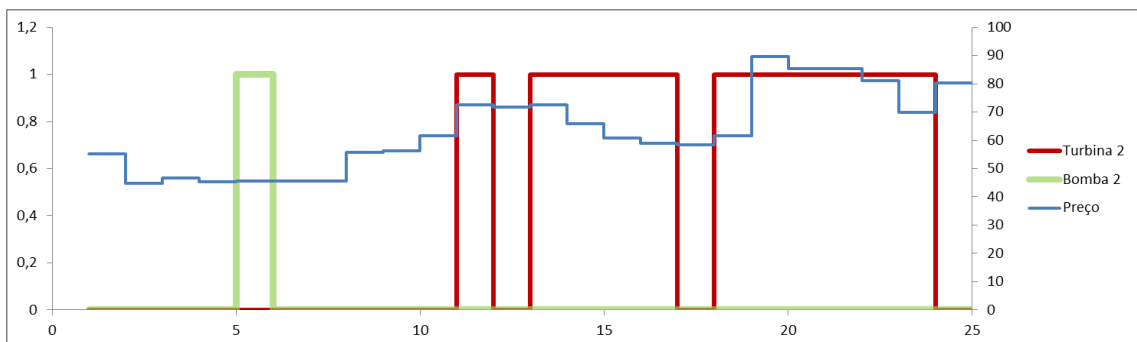


Figura 5.35 -Ordens de exploração para a Central 2.

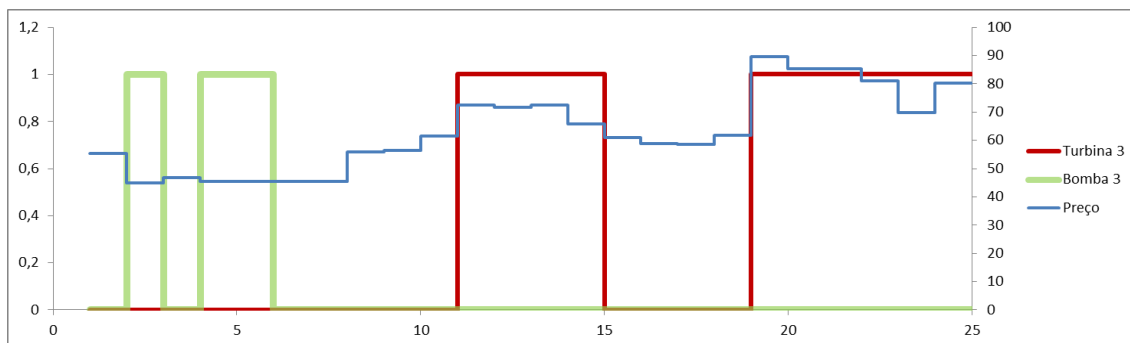


Figura 5.36 - Ordens de exploração para a Central 3.

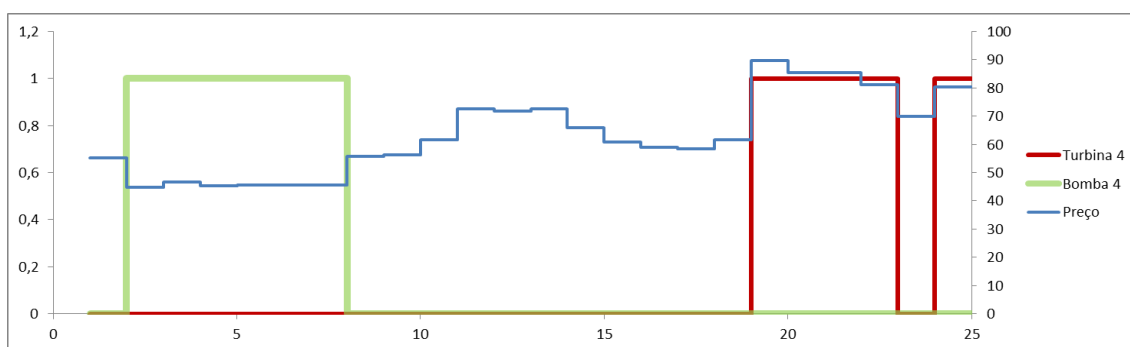


Figura 5.37 - Ordens de exploração para a Central 4.

A Tabela 5.9 apresenta a alteração verificada nos preços provocada pelas ordens de exploração do programa, em relação ao preço previsto se as centrais hídricas geridas pelo programa não entrassem para o despacho. Uma das colunas refere-se ao preço inicialmente previsto para o fecho do mercado resultante de curvas de compra e venda de energia que não incluem as centrais do programa. Outra coluna apresenta o preço previsto para alimentar a mesma carga mas agora as centrais do programa contribuem com propostas para as curvas de compra e venda de energia.

Na última coluna da tabela foram colocadas setas com a indicação da variação do preço no final da simulação. Nos períodos em que não se realiza nem turbinagem nem bombagem verifica-se que realmente o preço se mantém. Quando em determinada hora a potência a turbinar é superior à utilizada em bombagem o preço desce, pois a oferta de venda aumenta. Se a bombagem for dominante, nesse período verificar-se-á, pelo contrário, um aumento de preço devido ao aumento da carga.

Tabela 5.9 - Ordens de exploração para a Central 1 e variação do preço horário em mercado.

Hora	Potência turbinada total (MW)	Potência bombada total (MW)	Preço inicial (€/MW)	Preço final (€/MW)
1	218,30	163,94	55,32	54,84↓
2	0,00	477,56	44,80	49,66↑
3	0,00	164,16	46,74	48,39↑
4	0,00	383,96	45,39	49,28↑
5	0,00	254,51	45,49	48,13↑
6	0,00	267,22	45,48	48,24↑
7	0,00	306,16	45,57	48,70↑
8	106,54	164,56	55,76	56,29↑
9	0,00	0,00	56,37	56,37 -
10	0,00	0,00	61,49	61,49 -
11	197,82	0,00	72,52	69,32↓
12	271,61	0,00	71,70	67,52↓
13	195,95	0,00	72,44	69,27↓
14	255,54	0,00	65,92	62,74↓
15	0,00	0,00	60,85	60,85 -
16	90,97	0,00	58,89	58,00↓
17	0,00	0,00	58,48	58,48 -
18	106,56	0,00	61,73	60,57↓
19	363,13	0,00	89,58	80,73↓
20	419,17	0,00	85,30	76,15↓
21	580,23	0,00	85,30	73,18↓
22	359,23	0,00	80,99	73,83↓
23	357,86	0,00	69,84	64,80↓
24	356,49	0,00	80,23	73,25↓

Um efeito interessante causado pela relação não linear entre preço e quantidade considerada pode ser observado nos dois últimos períodos da tabela anterior. No período 24 turbinase com uma potência total inferior à potência considerada no período 23, o que poderia levar precipitadamente a pensar que o aumento no preço seria maior no período 23 pois a deslocação da curva de ofertas de venda é maior. No entanto, verifica-se que no período 23 ocorreu uma queda de 5,09 €/MW em relação ao preço previsto enquanto que no período 24 a redução foi de 6,98 €/MW. A explicação para esta situação está na forma da curva de ofertas de venda que origina uma maior queda para cargas mais elevadas. Por outras palavras, apesar de no período 24 se dar uma menor variação de potência, esta encontra-se numa zona da curva de ofertas de venda que origina uma maior variação do preço. Na **Figura 5.38** pretende-se ilustrar este efeito através da comparação de incrementos iguais de carga mas em diferentes pontos da curva de ofertas de venda.

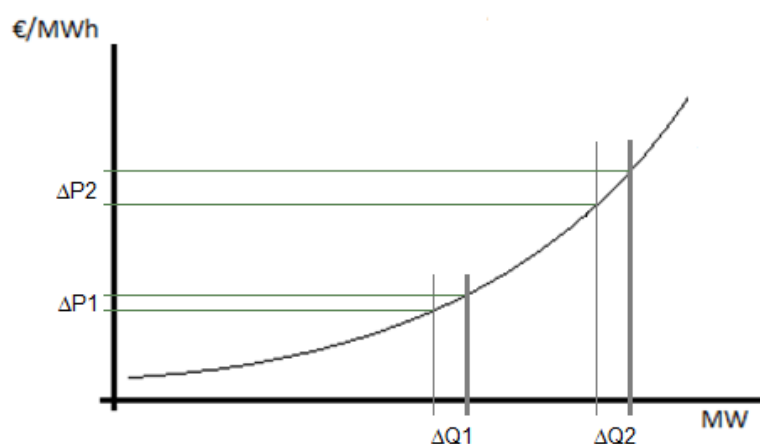


Figura 5.38 - Incrementos de carga em pontos diferentes da curva de ofertas de venda.

Em média a remuneração obtida nas simulações considerando este modelo foi de 164608,73 € em 900 segundos. Chama-se a atenção para não se comparar esta remuneração com resultados de testes anteriores. Principalmente porque os preços iniciais utilizados não são os mesmos que os que foram utilizados antes, pois foi necessário criar para este modelo pares de valores de preço e quantidade que refletissem a curva de ofertas de venda utilizada. Em anexo encontra-se esse perfil de preços e cargas utilizados como previsão inicial para dados de entrada do Modelo 4.

Para efeitos de comparação utilizou-se este novo perfil de preços no Modelo 2. Recorde-se que o Modelo 2 utiliza os preços como parâmetros enquanto que para o Modelo 4 são variáveis do problema. Com o Modelo 2, para o problema com 4 centrais, o proveito é em média de 206125,39 € com um tempo de computação médio 740 segundos. Ora, verifica-se que a introdução da curva de ofertas de venda (Modelo 4) provoca uma redução dos proveitos, ou seja, a alteração de preços por parte do programa levou a uma menor remuneração. Este resultado pode ser explicado pelas características do problema e, principalmente, pela forma da curva de ofertas de venda. Como se verificou em testes anteriores, tipicamente é realizada mais turbinagem do que bombagem e cada uma destas ações ocorre em zonas particulares da curva de oferta. A bombagem é concretizada quando a interseção das curvas de ofertas de venda e de compra resultam num preço baixo - carga mais baixa - e a turbinagem quando o preço resultante é maior - carga mais elevada. Enquanto que a entrada de mais bombagem provoca uma elevação do preço de encontro, a turbinagem contribui para um aumento da oferta de venda levando a um abaixamento do preço. Mesmo que o programa apresentasse uma solução em que se vendia tanta energia de turbinagem como a que se comprava para bombagem, o efeito de redução de preço iria predominar. Este comportamento deve-se ao carácter não linear da curva de ofertas de venda, aumentando o impacto das turbinagens e diminuindo o das bombagens. Note-se que se a curva de oferta fosse linear, nessa situação, não haveria alteração do proveito final.

## Capítulo 6

# Conclusões e Perspetivas de Desenvolvimento

Os estudos dos Sistemas Elétrico de Energia têm sofrido importantes desenvolvimentos nos últimos anos. Muitos devem-se à alteração de paradigma provocada pela introdução de Mercados de Eletricidade. Decorrente do processo de liberalização dos mercados, em que as atividades de redes se consideram monopólios naturais e são, por isso, objecto de regulação económica, a produção e a comercialização de eletricidade estão abertas à concorrência, com a justificação económica de ser possível introduzir por essa via uma maior eficiência na gestão e operação dos recursos afectos a estas atividades. Isto implica a utilização de ferramentas de apoio à decisão cada vez mais sofisticadas.

Os aproveitamentos hidroelétricos apresentam-se como um dos pilares base da estratégia das empresas produtoras. O avultado investimento necessário para estabelecer uma central, e o interesse em o amortizar rapidamente, justifica a existência de bastantes trabalhos dedicados ao planeamento da sua exploração. Porém, a enorme complexidade e dimensão associada a esta problemática aliada à recente introdução de mecanismos de mercado para transacionar energia, atrai o interesse para novos desenvolvimentos. Os responsáveis pelo planeamento das centrais hídricas pretendem determinar as ações de exploração que originam o maior proveito, sendo que todas as suas decisões são construídas com uma certa exposição ao risco. Uma atitude racional que conduza a um custo de operação menor e a maiores proveitos pode representar uma significativa vantagem num mercado competitivo.

O presente trabalho teve como principal objetivo o desenvolvimento de uma ferramenta computacional capaz de gerir um conjunto de centrais hídricas considerando a não linearidade entre a potência, o caudal e a queda, a possibilidade de os grupos realizarem bombagem e o efeito que as propostas de compra e de venda de energia têm no preço do mercado. Foi possível demonstrar a viabilidade que um programa baseado em Algoritmos Genéticos apresenta perante este problema quando consideradas as suas principais características, nomeadamente, as que se referem ao funcionamento das centrais e as que se referem ao seu envolvimento no ambiente concorrencial estabelecido pelos Mercados de Eletricidade.

O modo como foi desenvolvido o tema neste texto pretende assumir-se como um bom ponto de partida para trabalhos futuros relacionados com este. Na perspetiva de uma

utilização de Algoritmos Genéticos em outros trabalhos, foram desenvolvidos modelos matemáticos que permitem abordar o problema de uma forma progressiva. Assim, é possível criar sensibilidade tanto para os aspetos conceptuais dos Algoritmos Genéticos como para o problema complexo que é a otimização da exploração de centrais hídricas, facilitando futuros desenvolvimentos.

Apesar da pretensão que acompanha o estabelecimento de Mercados de Eletricidade relativamente à criação de um regime de concorrência, verifica-se que a maior parte da produção se encontra distribuída por apenas alguns *players*. Deste modo, faz todo o sentido que uma ferramenta de apoio à gestão dos ativos de produção não considere as centrais como *price takers*, uma vez que as propostas que estas apresentam têm algum efeito no preço de fecho do mercado.

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

- Apresentação de uma metodologia de resolução viável para o problema da otimização da exploração de centrais hídricas, considerando o novo paradigma dos Mercados de Eletricidade;
- Introdução de uma abordagem inovadora em que se considera que as propostas apresentadas pelas centrais têm algum efeito no preço de encontro do mercado, ao invés de se assumirem como *price takers*;
- Consideração dos principais aspetos que caracterizam o problema de exploração de centrais hídricas, nomeadamente, a relação não linear entre a potência, o caudal e a altura da queda e a realização de bombagem.

O tempo disponível para a realização deste trabalho não permitiu desenvolver certas abordagens mas os bons resultados obtidos permitem avançar que seria interessante analisar alguns aspetos. Relativamente à descrição do próprio problema existe espaço para os seguintes desenvolvimentos:

- Introduzir o encadeamento de centrais em cascata. Nesta abordagem, além dos efeitos causados pela interligação hidráulica dos aproveitamentos, deverão ser considerados os efeitos de propagação temporal das ações de turbinagem e de bombagem. Este modelo poderia ainda considerar a existência de vários grupos geradores por central;
- Considerar outros estados de funcionamento para as centrais, ou seja, discretizar em estados como por exemplo: 20%, 40%, 60%, 80% 100% do caudal de turbinagem. Neste caso poderia ser utilizada uma expressão para a perda de carga do circuito hidráulico em função do caudal;
- Acoplar o programa desenvolvido a outro que realize estudos económicos com vista a aferir sobre o valor marginal da água. O primeiro forneceria diretamente os valores de armazenamento de água no final do horizonte do planeamento que seriam utilizados, em seguida, pelo segundo. Os estudos económicos basear-se-iam em previsões de mercado e em previsões das afluências de cada aproveitamento;
- Construir um programa que providencie previsões das curvas de oferta e procura para cada hora. Estas previsões seriam utilizadas pelo programa desenvolvido nesta dissertação para realizar o planeamento da exploração das centrais hídricas considerando o impacto que as propostas apresentadas teriam no preço de fecho do mercado;



- Utilizar um modelo que considere custos de operação das centrais, nomeadamente, de arranque, de paragem e de inversão dos grupos. Seria interessante verificar o impacto que custos como a perda de água na transição de estados, os desgastes mecânicos e a manutenção teriam na estratégia de exploração de cada central;
- Construir um programa que para além de gerir as centrais hídricas inclua também a gestão de centrais térmicas. Normalmente, os detentores de ativos de produção hídrica também possuem ativos de produção térmica pelo que seria vantajoso que a sua estratégia resultasse de um estudo integrado relativo a todas as suas centrais.

Quanto ao Algoritmo Genético poderiam ser analisados os seguintes aspetos:

- Poderia ser estabelecida uma forma de gerar uma população inicial com indivíduos viáveis, ou pelo menos perto da viabilidade, em vez de a gerar aleatoriamente. Esta medida poderia aumentar significativamente a rapidez de convergência, o que seria particularmente importante se o programa tivesse de realizar o planeamento considerando um número elevado de centrais;
- A codificação dos indivíduos poderia ser realizada de forma a permitir mais estados de funcionamento para as centrais;
- O processo de seleção dos indivíduos que constituem o grupo de reprodutores é realizado através de processos estocásticos, existem no entanto vários métodos para realizar este processo. Possivelmente existirá outro que se revele mais adequado a este problema mas a sua escolha dependeria de um estudo aprofundado dos trabalhos que têm vindo a ser concretizados considerando Algoritmos Genéticos;
- O mecanismo de mutação utilizado neste trabalho também poderia ser realizado de outra forma, nomeadamente, através de uma troca múltipla de bits. Ainda em relação à mutação é por vezes vantajoso utilizar uma taxa decrescente ao longo da evolução da população;
- Para se prolongar o horizonte temporal do planeamento e o número de centrais a gerir sem aumentar para valores inabundáveis o tempo de computação, seria interessante utilizar uma abordagem que explorasse a sazonalidade que caracteriza o funcionamento do sector elétrico. Note-se que a estratégia de exploração de uma central não variará muito de um dia para outro, na mesma época do ano, pelo que tirar partido desta característica pode ser uma vantagem na pesquisa de soluções;
- Implementação do código em *MATLAB* visto que este tem demonstrado em outros trabalhos possuir uma velocidade de computação muito superior ao *Visual Basic*.

Estes melhoramentos que se sugerem são mais uma prova que a utilização de uma metodologia baseada em Algoritmos Genéticos é uma excelente opção para tratar o problema do planeamento de exploração de centrais hídricas. Apesar de ainda haver espaço para bastante desenvolvimento, é de salientar a inovação que foi introduzida neste trabalho através da consideração de curvas de oferta de venda e de compra para delinear a estratégia de exploração das diversas centrais hídricas. Contrariamente aos trabalhos encontrados na vasta literatura sobre este assunto, neste as centrais deixam de ser *price takers*, o que faz

todo o sentido quando se verifica que a produção de eletricidade funciona num regime tendencialmente oligopolizado.

Finalmente, fica expresso o desejo de que este trabalho contribua para uma aposta futura nesta meta-heurística já que são bastante promissoras as perspetivas da sua aplicação ao tema abordado nesta dissertação.

# Referências

- [1] Catalão, J. P. d. S., “Planeamento Operacional de Curto Prazo de Sistemas de Energia Hidroeléctricos”, Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2003.
- [2] Sousa, J. C. V., “Estimativa de Remuneração de Centrais Hídricas em Mercados de Electricidade”, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2007.
- [3] Saraiva, J. T., Silva, J. L. P. and Leão, M. T. P., “Mercados de Electricidade - Regulação e Tarificação de Uso das Redes”, FEUP Edições, 2002.
- [4] <http://www.erse.pt/pt/electricidade/Paginas/default.aspx> , página da internet da ERSE, acesso a 20 de Fevereiro de 2012.
- [5] “O Sector Eléctrico Em Portugal Continental - Contributo para discussão”, BPI, 2011.
- [6] Silva, N. B. F.,” Optimização horária da gestão de recursos hídricos, usando uma Meta-Heurística, em ambiente de mercado”, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2011.
- [7] Wood, A. J., Wollenberg, B. F., “Power Generation, Operation and Control”, 2<sup>a</sup> ed, Wiley, 1996.
- [8] S. J. P. S. Mariano, J. P. S. Catalão, V. M. F. Mendes, L. A. F. M. Ferreira, “Profit-Based Short-Term Hydro Scheduling considering Head-Dependent Power Generation”, IEEE Power Tech Conf, pp.1362-1367, Lausanne, Switzerland, Jul 2007.
- [9] Pousinho, H.M.I. Mendes, V.M.F. Catalão, J.P.S., “Profit-based head-dependent short-term hydro scheduling considering risk constraints”, 2011 IEEE Trondheim PowerTech, pp.1-6, Trondheim, Jun 2011.
- [10] Shawwash, Z.K., Siu, T.K., Russell, S.O.D., “The B.C. Hydro short term hydro scheduling optimization model”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 15, no. 3, pp. 1125-1131, Ago 2000.
- [11] Borghetti, A., D'Ambrosio, C., Lodi, A., Martello, S., “An MILP Approach for Short-Term Hydro Scheduling and Unit Commitment with Head-Dependent Reservoir”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 23, no 3, pp. 1115-1124, Ago 2008.
- [12] Garcia-Gonzalez, J., Castro, G.A., “Short-term hydro scheduling with cascaded and head-dependent reservoirs based on mixed-integer linear programming”, IEEE Power Tech Proceedings, vol. 3, Porto, 2001.
- [13] Nilsson, O., Sjelvgren, D., ” Hydro unit start-up costs and their impact on the short term scheduling strategies of Swedish power producers”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 12, no. 1, pp. 38-44, Fev 1997.

- [14]Viramontes, F. A., Hamilton, H. B., “Optimal Long Range hydro Scheduling in the Integrated Power System”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 97, no. 1, Jan. 1978.
- [15]Samudi, C., Das, G.P., Ojha, P.C., Sreeni, T.S., Cherian, S., “Hydro thermal scheduling using particle swarm optimization”, IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, pp. 1-5, Abr 2008.
- [16]Fosso, O.B., Belsnes, M.M., “Short-term hydro scheduling in a liberalized power system”, 2004. International Conference on Power System Technology, vol.2, Nov 2004.
- [17]Naresh, R., Sharma, J., “Hydro system scheduling using ANN approach”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 15, no. 1, Fev 2000.
- [18]Li Bin, Rui Jun, “Application of Simulated Annealing Particle Swarm Algorithm in Optimal Scheduling of Hydropower Plant”, AICI '09. International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence, vol. 4, pp. 608-610, Nov 2009.
- [19]Shyh-Jier Huang, “Application of genetic based fuzzy systems to hydroelectric generation scheduling”, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 14, no. 3, pp. 724 - 730, Set 1999.
- [20]Conejo, A.J., Arroyo, J.M., Contreras, J., Villamor, F.A., “Self-Scheduling of a Hydro Producer in a Pool-Based Electricity Market”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 17, no. 4, Nov 2002.
- [21]Catalão, J.P.S., Mariano, S.J.P., Mendes, V.M.F., Ferreira, L.A.F., “Nonlinear approach for short-term scheduling of a head-sensitive hydro chain”, IEEE Power Tech, pp.658-663, Russia, 2005.
- [22]Gil, E., Bustos, J., Rudnick, H., “Short-term hydrothermal generation scheduling model using a genetic algorithm”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 18, no. 4, Nov 2003.
- [23]Wu Jiekang, Zhu Jianquan, Chen Guotong, Zhang Hongliang, “A Hybrid Method for Optimal Scheduling of Short-Term Electric Power Generation of Cascaded Hydroelectric Plants Based on Particle Swarm Optimization and Chance-Constrained Programming”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 23, no. 4, Nov 2008.
- [24]Po-Hung Chen, Hong-Chan Chang, “Genetic aided scheduling of hydraulically coupled plants in hydro-thermal coordination”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 11, no. 2, pp. 975 - 981, Mai 1996.
- [25]Miranda, V., “Computação evolucionária: uma introdução”, versão 2.0, FEUP, Portugal, 2005
- [26]Miranda, V. H. B. P., “Evolutionary computation in power systems”, International Journal in Electrical Power & Energy Systems, vol. 20, No. 2, pp.89-98, Elsevier SCI Ltd, 1998
- [27]Lee, Y. El-Sharkawi, A. M., “Modern heuristic optimization techniques - theory and applications to power systems” John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2008
- [28]Osman, H. I., Kelly, P. J., “Meta-Heuristics: theory & applications”, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1996
- [29]Mitchell, M., “An introduction to Genetic Algorithms”, The MIT press, Massachusetts, 1999.
- [30]Liao, Y., Sun, C., “An educational genetic algorithms learning tool”, IEEE Transactions on Education, vol.44, no.2, pp. 20, Mai 2001.
- [31]Zoumas, C.E., Bakirtzis, A.G., Theocharis, J.B., Petridis, V., “A genetic algorithm solution approach to the hydrothermal coordination problem”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 19, no. 3, pp. 1356 - 1364, Ago 2004.

- [32]Frenzel, J. F., “Genetic algorithms - A new breed of optimization”, IEEE Potentials, pp.21-24, Out 1993.
- [33]Matos, M., “Ajuda Multicritério à Decisão - Introdução”, Notas para a disciplina de SAD, FEUP, 2005.
- [34]Barbosa, J. N., “Mecânica dos fluidos e hidráulica geral”, vol. 1, FEUP.
- [35]Oliveira, A., “Recuperação de energia - hidráulica em sistemas de distribuição de água”, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do porto, 2008.
- [36]Moreira, R., “Potencial hidroeléctrico Português desaproveitado”, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do porto, 2009.
- [37]Zhao, Y., Chen, X., Jia, Q., Guan, X., Zhang, S., “Long-term scheduling for cascaded hydro energy systems with annual water consumption and release constraints”, IEEE Transactions on Automation science and engineering , vol. 7, no. 4, pp. 969 - 977, Out 2010.
- [38]García-González, J., Castro, G., "Short-term hydro scheduling with cascaded and head-dependent reservoirs based on mixed-integer linear programming," , IEEE Power Tech Conf., Porto, Portugal, 2001.



# Anexos

## Dados de entrada do programa

### Modelo 1

Dados do mercado (€/MWh) a)	
Hora	Preço marginal do mercado €/MWh
1	55
2	45
3	46,5
4	45,44
5	45,52
6	45,51
7	45,58
8	55,49
9	56,16
10	61,75
11	72,5
12	71,74
13	72,42
14	66,25
15	61,07
16	58,95
17	58,5
18	62
19	90,6
20	85
21	85
22	80,47
23	70
24	79,72

Dados dos aproveitamentos				
	Central 1	Central 2	Central 3	Central 4
Volume inicial (m3)	900000000	20000000	30000000	9000000
Volume final (m3)	900000000	20000000	30000000	9000000
Volume mínimo (m3)	800000000	10000000	10000000	8000000
Volume máximo (m3)	1000000000	30000000	50000000	10000000
Caudal turbinado máximo (m3/s)	400	120	70	50
Caudal bombado máximo (m3/s)	400	120	70	50
Descarregamento mínimo	0	0	0	0
Queda (m)	50	100	150	500
Rendimento turbinagem	0,88	0,89	0,89	0,9
Rendimento bombagem	0,92	0,93	0,93	0,93
Afluência (m3/s)	0	0	0	0

a) Estes dados também são utilizados pelos Modelos 2 e 3.

## Modelo 2

Dados dos aproveitamentos a)					
		Central 1	Central 2	Central 3	Central 4
Volume inicial (m3)		900000000	20000000	30000000	9000000
Volume final (m3)		900000000	20000000	30000000	9000000
Volume mínimo (m3)		800000000	10000000	10000000	8000000
Volume máximo (m3)		1000000000	30000000	50000000	10000000
Caudal turbinado nominal (m3/s) b)		400	120	70	50
Caudal bombado nominal (m3/s)		324	100	58	42
Parâmetros da curva de queda c)	X1	0,025	0,25	0,125	5
	X2	25	92,5	143,75	450
Rendimento turbinagem		0,88	0,89	0,89	0,9
Rendimento bombagem		0,92	0,93	0,93	0,93
Afluência 1		100	50	0	0
Afluência 2		100	50	0	0
Afluência 3		100	50	0	0
Afluência 4		100	50	0	0
Afluência 5		0	50	0	0
Afluência 6		0	50	0	0
Afluência 7		0	50	0	0
Afluência 8		0	50	0	0
Afluência 9		0	50	0	0
Afluência 10		0	50	0	0
Afluência 11		0	50	0	0
Afluência 12		0	50	0	0
Afluência 13		0	50	0	0
Afluência 14		0	50	100	0
Afluência 15		0	50	100	0
Afluência 16		0	50	100	0
Afluência 17		0	50	100	0
Afluência 18		0	50	100	0
Afluência 19		0	50	0	0
Afluência 20		0	50	0	0
Afluência 21		0	50	0	0
Afluência 22		0	50	0	0
Afluência 23		0	50	0	0
Afluência 24		0	50	0	0

- a) Estes dados também são utilizados pelos Modelo 3 e 4.
- b) O valor dos caudais máximos depende do valor nominal dos próprios caudais e do valor nominal de queda (ver Formulação completa). Assumiu-se que estes valores nominais seriam iguais aos valores iniciais fornecidos ao algoritmo.
- c) A altura da queda é dada por uma curva que depende do volume armazenado da seguinte forma:  $h = X1 * v + X2$ .



**Modelo 3**

<b>Dados do mercado</b>		
<b>Hora</b>	<b>Preço marginal previsto (€/MWh)</b>	<b>Carga prevista (MW)</b>
1	55,00	350
2	45,00	277
3	46,50	288
4	45,44	280
5	45,52	281
6	45,51	280
7	45,58	281
8	55,49	353
9	56,16	358
10	61,75	399
11	72,50	477
12	71,74	471
13	72,42	476
14	66,25	431
15	61,07	394
16	58,95	378
17	58,50	375
18	62,00	400
19	90,60	608
20	85,00	568
21	85,00	568
22	80,47	535
23	70,00	459
24	79,72	529

## Modelo 4

Dados do mercado		
Hora	Preço marginal previsto (€/MWh)	Carga prevista (MW)
1	55,32	3877,02
2	44,80	2766,72
3	46,74	2946,68
4	45,39	2820,00
5	45,49	2829,64
6	45,48	2828,43
7	45,57	2836,86
8	55,76	3926,00
9	56,37	3992,15
10	61,49	4506,86
11	72,52	5308,86
12	71,70	5260,33
13	72,44	5303,81
14	65,92	4872,77
15	60,85	4447,81
16	58,89	4257,36
17	58,48	4215,70
18	61,73	4528,33
19	89,58	6093,60
20	85,30	5927,28
21	85,30	5927,28
22	80,99	5742,46
23	69,84	5144,52
24	80,23	5707,54

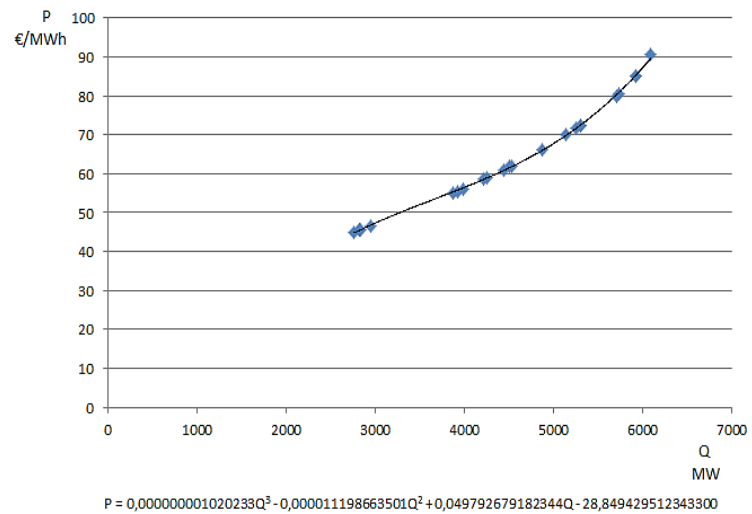


Figura A.1 - Curva de oferta