

Capítulo 4

Gestão de aproveitamentos hidroelétricos em ambiente de mercado

Neste quarto capítulo são abordados de forma mais aprofundada os aproveitamentos hidroelétricos, começando por uma clarificação dos seus benefícios e propriedades que os tornam tão apelativos, sendo depois apresentada a constituição geral de um aproveitamento deste tipo. Posteriormente é exposta a abordagem teórica do problema de otimização de aproveitamentos hidroelétricos e uma das metodologias utilizadas para a resolução do mesmo, acabando o capítulo com as formulações dos problemas de otimização que foram introduzidas na aplicação computacional que foi desenvolvida.

4.1 Energia Hidroelétrica

As centrais hídricas são uma das formas mais tradicionais e mais utilizadas para produção de energia elétrica, aproveitando a energia proveniente do movimento da água transformando-a em eletricidade. Este tipo de centrais tem assumido uma preponderância cada vez maior visto que são capazes de garantir a fiabilidade e a capacidade de resposta dos Sistemas Elétricos de Energia utilizando um recurso energético renovável e inesgotável. É no entanto necessário ter em conta que a quantidade de energia elétrica gerada depende largamente da precipitação, apresentando diferenças consideráveis entre os valores de anos secos e os de anos com precipitação abundante.

A principal desvantagem deste tipo de aproveitamentos está ligada à construção das infraestruturas necessárias, uma vez que estas alteram de forma significativa as bacias hidrográfica. No entanto, pouco tempo após a entrada em serviço das centrais, este impacto negativo deixa de ter qualquer significado tendo em conta os benefícios obtidos.

É possível então sumarizar e salientar alguns dos benefícios deste tipo de aproveitamentos na lista seguinte [8] :

- Fonte de energia renovável, limpa e inesgotável;
- Capacidade de responder a variações rápidas de carga;

- Capacidade de racionalização de matéria-prima, através de armazenamento de água;
- Nível de disponibilidade e fiabilidade muito elevado, possuindo a capacidade de funcionar como reserva em caso de avarias ou falhas de outros grupos geradores, ou erros de previsão de consumos, principalmente na ponta do diagrama de cargas;
- Custo operacional baixo;
- Tempo de vida útil elevado, se realizada a devida manutenção;
- Possibilidade de integrar outras fontes renováveis, devido à sua capacidade de responder à intermitência da eólica, tanto a turbinar, em caso de défice de produção como a bombear, em caso de excesso desta fonte;
- Contribuição para o aumento da eficiência energética dos países;
- Amortecimento de cheias, através do controlo do caudal;
- Abastecimento de água para consumo humano, industrial e agro-pecuário;
- Garantia de caudais mínimos em períodos críticos;
- Diminuição da emissão de gases poluentes para a atmosfera;
- Tecnologia altamente eficiente, com rendimentos próximos dos 90%.

O princípio de funcionamento destes aproveitamentos é baseado na transformação da energia potencial armazenada na água de um reservatório em energia cinética que, por sua vez, é transformada em energia elétrica. Ao percorrer o circuito hidráulico, que será abordado em 4.2, a água que se encontra inicialmente em repouso no reservatório, adquire velocidade devido à altura a que se encontrava. Este circuito hidráulico possui uma ligeira inclinação, encaminhando desta forma o líquido para as pás da roda da turbina que faz rodar o alternador (rotor) cujo eixo está diretamente acoplado à turbina. Este movimento e a circulação de correntes de excitação provocam um fenómeno de indução na parte fixa do alternador (estator) [8] .

Existe ainda a possibilidade de se tratar de um grupo reversível, que pode ser utilizada a energia elétrica da rede para colocar o motor em funcionamento, fazendo mover a bomba. Desta forma, a água que se encontra na albufeira inferior, ou seja, que foi turbinada ou descarregada no passado é bombada, retornando ao reservatório superior tornando-se passível de ser reutilizada.

4.1.1 Situação em Portugal

Em Portugal, o primeiro aproveitamento hidroelétrico foi instalado em 1891 no rio Cávado, com o objetivo de satisfazer consumos locais como pequenas instalações de iluminação pública e pequenas indústrias. A partir de 1930 verificou-se um aumento do interesse neste tipo de aproveitamentos, muito por culpa da industrialização e da elevada taxa de crescimento dos consumos, culminando nos anos 70 com os choques do preço do petróleo. Tal como exposto previamente, a

existência deste tipo de aproveitamentos permite obter uma série de benefícios para a sociedade, não só no plano energético, mas também no que diz respeito a controlo de cheias, possibilidade de criação de condições de navegabilidade, entre outros.

Embora este interesse tenha continuado a ser crescente até hoje e o progresso no aproveitamento dos recursos naturais seja bastante assinalável, Portugal é ainda altamente dependente dos combustíveis fósseis importados. Num ano médio, a produção de eletricidade de origem hídrica representa apenas 30%, valor que considerando o potencial hidroelétrico do país, é consideravelmente baixo.

Neste contexto foi desenvolvido o Plano Nacional de Barragens com Elevado Potencial Hidroelétrico (PNBEPH), que visa identificar quais os investimentos mais apropriados, de forma a atingir os 7000 MW de potência hídrica instalada até 2020 e diminuir o potencial hidroelétrico não explorado em aproximadamente 20%, como está representado na Figura 4.1 .

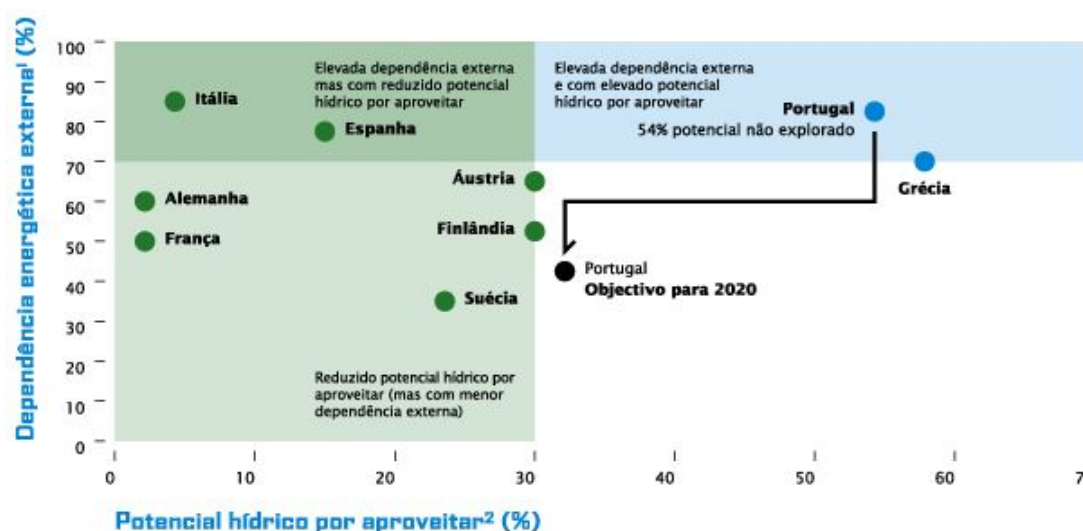


Figura 4.1: Enquadramento estratégico Português [6]

Das principais bacias hidrográficas do país, destaca-se a bacia do Douro com uma potência bastante mais elevada, como se pode verificar na Tabela 4.1 :

Tabela 4.1: Situação atual das principais bacias hidrográficas [8]

Bacia Hidrográfica	Produtibilidade média anual (GWh)	Número de grupos	Potência líquida máxima (MW)
Cávado-Lima	2554.1	21	1328.5
Douro	6196.0	34	2338.0
Tejo-Mondego	2169.0	42	1556.2
Total	10919.1	97	5272.7

Atualmente, e derivado do PNBEPH, existe uma série de projetos em curso para instalar 4117 MW hídricos em Portugal até 2017, sendo possível ver, na Tabela 4.2, quais os novos aproveitamentos e reforços de potência que estão em execução .

Tabela 4.2: Novos aproveitamentos/reforços de potência da EDP [10]

Barragens	Estado	Íncio de Construção	Entrada em Serviço	Potência a Instalar (MW)
Baixo Sabor	Em Construção	2008	2014	171 (Rev)
Ribeiradio Ermida	Em Construção	2010	2014	81 (Rev)
Foz Tua	Em Construção	2011	2016	252 (Rev)
Fridão	Em Licenciamento	2013	2018	238
Picote II	Concluído	2007	2011	246
Bemposta II	Concluído	2008	2011	191
Alqueva II	Concluído	2008	2012	256 (Rev)
Venda Nova III	Em Construção	2009	2015	746 (Rev)
Salamonde II	Em Construção	2010	2015	207 (Rev)

Mais uma vez se destaca a importância da bacia do Douro visto que a maior parte dos novos aproveitamentos e/ou reforços de potência se situam nessa bacia, sendo ainda de realçar também a importância da reversibilidade dos grupos, dado que dos 4117 MW de potência hidroelétrica a instalar até finais de 2017, cerca de 3064 MW correspondem a grupos reversíveis nas centrais hidroelétricas [7]. Na figura seguinte é possível observar a localização de todos os aproveitamentos, em serviço ou em construção, da bacia hidrográfica do Douro.

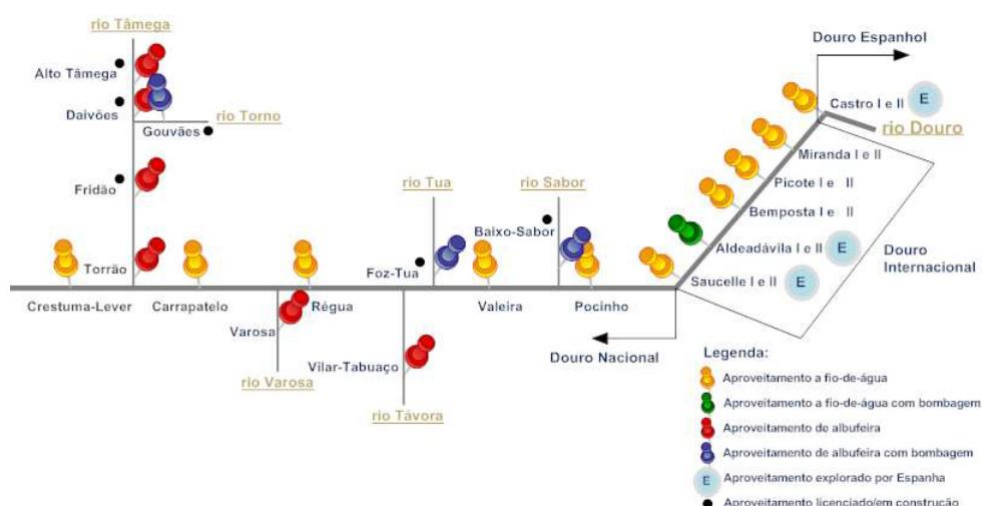


Figura 4.2: Mapa dos Aproveitamentos Hidroelétricos/Reforços de Potência da Bacia Hidrográfica do Douro até à Zona de Fronteira previsto para o ano de 2017 [7]

4.2 Classificação de Centrais Hidroelétricas

No contexto desta dissertação serão mais focados os aproveitamentos hidroelétricos de albufeira, tornando necessária uma clarificação das classificações das centrais. A preponderância dada aos aproveitamentos de albufeira deriva do facto de serem o tipo de aproveitamento que requer um maior cuidado na otimização do seu funcionamento.

De uma forma mais geral, as centrais de produção de eletricidade podem ser classificadas de 5 formas distintas [28]:

- Centrais de Base - destinadas a fornecer a maior parte da energia elétrica de forma contínua. São portanto centrais de grande potência.
- Centrais de Ponta - exclusivamente projetadas para cobrir a procura de energia nas horas de ponta. Devem poder ser colocadas em serviço rapidamente e também responder rapidamente ao aumento de carga.
- Centrais de Reserva - têm por objetivo substituir total ou parcialmente as centrais de base em caso de avaria destas.
- Centrais de Emergência ou Socorro - destinadas a abastecer consumidores que inesperadamente deixam de ser alimentados pela fonte de energia habitual. Pequena potência accionadas normalmente por motores diesel.
- Centrais de Bombagem ou Armazenamento - Permitem aproveitar a energia das horas de vazio para efetuar a bombagem, fornecendo energia nas horas de ponta seguintes.

As centrais hidroelétricas podem assumir qualquer um dos papéis, exceto de Emergência ou Socorro, o que demonstra a versatilidade deste tipo de aproveitamentos. Estas centrais podem ser caracterizadas pela sua queda ou quanto à sua capacidade de regularização, ou seja, o quociente entre a capacidade útil da albufeira e o caudal integral anual [28].

Assim, as centrais hidroelétricas podem ser de alta queda quando a altura da queda é superior a 200 metros, de média queda entre os 20 e os 200 metros ou de pequena queda quando a altura é inferior a 20 metros. Quanto à regularização designam-se como centrais a fio de água quando têm uma capacidade de armazenamento pequena, aproveitando a afluência natural dos cursos de água, ou centrais de albufeira quando têm uma capacidade de armazenamento elevada, permitindo reter a água para utilização em períodos mais favoráveis, sendo que tal como mencionado anteriormente em 4.1, existe a possibilidade de alguns aproveitamentos de albufeira realizarem bombagem [28].

No mesmo curso de água é habitual existir mais do que um aproveitamento hidroelétrico, o que significa que as decisões tomadas em relação à operação de uma central hídrica irão afetar as afluências e aproveitamentos a jusante. Este tipo de configuração hidráulica é denominado cascata, enquanto que quando os aproveitamentos apenas estão interligados do ponto de vista elétrico, dizem-se independentes.

4.2.1 Constituição Geral de uma Central Hidroelétrica

Um aproveitamento hidroelétrico é então composto por uma barragem, descarregadores, um circuito hidráulico e uma central, sendo nesta última que se encontram as turbinas. No que diz respeito às barragens, e considerando apenas as de betão, podem ser em arco-gravidade, arco simples com abóbada espessa, arco simples com abóbada delgada ou com arcos múltiplos [28] .

Os descarregadores dividem-se em descarregadores de fundo ou de cheias, podendo estes últimos ser laterais, em queda livre ou soleira. Passando para o circuito hidráulico verifica-se que este é composto pelos elementos seguintes [28] :

- Tomadas de água;
- Obras de adução - ligam as tomadas de água à câmara de pressão;
- Câma de pressão - quando a diferença de cota entre a tomada de água e as turbinas é superior a 15 metros convém que a entrada de água nas turbinas seja realizada através de condutas forçadas e, para isso, deve ser prevista uma câmara de carga ou 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;
- Condutas forçadas;
- 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;
- 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)
- 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 difusor e devolve-o ao rio a jusante em sítio conveniente;
- Comportas e outros órgãos de obturação.

Após o circuito hidráulico temos a central, o local onde se encontram instaladas as turbinas e os geradores assim como a restante maquinaria e demais aparelhagem auxiliar necessária ao seu funcionamento. Estas centrais podem ser a céu aberto (perto ou longe da barragem), subterrâneas ou de cavernas. As turbinas mencionadas são o elemento primário de um sistema de produção de energia elétrica que, em conjunto com um gerador, utiliza a energia contida num fluido (água),

podendo estas ser de vários tipos, sendo que cada um destes tipos se ajusta a um determinado tipo de central.

Em primeiro lugar existem as turbinas de ação, tipo Pelton, em que a água incide sobre a roda móvel através de jatos individualizados, sendo que não funcionam imersas na água turbinada nem possuem difusor, sendo portanto usadas em aproveitamentos de alta queda e baixo caudal.

Em segundo lugar existem as turbinas de reação, que trabalham no seio do fluido turbinado sendo que a água penetra na roda móvel por toda a periferia. Dentro das turbinas de reação existem 3 tipos diferentes, as turbinas Francis que são usadas em aproveitamentos de média ou baixa queda, em que 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. Existem ainda as turbinas Kaplan, utilizadas em aproveitamentos de baixa queda e grande caudal, que se diferenciam das turbinas Francis pelo menor número de pás que apresentam, tendo no entanto inclinação regulável e forma de hélice. Em último lugar existem os grupos bolbo, instalados muitas vezes em aproveitamentos de muito baixa queda, que 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 [28] .

4.3 Exploração de Aproveitamentos Hidroelétricos

A exploração de aproveitamentos hidroelétricos e a sua otimização corresponde a um problema deveras complexo e não linear, que ultrapassa largamente a capacidade de cálculo humano, sendo necessário recorrer a modelos computacionais para a sua resolução. Neste tipo de problemas é necessário considerar não só as decisões operacionais e o impacto destas nas restantes centrais, mas também a imprevisibilidade das afluências e a não linearidade da potência destes aproveitamentos, dada a sua dependência da queda e do caudal.

Analisando a questão de uma forma bastante simplista e tendo em conta que os custos de produção de uma central hídrica são praticamente nulos, turbinar no presente poderá parecer a melhor solução para poupar combustível e, conseqüentemente, diminuir o custo de produção devido à não utilização de centrais térmicas. No entanto, existindo um défice de afluências nos períodos seguintes, o custo de produção referentes irá aumentar drasticamente. Por outro lado, recorrer apenas a energia térmica no presente poderá originar a realização de descarregamentos caso as afluências sejam elevadas [8]

De uma forma sucinta, o problema de otimização da exploração de aproveitamentos hidroelétricos torna-se complexo devido aos seguintes fatores [9] :

- Característica não linear da potência gerada;
- Efeitos de propagação temporal das decisões tomadas num determinado momento;
- Incerteza associada à procura de energia elétrica e às afluências;
- Configuração das cascatas;

- Efeito da bombagem.

Tal como referido em 4.1, a bombagem corresponde à transferência de água de um reservatório a jusante para outro a montante, e constitui um dos processos mais importantes para os aproveitamentos hidroelétricos nos dias de hoje quando disponível. Esta importância está relacionada com a necessidade de avaliar se compensa ou não a realização do processo visto representar um custo e, caso se realize, quais os períodos mais adequados.

O trabalho aqui apresentado apenas se irá focar num horizonte temporal de 24 horas, ou seja, planeamento de curto prazo (operação) em que as empresas têm como principal objectivo determinar qual a melhor estratégia de operação das suas centrais, de modo a maximizarem o seu lucro, considerando os preços de mercado. Tendo em conta a possibilidade de bombagem, o objectivo básico será colocar a potência de turbinamento nas horas de preços mais elevados e realizar a bombagem nas horas de preços mais baixos, respeitando todas as restrições envolvidas. Para a bombagem, e para além das restrições, é necessário garantir que a relação de preços seja compensatória, ou seja, o custo de bombar um determinado volume de água tem de ser recuperado turbinando esse mesmo volume a preços que, no mínimo, permitam cobrir esse custo. A toda esta complexidade há que adicionar ainda a dificuldade associada à incerteza nas afluições, o efeito da interligação dos aproveitamentos e a relação não linear entre a potência, a queda e o caudal [9].

Tendo em conta esta complexidade e analisando os trabalhos existentes nesta área, é possível verificar a falta de consenso no que a simplificações diz respeito. No entanto, destaca-se a adoção de valores constantes para algumas variáveis sob certas condições de exploração, linearização de variáveis cujo comportamento é não linear ou mesmo a não consideração de algumas variáveis. Todas estas simplificações têm o objetivo de facilitar a resolução do problema e torná-lo mais leve. Desta forma, neste tipo de resolução não se pretende obter em geral a solução ótima, mas sim uma solução ou um conjunto de soluções de qualidade [8] .

É também de realçar a falta de unanimidade existente quanto à melhor metodologia, muito devido aos diferentes pesos dados pelos autores a aspetos como o tempo computacional, qualidade de solução, entre outros. Neste momento a principal aposta nesta área são as meta-heurísticas, destacando-se os Algoritmos Genéticos (AG) e os Enxames de Partículas Evolucionários (EPSO). Neste trabalho foram utilizados os Algoritmos Genéticos, razão pela qual serão abordados no Ponto 4.4.

4.4 Algoritmos Genéticos

4.4.1 Questões Gerais

Desenvolvidos na década de 60 por John Holland e os seus colegas, os AG correspondem a um algoritmo da família evolucionária, o que faz com que não existam grandes diferenças entre estes e os EPSO. O maior elemento diferenciador foi a proximidade em relação aos conceitos biológicos

da genética e da codificação do ADN, visto que a representação binária das soluções era associada ao conceito de cromossoma e a geração de soluções novas pelo mecanismo de cruzamento encontrou imediata analogia nos fenómenos que ocorrem na meiose celular [11].

Posto isto, a principal diferença consiste na forma de representar os indivíduos de uma população, sendo nos AG uma representação discreta para gerar novos indivíduos com maior possibilidade de sobrevivência. Consequentemente a interpretação das soluções terá de ser realizada de maneira distinta, assim como os mecanismos utilizados para a geração de novas soluções. Estas diferenças encontram-se sumarizadas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Distinção entre Algoritmos da Família Evolucionária [11]

...	AG	EPSO
Codificação para Soluções	Numa sequência de bits	Num vetor de variáveis reais
Mecanismo preferencial para gerar novas soluções	Recombinação (cruzamento), com pequena contribuição de mutação por inversão de bit	Mutação Gaussiana
Interpretação das soluções	Algoritmo de decodificação dos cromossomas	Leitura natural dos valores das variáveis

Como é possível verificar, os AG tornam-se 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 da solução ficar presa em ótimos 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 (uma sequência de bits), que é indiferente para a operação do algoritmo, 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, sendo o espaço de pesquisa explorado usando regras de transição probabilística (cruzamento, mutação) em vez de regras determinísticas. Uma outra vantagem destas metodologias resulta de não existir necessidade de utilizar derivadas para determinar a direção do movimento, sendo apenas necessária uma função de *fitness* para avaliar cada possível solução.

4.4.2 Implementação do Algoritmo Genético

O primeiro passo para a implementação de um AG é a codificação ou escolha do genótipo a utilizar no problema de otimização. Neste primeiro passo são codificados, normalmente utilizando linguagem binária, os parâmetros do problema numa *string* finita, composta por símbolos designados como genes. Esta codificação afeta significativamente a robustez do algoritmo, pelo que deve ser realizada com cuidado.

Definida a codificação é então criada uma população que permite trabalhar simultaneamente com um conjunto de indivíduos, aumentando a probabilidade de obtenção da solução ótima ao mesmo tempo que diminui o tempo de computação. Depois de criada a população inicial, cada *string* é avaliada sendo atribuído um valor referente à função de adaptação. No caso dos AG torna-se vital fazer uma distinção entre função objetivo e a função de adaptação utilizada pelo algoritmo. A primeira fornece uma medida de performance com respeito a um conjunto particular de valores de genes, independente de qualquer outra *string*, enquanto que a segunda transforma a medida de performance numa oportunidade de reprodução, isto é, a adaptação de uma *string* é definida em relação a outros membros da população corrente. Os valores de adaptação atribuídos às strings são depois aplicados para ponderar a importância de cada indivíduo na população [29].

Esta metodologia além de permitir considerar as restrições de uma forma bastante simplificada, fornece ainda diversos processos para lidar com a violação das mesmas. Destes processos é possível destacar a rejeição de cromossomas inviáveis, a reparação destes ou mesmo a reparação de apenas uma fração do cromossoma, de forma a torná-lo viável. Outra técnica consiste em permitir a pesquisa em regiões não admissíveis visto que, mesmo assim, estes indivíduos podem encontrar-se próximos da solução ótima, sendo no entanto aplicadas penalidades relativas a cada restrição violada [8].

No que diz respeito à geração de sucessivas populações com intuito de melhorar a inicial são três os operadores utilizados nos AG - seleção, cruzamento e mutação - sendo bastante simples de considerar uma vez que envolvem apenas a cópia ou alteração parcial das *strings*.

Após a reprodução é realizado o cruzamento, no qual dois indivíduos são combinados resultando dois indivíduos novos, como é possível ver na Figura 4.3. O ponto de cruzamento é, tal como mencionado anteriormente, determinado aleatoriamente. Este operador recombina porções dos melhores indivíduos existentes, o que faz com que o processo possa evoluir na direção da solução ótima para o problema em causa.

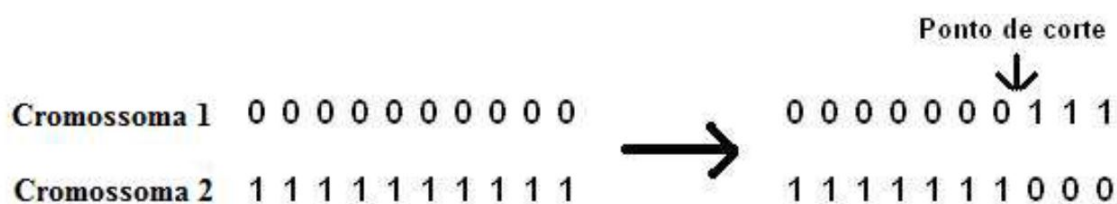


Figura 4.3: Processo de Cruzamento [8]

Este tipo de operador, juntamente com a reprodução, pode fazer com que se desperdice "material genético" importante, cabendo então à mutação evitar a convergência para ótimos locais. A mutação é realizada através da alteração aleatória da posição de um bit, ou seja, no caso binário apenas ocorre a mudança de 1 para 0 ou vice-versa. Geralmente o valor da taxa de mutação é bastante pequeno entre 0,001 e 0,05 [8].

Mais do que o cruzamento e a mutação, a seleção é o operador responsável por determinar a característica de convergência do AG. A pressão proveniente deste operador favorece os melhores indivíduos transportando-os para a iteração seguinte. Contudo, um valor muito elevado de pressão pode fazer o algoritmo convergir prematuramente para uma má solução. Hoje em dia, são utilizados vários os esquemas de seleção, sendo alguns indicados em seguida [29]:

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

Todos os parâmetros do problema como a taxa de mutação, taxa de cruzamento ou o número de indivíduos em cada população devem ser estudados de forma cuidadosa visto influenciarem de forma significativa o desenrolar do processo. Por exemplo, caso o número de indivíduos na população seja demasiado pequeno relativamente ao espaço de soluções, será difícil para o algoritmo realizar uma pesquisa eficiente. No caso da taxa de mutação, como foi visto anteriormente, o seu valor é consideravelmente pequeno porque o aumento do seu valor pode ser contraproducente com o efeito desejado de convergência obtido através do cruzamento de indivíduos [8].

Para finalizar, um possível algoritmo de aplicação dos Algoritmos Genéticos é apresentado em seguida.

Algorithm 1 Algoritmo Genético Base

- 1: Definir a codificação
 - 2: Definir aleatoriamente uma população inicial
 - 3: Avaliar a adaptação dos indivíduos da população
 - 4: Gerar novos indivíduos por cruzamento
 - 5: Realizar mutações nos novos indivíduos
 - 6: Avaliar a adaptação dos novos indivíduos
 - 7: Selecionar os melhores indivíduos por torneio estocástico
 - 8: Se o critério de convergência não for satisfeito, regressar a 4
-

4.5 Problema de Otimização da Exploração com Preços Fixos

Tal como mencionado em 4.3 a exploração de aproveitamentos hidroelétricos é bastante complexa e inclui um número bastante significativo de variáveis dificultando a resolução de problemas de otimização da sua exploração sem recorrer a ferramentas computacionais. Na realidade, mesmo

utilizando essas ferramentas a resolução do problema completo de otimização é impraticável devido ao nível de cálculo e tempo computacional, pelo que é usual considerar simplificações. Estas simplificações, que serão apresentadas posteriormente, impedem a obtenção de uma solução ótima mas garantem a obtenção de uma solução de qualidade considerando modelos próximos das condições de exploração reais.

O propósito da resolução deste problema consiste em realizar o escalonamento de um conjunto de aproveitamentos hidroelétricos, para um horizonte temporal de um dia, gerando a máxima receita possível às empresas detentoras das centrais hídricas, ao mesmo tempo que aproxima os modelos criados das condições reais de exploração. Este escalonamento consiste em determinar os períodos em que os aproveitamentos estarão em funcionamento quer a turbinar quer a bombear, de forma a satisfazer a carga. Embora este problema aborde essencialmente o planeamento a curto prazo, deverá ser incluída uma restrição relacionada com o volume final das albufeiras, de forma a salvaguardar as condições futuras de exploração.

Tal como apontado anteriormente, a complexidade deste problema está diretamente ligada a:

- Efeitos de propagação temporal;
- Existência de vários aproveitamentos no mesmo curso de água;
- Incertezas associadas às diferentes variáveis do problema;
- Impacto que cada estratégia tem no preço de fecho do mercado;
- Relação não linear entre a potência, o caudal e a queda;
- Existência de bombagem.

O efeito da propagação temporal está relacionado com a influência que as decisões tomadas no presente têm sobre as decisões futuras. Desta forma, turbinar em determinado período pode implicar a incapacidade de realizar a mesma operação no período seguinte em que o benefício poderia ser maior, resultando em receitas menores. Por outro lado, caso se adie em demasia a operação de turbinagem podem ocorrer desperdícios de energia inerentes aos descarregamentos devido ao excessivo armazenamento de água na albufeira [8] .

A existência de mais que um aproveitamento no mesmo curso de água faz com que as centrais hídricas sejam exploradas em cascata, pelo que as decisões operacionais tomadas relativamente a uma central vão influenciar e estar dependentes de todas as outras, tornando evidente uma interligação temporal no problema. Torna-se também óbvio que as decisões operacionais para uma dada central influenciam não só os seus volumes a montante e a jusante desta, mas também os volumes dos reservatórios das centrais a montante e a jusante. Esta interligação hidráulica não pode ser negligenciada mesmo que torne a resolução mais complexa, uma vez que permite considerar as obrigações que as centrais têm em respeitar o funcionamento das restantes [8] .

A incerteza está diretamente ligada às previsões realizadas para estimar de certas grandezas, como o preço de mercado, as condições atmosféricas ou as afluências. No caso das afluências, e

visto que se trata de um problema a curto prazo, estas são consideradas como grandezas determinísticas, correspondendo a dados do problema. Além disso, e pese o facto de ser o preço de mercado a definir o valor da água em cada período, os seus valores são também dados do problema mantendo-se inalterados ao longo de todo o Algoritmo Genético utilizado. Isto deriva do facto de, neste modelo, se admitir que os preços são fixos considerando-se que as centrais hídricas são *price takers*, ou seja, assume-se que as propostas de venda apresentadas por estas não influenciam o preço de mercado. Esta situação nem sempre traduz a realidade, razão pela qual será abordada em 4.6 .

No que concerne à potência resultante da operação de uma central hídrica é necessário considerar a sua relação não linear com a queda e o caudal, uma vez que esta não linearidade é uma das particularidades deste problema. Muitas vezes uma das simplificações realizadas passa por considerar a queda constante. No entanto, as centrais hídricas do rio Douro cujo comportamento se pretende emular têm albufeiras com capacidade reduzida pelo que as variações da queda podem ser significativas, razão pela qual serão consideradas.

Em último lugar, é necessário considerar a possibilidade de realizar bombagem uma vez que este aspeto tem um grande peso na maximização dos proveitos e, consequentemente, na análise da viabilidade económica destes projetos. Visto que se dão em intervalos muito curtos, os tempos de transição entre os estados de turbinagem e de bombagem são desprezados.

4.5.1 Potência Gerada por um Aproveitamento Hidroelétrico

Para ser possível a formulação matemática do problema de otimização da exploração de um aproveitamento hidroelétrico é imprescindível saber como é calculada a potência gerada por este. Sabendo que a densidade da água é aproximadamente 1000 kg/m^3 , desprezando as perdas de carga e atendendo ao facto de que a potência gerada por uma turbina resulta da energia potencial gravítica armazenada na água da albufeira, podemos usar a expressão (4.1) para obter o seu valor.

$$P = 9,81 \cdot q \cdot h \cdot \mu_T / 1000 (MW) \quad (4.1)$$

Nesta expressão:

- q - Caudal (m^3/s);
- h - Queda (m);
- μ_T - Rendimento de turbinagem.

Caso a altura da queda seja considerada constante, correspondendo à queda nominal do aproveitamento, pode ser utilizada a expressão (4.1) para o cálculo da potência de um aproveitamento.

No entanto, a queda útil de um aproveitamento hidroelétrico corresponde à diferença entre a queda bruta (H) - desnível entre a água a montante e a jusante - e as perdas de carga verificadas ao longo do circuito hidráulico. Tendo em conta que a altura da água a montante varia com o volume

da albufeira, esta será aproximada por uma reta do tipo $y=m.x+b$, sendo x o volume da albufeira e os parâmetros m e b características de cada central. Para além disso, por forma a obter a queda útil deverá ser subtraído ao valor da altura resultante desta expressão o valor da altura do nível a jusante (n) tal como se pode verificar na expressão (4.3) [8] .

Portanto, caso seja considerada a variação da queda e tendo em conta que o circuito hidráulico apresenta perdas de carga dadas por $\Delta h = \beta . q^2$, a potência gerada passa a ser calculada através da expressão (4.2) em que β corresponde ao coeficiente de perda de carga.

$$P = 9,81.q.(h - \beta . q^2) . \mu_T / 1000 (MW) \quad (4.2)$$

Em que h , em metros, é calculado da seguinte forma:

$$h = m.v + b - n \quad (4.3)$$

No que diz respeito à bombagem, a potência é calculada através da equação (4.4), onde μ_B é o rendimento da bombagem.

$$P_B = 9,81.q.(h + \beta . q^2) / (\mu_B . 1000) (MW) \quad (4.4)$$

A potência gerada, o caudal e a queda apresentam, tal como referido anteriormente, uma relação não linear que pode ser observada através da Figura 4.4.

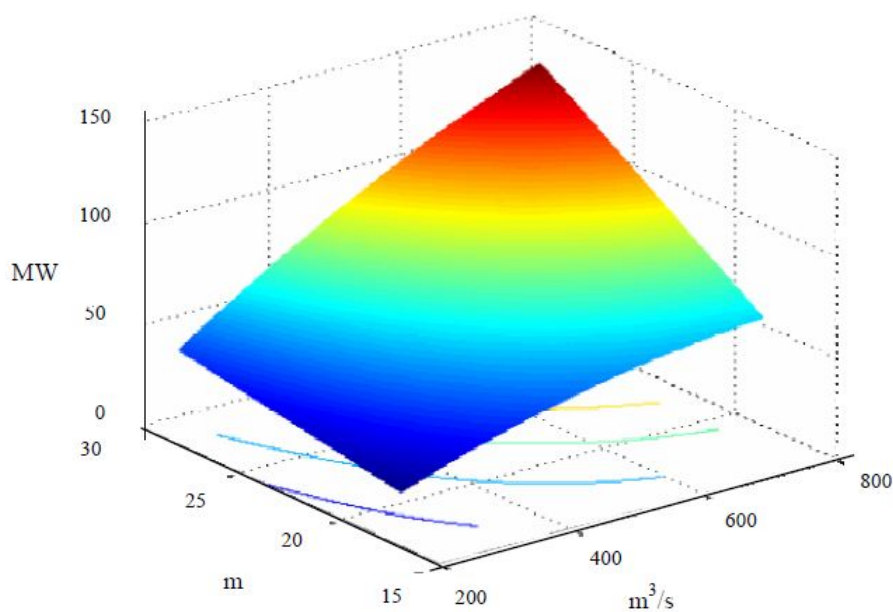


Figura 4.4: Relação não linear entre potência, caudal e queda [9]

Através da análise da Figura 4.4 é possível concluir que se, por exemplo, ocorrer uma diminuição da altura da queda será necessário aumentar o caudal, de forma a produzir a mesma potência, devendo este aumento ser maior para valores elevados da potência pretendida e para valores reduzidos da queda.

No entanto, considerando um valor constante para a altura da queda, é possível obter uma curva que relacione a potência gerada com o caudal. Na Figura 4.5 estão representadas uma série de curvas desse género, cada uma delas para um dado valor da altura da queda.

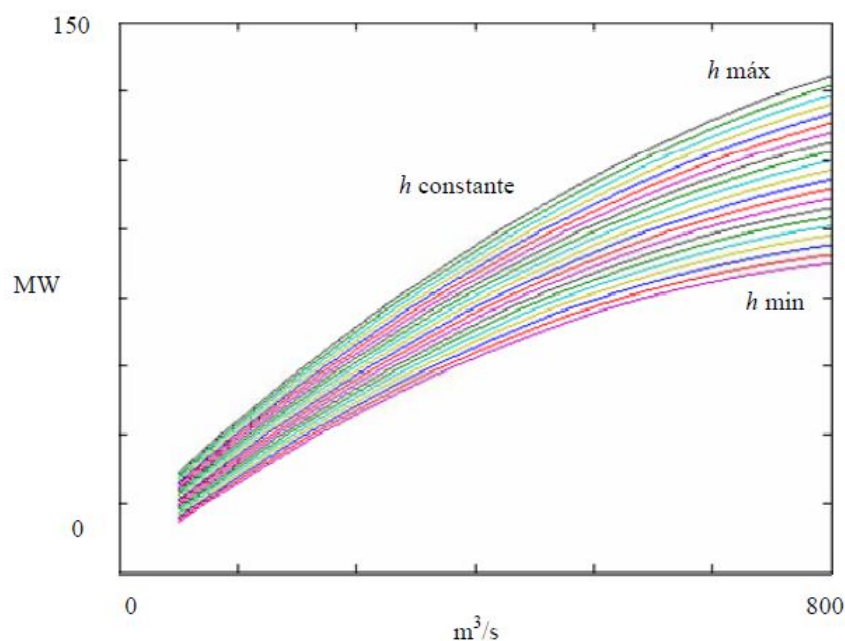


Figura 4.5: Relação entre potência e caudal para diferentes valores da queda [9]

Analisando a Figura 4.5 conclui-se que, mesmo para um valor de queda constante, a relação entre a potência e o caudal é não linear devido ao efeito da perda de carga, estando o valor da perda de carga diretamente relacionada com o caudal. Visto que na maioria das situações os aproveitamentos hidroelétricos funcionam com o caudal turbinado ou bombado máximo, o valor da perda de carga deverá ser considerado constante e máximo de forma a minimizar o erro cometido.

4.5.2 Variáveis

Da formulação de um problema de otimização fazem sempre parte 3 tipos de variáveis [9] :

- Variáveis de estado (x_{ik}): são as variáveis que descrevem completamente o comportamento do sistema, isto é, se os seus valores são conhecidos para todos os estados, então é possível caracterizar de forma completa o comportamento do sistema;

- Variáveis de decisão (u_{ik}): são as variáveis cujos valores podem ser escolhidos diretamente pelo utilizador. Estas variáveis influenciam o processo, afetando as variáveis de estado de uma forma predeterminada;
- Variáveis de perturbação ou parâmetros (p_{ik}): estão usualmente relacionadas com os dados do problema e em muitos casos correspondendo a elementos exógenos à atividade da empresa.

A Tabela 4.4 resume as variáveis referentes ao problema em questão, fazendo a distinção supracitada:

Tabela 4.4: Variáveis consideradas nos modelos do problema [8]

Tipo de Variável	Variável	Descrição
Decisão	$P_{T,ik}$	Potência turbinada pela central i na hora k
	$P_{B,ik}$	Potência bombada pela central i na hora k
Estado	$q_{T,ik}$	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 k
	h_{ik}	Altura da queda da central i na hora k
Parâmetros	a_{ik}	Afluência da albufeira da central i na hora k
	π_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
	$\mu_{T,i}$	Rendimento da turbinagem da central i
	$\mu_{B,i}$	Rendimento da bombagem da central i

4.5.3 Restrições

As restrições deste problema podem ser divididas em restrições operacionais e restrições globais.

As primeiras dizem respeito aos limites que devem ser impostos às variáveis de estado, estabelecendo então limites máximos fixos, dependentes da altura da queda, para os caudais turbinados e bombados. No entanto nesta formulação esse aspeto não é considerado, sendo então utilizado sempre o caudal máximo tal como acontece maioritariamente na exploração real deste tipo de centrais.

O volume armazenado nas albufeiras está também sujeito a limites máximos e mínimos, dependendo das características das albufeiras em causa, sendo os limites mínimos necessários visto existirem volumes obrigatórios que devem ser assegurados para outras atividades. O mesmo não acontece com o volume descarregado que só apresenta limite mínimo, sendo considerado que a central tem capacidade para libertar uma capacidade infinita de água, tendo como objetivo garantir

que o volume máximo da central não seja ultrapassado em cada período. Esta última restrição será já considerada através de uma restrição global.

As restrições globais dizem respeito a todo o sistema, correspondendo nomeadamente à restrição de balanço de água que visa, através de uma restrição de igualdade, traduzir a dependência temporal e hidráulica das ações ocorridas nas centrais de um sistema. A segunda restrição global considerada impõe a igualdade entre o volume inicial e o volume final de água [8] .

4.5.4 Formulação Completa

A função objetivo dada por (4.5) representa o lucro decorrente da operação de I aproveitamentos hidroelétricos ao longo de K períodos horários e é calculada pela diferença entre os proveitos resultantes do turbinamento da água em cada período e os custos de bombear água tendo em conta o preço de mercado da energia elétrica em cada período.

$$\max \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \pi_k (P_{T,ik} - P_{B,ik}) \quad (4.5)$$

Suj a:

$$v_{ik} = v_{i,k-1} + a_{ik} - q_{T,ik} - s_{ik} + q_{B,ik} + \sum_{m=1}^M (q_{T,m(k-\phi_m)} + S_{m(k-\lambda_m)} - q_{B,m(k-\omega_m)}) \quad (4.6)$$

$$v_i^{\min} \leq v_{ik} \leq v_i^{\max} \quad (4.7)$$

$$0 \leq s_{ik} \leq \infty \quad (4.8)$$

$$v_i^f = vol_i^f \quad (4.9)$$

Em que:

- I - número total de aproveitamentos;
- K- número total de horas (períodos);
- π_k - preço de mercado na hora k em €/MWh;
- $P_{T,ik}$ - potência turbinada pela central i no período k;
- $P_{B,ik}$ - potência bombada pela central i no período k;

- v_i^{min} - volume mínimo da central i;
- v_i^{max} - volume máximo da central i;
- v_{ik} - volume da albufeira i na hora k;
- a_{ik} - afluência de água à albufeira i na hora k;
- $q_{T,ik}$ - caudal turbinado pela central i na hora k;
- s_{ik} - caudal descarregado pela central i na hora k;
- $q_{B,ik}$ - caudal bombado pela central i na hora k;
- v_i^f - volume final da albufeira da central i;
- vol_i^f - volume final definido para a central i.
- m - índice associado a cada uma das centrais imediatamente a montante da central i;
- M - número de centrais a montante da central i;
- $\phi_m, \lambda_m, \omega_m$ - tempos de atraso para caudais turbinados, descarregados e bombados.

Na formulação apresentada, (4.6) corresponde à restrição de balanço de água, (4.7) é referente aos limites estabelecidos para os volumes armazenados em cada aproveitamento. As restrições (4.8) estabelece os limites para os volumes descarregados e (4.9) impõe que o volume final armazenado em cada aproveitamento seja igual ao volume inicial. Esta última restrição pode ser alterada para duas restrições de desigualdade, em que numa delas o valor do volume final deverá ser inferior ao volume inicial mais o caudal de uma bombagem e na outra superior ao volume inicial menos o caudal de uma turbinagem, permitindo não só aumentar a velocidade de convergência do algoritmo mas também realizar uma operação a mais de turbinagem do que bombagem [8] .

Deve salientar-se ainda que no caso de não se considerar interligação hidráulica, a restrição (4.6) é simplificada obtendo-se (4.10) .

$$v_{ik} = v_{i,k-1} + a_{ik} - q_{T,ik} - s_{ik} + q_{B,ik} \quad (4.10)$$

4.5.5 Algoritmo Genético aplicado ao Problema

Uma das formas para resolver o problema descrito no ponto anterior são os Algoritmos Genéticos e, conseqüentemente, a aplicação desenvolvida em [8] . Deve referir-se que esta aplicação e respetivos modelos, integralmente criados em *Matlab*, funcionarão como base para o resto do trabalho realizado no âmbito desta dissertação.

Embora os princípios gerais dos Algoritmos Genéticos sejam os mesmos para todas as aplicações, existem nuances que tornam essencial a clarificação de todos os procedimentos adotados.

O programa criado em [8] foi desenvolvido com o intuito de ser o mais genérico possível, ou seja, de permitir realizar testes para diferente número de centrais, número de gerações, número de indivíduos e número de períodos, sendo apenas necessário alterar no código o valor das variáveis respectivas estando estas devidamente identificadas. No entanto, ao longo desta dissertação estes testes não serão abordados, sendo apenas utilizados os valores que se concluíram mais adequados.

Através da Figura 4.6, que representa o algoritmo da aplicação referida anteriormente, é possível verificar que o primeiro passo é a criação de uma população inicial com um determinado número de indivíduos. A criação das sequências de 1 e 0 que compõe estes indivíduos iniciais pode ser feita aleatoriamente, como é realizada habitualmente, ou partindo de uma população inicial mais próxima da solução ótima [8]. Mais à frente, quando expostos os modelos utilizados, a forma como é criada a população será devidamente indicada.

Após a criação destes indivíduos é necessário definir uma codificação e decodificar cada indivíduo, ou seja, atribuir um significado aos 1 e 0 que os constituem. Desta forma, estas sequências são transformadas numa possível solução do problema e possibilitam o cálculo da potência de turbinagem e de bombagem para cada indivíduo através das equações (4.2) e (4.4).

Visto existirem 3 estados de funcionamento possíveis - turbinagem, bombagem ou inatividade - cada estado é definido por 2 bits, de tal modo que o número de bits de cada indivíduo corresponde ao dobro do produto do número de períodos pelo número de centrais. A codificação dos estados é feita da seguinte forma [8]:

- 00 - Inativa;
- 01 - Bombar;
- 10 - Turbinar;
- 11 - Inativa.

Após a decodificação e o cálculo da potência turbinada ou bombada, é possível verificar a adaptação de cada um dos indivíduos e respetivo valor da função objetivo que neste caso corresponde aos proveitos inerentes à exploração dos aproveitamentos pelo que se deseja que sejam os mais elevados possível. No entanto, é necessário verificar quais os indivíduos que respeitam todas as restrições e constituem soluções viáveis realizando uma série de testes e aplicando as respetivas penalizações em caso de incumprimento, como apresentado de seguida [29] :

- É calculado o volume final de cada albufeira associada à solução em análise;
- Se esse volume final ultrapassar o limite máximo de armazenamento da albufeira realiza-se um descarregamento correspondente ao excesso;
- 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 coeficiente bastante elevado;

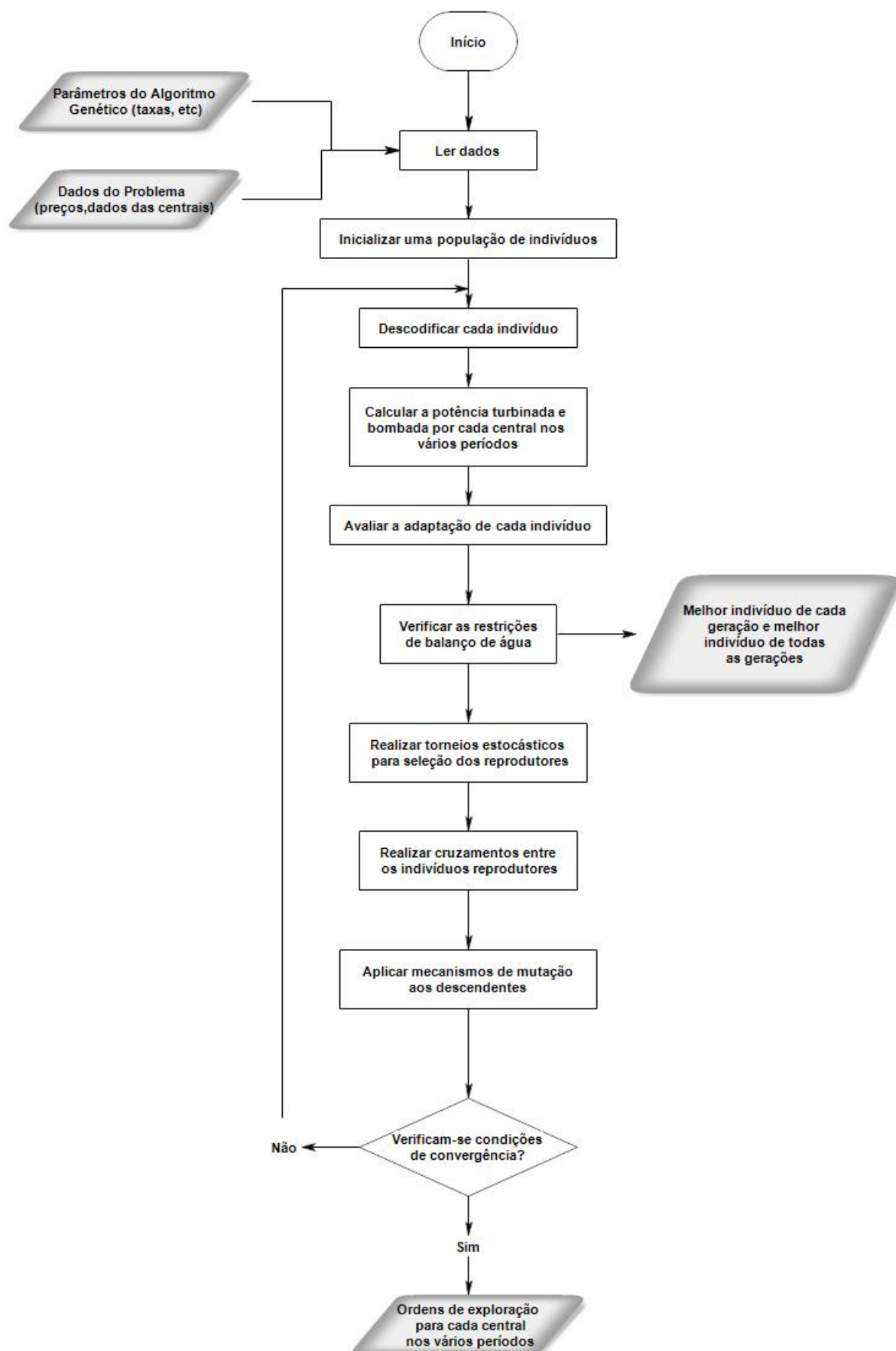


Figura 4.6: Fluxograma da aplicação desenvolvida em [8]

- Estabeleceu-se que o volume final de água armazenada em cada albufeira constitui um dado de entrada. Se o volume final associado a uma solução não coincidir com o limite definido procede-se à 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 coeficiente bastante elevado.

Assim, os indivíduos que não verifiquem as restrições são penalizados, diminuindo a sua probabilidade de integrarem os conjunto de reprodutores, que são utilizados no processo de seleção através de torneio estocástico. Nestes torneios são escolhidos aleatoriamente dois indivíduos, dos quais o melhor adaptado tem maior probabilidade de integrar o conjunto de reprodutores. Contudo é necessário ter em consideração que os indivíduos menos adaptados podem conter alguma informação relevante, pelo que a taxa de seleção deve ser selecionada de forma adequada.

O passo seguinte consiste em realizar a reprodução e o cruzamento, processo já explicado em 4.4.2, do qual resultam dois indivíduos novos com informação dos progenitores selecionados. Este cruzamento será realizado tantas vezes quanto o resultado da divisão do número de indivíduos por dois.

Em último lugar, e também explicado no Ponto 4.4.2, é realizada a mutação em alguns indivíduos. Esta tem associada uma probabilidade muito baixa e corresponde à seleção aleatória de um bit que é modificado, ou seja, passa de 1 para 0 ou vice-versa.

Utilizando todos estes operadores é criada uma nova população e o ciclo é repetido até que se verifiquem os critérios de convergência estipulados ou que se atinja um número máximo de iterações do AG. A solução final diz respeito ao melhor indivíduo da população final, sendo então criadas matrizes com as ordens de exploração das centrais para os períodos considerados [8].

4.6 Problema de Otimização Final

Na formulação apresentada anteriormente, e referente ao trabalho realizado em [8], as centrais hídricas foram consideradas como *price takers*. Este facto significa que se assume que a potência turbinada ou bombada nas centrais hídricas não atinge valores que se considerem relevantes para a alteração do preço de mercado. Isto leva a que nestes casos, embora o preço de mercado influencie o valor da água em cada período, os preços horários sejam dados do problema e não sofram qualquer alteração ao longo do processo.

No entanto o que se verifica é que a potência instalada no conjunto destas centrais pode ser suficientemente elevada ao ponto de alterar significativamente as curvas de oferta, levando a uma alteração do preço do mercado e, conseqüentemente, do lucro inerente à exploração destas centrais. Este impacto na estratégia de operação será tanto maior quanto maior o número de centrais hídricas consideradas. Estas alterações constituem o alvo central de estudo ao longo do trabalho realizado nesta dissertação.

Assim, inicialmente é necessário realizar uma previsão da carga para cada período, bem como a quantidade de energia oferecida pelos concorrentes e o respetivo preço, de forma a compreender

o comportamento das curvas de mercado sem o impacto das centrais hídricas. Posteriormente são adicionadas as potências destas centrais às curvas de oferta de energia iniciais, conforme será explicado em 4.6.1, e calculados os novos preços de mercado. Este novo preço de mercado será o preço introduzido no AG na iteração seguinte. Este processo será repetido até que em duas iterações sucessivas o valor máximo da diferença relativa entre preços de todos os períodos seja inferior ao definido pelo utilizador.

Os dados referentes às curvas de mercado iniciais foram fornecidos pela EDP- Gestão da Produção de Energia, SA.

4.6.1 Impacto dos Períodos de Turbinagem e de Bombagem nos Preços de Mercado

Após a construção das curvas iniciais de mercado, sem o impacto das centrais hídricas, é possível obter o preço de mercado para cada hora do período em estudo, sendo estes os valores que o AG utilizará ao ser executado a primeira vez. Como resultado, irão ser obtidas ordens de exploração através das quais é calculada a potência turbinada e bombada pelas centrais hídricas em estudo.

A potência turbinada assim obtida, derivada da particularidade das centrais hídricas possuírem custos de produção praticamente nulos, será adicionada ao segmento a preço zero das curvas de oferta de venda de energia. Quanto à potência bombada, e visto que a operação de bombagem representa um custo e que a relação de preços terá que ser garantidamente compensatória, é adicionada ao segmento mais caro das curvas de oferta de compra de energia.

Nas figuras seguintes - 4.7 , 4.8 e 4.9 - é apresentado um exemplo onde é possível verificar o impacto que as potências turbinadas e bombadas por parte de centrais hídricas podem ter no preço de fecho de mercado. Deve salientar-se que os valores apresentados são meramente ilustrativos e não correspondem a valores reais e/ou inseridos na aplicação desenvolvida.

Consideremos a Figura 4.7 como ponto de partida. Nestas curvas de ofertas só estão representadas as ofertas dos concorrentes verificando-se que o preço de fecho de mercado se encontra nos 35 €/MWh e que o valor das potências nos segmentos mais barato das curvas de venda e mais caro das curvas de compra é 16 MW e 20 MW respetivamente.



Figura 4.7: Curvas de oferta de compra e venda de energia elétrica

Na situação apresentada na Figura 4.8 a potência turbinada pelas centrais hídricas é de 10 MW e a potência bombada é 20 MW. Como resultado nota-se que a interseção das curvas de oferta corresponde ao preço de fecho do mercado que se situa claramente nos 40 €/MWh.



Figura 4.8: Curvas de oferta de compra e venda de energia elétrica

No último caso, representado na Figura 4.9 a potência turbinada aumentou, passando para os 20 MW enquanto que a potência bombada baixou para os 5 MW, fazendo com o preço de mercado baixasse para os 30 €/MWh.



Figura 4.9: Curvas de oferta de compra e venda de energia elétrica

Com isto é possível concluir que, tal como esperado, a turbinagem irá contribuir para uma diminuição do preço de mercado e a bombagem, uma vez que representa um custo, contribui para o aumento do preço de mercado.

4.6.2 Aplicação Final

Tal como indicado anteriormente o ponto de partida para a criação da aplicação desenvolvida neste trabalho foi a aplicação descrita em [8]. Assim, o Algoritmo Genético utilizado nessa aplicação e apresentado previamente na Figura 4.6, corresponde ao bloco “Algoritmo Genético” do fluxograma da aplicação final, que se encontra na Figura 4.10. Nestas condições, em cada iteração

da nova aplicação é executado um AG. O facto de ser o mesmo Algoritmo Genético em ambos os casos leva a que as restrições e variáveis consideradas sejam as mesmas.

Enquanto que em aplicações anteriores os preços de mercado a inserir no AG correspondiam a valores inseridos diretamente pelo utilizador num vetor, nesta nova aplicação é necessário que sejam calculados através do Algoritmo 2 a partir dos dados fornecidos para as curvas iniciais de mercado. Deve referir-se ainda que as curvas de oferta de mercado foram aproximadas a retas do tipo $y=m.x+b$, daí a necessidade de saber o declive das mesmas.

Algorithm 2 Cálculo Preço de Mercado

```

1:  $p = 24$ 
2: for iteration  $i = 1 : p$  do
3:    $xvenda(1,i) = qtdvenda(1,i) + pturbinada(i,2);$ 
4:    $xcompra(1,i) = qtdcompra(1,i) + pbombada(i,2);$ 
5:    $bcompra(1,i) = ycompra(1,i) - mcompra(1,i).xcompra(1,i);$ 
6:    $bvenda(1,i) = yvenda(1,i) - mvenda(1,i).xvenda(1,i);$ 
7:    $xint(1,i) = -(bcompra(1,i) - bvenda(1,i)) / (mcompra(1,i) - mvenda(1,i));$ 
8:    $yint(1,i) = mvenda(1,i).xint(1,i) + bvenda(1,i);$ 
9:    $preco(1,i) = yint(1,i);$ 
10: end for
  
```

Neste algoritmo os dados e os resultados correspondem a:

- p - Número de períodos;
- $qtdvenda$ - quantidade de energia transacionada no segmento mais barato das curvas de venda sem as centrais hídricas;
- $qtdcompra$ - quantidade de energia transacionada no segmento mais caro das curvas de compra sem as centrais hídricas;
- $yvenda$ - preço do segmento mais barato das curvas de venda de energia;
- $ycompra$ - preço do segmento mais caro das curvas de venda de energia;
- $xvenda$ - quantidade de energia transacionada no segmento mais barato das curvas de venda após a soma da potência turbinada;
- $xcompra$ - quantidade de energia transacionada no segmento mais caro das curvas de compra após a soma da potência bombada;
- $bvenda$ - ordenada na origem da curva das ofertas de venda de energia;
- $bcompra$ - ordenada na origem da curva das ofertas de compra de energia;
- $mvenda$ - declive da curva das ofertas de venda de energia;
- $mcompra$ - declive da curva das ofertas de compra de energia;

- x_{int} - quantidade de energia transacionada no mercado;
- y_{int} - preço de mercado.

Neste caso, referente aos preços iniciais, o valores dos vectores $pturbada$ e $pbombada$ são nulos, sendo o cálculo dos valores destes vetores realizado apenas no fim de cada utilização do Algoritmo Genético.

Após o cálculo dos preços iniciais é executado o Algoritmo Genético que devolve as ordens de exploração para as diversas centrais relativamente aos períodos em estudo, para os preços de mercado utilizados nesta iteração.

Com essas ordens de exploração são calculadas, para cada período, as potências turbinadas e bombadas por parte de cada central. Posteriormente estes valores são somados, obtendo-se o valor total das potências turbinadas e bombadas para cada período. Este processo é realizado através do Algoritmo 3, apresentado de seguida.

Algorithm 3 Cálculo das Potências Turbinadas e Bombadas

```

1:  $p = 24$ 
2:  $c = x$ 
3: for  $z = 1 : p$  do
4:   for  $u = 1 : c$  do
5:      $pturbagem(z,u+1) = turbina(z,u+1).pturb(u,1);$ 
6:      $pbombagem(z,u+1) = bomba(z,u+1).pbomb(u,1);$ 
7:   end for
8:    $pturbada(z,2) = \text{sum}(pturbagem(z,:)) - pturbagem(z,1);$ 
9:    $pbombada(z,2) = \text{sum}(pbombagem(z,:)) - pbombagem(z,1);$ 
10: end for
```

Neste algoritmo os dados e os resultados correspondem a:

- c - número de centrais;
- $pturb$ - vetor com os valores das potências de turbinagem das várias centrais;
- $pbomb$ - vetor com os valores das potências de bombagem das várias centrais;
- $turbina$ - matriz resultante do AG com as ordens de turbinagem para as várias centrais em todos os períodos;
- $bomba$ - matriz resultante do AG com as ordens de bombagem para as várias centrais em todos os períodos;
- $pturbagem$ - matriz com as potências turbinadas por cada central para os vários períodos de exploração;
- $pbombagem$ - matriz com as potências bombadas por cada central para os vários períodos de exploração;

- pturbinada - potência turbinada total em cada um dos períodos
- pbombada - potência bombada total em cada um dos períodos

Deve salientar-se que nos vetores turbina, bomba, pturbinagem, pbombagem, pturbinada e pbombada a primeira coluna apresenta o número de ordem do período em causa, daí a necessidade de a maioria dos cálculos serem realizados a partir da segunda coluna das matrizes e também a necessidade de subtrair a primeira coluna dos vetores pturbinagem e pbombagem no cálculo da potência total de cada período.

Após o cálculo destas potências é novamente utilizado o Algoritmo 2, com as devidas diferenças nos valores dos vetores pbombada e pturbinada. Desta forma, e sempre partindo das curvas iniciais de mercado, serão calculados os novos preços de mercado e, em seguida, é utilizado novamente o AG para obter as novas ordens de exploração e os proveitos relativos ao novo conjunto de preços.

A aplicação desenvolvida irá executar o AG e os algoritmos acima apresentados até que o valor absoluto máximo da diferença de preços relativa entre duas iterações consecutivas, para todos os períodos, seja inferior a um valor especificado. Foi ainda introduzido, como medida de segurança, um contador de iterações para o caso de existirem problemas de convergência em algum dos casos. Se o número de iterações atingir o valor predefinido pelo utilizador, todo o processo irá parar. Tudo isto foi conseguido através do Algoritmo 4.

Algorithm 4 Novo Critério de Convergência

```

1: x
2: y
3: count = 0
4: p = 24
5: while difmax ≥ x and count ≤ y do
6:   Correr Algoritmo Genético
7:   Calcular novos preços
8:   for k = 1 : p do
9:     dif(1,k) = abs((preco1(1,k) - preco(1,k))/preco(1,k));
10:  end for
11:  difmax = max(dif);
12:  count = count + 1;
13: end while

```

Neste algoritmo os dados e os resultados correspondem a:

- x - valor definido pelo utilizador como máximo para a diferença relativa dos preços de iterações consecutivas;
- y - valor definido pelo utilizador como máximo para o nº de iterações a realizar;
- count - contador de iterações da aplicação;

- dif - vetor com os valores das diferenças relativas de preços em todos os períodos de exploração;
- preco1 - vetor com os preços da iteração n para todos os períodos de exploração;
- preco - vetor com os preços para a iteração $n+1$ para todos os períodos de exploração e que em caso de convergência corresponde ao preço final;
- difmax - valor máximo da diferença relativa de preços de iterações consecutivas.

Na Figura 4.10 está então representado o fluxograma referente a esta nova aplicação que inclui todas as etapas mencionadas e explicadas anteriormente.

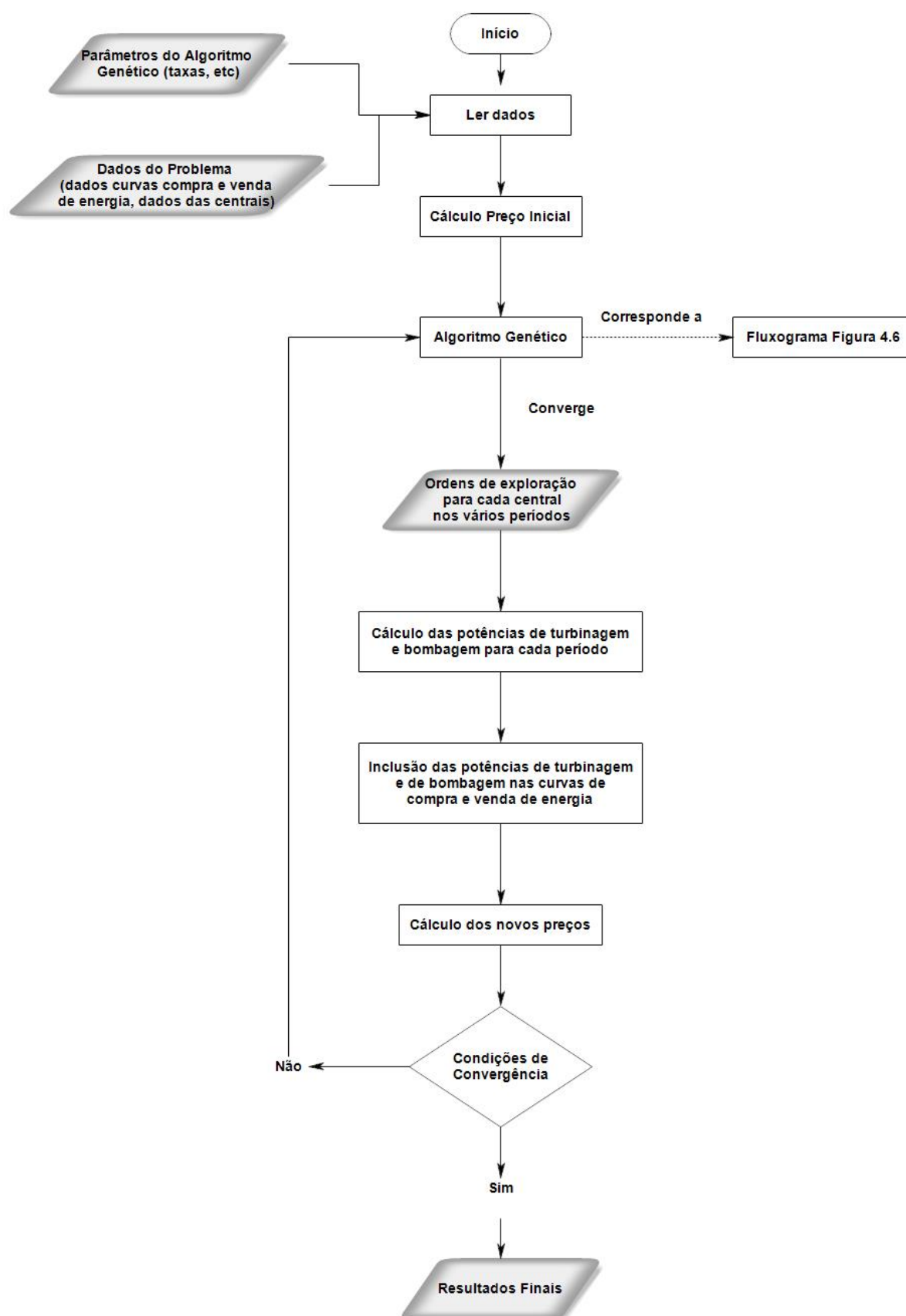


Figura 4.10: Fluxograma da aplicação final desenvolvida ao longo da dissertação