

## Simulação de um Pool Simétrico com Validação Técnica do Despacho Provisório e Apresentação de Medidas Corretivas Baseadas num Despacho Ótimo

PEDRO DANIEL SOARES GOMES  
Novembro de 2012

## **Agradecimentos**

A elaboração de uma tese de Mestrado constitui uma tarefa árdua, que exige dedicação e algum sacrifício pessoal. A dificuldade desta tarefa depende das adversidades, mas também dos apoios que vão surgindo ao longo do trabalho. No meu caso, os apoios foram significativos e determinantes para superar todas as adversidades. Neste sentido, gostaria de prestar os meus sinceros agradecimentos a algumas pessoas e instituições que de alguma forma contribuíram para a realização desta dissertação.

Um agradecimento especial ao meu orientador, Doutor Filipe Miguel Tavares de Azevedo, pela total disponibilidade que dispôs para me receber no seu gabinete ou por teleconferência, pelo apoio, prestabilidade e orientação.

Ao meu coorientador, Eng. Manuel João Dias Gonçalves, um agradecimento também especial pela disponibilidade e atenção com que acompanhou este trabalho.

Enquanto aluno deste Instituto, quero também congratular a ajuda de todos os professores que me capacitaram para a elaboração deste trabalho.

Por fim, mas não menos importante, quero agradecer à minha família pelo carinho, apoio e suporte que demonstraram e sempre me deram.



## **Resumo**

Os mercados de energia elétrica são atualmente uma realidade um pouco por todo o mundo. Contudo, não é consensual o modelo regulatório a utilizar, o que origina a utilização de diferentes modelos nos diversos países que deram início ao processo de liberalização e de reestruturação do sector elétrico. A esses países, dado que a energia elétrica não é um bem armazenável, pelo menos em grandes quantidades, colocam-se questões importantes relacionadas com a gestão propriamente dita do seu sistema elétrico. Essas questões implicam a adoção de regras impostas pelo regulador que permitam ultrapassar essas questões.

Este trabalho apresenta um estudo feito aos mercados de energia elétrica existentes um pouco por todo o mundo e que o autor considerou serem os mais importantes. Foi também feito um estudo de ferramentas de otimização essencialmente baseado em meta-heurísticas aplicadas a problemas relacionados com a operação dos mercados e com os sistemas elétricos de energia, como é o exemplo da resolução do problema do Despacho Económico.

Foi desenvolvida uma aplicação que simula o funcionamento de um mercado que atua com o modelo *Pool* Simétrico, em que são transmitidas as ofertas de venda e compra de energia elétrica por parte dos produtores, por um lado, e dos comercializadores, consumidores elegíveis ou intermediários financeiros, por outro, analisando a viabilidade técnica do Despacho Provisório. A análise da viabilidade técnica do Despacho Provisório é verificada através do modelo DC de trânsito de potências. No caso da inviabilidade do Despacho Provisório, por violação de restrições afetas ao problema, são determinadas medidas corretivas a esse despacho, com base nas ofertas realizadas e recorrendo a um Despacho Ótimo. Para a determinação do Despacho Ótimo recorreu-se à meta-heurística Algoritmos Genéticos.

A aplicação foi desenvolvida no *software* MATLAB utilizando a ferramenta *Graphical User Interfaces*.

A rede de teste utilizada foi a rede de 14 barramentos do *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE).

A aplicação mostra-se competente no que concerne à simulação de um mercado com tipo de funcionamento *Pool* Simétrico onde são efetuadas ofertas simples e onde as transações ocorrem no mercado diário, porém, não reflete o problema real relacionado a este tipo de mercados. Trata-se, portanto, de um simulador básico de um mercado de energia cujo modelo de funcionamento se baseia no tipo *Pool* Simétrico.



## **Abstract**

The electricity markets are now a reality all over the world. However, there is consensus to use the regulatory model, which leads to the use of different models in different countries that began the process of liberalization and restructuring of the electric sector. In these countries, given that electricity is not a storable good, at least in large quantities, important questions arise concerning the actual management of your electrical system. These issues involve the adoption of rules imposed by the regulator for overcoming these issues.

This paper presents a study of electricity markets exist all over the world and that the author considered being the most important. It has also made a study of optimization tools mainly based on meta-heuristics applied to problems related to the operation of markets and the electric energy systems, as is the example of solving the problem of Economic Dispatch.

We developed an application that simulates the operation of a market model that works with Symmetrical Pool, where are transmitted offers of sale and purchase of electricity from producers, on the one hand, and traders, consumers or eligible financial intermediaries, on the other hand, analyzing the technical feasibility of the Provisional Dispatch. The analysis of the technical feasibility of the Provisional Dispatch is verified through the linearized model or DC power flow. In case of inability of Provisional Dispatch for violation of restrictions related to the problem, corrective measures are determined in this dispatch, based on the offers made and using a Optimal Dispatch. To determine the Optimal Dispatch we used the meta-heuristic Genetic Algorithms.

The application was developed using the software tool MATLAB Graphical User Interfaces.

The test network used was the network of 14 buses of the Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

The application shows that it has jurisdiction with respect to the simulation of a market with Symmetrical Pool type of operation where simple offerings are made, where transactions occur in the daily market. However, does not reflect the actual problem related to such markets. It is therefore a basic simulator of an energy market model whose operation is based on the type Symmetrical Pool.



---

# Índice

|   |           |
|---|-----------|
| Agradecimentos .....                                  | I         |
| Resumo .....  | III       |
| Abstract .....  | IV        |
| <b>CAPÍTULO I</b> .....                               | <b>1</b>  |
| 1.1 Introdução .....                                  | 2         |
| 1.2 Objetivos .....                                   | 3         |
| 1.3 Estrutura da Dissertação .....                    | 4         |
| <b>CAPÍTULO II</b> .....                              | <b>5</b>  |
| 2.1 Modelos de Mercado de Energia Elétrica .....      | 6         |
| 2.2 Modelo <i>Pool</i> .....                          | 7         |
| 2.2.1 Pool Simétrico .....                            | 8         |
| 2.2.2 Pool Assimétrico .....                          | 10        |
| 2.2.3 Modelo Obrigatório e Voluntário .....           | 11        |
| 2.3 Modelo Bilateral .....                            | 11        |
| 2.4 Modelo <i>Pool-Bilateral</i> ou Híbrido .....     | 12        |
| <b>CAPÍTULO III</b> .....                             | <b>15</b> |
| 3.1 Argentina .....                                   | 16        |
| 3.1.1 Generalidades .....                             | 16        |
| 3.1.2 Funcionamento do Mercado .....                  | 17        |
| 3.2 Chile .....                                       | 18        |
| 3.2.1 Generalidades .....                             | 18        |
| 3.2.2 Funcionamento do Mercado .....                  | 19        |
| 3.3 Países Nórdicos ( <i>Nord Pool</i> ) .....        | 20        |
| 3.3.1 Generalidades .....                             | 20        |
| 3.3.2 Funcionamento do Mercado .....                  | 21        |
| 3.3.2.1 <i>Elspot</i> .....                           | 22        |
| 3.3.2.2 <i>Elbas</i> .....                            | 22        |
| 3.3.2.3 <i>Eltermin</i> .....                         | 22        |
| 3.4 Inglaterra, País de Gales e Escócia (BETTA) ..... | 23        |
| 3.4.1 Generalidades .....                             | 23        |
| 3.4.2 Funcionamento do Mercado .....                  | 24        |
| 3.5 Brasil .....                                      | 25        |
| 3.5.1 Generalidades .....                             | 25        |
| 3.5.2 Funcionamento do Mercado .....                  | 26        |
| 3.6 Estados Unidos da América .....                   | 28        |
| 3.6.1 Generalidades .....                             | 28        |

|                    |   |           |
|--------------------|---|-----------|
| 3. 6. 2            | PJM Interconnection.....  | 29        |
| 3. 6. 2. 1         | <i>Generalidades</i> .....  | 29        |
| 3. 6. 2. 2         | <i>Funcionamento do Mercado</i> .....   | 29        |
| <b>3. 7</b>        | <b>Península Ibérica (MIBEL)</b> .....  | <b>31</b> |
| 3. 7. 1            | Generalidades .....   | 31        |
| 3. 7. 2            | Funcionamento do Mercado .....  | 32        |
| <b>CAPÍTULO IV</b> | .....   | <b>35</b> |
| <b>4. 1</b>        | <b>O problema do Despacho Económico</b> .....   | <b>36</b> |
| 4. 1. 1            | Formulação do problema do Despacho Económico .....  | 37        |
| <b>4. 2</b>        | <b>Ferramentas de Otimização</b> .....  | <b>39</b> |
| <b>4. 3</b>        | <b>Algoritmos Genéticos</b> .....   | <b>40</b> |
| 4. 3. 1            | Representação dos Indivíduos .....  | 41        |
| 4. 3. 2            | Operadores Genéticos.....   | 41        |
| 4. 3. 2.1          | <i>Cruzamento</i> .....   | 41        |
| 4. 3. 2. 2         | <i>Mutação</i> .....  | 42        |
| 4. 3. 3            | Métodos de Seleção .....  | 42        |
| 4. 3. 3. 1         | <i>Seleção Proporcional ou Roda Roleta</i> .....  | 42        |
| 4. 3. 3. 2         | <i>Amostragem Estocástica ou Universal</i> .....  | 42        |
| 4. 3. 3. 3         | <i>Seleção por Ranking</i> .....  | 43        |
| 4. 3. 3. 4         | <i>Seleção por Torneio</i> .....  | 43        |
| 4. 3. 3. 5         | <i>Truncatura</i> .....   | 43        |
| 4. 3. 4            | Elitismo.....   | 43        |
| 4. 3. 5            | Função de Aptidão.....  | 43        |
| 4. 3. 6            | População Inicial .....   | 44        |
| 4. 3. 7            | Critérios de Paragem .....  | 44        |
| 4. 3. 8            | Parâmetros .....  | 44        |
| <b>4. 4</b>        | <b>Exemplo de Aplicação dos Algoritmos Genéticos no problema do Despacho</b> .....              | <b>45</b> |
| 4. 4. 1            | Algoritmo Genético Simples .....  | 45        |
| 4. 4. 2            | LRGA .....  | 46        |
| <b>4. 5</b>        | <b>Particle Swarm Optimization</b> .....  | <b>48</b> |
| <b>4. 6</b>        | <b>Exemplo de Aplicação do <i>Particle Swarm Optimization</i> no problema do Despacho</b> ..... | <b>51</b> |
| <b>4. 7</b>        | <b>Simulated Annealing</b> .....  | <b>53</b> |
| <b>4. 8</b>        | <b>Exemplo de Aplicação do <i>Simulated Annealing</i> no problema do Despacho</b> .....         | <b>54</b> |
| <b>CAPÍTULO V</b>  | .....   | <b>57</b> |
| <b>5. 1</b>        | <b>Aplicação Desenvolvida – Simulador <i>Pool</i> Simétrico</b> .....                           | <b>58</b> |
| <b>5. 2</b>        | <b>Fluxograma Genérico do Simulador</b> .....   | <b>59</b> |
| <b>5. 3</b>        | <b>Formulação Matemática do Problema</b> .....  | <b>60</b> |
| <b>5. 4</b>        | <b>Rede de Teste</b> .....  | <b>61</b> |
| 5. 4. 1            | Esquema Unifilar.....   | 62        |
| 5. 4. 2            | Dados da Rede.....  | 62        |
| <b>5. 5</b>        | <b>Operador de Mercado</b> .....  | <b>64</b> |

---

|                               |  |           |
|-------------------------------|--|-----------|
| <b>5. 6</b>                   | <b>Operador de Sistema .....</b>               | <b>65</b> |
| 5. 6                          | Trânsito de Potências .....                    | 66        |
| 5. 6. 1                       | Função <i>Genetic Algorithm (ga)</i> .....     | 69        |
| <b>5. 7</b>                   | <b>Funcionamento do Simulador.....</b>         | <b>70</b> |
| 5. 7. 1                       | Interface com o Utilizador .....               | 70        |
| 5. 7. 2                       | Introdução de Dados.....                       | 71        |
| <b>5. 8</b>                   | <b>Casos de Estudo .....</b>                   | <b>73</b> |
| 5. 8. 1                       | Caso de Estudo 1 .....                         | 73        |
| 5. 8. 1. 1                    | <i>Resultados do Operador de Mercado</i> ..... | 75        |
| 5. 8. 1. 2                    | <i>Resultados do Operador de Sistema</i> ..... | 77        |
| 5. 8. 1. 3                    | <i>Análise dos Resultados</i> .....            | 77        |
| 5. 8. 2                       | Caso de Estudo 2 .....                         | 79        |
| 5. 8. 2. 1                    | <i>Resultados do Operador de Mercado</i> ..... | 83        |
| 5. 8. 2. 2                    | <i>Resultados do Operador de Sistema</i> ..... | 84        |
| 5. 8. 2. 3                    | <i>Análise dos Resultados</i> .....            | 85        |
| <b>CAPÍTULO VI</b>            | <b>.....</b>                                   | <b>87</b> |
| <b>Conclusões</b>             | <b>.....</b>                                   | <b>88</b> |
| <b>Desenvolvimento Futuro</b> | <b>.....</b>                                   | <b>91</b> |
| <b>Referências</b>            | <b>.....</b>                                   | <b>92</b> |
| <b>Glossário</b>              | <b>.....</b>                                   | <b>95</b> |
| <b>APÊNDICE</b>               | <b>.....</b>                                   | <b>97</b> |
|                               | Instruções de Utilização .....                 | 98        |



---

## Índice de Figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 - Modelo de exploração do setor elétrico em Pool [2] .....                              | 8  |
| Figura 2 - Funcionamento de um Pool Simétrico [2] .....  | 9  |
| Figura 3 - Funcionamento de um Pool Simétrico ideal [2].....                                     | 9  |
| Figura 4 - Funcionamento de um <i>Pool</i> Assimétrico [3] .....                                 | 10 |
| Figura 5 - Funcionamento de um <i>Pool</i> Assimétrico ideal [3].....                            | 11 |
| Figura 6 - Modelo misto de exploração do setor elétrico [2].....                                 | 12 |
| Figura 7 - Situação geográfica da Argentina [20].....  | 16 |
| Figura 8 - Situação geográfica do Chile [21].....  | 18 |
| Figura 9 - Estrutura do mercado elétrico chileno [5].....  | 19 |
| Figura 10 - Situação geográfica do Nord Pool [22].....   | 21 |
| Figura 11 - Situação geográfica do BETTA [23] .....  | 23 |
| Figura 12 - Situação geográfica do Brasil [24].....  | 25 |
| Figura 13 - Situação geográfica dos Estado Unidos da América [25].....                           | 28 |
| Figura 14 - Situação geográfica do PJM Interconnection [26] .....                                | 29 |
| Figura 15 - Situação geográfica do MIBEL [27].....   | 31 |
| Figura 16 - Modelo de mercado do MIBEL .....   | 32 |
| Figura 17 - Curva típica do custo de produção de um gerador térmico clássico [11].....           | 37 |
| Figura 18 - Estrutura geral de uma meta-heurística [10].....                                     | 39 |
| Figura 19 - Mutação clássica em representa o binária [12].....                                   | 42 |
| Figura 20 - Desempenho de um Algoritmo Genético com e sem Elitismo [12].....                     | 43 |
| Figura 21 - Bando de aves com comportamento coordenado [28] .....                                | 49 |
| Figura 22 - Fluxograma do algoritmo básico do PSO [19].....                                      | 51 |
| Figura 23 - Estado desordenado das moléculas da m teria em fusão [16] .....                      | 53 |
| Figura 24 - Estado desordenado das moléculas devido a um arrefecimento rápido [16].....          | 54 |
| Figura 25 - Estado ordenado das moléculas devido a um arrefecimento lento [16] .....             | 54 |
| Figura 26 - Fluxograma do algoritmo Simulated Annealing desenvolvido.....                        | 55 |
| Figura 27 - Fluxograma genérico do simulador Pool Simétrico.....                                 | 59 |
| Figura 28 - Esquema unifilar da rede de teste de 14 barramentos do IEEE.....                     | 62 |
| Figura 29 - Fluxograma das a oes do Operador de Mercado .....                                    | 65 |
| Figura 30 - Fluxograma das a oes do Operador de Sistema.....                                     | 66 |
| Figura 31 - Ambiente de trabalho do simulador Pool Simétrico .....                               | 70 |
| Figura 32 - Barra de ferramentas do simulador Pool Simétrico .....                               | 71 |
| Figura 33 - Caixa de texto do botão de saída.....  | 71 |
| Figura 34 - Tabela de inser o de dados relativos às ofertas de venda .....                       | 72 |
| Figura 35 - Tabela de inser o de dados relativos às ofertas de compra .....                      | 72 |
| Figura 36 - Tabela de inser o de dados relativos aos contratos bilaterais físicos .....          | 73 |
| Figura 37 - Apresenta o dos resultados no ambiente de trabalho da aplica o .....                 | 75 |
| Figura 38 - Representa o gráfica da simula o do caso de estudo 1 .....                           | 75 |
| Figura 39 - Apresenta o dos resultados no ambiente de trabalho da aplica o (primeira parte)..... | 80 |
| Figura 40 - Apresenta o dos resultados no ambiente de trabalho da aplica o (final) .....         | 82 |
| Figura 41 - Representa o gráfica da evolu o do processo iterativo da otimiza o do problema.....  | 82 |
| Figura 42 - Representa o gráfica da simula o do caso de estudo 2 .....                           | 83 |



---

## Índice de Tabelas

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 - Analogia entre o PSO e o bando de pássaros [19].....                                  | 50 |
| Tabela 2 - Características das linhas.....   | 62 |
| Tabela 3 - Características dos barramentos .....   | 63 |
| Tabela 4 - Características dos geradores .....   | 63 |
| Tabela 5 - Limite de trânsito de potências nas linhas .....                                      | 64 |
| Tabela 6 - Campos da estrutura da função <i>ga</i> do MATLAB .....                               | 69 |
| Tabela 7 - Ofertas de venda do caso de estudo 1 .....  | 73 |
| Tabela 8 - Ofertas de compra do caso de estudo 1 .....   | 74 |
| Tabela 9 - Contratos bilaterais físicos do caso de estudo 1 .....                                | 74 |
| Tabela 10 - Resultados da interseção do cruzamento das ofertas de compra e venda de energia..... | 76 |
| Tabela 11 - Resultados do Despacho Provisório .....  | 76 |
| Tabela 12 - Resultados dos custos de produção associados a cada gerador .....                    | 77 |
| Tabela 13 - Resultados do trânsito de potências.....   | 77 |
| Tabela 14 - Ofertas de venda aceites no final da simulação .....                                 | 78 |
| Tabela 15 - Ofertas de compra aceites no final da simulação.....                                 | 78 |
| Tabela 16 - Ofertas de venda do caso de estudo 2.....  | 79 |
| Tabela 17 - Ofertas de compra do caso de estudo 2 .....  | 79 |
| Tabela 18 - Contratos bilaterais físicos do caso de estudo 2 .....                               | 80 |
| Tabela 19 - Resultados do Despacho Provisório .....  | 80 |
| Tabela 20 – Resultados provisórios dos custos de produção associados a cada gerador.....         | 81 |
| Tabela 21 - Resultados do trânsito de potências provisório .....                                 | 81 |
| Tabela 22 - Resultados da interseção do cruzamento das ofertas de compra e venda de energia..... | 83 |
| Tabela 23 - Resultados do Despacho Ótimo.....  | 83 |
| Tabela 24 - Resultados dos custos de produção associados a cada gerador .....                    | 84 |
| Tabela 25 - Resultados do trânsito de potências.....   | 84 |
| Tabela 26 - Ofertas de venda aceites no final da simulação .....                                 | 85 |
| Tabela 27 - Ofertas de compra aceites no final da simulação.....                                 | 85 |



---

# CAPÍTULO I

## Introdução e Objetivos

---

## **1.1 Introdução**

Atualmente, nos países desenvolvidos, a energia elétrica tornou-se imprescindível e com uma infinidade de usos, devido à sua grande versatilidade, fácil controlo e imediata utilização. O funcionamento das sociedades desenvolvidas e a qualidade de vida dependem significativamente da disponibilidade da energia elétrica, que se assumiu como um bem de consumo essencial.

A eletricidade possui características muito peculiares. Hoje em dia, como ainda não é possível o armazenamento de energia elétrica em quantidades, o seu consumo é feito ao mesmo tempo que a produção. Esta particularidade condiciona de forma absoluta a configuração, o planeamento, a exploração, a organização e a gestão dos sistemas elétricos de energia. Neste seguimento, condiciona também de forma importante o projeto dos mercados elétricos nos países que tiveram como opção liberalizar a produção e comercialização deste produto.

Desde o início dos anos 90 que a visão do negócio da eletricidade se alterou radicalmente, pondo em causa a posição dominante das estruturas verticalmente integradas. A grande capacidade de interligação da rede de transporte em muitos países permite que os produtores situados em qualquer nó da rede possam competir entre si para o fornecimento de energia elétrica a qualquer outro nó da rede. Assim, é possível separar as atividades da rede estritamente monopolistas das de produção e comercialização, que podem ser feitas em regime de concorrência.

Com esta nova conceção do negócio da eletricidade, o planeamento e exploração dos sistemas elétricos de energia tomam uma dimensão diferente. Cada empresa produtora decide quando e quanto produzir. As decisões de investimento em novas centrais de produção não são tomadas centralmente por nenhuma entidade ou empresa responsável pela garantia do fornecimento de energia, mas sim por investidores privados que consideram que o seu investimento será rentável, não assumindo a responsabilidade pela garantia do fornecimento global. Portanto, a abertura de determinadas atividades do setor elétrico à concorrência desloca decisões críticas, até então da responsabilidade dos respetivos governos, para o mercado. Desta forma, utilizando uma exploração do setor elétrico em regime de mercado devidamente implementado e regulado advêm melhorias de eficiência da produção de eletricidade, alocação económica de recursos, preços mais reduzidos para os consumidores, melhor alocação de risco e estímulo ao crescimento económico.

A atividade de distribuição não é afetada significativamente com a reestruturação do setor elétrico, a não ser pela sua separação com a atividade da comercialização, que passa a ser feita em regime de concorrência. Ao nível do transporte, continua-se em regime de monopólio regulado, a fim de garantir as condições de segurança nos mercados competitivos.

A importância dos aspetos regulatórios, sem descuidar os aspetos tecnológicos e económicos, é comparativamente maior quanto maior for o âmbito geográfico e político dos sistemas elétricos, particularmente em torno da livre concorrência. Nesta situação

encontram-se os sistemas elétricos regionais. A motivação fundamental do estabelecimento destes mercados é o fator económico.

A estrutura do mercado elétrico reflete a organização do próprio setor e das atividades que o compõem, designadamente a que decorre do processo de liberalização que é um traço comum na Europa [1].

No âmbito do processo de liberalização dos mercados, em que as atividades de redes se consideram monopólios naturais e são, por isso, objeto de regulação económica, a produção e a comercialização de eletricidade estão abertas à concorrência, com a justificação económica de introduzir maior eficiência na gestão e operação dos recursos afetos a estas atividades [1].

A atividade de produção de eletricidade em regime de mercado está associada a um mercado grossista, em que os agentes presentes na produção asseguram a colocação da mesma e os agentes que necessitam abastecer-se de eletricidade procuram adquiri-la, seja para satisfazer a carteira de fornecimentos a clientes finais, seja para consumo próprio. A atividade de comercialização está associada a um mercado retalhista, em que os agentes comercializadores concorrem para assegurar o fornecimento dos clientes finais [1].

A estas atividades principais, o modelo de liberalização do setor elétrico veio acrescentar a existência de mercados organizados, que se constituem como plataformas de negociação tendencialmente independentes dos agentes tradicionais que atuam nas atividades de produção e de comercialização de eletricidade [1].

O acompanhamento do que é o funcionamento do mercado de eletricidade no atual contexto de liberalização obriga a que se preste atenção aos mercados organizados, bem como à evolução de outros mercados cujas matérias aí transacionadas influem na formação do preço da eletricidade (por exemplo, carvão, petróleo, gás natural, emissões de dióxido de carbono, mercados financeiros, etc.) [1].

Por outro lado, a contratação de eletricidade envolve múltiplas formas, desde a contratação para o dia seguinte, mercado diário, para prazos mais longos, mercado a prazo, ou de forma bilateral e/ou através de mecanismos legais ou regulamentares específicos.

## **1.2 Objetivos**

Este trabalho tem como objetivo principal desenvolver uma aplicação que permita simular o funcionamento de um mercado que atue no modelo de funcionamento *Pool* Simétrico, analisando a viabilidade técnica do Despacho Provisório e apresentando medidas corretivas a esse despacho, com base nas ofertas de compra e venda de energia elétrica realizadas e recorrendo a um Despacho Ótimo. Além disto, pretende-se fazer um estudo dos mercados de energia elétrica existentes um pouco por todo o mundo e estudar ferramentas de otimização que possam resolver problemas reais com aplicação na operação dos mercados, como é, por exemplo, a resolução do problema do Despacho Económico.

### **1.3 Estrutura da Dissertação**

Uma breve referência à sua estrutura pretende facilitar a leitura da mesma, apresentando, resumidamente, os conteúdos dos diversos capítulos que a constituem. A presente dissertação está dividida em 6 capítulos.

No **capítulo 1** faz-se uma introdução à dissertação, nomeadamente no que diz respeito à importância da liberalização dos mercados de energia elétrica e ao papel dos Operadores de Mercado e de Sistema, num ambiente de mercado competitivo. Neste capítulo, são ainda apresentados os objetivos subjacentes a esta dissertação.

No **capítulo 2** trata-se dos modelos de mercados de energia elétrica existentes um pouco por todo o mundo, dando especial ênfase ao modelo *Pool* Simétrico.

No **capítulo 3** faz-se o estudo das características e funcionamento dos principais mercados de energia elétrica do mundo.

No **capítulo 4** aborda-se o problema do Despacho Económico e apresentam-se algumas das meta-heurísticas utilizadas na sua resolução, dando especial atenção à ferramenta de otimização Algoritmos Genéticos.

No **capítulo 5** apresenta-se de forma detalhada o modelo matemático da aplicação desenvolvida que permite simular o funcionamento de um mercado com modelo *Pool* Simétrico, adotando um modelo DC de trânsito de potências, e onde é efetuada a validação técnica do Despacho Económico determinado no *Pool*, através da meta-heurística Algoritmos Genéticos. São ainda apresentados dois casos de estudo que representam simulações distintas no que diz respeito à otimização do Despacho Económico.

No **capítulo 6** apresentam-se as conclusões de todos os assuntos tratados ao longo do trabalho e, no desenvolvimento futuro, é dada uma ideia do que poderia vir a ser uma versão mais completa de um simulador *Pool* Simétrico, relativamente à que foi desenvolvida nesta dissertação.

---

# CAPÍTULO II

## Modelos de Mercados de Energia Elétrica

---

## 2.1 Modelos de Mercado de Energia Elétrica

A reestruturação do setor elétrico passou, essencialmente, pelos seguintes requisitos:

- *Unbundling* das empresas verticalmente integradas, através da criação de diversas empresas no segmento da produção, do transporte e da distribuição;
- Criação de mecanismos regulatórios;
- Alteração dos métodos que orientavam o planeamento da expansão, o que obrigou a introduzir na legislação períodos de transição para os investimentos realizados antes da reestruturação e que ainda se encontravam em período de amortização. Estes mecanismos transitórios originaram os chamados Custos Ociosos.

O processo de *unbundling* ou de desverticalização caracteriza-se pela separação da empresa verticalmente integrada, em função das atividades da cadeia de valor da eletricidade: produção, transporte, distribuição e comercialização. A produção e a comercialização são os segmentos nos quais a concorrência tem um potencial maior, pelo que, tradicionalmente, após a desverticalização da empresa inicial, surgem várias empresas que atuam nestes segmentos. O número de empresas é determinado de tal forma a evitar que existam posições dominantes, no mercado que se quer de livre concorrência. O transporte de energia elétrica é um segmento que pode dar origem a uma única empresa, que atua em monopólio natural regulado, por motivos de ordem técnica e ambiental (não seria técnica nem ambientalmente viável multiplicarem-se as redes de transporte). No que toca ao segmento da distribuição de energia elétrica, existem duas opções: ou surgem várias empresas que funcionam em regime de monopólio natural regulado regional, pela mesma justificação que a do segmento do transporte, ou surge apenas uma empresa que funcionará no mesmo regime, mas em todo o país [2].

A par da desverticalização foram sendo incorporados mecanismos que permitiram o incentivo da concorrência, nomeadamente a possibilidade de acesso de consumidores elegíveis, classificados por nível de tensão ou por valor de potência contratada ou de energia consumida anualmente, a mercados centralizados de energia e/ou a possibilidade de selecionarem a entidade fornecedora de energia elétrica [2].

A organização do setor elétrico nas quatro atividades acima mencionadas apresenta diversas consequências:

- Existência de atividades exercidas em regime de monopólio natural regulado;
- Criação de diferentes mecanismos regulatórios para a atividade de transporte e para a atividade de distribuição;
- Necessidade de criação de tarifas que permitam o pagamento, aos proprietários ou concessionários das redes, o uso destas, por parte das entidades que a elas se encontram ligadas;
- Aparecimento de inúmeros agentes nos setores de produção e de comercialização, bem como de um número crescente de clientes elegíveis;

- Necessidade de criação de mecanismos de monitorização do funcionamento das redes e dos seus investimentos, bem como de mecanismos de controlo, de comunicação e de segurança;
- Com a introdução de mecanismos de mercado, passou-se a maximizar o benefício social da utilização da energia elétrica, em vez de se minimizarem os custos [2].

Um pouco por todo o mundo, o processo de reestruturação dos mercados de energia elétrica tem-se baseado num dos três modelos que se seguem:

- Modelo *Pool*;
- Modelo Bilateral;
- Modelo *Pool*-Bilateral ou Híbrido.

## **2.2 Modelo *Pool***

Uma das formas de relacionamento entre empresas produtoras, por um lado, e comercializadores ou clientes elegíveis, por outro, corresponde aos mercados *spot* centralizados, habitualmente conhecidos como mercado em *Pool*. Estes mercados integram ou administram mecanismos a curto prazo nos quais se pretende equilibrar a produção e o consumo através de propostas comunicadas pelas entidades produtoras, por um lado, e pelos comercializadores e consumidores elegíveis, por outro. Funcionam normalmente no dia anterior àquele em que será implementado o resultado das propostas de compra/venda que tiverem sido aceites. São também conhecidos como *Day-Ahead Markets* ou Mercados *Spot* de energia elétrica [2].

Pretende-se, neste sentido, otimizar o funcionamento do sistema a curto prazo, pelo que as propostas de venda de energia tendem a ser estruturadas de forma a refletir custos marginais de curto prazo. Nos mercados a curto prazo, as alterações diárias da carga e a necessidade de colocar em funcionamento centrais elétricas que tenham custos marginais distintos levam a que estes tenham de ser estruturados de modo a acomodarem as variações de carga e a poderem refletir as variações dos custos de exploração. Assim, o intervalo de tempo de um dia, alvo de negociação no dia anterior, é normalmente dividido em 24 ou 48 intervalos de 1 hora ou 30 minutos, respetivamente. Para cada um desses intervalos, os agentes que atuam no mercado devem apresentar as propostas de compra/venda, incluindo a indicação do preço mínimo a que estão aptos a vender, o preço máximo que estão disponíveis a pagar, o nó da rede onde se fará a injeção ou absorção e a potência que pretendem. No final do período de negociação, são obtidos 24 ou 48 despachos económicos para cada hora ou meia hora do dia seguinte.

Assim, o mercado a curto prazo administrado pelo *Pool* pode ser definido como um mercado grossista de energia elétrica, tendo por base propostas de compra/venda em que os preços apresentados pelos produtores refletem custos marginais. De algum modo, o *Pool* corresponde a uma das formas existentes no ambiente de mercado para realizar o planeamento da operação do sistema elétrico para o dia seguinte. A figura 1 ilustra o modelo de exploração de um mercado em *Pool* [2].

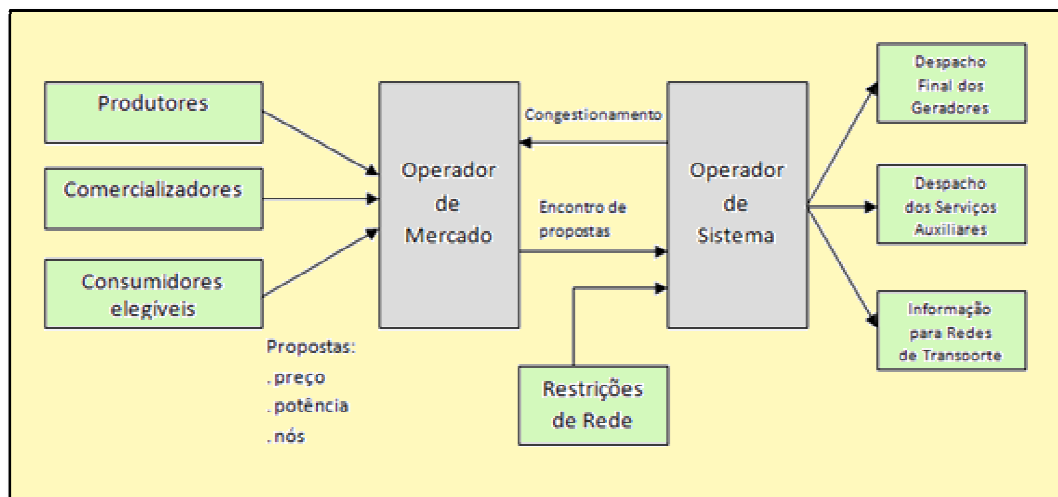


Figura 1 - Modelo de exploração do setor elétrico em Pool [2]

Os operadores de mercado e de sistema asseguram a coordenação da exploração do sistema. O operador de mercado, que administra o mercado para o dia seguinte, deve receber as propostas de compra/venda de energia elétrica dos agentes autorizados a atuar no mercado (produtores, comercializadores, consumidores elegíveis ou intermediários financeiros). Para cada um dos períodos, o operador de mercado organiza as propostas de compra e venda de forma adequada, identificando as propostas de venda para as quais existem propostas com preço de compra superior ao de venda. Do ponto de vista económico, o resultado deste encontro corresponde a uma forma eficiente de alocar a produção à carga. Caso se verifique a ocorrência de congestionamentos na rede cabe aos operadores de mercado e de sistema interagirem de modo a eliminar essas situações.

O modelo de mercado *Pool* pode apresentar duas versões: simétrico e assimétrico. Na secção 2.2.1, será dada uma explicação mais detalhada sobre cada uma delas.

### 2. 2. 1 Pool Simétrico

O modelo de mercado *Pool* Simétrico é caracterizado por haver a possibilidade se efetuarem ofertas de compra e venda de energia elétrica. Neste sentido, os produtores, por um lado, e os comercializadores, consumidores elegíveis ou intermediários financeiros, por outro, devem transmitir ao operador de mercado as suas ofertas.

Por sua vez, o operador de mercado, relativamente a cada período (de uma ou meia hora), organiza as propostas recebidas e constrói curvas de oferta de venda e de compra, como será apresentado na figura 2. As ofertas de venda são dispostas por ordem crescente dos preços oferecidos e as ofertas de compra por ordem decrescente dos preços respetivos.

Cada segmento dessas curvas representa uma proposta de compra ou venda caracterizada pelo preço e quantidade envolvida. O ponto de intersecção das duas curvas corresponde ao Preço de Encontro do Mercado (*Market Clearing Price*) e a energia elétrica respetiva corresponde à Quantidade Negociada (*Market Clearing Quantity*). A determinação destes valores corresponde à essência do funcionamento deste mercado [2].

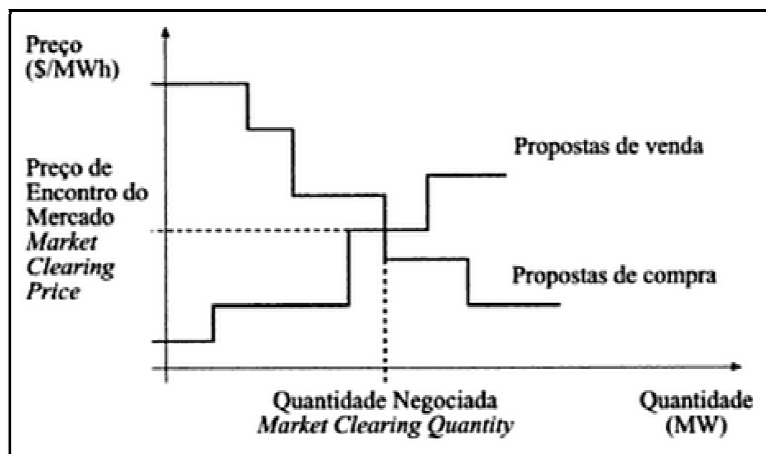


Figura 2 - Funcionamento de um Pool Simétrico [2]

O Preço de Encontro de Mercado ou *Market Clearing Price* pode ser encarado de duas formas: por um lado, corresponde ao preço da energia elétrica para o qual há ofertas cujo preço de compra é superior ao preço de venda associado às ofertas de venda; por outro, pode ser visto como correspondendo à quantidade máxima de energia elétrica para a qual há ofertas de compra cujo preço de compra é superior ao preço de venda associado às ofertas de venda.

No seguimento, as ofertas de venda e de compra de energia situadas à direita da Quantidade Negociada ou *Market Clearing Quantity*, como indica a figura 2, não são aceites, devido ao facto de não haver ofertas de compra cujo preço supere o das ofertas de venda ainda não despachadas.

No que concerne à eficiência deste tipo de mercados, quanto mais agentes atuarem nos segmentos de compra e venda de energia elétrica e quanto menos concertação existir na preparação das propostas respectivas mais eficientes eles serão.

Imagine-se agora um *Pool Simétrico* ideal, como o que é apresentado na figura 3.

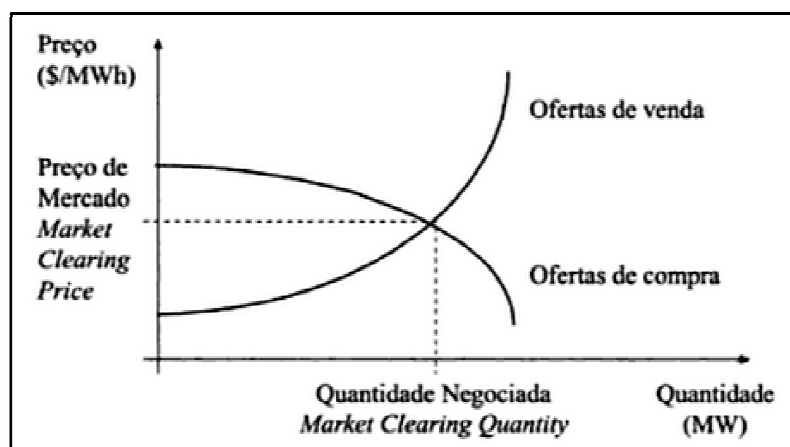


Figura 3 - Funcionamento de um Pool Simétrico ideal [2]

É de notar que se um mercado perfeito, para além de se exigir um elevado número de participantes no mercado e que a carga ou a capacidade de produção seja repartida entre

eles, a capacidade de produção deverá ser sempre superior, num valor não desprezável, à carga. Caso a capacidade de produção seja exatamente igual à carga, o último gerador a ser despachado tem sempre a garantia de o ser. Como a carga possui uma elasticidade reduzida, o último gerador terá um grande poder de mercado, realizando ofertas de venda com preços superiores ao seu custo marginal de produção. No limite, as ofertas de venda deixarão de refletir os custos marginais de produção, com o conseqüente prejuízo para o funcionamento do mercado [3].

### 2. 2. 2 Pool Assimétrico

O modelo de mercado *Pool* Assimétrico caracteriza-se por estar estruturado de forma a permitir apenas a apresentação de propostas de venda de energia elétrica.

Do lado da procura, estas implementações utilizam, normalmente, previsões de carga comunicadas para cada intervalo de tempo de negociação pelas entidades consumidoras ou comercializadoras. Este modelo admite de forma implícita que a carga é inelástica, isto é, que se encontra apta a pagar qualquer preço que resulte do funcionamento do mercado [2].

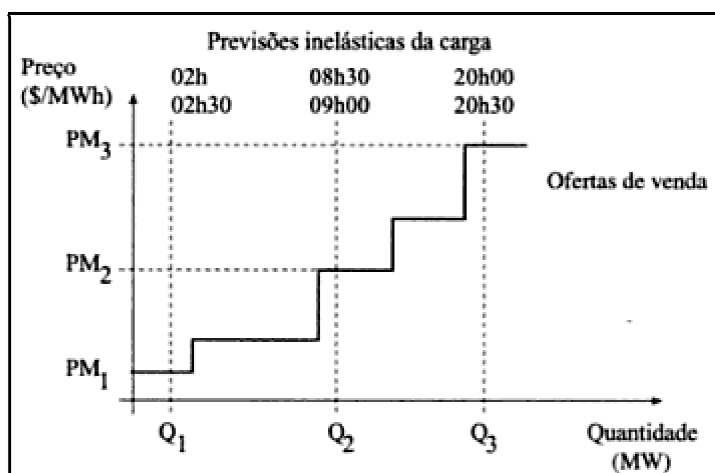


Figura 4 - Funcionamento de um *Pool* Assimétrico [3]

Na figura 4 apresenta-se um exemplo de um mercado deste tipo para vários períodos do dia. Aqui, admitiu-se que as ofertas de venda se caracterizam pelo mesmo valor de preço de venda e de quantidade disponível, independentemente do intervalo de tempo de negociação. Assim, a carga prevista no primeiro período (02h às 02h30) é diminuta,  $Q_1$ , com preço de mercado  $PM_1$ . À medida que a carga prevista aumenta para  $Q_2$  e  $Q_3$  o preço de mercado aumenta para  $PM_2$  e  $PM_3$ . A figura mostra ainda a volatilidade dos preços provenientes deste tipo de mercado. Os preços de encontro de mercado são fortemente influenciados pelos preços de venda oferecidos, pelo nível de procura e pela ocorrência de saídas de serviço (programadas ou por avaria).

Imagine-se agora um *Pool* Assimétrico ideal, como o que é apresentado na figura 5.

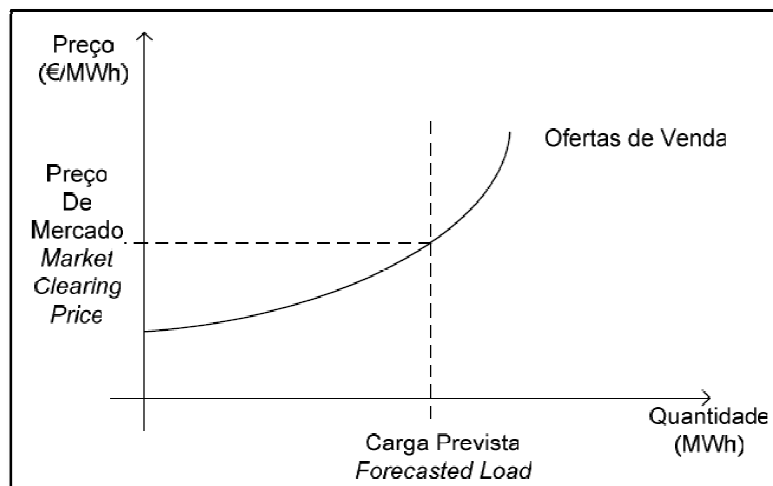


Figura 5 - Funcionamento de um *Pool* Assimétrico ideal [3]

Tal como acontece no *Pool* Simétrico, também aqui no *Pool* Assimétrico, se o número de produtores for elevado e se a capacidade de produção for repartida entre eles, a curva agregada das ofertas de venda não apresentará descontinuidades acentuadas. Esta situação permitirá, considerando que as ofertas se mantêm, reduzir a volatilidade do preço de mercado.

Para além destas duas versões, o modelo de mercado *Pool* pode ser classificado como sendo de participação obrigatória ou voluntária.

### 2. 2. 3 Modelo Obrigatório e Voluntário

Nos mercados obrigatórios torna-se obrigatória a apresentação de propostas de venda e/ou compra de energia elétrica a todas as entidades produtoras, comercializadoras e consumidores elegíveis, fator que advém da existência de disposições legais. Assim, o *Pool* assume o papel de uma grande entidade que atua como intermediária financeira entre a totalidade da produção e o consumo. Esta estrutura designa-se normalmente por Comprador Único ou *Single Buyer*. Para além do *Pool*, não são admitidas outras formas de relacionamento comercial direto entre produção e consumidores elegíveis ou comercializadores.

Nos mercados voluntários as entidades produtoras, comercializadores e clientes elegíveis podem apresentar as suas propostas neste mercado ou poderão estabelecer relacionamentos diretos entre si através de mecanismos designados por contratos bilaterais. Este mecanismo de transação de energia elétrica será analisado na secção seguinte.

## 2. 3 Modelo Bilateral

O modelo Bilateral é baseado no princípio da livre concorrência em que imperam as regras do mercado. Numa lógica de mercado, todos os agentes (produtores, por um lado, comercializadores e consumidores elegíveis, por outro) tentam encontrar o parceiro ideal para efetuarem as suas transações, tendo sempre como finalidade a maximização dos seus lucros. Se os contratos bilaterais forem realizados entre as duas partes este tipo de modelo

poderá ser menos transparente que o modelo *Pool*, visto que apenas são conhecidos os aspetos técnicos que têm que ser comunicados ao Operador de Sistema (OS).

Neste modelo verifica-se uma separação total entre a parte económica e a parte técnica, com exceção de quando os contratos provocam a violação de quaisquer restrições da rede. Caso ocorram violações das restrições da rede, após a submissão dos contratos para avaliação por parte do OS, esses terão que ser retificados de forma a resolvê-las e satisfazer, dentro do possível, os interesses das partes envolvidas.

## 2.4 Modelo *Pool*-Bilateral ou Híbrido

A generalidade dos mercados mundiais onde ocorreu uma reestruturação do setor elétrico optou por um modelo de mercado deste tipo (estrutura mista), em que funciona em simultâneo um mercado centralizado de transação de energia elétrica, do tipo *Pool*, e é permitido o estabelecimento de contratos bilaterais.

Neste tipo de mercados a participação na *Pool* é voluntária, dado que existe uma alternativa de relacionamento entre os produtores, distribuidores/retalhistas e os consumidores elegíveis. A figura 6 ilustra de forma resumida o modelo misto de exploração do setor elétrico.

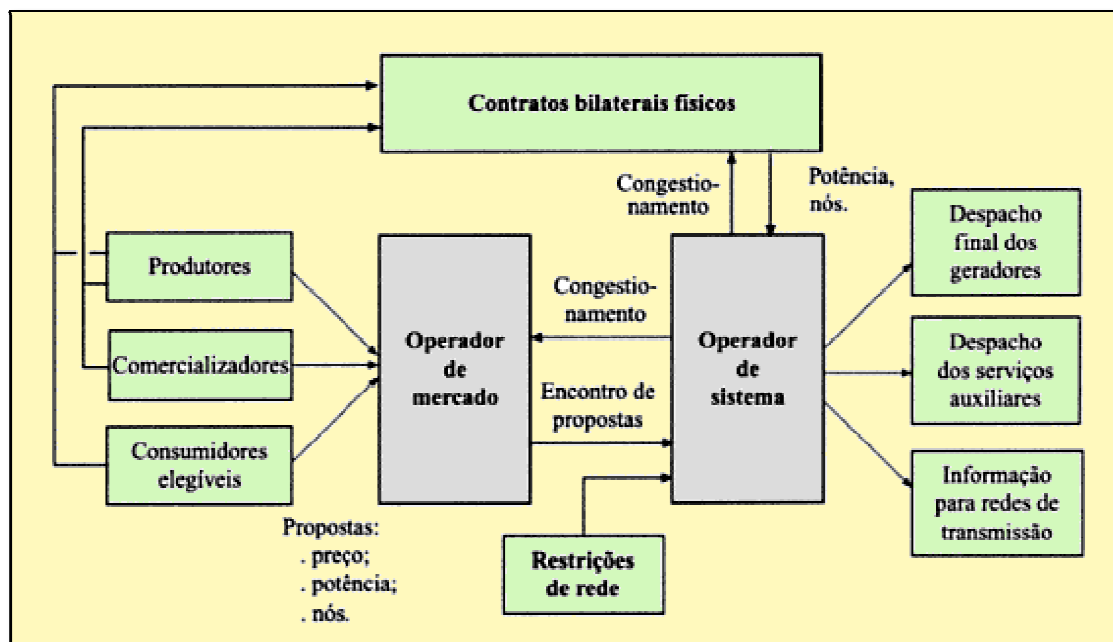


Figura 6 - Modelo misto de exploração do setor elétrico [2]

A existência de uma bolsa cujo objetivo é permitir aos vários agentes do mercado a transação da energia elétrica, permite que o preço aí definido seja, ainda que aparentemente, mais transparente, dado que o mesmo é resultante da interação dos vários agentes. Contudo, o mercado *spot* não é imune à possibilidade de um agente exercer poder de mercado, sendo esse poder usado para elevar artificialmente o preço. A probabilidade da sua ocorrência é tanto mais elevada quando menor for o número de participantes e maior for a dimensão do participante que exerce o poder em relação aos restantes. Por outro lado, o preço no

mercado *spot* apresenta uma elevada volatilidade, que resulta do fato da energia elétrica ter características muito específicas resultantes da impossibilidade de a armazenar em grandes quantidades para entrega numa data futura [3].

A existência de contratos bilaterais assume um papel fundamental por ter uma função estabilizadora do preço de mercado, o que permite aos agentes protegerem-se da volatilidade do preço no mercado *spot*. Por ter implicações na gestão técnica da rede, a viabilidade dos contratos bilaterais tem que ser avaliada pelo OS de forma a evitar congestionamentos e violação de restrições na rede.

Os mercados com este tipo de estrutura, são frequentemente complementados com instrumentos de índole financeira, tais como *swaps* ou Contratos às Diferenças, futuros e opções, que permitem aumentar a liquidez do mercado e ao mesmo tempo a prática do *hedge* (gestão do risco) relativamente à volatilidade do preço de mercado.

O Operador de Sistema (OS) é responsável pela informação técnica relativa aos contratos que contemplam a entrega física da energia e pela informação que diz respeito ao despacho provisório que resulta do encontro das ofertas de venda e compra realizado pelo Operador de Mercado (OM). Cabe ao OS a avaliação da existência de congestionamentos na rede, tendo em conta as restrições técnicas do sistema elétrico. Caso ocorram congestionamentos na rede, a sua gestão pode ser feita de várias formas, tais como alterando a topologia da rede ou fazendo um novo despacho sem alterar o programa de trocas. Contudo, se estas medidas não forem suficientes o OS recorre ao mercado intradiário ou de ajustes, onde serão aceites incrementos/decrementos de potência, até que os congestionamentos sejam resolvidos.



---

# CAPÍTULO III

Características e Funcionamento

dos

Principais Mercados de Energia Elétrica do Mundo

---

## 3.1 Argentina

### 3.1.1 Generalidades

A reestruturação da Indústria de Serviços Elétricos da Argentina (ISE), promovida pelo Governo, foi fundamentada nas recomendações propostas pelo Banco Mundial, que pretendeu criar um mercado competitivo, privatizando e desverticalizando os segmentos da produção, transporte e distribuição em diversas unidades e criando o mercado livre de energia elétrica.



Figura 7 - Situação geográfica da Argentina [20]

A reforma da ISE argentina sofreu dois processos de mudanças radicais. Inicialmente, foi feita uma tentativa de reestruturação com base na Lei de Reforma do Estado. Em 1992, surgiu a Lei n.º 24.065/92, que estabelece o novo "marco regulatório" da ISE.

O marco regulatório rege a organização institucional e o regime de propriedade da ISE. A regulação institucional pretendeu realizar a máxima participação horizontal e vertical das empresas privadas para facilitar a introdução da competição e da eficiência. Em relação ao controle, a regulação estabelece a retirada do Estado produtor e a entrada da iniciativa privada. O objetivo geral da reforma foi proteger os direitos dos utilizadores de acesso aos serviços de eletricidade, promover um modelo competitivo no mercado elétrico, incentivar investimentos privados, criar um modelo de operação do sistema fiável e regular as atividades de transmissão e distribuição, assegurando tarifas razoáveis. No novo modelo, são reconhecidos os seguintes agentes de mercado: os produtores, os transportadores, os distribuidores, os órgãos reguladores (ENRE e COMMESSA) e o Mercado Elétrico Mayorista (MEM), que corresponde ao mercado atacadista de eletricidade, administrado pela COMMESSA.

O "marco regulador" estabelece, portanto, as funções e as condições sob as quais esses segmentos da ISE podem operar [4].

### **3. 1. 2 Funcionamento do Mercado**

No *Mercado Eléctrico Mayorista* (MEM) são determinados dois preços de mercado nodais, o preço *spot* e o preço sazonal, aos quais são adicionados fatores de forma a refletirem os custos associados às perdas. A entidade responsável pela determinação de ambos os preços de mercado é a CAMMESA. Baseando-se na previsão da carga, nos custos marginais de produção e nas restrições técnicas do sistema, a CAMMESA efetua o despacho e determina o preço *spot* que é igual ao custo marginal de produção da última central a ser despachada.

Os preços sazonais são determinados em função do despacho ótimo das centrais térmicas e hidroelétricas, utilizando para o efeito a informação relativa à previsão da carga, as restrições técnicas do sistema e a disponibilidade da produção declarada pelos produtores para esses períodos. Os preços sazonais são determinados nos meses de Maio e de Novembro de cada ano e possuem um período de vigência de seis meses. No entanto, eles são revistos pela CAMMESA de três em três meses, pelo que poderão ser alterados se os fatores que estiveram na sua origem se alterarem.

A gestão dos congestionamentos na rede é efetuada através da aplicação de preços zonais de congestionamento. No MEM, em Julho e em Dezembro, todos os geradores são obrigados a declarar a sua disponibilidade e as centrais hidroelétricas a quantidade de água armazenada nas suas albufeiras. Por sua vez, as centrais térmicas e nucleares são solicitadas a indicar o preço a que estão dispostas a vender a energia para cada hora dos próximos seis meses (Novembro a Abril e de Maio a Outubro), não podendo o preço exceder 115% do custo atual dos combustíveis. No entanto, se o preço dos combustíveis sofrer variações superiores a uma determinada percentagem anteriormente especificada, o preço de venda declarado pelas centrais térmicas e nucleares pode sofrer ajustes durante a vigência do período de seis meses a que correspondem as ofertas.

Os geradores recebem o preço *spot*, com o fator nodal já aplicado para refletir as perdas do sistema de transmissão, acrescido de um preço que tem como objetivo remunerar a capacidade instalada se funcionarem das 06:00 às 23:00 dos dias úteis da semana. Também são remunerados pelos serviços de sistema prestados (regulação de frequência e reserva estática).

Os comercializadores podem comprar e/ou vender energia elétrica através de contratos bilaterais e/ou através do mercado *spot*, funcionando como agregadores de grandes consumidores e de geradores. Aos comercializadores também é permitido a importação e a exportação de energia elétrica.

Aos distribuidores e aos grandes consumidores é permitido o livre estabelecimento de contratos para o fornecimento de energia elétrica. Contudo, os distribuidores terão que pagar o preço sazonal se não adquirirem a energia elétrica de que necessitam.

Com exceção dos grandes consumidores, que podem adquirir a energia diretamente no mercado *spot*, os consumidores têm que comprar a energia elétrica de que necessitam aos distribuidores, ao preço sazonal acrescido de uma margem regulada que inclui os custos de capital, os custos de investimento, os custos de operação, os custos de manutenção, o lucro

e as perdas no sistema de distribuição. No entanto, a componente do preço que os consumidores têm que pagar aos distribuidores referente às perdas no sistema de distribuição é regulada.

Aos consumidores com consumo anual superior a 1 MW é permitido a compra e venda de energia no mercado *spot*, tendo que contratar pelo menos 50% do seu consumo com o distribuidor. Os consumidores com consumos anuais entre 100 kW e 1 MW são obrigados a contratar a energia ao distribuidor. Para os consumidores com consumo anual inferior a 100 MW, a energia elétrica que necessitam é fornecida pelo distribuidor a tarifas reguladas [3].

## **3.2 Chile**

### **3.2.1 Generalidades**

O mercado elétrico chileno foi pioneiro na abertura e liberalização que os seus “marcos regulatórios” implantaram. A reestruturação do setor começou em 1978 e em 1982 estava já em vigor o *Decreto com Fuerza de Ley N° 1* que institui as bases de eficiência económica que caracterizam o sistema atual. Com esta reestruturação pretendeu-se estabelecer um mercado de produção de energia elétrica competitivo e regular os setores ao nível do transporte e distribuição de energia.



**Figura 8 - Situação geográfica do Chile [21]**

Em Janeiro de 2004, surgiram novas reformas com o objetivo de incentivar o investimento na produção devido aos baixos preços nodais relativamente aos custos de produção e ao investimento na transmissão devido a problemas em chegar a acordo nos investimentos em novas linhas de transmissão [3].

Apesar dos ativos do sistema elétrico serem propriedade privada, as decisões relacionadas com a política energética do Chile são da responsabilidade da *Comisión Nacional de*

Energia (CNE), do *Ministerio da Economia e da Energia (MEE)* e da *Superintendência da Electricidade e do Fuel (SEF)* [3].

As tarifas no Chile são reguladas e revistas duas vezes por ano pela CNE que analisa também a necessidade do reforço da capacidade de produção. A SEF, por sua vez, regula o setor da eletricidade e assegura o cumprimento das regras. O MEE revê e aprova as tarifas propostas pela CNE e supervisiona a atribuição das concessões para a produção, distribuição e transporte [3].

O sistema elétrico chileno é hoje constituído por dois subsistemas independentes e denominados *Sistema Interconectado del Norte Grande (SING)* e *Sistema Interconectado Central (SIC)* [3].

O setor da produção caracteriza-se pela separação do funcionamento ou operação do sistema com o mercado de contratos. Esta característica é ainda mais explícita na maioria dos mercados elétricos competitivos existentes, observando-se principalmente duas variantes: uma de estabelecer um despacho segundo os custos variáveis de produção e outra de se efetuar o despacho com base em ofertas. Na figura 9 está caracterizado o mercado nacional chileno, onde se ilustra a dualidade atrás mencionada [5].

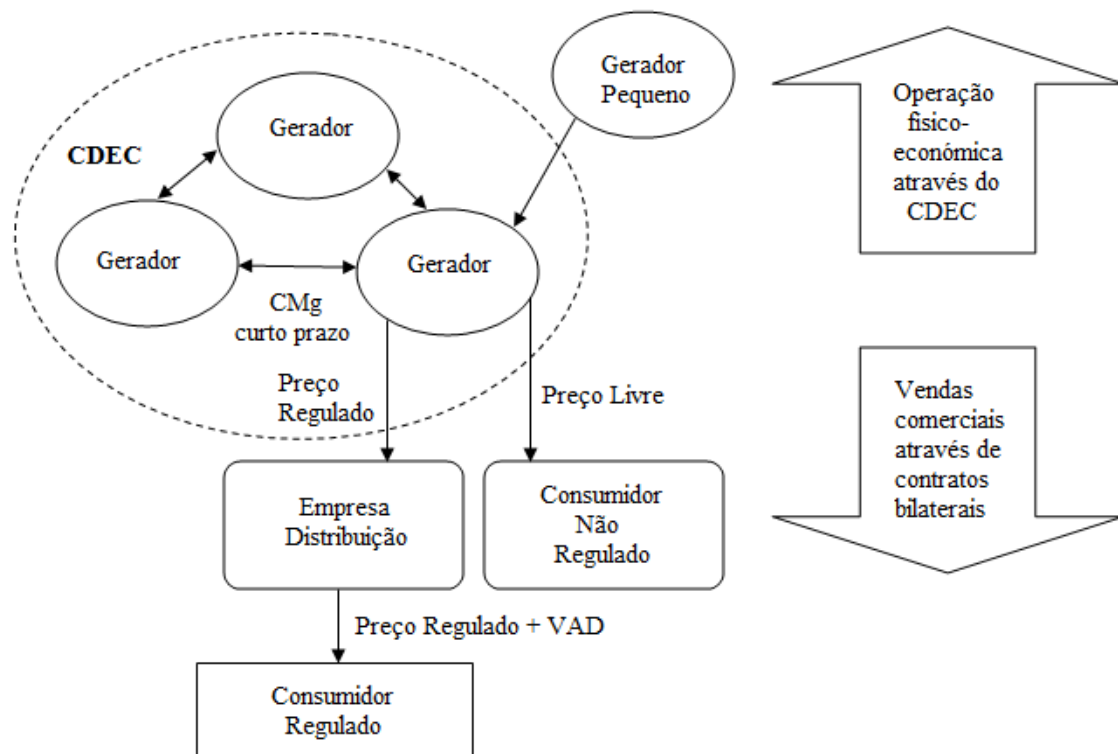


Figura 9 - Estrutura do mercado elétrico chileno [5]

### 3. 2. 2 Funcionamento do Mercado

No mercado elétrico chileno, a CDEC, que detém o controlo do sistema de transporte, utiliza um sistema de ofertas centralizado onde as centrais com custos de produção mais reduzidos são despachadas em primeiro lugar. No caso das centrais hidroelétricas, o seu

despacho é efetuado de acordo com o valor da água, de forma a otimizar a utilização da água retida nas albufeiras.

Os geradores são obrigados a declarar em todas as horas a sua disponibilidade e o custo marginal de produção, com o objetivo de permitir à CDEC a determinação do despacho e dos preços nodais.

Os preços nodais possuem duas componentes:

- **Preço-base da energia** – calculado da média dos custos previstos de produção de curto prazo para os próximos quatro anos. Após o seu cálculo, é convertido num preço *spot* regulado, através da aplicação de um fator de penalização para levar em consideração as perdas do sistema. Esta componente é calculada de seis em seis meses pelo regulador;
- **Preço-base da potência** – corresponde ao preço da potência de ponta e é igual ao custo marginal anual associado ao aumento da capacidade de produção do sistema produtor para uma margem de reserva teórica, através da utilização da central mais económica num determinado nó. O preço-base da potência é depois convertido num preço regulado, através da aplicação de um fator de penalização para refletir os efeitos da potência de ponta no sistema de transmissão.

Note-se que as penalizações aplicadas ao preço-base de energia e ao preço-base de potência têm como objetivo integrar informação relativa ao sistema de transmissão e às perdas respetivas. Caso contrário, os preços nodais seriam constantes em todos os nós do sistema, o que corresponderia a uma situação afastada da realidade.

Em condições normais, o custo de oportunidade é igual ao custo de operação da central térmica mais cara despachada pelo que, normalmente, o preço *spot* projetado (num nó de referência) normalmente iguala o custo de oportunidade da água no sistema SIC. Os serviços do sistema são adquiridos pelo operador do sistema CDEC que faz refletir os seus custos no preço *spot*.

No mercado elétrico chileno, são considerados dois tipos de consumidores: os consumidores de “preço livre”, com carga superior a 0,5 MW, e os consumidores de “preço regulado”, com carga inferior a 0,5 MW. Aos consumidores de “preço livre” é permitido o estabelecimento de contratos bilaterais com os geradores, normalmente baseados nos preços nodais para cada hora. Os consumidores de “preço regulado” são fornecidos pelo distribuidor a preços regulados para a distribuição, aos quais acresce o preço nodal [3].

### **3.3 Países Nórdicos (*Nord Pool*)**

#### **3.3.1 Generalidades**

O Mercado Nórdico é composto pelos países escandinavos (Finlândia, Suécia, Noruega e Dinamarca) e corresponde a um dos mercados de energia elétrica mais desenvolvidos. Este mercado é caracterizado pela variedade dos recursos e pelo forte papel atribuído ao mercado organizado transnacional, o *Nord Pool* [6].



Figura 10 - Situação geográfica do Nord Pool [22]

Com a publicação do *Energy Act* em 1990, a Noruega foi o primeiro dos países nórdicos a dar início ao processo de reestruturação do seu mercado elétrico. Posteriormente, seguiram-se a Suécia, a Finlândia e a Dinamarca [3].

Em 1993, a rede nacional de transporte Norueguesa estabeleceu o *Nordic Power Exchange*, que acabou por se expandir à Suécia em 1996, dando origem ao primeiro mercado elétrico multinacional do mundo. A Finlândia e a Dinamarca acabaram por se associar ao *Nord Pool* em 1998 e 2000, respetivamente [3].

No mercado de eletricidade nórdico existe um Operador de Mercado (OM), *Nordpool*, e cinco Operadores de Sistema (OS), *Svenska Kraftnät* (Suécia), *Fingrid* (Finlândia), *Statnet* (Noruega), *Eltra* e *Elkraft Systems* (Oeste e Este da Dinamarca). Estes cinco OS são os proprietários ou concessionários das respetivas redes de transmissão consistindo, assim, a entidades designadas por *Transmission System Operator* (TSO). As suas funções principais correspondem à coordenação entre produtores, consumidores e outras redes. As principais funções destas empresas são a operação e a manutenção das redes bem como tornar possível o acesso de terceiros. Os participantes no mercado são os produtores, consumidores e comercializadores que estão registados como membros de mercado no *Nord Pool* ou que operam contratos bilaterais. Existem ainda entidades reguladoras independentes e separadas em cada um dos quatro países [6].

Os contratos exclusivamente financeiros são transacionados no *Eltermin*. Operado pelo *Nord Pool*, este mercado de derivados comercializa contratos *forward* e de futuros. Também é da responsabilidade do *Nord Pool* a operação do mercado *spot* para o dia seguinte, o *Elspot*, e do mercado *spot* para a hora seguinte, o *Elbas*. Essencialmente o *Elbas* funciona como um “*after market*” relativamente ao *Elspot* [3].

### 3. 3. 2 Funcionamento do Mercado

O *Nord Pool* integra um mercado diário, *Elspot*, baseado em ofertas de energia elétrica para cada uma das 24 horas do dia seguinte, bem como um mercado horário contínuo, *Elbas*, (para a Finlândia, a Suécia e o este da Dinamarca) que corresponde ao mercado intradiário

de compensação de desvios. Disponibiliza, ainda, um mercado de derivados financeiros, *Eltermin*. O *Elspot* e o *Elbas* correspondem a mercados de transação física [6].

### **3.3.2.1 Elspot**

O *Elspot* é um mercado não obrigatório que funciona como alternativa aos contratos bilaterais. Até às 12 horas de cada dia, os agentes compradores e vendedores submetem as suas ofertas de preço-quantidade para cada hora do dia seguinte. As ofertas de compra e de venda de energia elétrica submetidas ao *Elspot* são adequadamente agregadas resultando nas curvas de consumo e de produção, respetivamente, a partir das quais se determina o preço do sistema para cada hora do dia seguinte. Os preços e volumes de todas as transações são publicados não sendo divulgados os agentes compradores ou vendedores. O *Nord Pool* funciona ainda como agente que garante a liquidação das diversas transações [6].

Como já foi referido, o preço de sistema determinado no *Elspot* corresponde ao preço de equilíbrio entre as ofertas de compra e de venda. Não existindo restrições de limites de trânsito de potência entre as diversas áreas que se encontrem ativas o preço será igual em todo o sistema. Se existirem restrições ativas nas interligações entre a Suécia, a Finlândia, o oeste e este da Dinamarca e as duas áreas em que se divide a Noruega (norte e sul), o sistema é dividido em diversas áreas de preços. Estas diferenças de preços são utilizadas pelos TSO para adquirir energia ou pagar reduções de produção de modo a eliminar os congestionamentos [6].

### **3.3.2.2 Elbas**

O *Elbas* é um mercado intradiário para compensação de desvios de entrega física para a Suécia, a Finlândia e a zona este da Dinamarca sendo operado via Internet. Os agentes de mercado que pretendam corrigir os volumes obtidos no dia anterior no mercado *Elspot* poderão fazê-lo através do mercado *Elbas*. Este mercado também opera com base em contratos horários sendo comercializados para a hora seguinte. A comercialização neste mercado tem início logo após a publicação dos resultados obtidos no mercado *Elspot* e o número de participantes e o volume de transações são em geral reduzidos [6].

Os desvios entre a procura e a oferta resultantes do *Elspot* e do *Elbas* são solucionados através de transações em mercados em tempo real operados pelos Operadores de Sistema locais [3].

### **3.3.2.3 Eltermin**

O *Eltermin* é um mercado de derivados onde são transacionados contratos financeiros normalizados, nomeadamente contratos *forward* e de futuros para as horas de vazio, opções e *swaps*. Neste mercado, o preço de mercado determinado no *Elspot*, sem levar em consideração as restrições técnicas do sistema, é utilizado como preço de referência para a liquidação dos contratos [3].

O *Nord Pool ASA* funciona como câmara de compensação do *Eltermin* de forma a garantir o cumprimento dos contratos ali transacionados [3].

### 3. 4 Inglaterra, País de Gales e Escócia (BETTA)

#### 3. 4. 1 Generalidades

O mercado de produção de energia elétrica de Inglaterra e Gales foi submetido a uma reforma importante em Março de 2001. A comercialização da energia elétrica para o dia seguinte era realizada obrigatoriamente no *Pool* introduzido na primeira fase de reformas ocorridas em 1990, tendo sido substituído pelo *New Electricity Trading Arrangements* (NETA). Esta alteração reduziu o âmbito do mercado organizado, até então em vigor, dando origem a um mecanismo de compensação de desvios em tempo real. No dia 1 de Abril de 2005, foi criado um mercado grossista de energia elétrica único para a Grã-Bretanha com a inclusão da Escócia, através da implementação do *British Trading and Transmission Arrangements* (BETTA) [6].

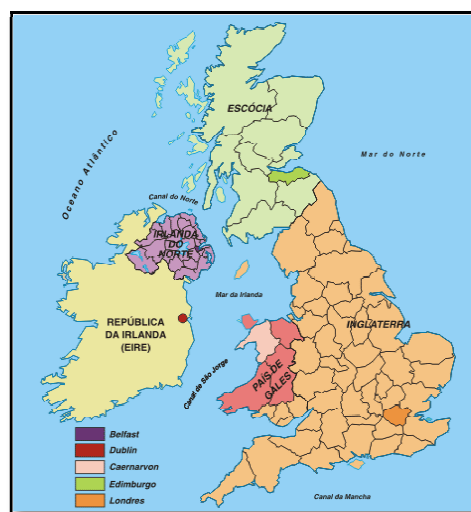


Figura 11 - Situação geográfica do BETTA [23]

O BETTA é regido pelo *Balancing and Settlement Code* (BSC), que representa os geradores, os distribuidores/retalhistas, os consumidores, o *Office of Gas and Electricity Markets* (OFGEM) e a *National Grid* (NG) [6].

As principais características do mercado grossista de energia elétrica da Grã-Bretanha consistem no elevado número de participantes e na elevada liquidez do mercado de contratos bilaterais. Os mercados organizados contabilizam uma reduzida quota de comercialização de energia elétrica comparativamente com as transações efetuadas bilateralmente ou através dos *brokers* existentes.

O modelo atual, BETTA, apresenta um único OS que é a NGC, e inclui três concessionários separados possuindo licenças de transmissão, nomeadamente, a *National Grid*, a *Scottish Power* e a *Scottish Hydro*. Assim, a *National Grid* para além de ser um concessionário de parte da rede de transmissão, é igualmente o OS pelo que o Regulador terá de assegurar que não existirá discriminação em relação aos restantes concessionários. As interligações entre a Escócia e Inglaterra e Gales fazem agora parte do sistema de transmissão da Grã-Bretanha pelo que já não são tratadas separadamente. Estas condições vieram simplificar o acesso dos produtores de energia elétrica escoceses ao mercado de Inglaterra e Gales [6].

### 3. 4. 2 Funcionamento do Mercado

Até ao fecho da sessão (*Gate Closure*), que se verifica uma hora antes do período real a que corresponde a entrega física da energia, os agentes do mercado podem estabelecer livremente contratos *forward* com durações que podem ir até vários anos no futuro. Em simultâneo, os agentes realizam notificações provisórias (*Initial Physical Notification*) ao OS e vão realizando ajustes às mesmas até ao fecho da sessão. Com o fecho da sessão, as notificações que indicam os níveis de produção e de consumo com que os geradores e os consumidores, respetivamente, pretendem operar transformam-se em notificações definitivas - *Final Physical Notification* (FPN) [3].

Contudo, o OS tem necessidade de ajustar os níveis de produção e de consumo, devido essencialmente, a duas razões:

- Inexatidão na previsão dos níveis reais de operacionalidade dos agentes de mercado; alterações climatéricas com impacto na procura e indisponibilidade dos geradores devido a avarias;
- Necessidade do OS ajustar os níveis de produção e de consumo para os níveis que os agentes pretendem operar devido a razões técnicas e de forma a preservar a segurança do sistema [3].

Assim, para ajustar os níveis de produção e de consumo, o OS recorre a um mercado designado por *Balancing Mechanism* (BM) que se rege de acordo com o estabelecido no *Balancing and Settlement Code*. A participação no *Balancing Mechanism* (BM), que não é obrigatória, envolve a submissão de ofertas para aumentar a produção ou reduzir o consumo, designadas por *offers*, e/ou ofertas para reduzir a produção ou aumentar o consumo, designadas por *bids*. Transações fora do BM após o fecho da sessão são proibidas [3].

O OS (*National Grid UK*) compra *offers*, *bids* e outros serviços com o objetivo de manter o sistema em equilíbrio. As *offers* e as *bids* podem ser submetidas pelos fornecedores, distribuidores, grandes consumidores e geradores. No entanto, os participantes do BM têm que possuir unidades de produção ou consumo, designadas por *Balancing Mechanism units*, registadas de acordo com o BSC. Caso contrário, não poderão participar nesse mercado [3].

As *Balancing Mechanism units* têm sempre que submeter as *offers* e as *bids* aos pares, isto é, sempre que um gerador pretende aumentar o seu nível de produção relativamente à sua FPN ele tem que submeter uma *offer* e em simultâneo uma *bid* para repor os seus níveis de produção ao nível original. As *offers* e as *bids* são constituídas por uma determinada quantidade de energia eléctrica, expressa em MWh, e um preço, expresso em £/MWh. Cada *Balancing Mechanism unit* pode submeter no máximo cinco pares de *offers/bids* acima da FPN e cinco abaixo, com preço crescente ou constante e só são aceites segundo a sua ordem de submissão [3].

Desde o fecho da sessão até ao momento da entrega física da energia, o OS de forma a manter o equilíbrio e a satisfazer as restrições técnicas do sistema, pode aceitar qualquer *offer* ou *bid* desde que sejam consistentes com os parâmetros dinâmicos da *Balancing Mechanism unit*. Os parâmetros dinâmicos de cada *Balancing Mechanism unit* estão

relacionados com os gradientes dos níveis de produção e de consumo, com a informação relativa aos níveis estáveis de operação e com os limites máximos e mínimos de importação e de exportação. O OS informará a *Balancing Mechanism unit* do nível absoluto que pretende que ela opere. Para tal, o OS poderá ter que aceitar mais do que uma *offer* ou *bid* em simultâneo [3].

Na eventualidade dos agentes do sistema não cumprirem com as suas posições contratuais, o OS recupera os custos daí decorrentes através da aplicação de penalidades. O preço que os agentes do mercado terão que pagar pela energia resultante do incumprimento contratual é designado por *imbalance price* [3].

Existem dois *imbalance prices*:

- O *System Buy Price* é o preço a que são cobrados os *deficits* e reflete o preço médio a que o sistema teve que comprar a energia para corrigir o deficit dos participantes;
- O *System Sell Price* é o preço para os excedentes e pretende refletir o preço médio a que o sistema teve que vender a energia excedentária [3].

## **3.5 Brasil**

### **3.5.1 Generalidades**

O processo de reestruturação do setor elétrico brasileiro iniciou-se em meados dos anos 90, com a fase de conceção do novo modelo, acompanhado pela consultoria prestada pela empresa inglesa *Cooper & Lybrand* ao Ministério das Minas e Energia. A reestruturação trouxe uma mudança do mercado monopolista, para um mercado pluralista horizontal e que tem como pontos principais a desverticalização das empresas, a implantação de um modelo comercial competitivo e o novo papel do Estado que deixa a sua condição de estado empresário para assumir o papel de agente orientador e fiscalizador dos serviços de energia elétrica [7].



Figura 12 - Situação geográfica do Brasil [24]

Para aperfeiçoar os mecanismos de regulação do mercado que garantissem um funcionamento eficiente do novo modelo implantado no setor elétrico, criaram-se as seguintes entidades:

- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica: vinculada ao Ministério das Minas e Energia, que tem como missão proporcionar condições favoráveis para que o mercado de energia elétrica se desenvolva com equilíbrio entre os agentes e em benefício da sociedade. Regular e fiscalizar a produção, transporte, distribuição e comercialização de energia do sistema elétrico são algumas das suas funções;
- ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico: criado para operar, supervisionar e controlar a produção e transporte de energia elétrica no Brasil, com o objetivo de minimizar os custos e garantir a fiabilidade e segurança do sistema. Além disso, é responsável pela administração operacional e financeira dos serviços de transporte e das condições de acesso à rede básica (livre acesso);
- CNPE – Conselho Nacional de Política Energética: órgão para formulação de políticas e diretrizes de energia;
- CCPE – “Comitê Coordenador do Planejamento da Expansão dos Sistemas Elétricos”: foi criado com atribuição central de coordenar a elaboração do planejamento da expansão dos sistemas elétricos brasileiros e atividades relacionadas;
- MAE – Mercado Atacadista de Energia: criado em 27 de Maio de 1998, com a função de intervir em todas as transações de compra e venda de energia elétrica, assim como a contabilização e formação de preços que reflita o custo marginal do sistema, para os quatro subsistemas (Norte, Nordeste, Sudeste/Centro-Oeste e Sul) [7].

### **3. 5. 2 Funcionamento do Mercado**

No MAE é feito o processamento da contabilização e liquidação da energia elétrica produzida e consumida no Brasil. As empresas produtoras, distribuidoras e comercializadoras de energia elétrica, registam no MAE os valores de energia contratada, ao mesmo tempo registam-se os valores de energia verificada. A diferença entre estas é liquidada no MAE, ao preço *spot* do MAE, para cada um dos subsistemas e para cada patamar [7].

Analisando o sistema elétrico brasileiro, constata-se que as empresas geradoras produzem e fornecem energia ao mercado, estando as centrais conectadas a uma rede de transporte que é propriedade das empresas transportadoras, que se encarregam do transporte da energia, em alta tensão, até as estações abaixadoras de tensão das empresas distribuidoras que ali assumem a responsabilidade pela distribuição da energia aos consumidores da sua região de concessão [8].

A liquidação financeira dessa complexa relação de suprimento de energia dá-se no âmbito do MAE e obedece a um sistema próprio e muito peculiar, que decorre das seguintes características especiais, verdadeiramente *sui generis*, que revestem o mercado de energia elétrica:

- Como a energia não pode ser armazenada, o conjunto das centrais integradas no sistema gera exatamente o montante total de energia que é procurado pelo conjunto dos consumidores que são abastecidos pelo mesmo sistema;
- Por força do art. 13, parágrafo único, letra “a”, da Lei nº 9.648/98, constitui atribuição do ONS o “despacho centralizado da geração, com vistas à otimização” do sistema interligado.

Isso significa que é o ONS, e não a empresa produtora, quem decide quanta energia deve ser colocada no sistema a cada momento, com o detalhe importante de que, ao tomar essas decisões, o ONS leva em consideração, exclusivamente, a otimização da utilização do sistema, desconsiderando por completo os contratos existentes entre os agentes de produção e distribuição [8].

O modelo foi estruturado com base em:

1. O comprador sempre recebe a energia contratada no âmbito do MAE, mesmo que, na realidade, tenha retirado menos energia do sistema do que o montante total previsto em todos os seus contratos celebrados no âmbito do MAE;
2. O vendedor fornece sempre a energia que se obrigou contratualmente a fornecer no âmbito do MAE, mesmo que, na realidade, tenha colocado no sistema menos do que o montante total previsto em todos os seus contratos celebrados no âmbito do MAE [8].

Com base nisto, o comprador deve pagar o montante integral de energia previsto nos seus contratos, independentemente de ter ou não recebido fisicamente essa energia, ficando as eventuais diferenças entre o “contratado” e o “realizado” para serem acertadas através de um mecanismo criado especificamente para essa finalidade, que é o mercado de curto prazo, ou *spot*, do MAE [8].

No mercado de curto prazo do MAE as diferenças são acertadas por um sistema de créditos e débitos. Quando uma empresa distribuidora retira do sistema energia em montante superior ao montante total previsto em seus contratos celebrados no âmbito do MAE, a correspondente diferença dá origem a um débito contra essa empresa distribuidora. Quando a empresa distribuidora, ao contrário, retira do sistema energia em montante inferior ao montante total previsto em seus contratos celebrados no âmbito do MAE, essa diferença garante-lhe um crédito. Da mesma forma, a empresa geradora fica com um débito quando coloca no sistema energia em montante inferior ao que estava obrigada contratualmente a colocar e com um crédito quando ocorre o contrário [8].

Resumindo, quem, no âmbito do MAE, retira do sistema mais energia do que tem direito contratualmente assegurado de retirar ou quem coloca no sistema menos energia do que está contratualmente obrigado a colocar deve pagar pela diferença ao “mercado” e quem faz o contrário, ou seja, quem retira menos do que tem direito ou coloca mais do que está obrigado, passa a ter o direito de receber pela diferença do “mercado” [8].

Calculam-se, dessa forma, os montantes de energia que os vários agentes “devem” ou “têm direito a receber” do mercado. Esses montantes são convertidos em valores monetários utilizando-se o “preço do MAE”, que está previsto para vir a ser estabelecido para cada meia hora de cada dia e deveria refletir, pelo menos teoricamente, a situação relativa entre a oferta e a procura de energia em cada momento [8].

## 3.6 Estados Unidos da América

### 3.6.1 Generalidades

A reestruturação do setor elétrico nos Estados Unidos da América começou em 1978 com a publicação do *Public Utility Regulatory Policies Act* (PURPA), que pôs fim aos monopólios regionais existentes até à altura e que se estavam estruturados em empresas verticalmente integradas, considerando os setores de produção, transporte e distribuição de energia elétrica. Esta legislação deu origem ao aparecimento de entidades produtoras, independentes das empresas verticalmente integradas, denominadas por *Qualifying Facilities* (QF), e estabeleceu que as empresas verticalmente integradas deveriam adquirir energia a estes produtores a preços correspondentes aos custos das unidades de produção que se tornava desnecessário despachar.

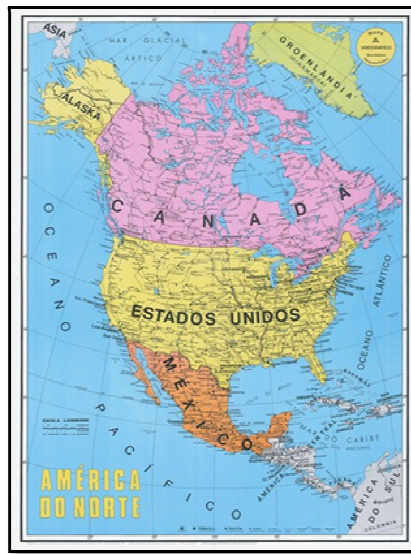


Figura 13 - Situação geográfica dos Estado Unidos da América [25]

Em 1992 foi publicada a legislação *Energy Policy Act* com o objetivo de aumentar a importância dos mecanismos de mercado na alimentação das cargas e criar um novo tipo de entidades produtoras, denominadas por *Exempt Wholesale Generators* (EWG). O *Federal Energy Regulatory Commission* (FERC), entidade regulatória a nível federal, veio permitir o livre acesso de todas as entidades elegíveis às redes de transporte e distribuição.

Devido ao facto dos EUA serem um país de enorme território e também com um elevado número de estados com autonomia a vários níveis, levou a que o processo de reestruturação do setor elétrico tivesse um desenvolvimento não uniforme. Verificando-se em alguns estados como a Califórnia, o Arizona, o Illinois e o estado de Massachusetts, entre outros, um avanço no setor elétrico em termos de processo de reestruturação, enquanto em alguns estados esse processo está menos desenvolvido.

Por ser a companhia responsável pelo despacho centralizado de uma das áreas mais extensas da América do Norte (*Delaware, Illinois, Indiana, Kentucky, Maryland, Michigan, New Jersey, North Carolina, Ohio, Pennsylvania, Tennessee, Virginia, West Virginia* e o

distrito de *Columbia*), de seguida, tratar-se-á da caracterização e funcionamento do mercado *Pennsylvania Jersey Maryland Interconnection* (PJM).

### 3. 6. 2 PJM Interconnection

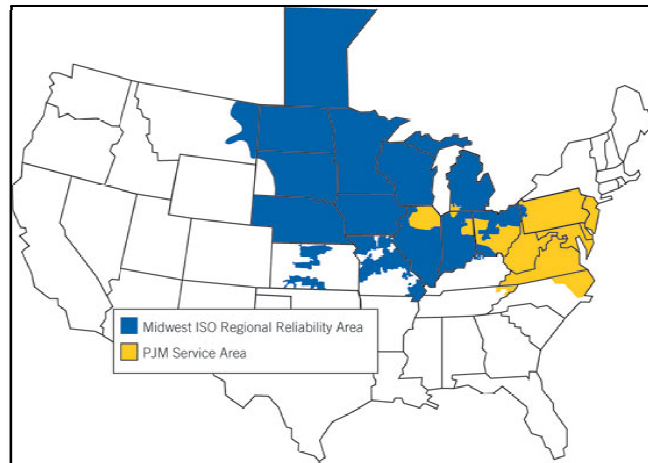


Figura 14 - Situação geográfica do PJM Interconnection [26]

#### 3. 6. 2. 1 Generalidades

Em 1927, foi criado o primeiro mercado de energia elétrica do mundo - o *Pennsylvania, New Jersey and Maryland* (PJM), quando três companhias de eletricidade dos estados de *Pennsylvania, New Jersey* e *Maryland* decidiram que podiam beneficiar da partilha de recursos. Progressivamente, outras companhias de eletricidade foram-se associando ao acordo que rege o *PJM Interconnection*. Em 1993, é criada a associação *PJM Interconnection Association* com o objetivo de administrar o mercado [3].

Em 1997, são iniciadas as transações de energia elétrica sob a forma de ofertas no PJM. Também nesse ano, o *Federal Energy Regulatory Commission* (FERC) aprova o PJM como o primeiro Operador Independente do Sistema (ISO) nos EUA [3].

Em 1998, o PJM adotou o modelo baseado nos preços marginais nodais – *Locational Marginal Prices*. O PJM representa atualmente o maior mercado de energia elétrica mundial, com cerca de 350 signatários do *PJM Operating Agreement*, os quais se podem dividir em cinco grupos: os geradores, os proprietários da rede de transporte, os intermediários (*brokers*), os retalhistas (*Load Serving Entities*) e os consumidores finais [3].

#### 3. 6. 2. 2 Funcionamento do Mercado

O mercado operado pelo PJM integra dois processos fundamentais relativos ao mercado diário e ao mercado em tempo real para a compensação de ajustes. O mercado diário é um mercado de tipo *forward* baseado em ofertas de compra e venda para cada hora do dia seguinte e no qual são determinados preços marginais para cada um desses períodos. As ofertas de compra e venda para o dia seguinte são submetidas até às 12 horas e os programas de produção e preços são publicados até às 16 horas [6].

O mercado em tempo real baseia-se em ofertas de incrementos e decrementos e podem ser submetidas por qualquer agente que participe no mercado diário permitindo realizar correções ao pré despacho de cada período obtido no dia anterior. Neste mercado são determinados preços marginais nodais para intervalos de 5 minutos considerando um modelo de despacho que inclui restrições relativas à capacidade dos ramos da rede de transmissão mas em que as perdas ativas são desprezadas. Por outro lado, as entidades envolvidas em contratos bilaterais devem igualmente submeter os seus programas ao ISO podendo especificar o preço que admitem pagar se ocorrerem congestionamentos na rede. Se tal não acontecer, poderá ser reduzida a potência programada para esse contrato bilateral no mercado de compensação de ajustes tendo em conta os congestionamentos da rede [6].

Finalmente, assinala-se que o PJM também disponibiliza contratos de tipo *Financial/Firm Transmission Rights* (FTR) para gerir o risco associado à ocorrência de congestionamentos na rede de transmissão. Aos clientes da rede de transmissão são aplicadas tarifas por congestionamento baseadas nos preços marginais obtidos no mercado de compensação e nos desvios obtidos relativamente aos respetivos programas para o dia seguinte. Todas as transações determinadas neste mercado serão afetadas pelo preço marginal de tempo real [6].

Os preços das ofertas de compra e de venda submetidas aos mercados diário e de compensação de desvios em tempo real são limitados por um preço *cap* que assumiu em 2005 o valor de \$US1000/MWh [6].

O mercado de serviços auxiliares corresponde a um mercado de regulação operado pelo PJM permitindo aos participantes adquirirem reserva neste mercado conjuntamente com a auto programação dos seus próprios recursos ou adquirindo reserva através de procedimentos bilaterais. Ao mercado de regulação são submetidas ofertas de regulação dos agentes fornecedores, limitadas por um preço *cap* que em 2003 foi de \$US100/MW, e ofertas de custos de oportunidade [6].

As entidades consumidoras são obrigadas a contratar uma reserva da ordem de 18% da carga máxima a alimentar. Estas entidades têm a flexibilidade de adquirir essa capacidade de reserva através de uma diversidade de formas, por exemplo, através da construção de unidades próprias, através de contratos bilaterais ou, então, participando no mercado de capacidade operado pelo PJM. Coletivamente, estes contratos correspondem ao *Installed Capacity Market* (ICAP). Os mercados de capacidade do PJM fornecem um mecanismo para equilibrar a oferta e o consumo para a capacidade não satisfeita através do mercado bilateral ou através do auto fornecimento. O PJM não disponibiliza contratos de longo prazo. Assim, os participantes que pretendam realizar este tipo de contratos ficam dependentes da negociação direta de contratos bilaterais ou através de um *broker* ou, ainda, através de contratos de futuros [6].

### 3.7 Península Ibérica (MIBEL)



Figura 15 - Situação geográfica do MIBEL [27]

#### 3.7.1 Generalidades

Tem-se assistido a uma tendência de privatizar o setor elétrico um pouco por toda a União Europeia. Com isto, pretende-se incentivar a criação de mercados regionais, tendo em vista um posterior alargamento para um “mercado europeu de energia”. Revela-se então de grande interesse para o setor elétrico de ambos os países (Portugal e Espanha) a criação do MIBEL e um passo importante para a consolidação do mercado europeu de eletricidade.

O “Protocolo de colaboração entre as Administrações Espanhola e Portuguesa para a criação do Mercado Ibérico da Electricidade”, assinado a 14 de Novembro de 2001, iniciou o processo de convergência dos sistemas elétricos português e espanhol. A concretização do MIBEL permitirá, a qualquer consumidor no espaço ibérico, adquirir energia elétrica, num regime de livre concorrência, a qualquer produtor ou comercializador que atue em Portugal ou Espanha [3].

Com a entrada em vigor do Acordo Internacional assinado em Santiago de Compostela, a 1 de Outubro de 2004, as entidades autorizadas em Portugal e Espanha podem atuar no MIBEL beneficiando de um reconhecimento automático, deixando de ser consideradas agentes externos, tendo os mesmos direitos e obrigações. Por outro lado, neste acordo também são estabelecidas as regras gerais de funcionamento. Assim, foram estabelecidos dois polos responsáveis pela gestão dos mercados:

- *Operador del Mercado Ibérico de Energía (OMIE)* – polo espanhol, responsável pela gestão dos mercados diário e intradiário;
- *Operador do Mercado Ibérico (OMIP)* – polo português, responsável pela gestão do mercado de derivados.

Assim sendo, a OMEL (*Compañia Operadora del Mercado Español de Electricidad*) passa a ser designada por OMIE e a junção dos operadores de mercado dos dois polos, OMIP e OMIE, dará origem a um único operador intitulado por Operador do Mercado Ibérico (OMI).

Em 1 de Julho de 2007, o MIBEL arrancou em toda a sua dimensão, coroando o trabalho de harmonização de condições entre os dois sistemas elétricos ibéricos, na perspetiva de que do seu funcionamento adviriam benefícios para os consumidores de ambos os países, num quadro de garantia do acesso a todos os interessados em condições de igualdade, transparência e objetividade [9].

### 3. 7. 2 Funcionamento do Mercado

A contratação de energia elétrica no MIBEL efetua-se por intermédio de um mercado *spot*, diário e intradiário, de um mercado a prazo e por um mercado livre de contratação bilateral. É, portanto, um modelo misto que supera os modelos atuais de Espanha e Portugal, baseados no *pool* quase obrigatório e na contratação bilateral física quase obrigatória, respetivamente, incorporando as experiências dos dois países. Como tal, o modelo de mercado adotado para o MIBEL é baseado em Mercados Organizados e Mercados Não Organizados, que se associam para se realizarem as transações sobre a energia elétrica.

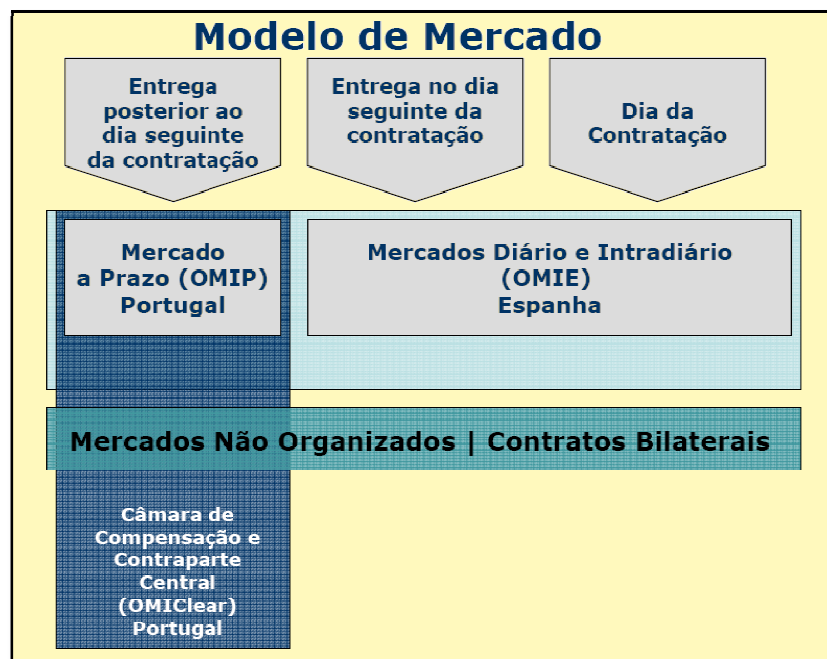


Figura 16 - Modelo de mercado do MIBEL

Segundo o modelo de mercado apresentado na figura 16, fazem parte dos Mercados Organizados: os mercados a prazo, onde se faz a transação da energia com entrega posterior ao dia da contratação, de liquidação física ou financeira; os mercados diários, onde se faz a negociação da energia com entrega no dia seguinte ao da contratação, de liquidação necessariamente física (mercado *spot*); e o mercado intradiário, onde se faz a contratação da energia para o próprio dia, também de liquidação necessariamente física.

A transação de energia elétrica através da realização de contratos bilaterais, cujas condições são fixadas livremente entre as contrapartes, sendo a liquidação física ou financeira, é feita nos Mercados Não Organizados.

O Mercado Diário (*Day-Ahead Market*) é baseado numa negociação independente para cada uma das 24 horas do dia seguinte. As ofertas feitas pelos diferentes produtores de energia, deverão ser ofertas simples nas quais deverá estar explícita a quantidade de energia a ser transacionada e o respetivo preço de venda.

Em paralelo com o Mercado Diário, decorre um Mercado de Ajustes que existe para gerir os desvios a curto prazo previstos para os programas de contrato entre a produção e o consumo de energia elétrica. Este mercado é também um mecanismo necessário para prevenir eventuais congestionamentos na rede elétrica de transporte e distribuição ou até, eventualmente, avarias em equipamentos presentes na rede.

Existe também o Mercado a Prazo que corresponde a um mercado de derivados, que se caracteriza por ser um mercado organizado de contratação de energia elétrica a prazo, no qual a Sociedade de Compensação de Mercados de Energia, S.A. (OMIClear) assume funções de câmara de compensação e de contraparte central. A contratação a prazo engloba os contratos de futuros, bem como as opções e outras operações a prazo que tenham por ativo subjacente a eletricidade. Este tipo de contratação pode ter uma liquidação física ou ser do tipo financeiro. A este tipo de mercado está associada uma série de vantagens, de entre as quais se pode destacar o aumento da liquidez do mercado. Permite assegurar o preço de fornecimento de energia elétrica em instantes futuros, bem como estabilizar os preços através da arbitragem entre preços *spot* e preços futuros.

Também no MIBEL, à semelhança do que acontece noutros mercados elétricos europeus, a contratação bilateral representa uma importante característica de funcionamento do mercado. Assim, são permitidos contratos entre todo o tipo de produtores e os demais agentes de mercado e estabelecidas as condições em que os comercializadores e produtores poderão vender a energia previamente adquirida a outros produtores ou agentes externos. No entanto, e segundo o documento da Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos “Modelo de Organização do Mercado Ibérico de Electricidade”, não se podem efetuar contratos bilaterais ilimitados, o que obriga as companhias de comercialização a comprar parte das suas necessidades energéticas no *pool* ou através de mercados de futuros de curto e médio prazo. Associando este facto à limitação da duração de contratos bilaterais e à obrigação das companhias de produção tornarem de domínio público os preços agregados aos diferentes contratos, leva a que seja assegurada a transparência e competição entre as diferentes plataformas de negociação. Com isto, pretende-se minimizar a possibilidade de agentes de pequena dimensão operarem sob condições desvantajosas, o que levaria ao fecho do mercado a novos competidores.



---

# CAPÍTULO IV

## Ferramentas de Otimização

---

Neste capítulo pretende fazer-se uma abordagem às ferramentas de otimização com maior aplicação nos sistemas elétricos de energia. Em particular, e tendo em consideração os objetivos desta dissertação, será dada maior importância ao estudo de meta-heurísticas, que se adequam à resolução de problemas reais, tais como, o problema do Despacho Económico (*Economic Dispatch*).

## **4.1 O problema do Despacho Económico**

O problema do Despacho Económico passa por determinar a quantidade de energia que cada gerador deve produzir de forma a satisfazer a procura, considerando as limitações das unidades geradoras. Neste caso em particular, o Despacho deve ser feito de modo a minimizar uma determinada função de custo [10].

O plano resultante do Despacho deve ser operacionalizado. Isto corresponde a escalonar em pequenos períodos de tempo, inferiores a uma hora, a energia a produzir pelas diversas unidades de produção. A isto chama-se Escalonamento da Produção ou *Unit Commitment*. O ponto de partida para o problema do Escalonamento de Produção é a solução do problema do Despacho Económico. Tem como objetivo principal determinar a médio prazo a quantidade de energia que cada unidade de geração deve produzir para cada unidade de tempo tendo em atenção a previsão da procura de energia, a capacidade de produção de cada unidade, outras limitações de cada unidade de produção, custos de produção, de transporte, de paragem, de arranque, ambientais, etc., e a reserva de produção (Reserva Girante). Os custos dependem essencialmente do tipo de unidade de produção. Normalmente, os custos dividem-se em custos de operação, associados diretamente à produção de energia, nomeadamente, custos de combustível, custos associados ao funcionamento da unidade (normalmente a função de custo é não linear e pode ser discreta), e custos de arranque ou paragem. Algumas unidades de produção têm um custo de paragem/arranque significativo, que pode depender do tempo inclusivamente [10].

Quanto às restrições, a principal restrição é a de Procura. Esta implica que, em qualquer instante, o somatório da energia produzida por todas as unidades seja maior ou igual à procura de energia (normalmente considera-se também uma Reserva Girante). Outra restrição é a restrição de Produção. Esta representa a limitação em termos de capacidade de produção de uma unidade. Pode ser de vários tipos, conforme o tipo de unidade: capacidade máxima (todas as unidades têm uma capacidade de produção máxima em cada período), capacidade mínima (algumas unidades não podem ou não devem ser completamente ou imediatamente desligadas, pelo que um nível de produção mínimo deve ser mantido) e não simultaneidade e precedência (pode acontecer que determinados grupos não possam funcionar simultaneamente ou um grupo deva arrancar primeiro que outro) [10].

A função de otimização do custo, normalmente, corresponde à soma dos custos de Produção que podem ser fixos e variáveis. Os custos variáveis de cada gerador são normalmente representados por uma função não linear e, por vezes, discreta. Os custos fixos correspondem normalmente a custos de arranque, paragem, não produção, manutenção, etc. Estes podem ser representados por uma constante, ou nos casos em que dependem duma

mudança de estado, usando uma constante e uma variável auxiliar. As perdas de energia no transporte também são de considerar [10].

#### 4. 1. 1 Formulação do problema do Despacho Económico

O problema do Despacho Económico consiste na alocação da totalidade da produção necessária de entre as unidades de produção disponíveis, assumindo-se que o Escalonamento da Produção é previamente determinado. O objetivo consiste em minimizar o custo do combustível, sujeito a restrições tanto físicas como operacionais. Como resultado, o objetivo do problema é determinar a melhor combinação de potências de todas as unidades produtoras, de maneira a ir de encontro às necessidades da carga ao menor custo de operação possível, satisfazendo as restrições de igualdade e desigualdade do sistema. O objetivo de um despacho moderno é o de explorar a rede muito mais perto do seu limite de segurança. Uma vez que os custos de produção são bastante elevados, um despacho ótimo permite a poupança de uma considerável quantia[11].

Por questões de simplicidade, nos problemas tradicionais do Despacho Económico, a função de custo de cada unidade produtora tem vindo a ser aproximada por uma função quadrática, expressão (2), sendo considerada a restrição de Balanço separadamente da capacidade limite de geração, e é resolvida usando técnicas de programação matemática, como, por exemplo, o multiplicador de Lagrange, método do gradiente e o método de Newton. Estes métodos conseguem resolver eficientemente problemas de Despacho, mas apenas se a curva do custo marginal ou incremental dos combustíveis for monotonamente crescente. Ou seja, estes métodos matemáticos necessitam de informação derivada da função de custo, como o custo marginal e incremental. Na figura 17 está representada uma curva típica dos custos de produção de um gerador térmico clássico [11].

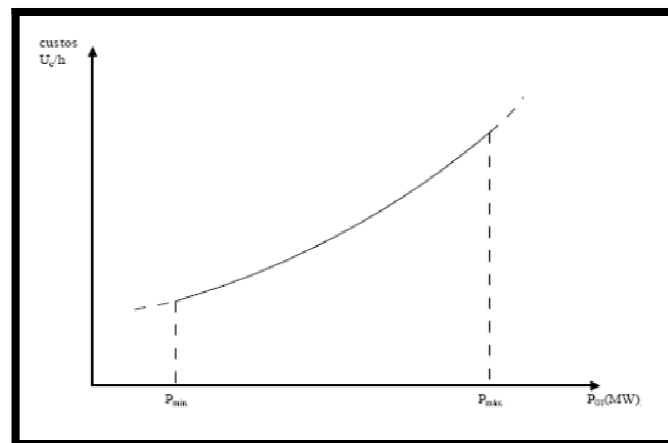


Figura 17 - Curva típica do custo de produção de um gerador térmico clássico [11]

Contudo, num problema prático de despacho, as funções de custo das unidades produtoras são não lineares, devido a zonas de operação proibitivas, válvulas de injeção, aos efeitos da multiplicidade de combustíveis, limites das rampas dos geradores, entre outros, e existem múltiplos mínimos locais e mínimos globais nessas curvas características. Por conseguinte, na prática, um problema de despacho económico deve ser representado como um problema de otimização onde a função objetivo é não linear, com restrições de igualdade e

inequações, que não pode ser resolvido diretamente através de métodos matemáticos tradicionais, uma vez que estes têm maior probabilidade de falhar na localização da solução ótima, resultado daí erros consideráveis. Todos estes aspetos tornam este problema de encontrar um mínimo global bastante complexo [11].

O problema do Despacho Económico também pode ser formulado de uma maneira dinâmica, que torna a sua resolução mais complicada, uma vez que normalmente é resolvido dividindo o período total de despacho em intervalos de tempo mais pequenos, e depois é resolvido o problema de Despacho Económico em cada um dos intervalos. O despacho dinâmico é um método para o escalonamento das unidades de produção com a previsão do consumo durante um determinado período de tempo, para uma operação mais económica do sistema de produção. Trata-se de um problema de otimização dinâmico tendo em conta as restrições impostas ao funcionamento do sistema, gerando limites para as rampas de capacidade de variação das unidades térmicas [11].

Em geral, pode ser formulado matematicamente com uma função objetivo, expressão (1), e duas restrições, expressões (3) e (4).

$$F_T = \sum_{i=1}^N F_i(P_i) \quad (1)$$

$$F_i(P_i) = a_i + b_i P_i + c_i P_i^2 \quad (2)$$

Onde:

$F_T$  = Custo total da produção

$F_i$  = Função de custo do gerador  $i$

$a_i, b_i, c_i$  = Coeficientes de custo do gerador  $i$

$P_i$  = Potência do gerador  $i$

$N$  = Número de geradores

Para o balanço da potência, uma restrição de igualdade deve ser satisfeita. A produção total deve ser igual à carga total mais as perdas totais.

$$\sum_{i=1}^N P_i = P_D + P_{perdas} \quad (3)$$

Onde  $P_D$  é a carga total pretendida e  $P_{perdas}$  corresponde às perdas totais.

A potência produzida por cada gerador deve estar compreendida entre um limite máximo e um limite mínimo. As respetivas restrições de desigualdade para cada gerador são:

$$P_{i_{min}} \leq P_i \leq P_{i_{max}} \quad (4)$$

Onde  $P_{i_{min}}$  e  $P_{i_{max}}$  correspondem à potência mínima e máxima produzida pelo gerador  $i$ , respetivamente.

## 4.2 Ferramentas de Otimização

A palavra heurística é derivada do grego *heuriskein*, que significa descobrir ou encontrar. Em otimização, heurísticas são regras indicativas que são desenvolvidas através da intuição, experiência e bom senso. Produzem estratégias rápidas e práticas, as quais reduzem o exaustivo espaço de busca (redução do esforço computacional) e podem conduzir a soluções ótimas, ou próximas das ótimas. Métodos heurísticos são intuitivos, fáceis de entender, e capazes de resolver problemas de otimização combinatória. A sua implementação é simples quando comparada a outros métodos de otimização. No entanto, os resultados produzidos por algoritmos heurísticos não têm garantia de serem sempre os ótimos globais. A figura 18 pretende ilustrar a estrutura geral de uma qualquer meta-heurística.

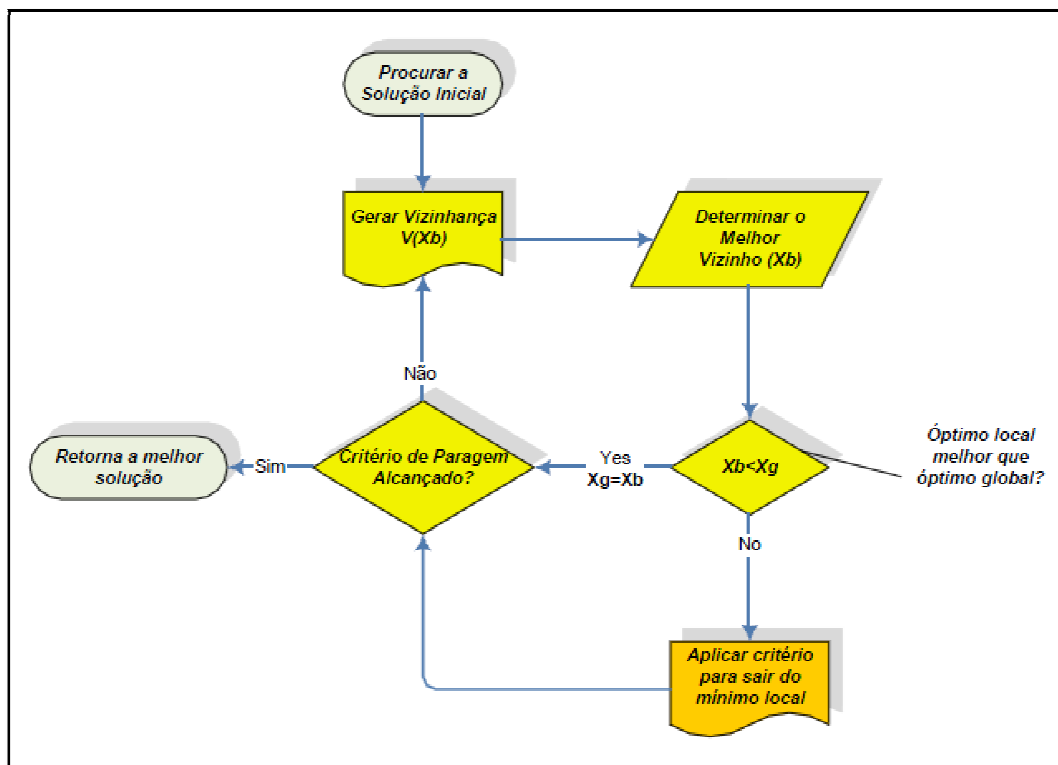


Figura 18 - Estrutura geral de uma meta-heurística [10]

No presente trabalho, serão apresentadas algumas das meta-heurísticas que têm vindo a ser mais utilizadas na resolução do problema do Despacho Económico, tais como, Algoritmos Genéticos (*Genetic Algorithms*), *Particle Swarm Optimization*, Relaxação Lagrangeana (*Lagrangian Relaxation*) e *Simulated Annealing*. Algumas destas meta-heurísticas são utilizadas de forma combinada, ou seja, os autores criam uma ferramenta de otimização baseada em duas meta-heurísticas diferentes com a finalidade de encontrar uma solução ótima, ou mais aproximada da ótima, e outras apresentam uma variação daquilo que é a sua forma original.

Será dado maior destaque aos Algoritmos Genéticos por ter sido a meta-heurística utilizada na aplicação desenvolvida nesta dissertação.

### 4.3 Algoritmos Genéticos

Os Algoritmos Genéticos (AG) são algoritmos estocásticos de busca inspirados no comportamento das espécies na natureza. O motivo da inspiração na natureza é que esta consegue resolver satisfatoriamente problemas altamente complexos (como a sobrevivência das espécies, por exemplo) [12].

Algoritmos de busca são aqueles que percorrem um determinado espaço de possíveis soluções em busca de uma solução ótima para o problema. Já algoritmos estocásticos são algoritmos não determinísticos baseados em princípios estatísticos, ou seja, eles percorrem o espaço de possíveis soluções de maneira estocástica (aleatória) [12].

Basicamente, os AG tratam da simulação da evolução de estruturas individuais (cromossomas), via processo de seleção e os operadores de busca, chamados operadores genéticos (mutação e cruzamento). Este processo depende da aptidão atingida pelas estruturas individuais, frente a um ambiente. A seleção é focalizada nos indivíduos com um alto grau de aptidão, explorando a informação da aptidão disponível. O cruzamento e a mutação perturbam estes indivíduos (heurística geral para a exploração) [12].

Os AG foram desenvolvidos por John Holland com ajuda de alguns dos seus colaboradores da *University of Michigan* quando estes entenderam que os mecanismos biológicos permitiam a adaptação do sistema natural biológico de forma que poderiam ser expressas matematicamente e simuladas. A ideia de Holland foi tentar imitar algumas etapas do processo da evolução natural das espécies incorporando-as a um algoritmo computacional. O ponto de referência foi gerar a partir de uma população de cromossomas, novos cromossomas com propriedades genéticas superiores às dos seus antecedentes [12].

Um AG é basicamente projetado conforme as seguintes etapas:

1. Geração da população inicial de cromossomas que consiste de um conjunto de possíveis soluções para o problema a ser resolvido. Essa população é geralmente gerada de forma aleatória;
2. A população é avaliada (de acordo com uma função chamada “função de aptidão”) e cada cromossoma recebe um valor que reflete sua qualidade para resolução do problema;
3. Depois de avaliados, os indivíduos passam por um processo de seleção onde os indivíduos mais aptos são selecionados e os menos aptos são descartados;
4. São aplicados os operadores genéticos nos cromossomas selecionados. Os operadores genéticos mais conhecidos são o de cruzamento e o de mutação;
5. Uma nova geração de soluções é obtida contendo os descendentes gerados pelas modificações realizadas na etapa 4;
6. As etapas de 2 a 5 são repetidas até que seja encontrada uma solução satisfatória.

As etapas mencionadas podem ser entendidas com maior facilidade através de um algoritmo, como o que é mostrado a seguir:

#### Algoritmo Genético

Seja  $S(t)$  a população de cromossomas na geração  $t$

```
t ← 0
Inicializar S(t)
Avaliar S(t)
Enquanto (!Condição de Pararagem()) faça
    t ← t+1
    Selecionar S(t) a partir de S(t-1)
    Aplicar reprodução em S(t)
    Aplicar mutação em S(t)
    Avaliar S(t)
Fim Enquanto [12]
```

### 4.3.1 Representação dos Indivíduos

A população de um AG é formada por indivíduos. A representação desses indivíduos define como a estrutura será manipulada. Essa representação depende do tipo de problema a ser resolvido. Os principais tipos de representação são a binária, real, permutação inteira e simbólica.

A representação binária é utilizada para problemas inteiros e numéricos, sendo que os problemas numéricos também podem fazer uso de representação real. Já a representação de permutação de símbolos é recomendada para ser utilizada em problemas baseados em ordem (como, por exemplo, *job shop scheduling*, caixeiro viajante, entre outros). Para problemas de agrupamento (*clustering*) é utilizada a representação baseada em itens repetidos.

Os indivíduos representam os parâmetros da função objetivo que será maximizada ou minimizada [12].

### 4.3.2 Operadores Genéticos

Os operadores genéticos são responsáveis por modificar a população de alguma maneira, de forma a explorar regiões desconhecidas do espaço de pesquisa, a fim de encontrar regiões com melhores soluções [12].

Existem vários tipos de operadores, sendo que alguns deles são utilizados em implementações específicas. Os operadores que usualmente são mais utilizados são o de Cruzamento e o de Mutação. A seguir, estes dois tipos de operadores serão descritos mais detalhadamente.

#### 4.3.2.1 Cruzamento

O funcionamento desse operador consiste basicamente em combinar informações de dois quaisquer indivíduos da população, a fim de que se tenham dois novos indivíduos com características melhores que a dos seus antepassados.

A forma como essa recombinação genética é feita depende do tipo de cruzamento utilizado. Existem diversos tipos de cruzamento. São eles o Cruzamento de 1-Ponto e N-Pontos, Cruzamento Uniforme e Cruzamento Média [12].

#### 4.3.2.2 Mutação

O operador de Mutação é aquele em que se tem a alteração de um ou mais genes do cromossoma, introduzindo, aleatoriamente, modificações no gene. Esse operador é responsável pela diversificação da população, no sentido de não se ter indivíduos muito parecidos. Porém, ele destrói parte da informação contida no cromossoma [12].

Na representação binária existem basicamente dois tipos de Mutação, são eles:

- Mutação Clássica: ocorre a troca do valor de um gene no cromossoma por um outro valor gerado aleatoriamente entre os valores que esse gene pode assumir;

|        |                          |  |
|--------|--------------------------|--|
| Antes  | <i>filho<sub>1</sub></i> | (0010101010010010101100)                   |
|        | <i>filho<sub>2</sub></i> | (0011111011100000111111)                   |
| Depois | <i>filho<sub>1</sub></i> | (0010 <u>0</u> 010100100101 <u>1</u> 1100) |
|        | <i>filho<sub>2</sub></i> | (0011111011 <u>0</u> 00000111111)          |

Figura 19 - Mutação clássica em representação binária [12]

- *Creep*: faz uso de uma distribuição normal ou uniforme com pouca variância. O valor gerado por essa distribuição é adicionado ao valor que o gene possui antes de sofrer a mutação [12].

#### 4.3.3 Métodos de Seleção

A seleção é o processo em que são escolhidos os indivíduos que participarão dos operadores genéticos. A seleção geralmente é feita baseada na aptidão dos indivíduos, ou seja, o seu valor na função objetivo [12].

Existem vários métodos de seleção, onde se destacam a roleta e os baseados em ranking ou torneio.

##### 4.3.3.1 Seleção Proporcional ou Roda Roleta

Este método consiste em colocar todos os indivíduos em uma roleta, onde a posição de cada indivíduo é proporcional à sua aptidão. A roleta é rodada N vezes, sendo que esse N é o número de indivíduos que serão necessários para se realizar os operadores genéticos. Quanto maior a aptidão do indivíduo, mais hipóteses de ele ser escolhido.

##### 4.3.3.2 Amostragem Estocástica ou Universal

Neste método, os indivíduos são colocados num gráfico circular dividido em regiões correspondentes ao número de indivíduos da população. Como no método de seleção visto anteriormente, os indivíduos são distribuídos de acordo com a sua aptidão. Sobre esse gráfico, é colocada uma roleta com ponteiros igualmente espaçados. Os indivíduos que possuírem maior aptidão terão mais hipóteses de serem selecionados, sendo que alguns indivíduos podem vir a desaparecer.

#### 4.3.3.3 Seleção por Ranking

Na seleção por ranking os indivíduos são ordenados em ordem crescente de acordo com o valor de aptidão que possuem. A cada indivíduo é atribuído um número inteiro que corresponde a sua posição no ranking. Quanto melhor a sua posição no ranking, melhor é a sua aptidão em relação aos outros indivíduos, e portanto, maior a sua probabilidade de ser escolhido. O ranking pode ser Linear ou Exponencial.

#### 4.3.3.4 Seleção por Torneio

Esta seleção não é baseada na competição entre toda a população e sim dentro de um subconjunto. O menor número desse subconjunto é dois. O seu funcionamento consiste em selecionar qual é o indivíduo mais apto dentro deste subconjunto. Por ser considerado um dos métodos de seleção mais eficientes, a seleção por torneio foi utilizada na implementação do algoritmo apresentado neste trabalho.

#### 4.3.3.5 Truncatura

Este método é baseado num limiar  $t$  que pode assumir valores entre 0 e 1. São selecionados os  $t$  melhores indivíduos da população, ou seja, se  $t = 0,4$ , 40% da população de melhores indivíduos será selecionada e o restante será descartado [12].

#### 4.3.4 Elitismo

Esta técnica tem como objetivo copiar o melhor indivíduo para a próxima geração, no sentido de preservar a melhor solução encontrada até o momento, já que quando os indivíduos sofrem a ação dos operadores genéticos, algumas informações importantes podem vir a ser perdidas [12].

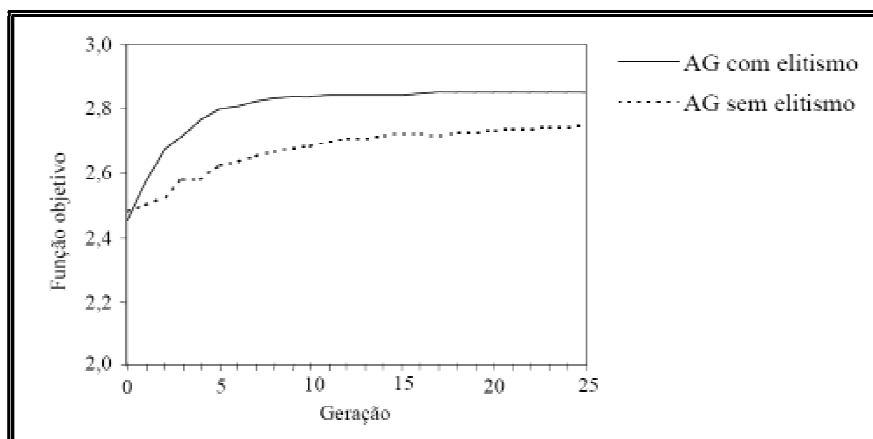


Figura 20 - Desempenho de um Algoritmo Genético com e sem Elitismo [12]

#### 4.3.5 Função de Aptidão

A Função de Aptidão é uma função matemática responsável por medir a qualidade das soluções, ou seja, qualificar se determinado indivíduo representa uma possível solução para o problema que está a ser resolvido.

Dependendo do método de seleção que é utilizado, a Função de Aptidão precisa ser normalizada, já que em métodos como o Roda Roleta, por exemplo, não são aceites valores negativos [12].

### **4. 3. 6 População Inicial**

A geração da população inicial de um Algoritmo Genético consiste em criar-se a primeira população de indivíduos em que serão aplicados os passos seguintes do algoritmo.

A forma mais usada de geração da população inicial é uma geração aleatória de indivíduos, e, geralmente, esse método produz bons resultados. Porém, se uma geração de indivíduos muito pequena for gerada aleatoriamente, é provável que algumas regiões do espaço de pesquisa não venham a ser representadas.

Uma maneira de se tentar resolver este problema é gerar uma população mais uniforme, com pontos igualmente espaçados. Outra alternativa é gerar metade da população aleatoriamente e a outra metade é obtida através da inversão dos *bits* da primeira metade.

Existe também uma técnica chamada *seeding*, que consiste em utilizar soluções encontradas por outros métodos de otimização. Isso garante que a solução encontrada pelo AG não será pior que as soluções encontradas por estes outros métodos [12].

### **4. 3. 7 Critérios de Paragem**

Entende-se por critério de paragem o momento em que se deseja interromper a execução do algoritmo.

Existem vários critérios para serem seguidos, e os mais comuns serão apresentados a seguir:

- Número de gerações: quando o algoritmo atingir um número máximo de gerações, a execução do algoritmo é interrompida;
- Convergência: quando não ocorre uma melhoria de soluções por um longo número de iterações;
- Valor da Função Objetivo (para problemas de otimização): quando o valor da função objetivo é conhecido, o algoritmo é finalizado quando se encontra esse valor [12].

### **4. 3. 8 Parâmetros**

Num algoritmo genético vários parâmetros controlam o processo evolutivo. Esses parâmetros podem ser qualitativos ou quantitativos. A seguir, alguns desses tipos de parâmetros:

- Tamanho da população: do tipo quantitativo, diz respeito a quantos indivíduos farão parte da população a cada geração;
- Taxa de Cruzamento: também do tipo quantitativo, é a probabilidade dos indivíduos sofrerem a ação desse operador;
- Taxa de Mutação: é a probabilidade do conteúdo de um indivíduo ser modificado. Esse parâmetro também é dito do tipo quantitativo;

- Tipo de Cruzamento: é um parâmetro qualitativo. Nele se define qual tipo de Reprodução foi utilizada (1-ponto, N-pontos, média);
- Tipo de Seleção: também é um parâmetro qualitativo onde se tem o tipo de seleção utilizado no desenvolvimento do AG [12].

## 4.4 Exemplo de Aplicação dos Algoritmos Genéticos no problema do Despacho

Nesta secção serão apresentados dois exemplos de aplicação dos Algoritmos Genéticos no problema do Despacho Económico. No primeiro é implementado um AG de composição “simples” e a segunda é uma combinação entre o método Relaxação Lagrangeana (LR) e Algoritmos Genéticos, denominado por LRGGA.

### 4.4.1 Algoritmo Genético Simples

Os autores de [18] implementaram um algoritmo baseado na meta-heurística AG para resolver o problema do Despacho tendo em conta a carga e os limites de potência ativa produzida. O AG proposto produz uma combinação de potências ativas de cada gerador do sistema elétrico em teste. Foi usada a rede de teste de 14 barramentos do IEEE. Para cada cromossoma, foi resolvido o trânsito de potências pelo método rápido desacoplado, para que o atendimento da carga seja assegurado. A função de aptidão é o cálculo do custo de produção total tendo em consideração todos os geradores presentes, como se pode verificar pela expressão (5), onde cada gerador possui uma função de custo quadrática e  $ng$  representa todos os geradores. O AG dá seguimento a partir da determinação do cromossoma que apresenta o menor custo de produção.

$$\sum_{i=1}^{ng} (a_i P g_i^2 + b_i P g_i + c_i) \quad (5)$$

As variáveis da expressão (5) são as mesmas que na expressão (2) presente neste documento, onde  $Pg_i$  é  $P_i$ . Apresenta-se, de seguida, o algoritmo AG aplicado na solução do Despacho Económico.

#### **Passo 1** - Especificações

População inicial;

Quantidade de geração;

Número de bits presente em cada gene;

$P_{gmin}$  e  $P_{gmax}$ ;

Taxa de cruzamento;

Taxa de mutação;

**Passo 2** - Gerar aleatoriamente uma população de acordo com as especificações.

**Passo 3** - Resolver o trânsito de potências pelo método rápido desacoplado para cada cromossoma. Calcular a função aptidão

conforme a equação acima exposta. Determinar o menor valor do custo total, mantendo tais valores para a próxima geração.

**Passo 4** - Selecionar o número de indivíduos para serem cruzados.

**Passo 5** - Fazer o cruzamento e obter uma nova população;

**Passo 6** - Fazer a mutação dos indivíduos cruzados;

**Passo 7** - Retornar ao Passo 3 até que seja atingido o número máximo de gerações.

Ainda segundo os mesmos autores, esta metodologia mostrou-se bem robusta na medida em que se obteve a mesma solução final para diferentes inicializações. Contudo, a dimensão da rede de teste utilizada não permite concluir que este algoritmo apresente a mesma robustez e resultados satisfatórios quando aplicado numa rede de grande dimensão.

#### **4.4.2 LRGA**

O método Relaxação Lagrangeana resolve o problema do Despacho por "relaxamento" ou ignorando temporariamente as restrições de acoplamento e resolve o problema como se este não existisse. O processo de decomposição LR, com base na teoria de otimização dual, gera um problema dividido por integrar algumas restrições de acoplamento para a função objetivo, através de "fatores de penalização", que são funções da violação de restrição [13].

Os "fatores de penalização", referido como multiplicadores de Lagrange, são determinados iterativamente. Em vez de resolverem o problema primordial, pode resolver-se o dual, maximizando a função Lagrangeana em relação aos multiplicadores de Lagrange, minimizando com respeito à variável de controlo do Despacho [13].

O processo de decomposição LR depende das estimativas iniciais dos multiplicadores de Lagrange e do método usado para atualizar os multiplicadores. Outra dificuldade com os métodos baseados em LR é que o desempenho computacional é muito dependente do método pelo qual os multiplicadores de Lagrange são atualizados. Atualmente, a maioria das técnicas usadas para estimar os multiplicadores de Lagrange contam com um algoritmo de sub-gradiente ou heurística [13].

O método Relaxação Lagrangeana e Algoritmos Genéticos (LRGA) incorpora Algoritmos Genéticos e Relaxação Lagrangeana para atualizar os multiplicadores de Lagrange e melhorar o desempenho do método LR. Os Algoritmos Genéticos combinam a natureza adaptativa da genética natural, ou os procedimentos a evolução de órgãos com otimizações funcionais. Por simulação de "sobrevivência do mais apto" de evolução "Darwiniana" entre cromossomas, o cromossoma ótimo (solução) é procurado pela troca de informações ao acaso. Os três operadores principais associados ao AG são reprodução, *crossover* e mutação [13].

O método LRGA consiste num ciclo de duas fases. A primeira fase é a busca de um mínimo de restrições da função Lagrangeana sob constante dos multiplicadores de Lagrange por

dois estados de programação dinâmica. A segunda fase é a maximização da função Lagrangeana com relação aos multiplicadores de Lagrange ajustadas por Algoritmos Genéticos. [13]

A expressão (6) representa a formulação do problema do Despacho deste método.

$$\begin{aligned} \min L(X, P, \lambda, \mu) \\ = \sum_{i=1}^N \min \sum_{h=1}^H [F_i(P_{ih}) + ST_i(1 - X_{i(h-1)}) - \lambda^h P_{ih} - \mu^h P_{imax}] X \\ + \sum_{h=1}^H (\lambda^h D_h + \mu^h D_h + \mu^h R_h) \end{aligned} \quad (6)$$

Tendo em conta a função objetivo, representada pela expressão acima apresentada, o algoritmo do LRGA para o problema do Despacho é descrito da seguinte forma:

**Passo 1:** Inicializar os parâmetros como o tamanho da população, a taxa de mutação, a taxa de *crossover*, a produção máxima, o intervalo de dualidade, etc.;

**Passo 2:** Inicializar a população de cromossomas  $\lambda$  e  $\mu$  (multiplicadores de Lagrange);

**Passo 3:** Enquanto (energia produzida < energia máxima produzida ou o intervalo de dualidade é maior que um determinado limite) Fazer {descodificar cada um dos cromossomas para valores normalizados  $\lambda^h_{\text{decode}}$  e  $\mu^h_{\text{decode}}$ ; converter  $\lambda^h_{\text{decode}}$  e  $\mu^h_{\text{decode}}$  para os atuais  $\lambda^h$  e  $\mu^h$ };

**Passo 4:** Resolver o mínimo de restrições da função Lagrangeana de cada unidade para obter  $P_{ih}$  e  $X_{ih}$  para  $h = 1...T$ ;  $i = 1...N$ ; usando dois estados de programação dinâmica;

**Passo 5:** Calcular o dual usando os valores obtidos de  $P_{ih}$  e  $X_{ih}$ ;

$$\begin{aligned} q(\lambda, \mu) = \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^N [F_i(P_{ih}) + ST_{i(h-1)}] X_{ih} \\ + \sum_{h=1}^H \lambda^h (D_h - \sum_{i=1}^N P_{ih}) + \sum_{h=1}^H \mu^h (D_h + R_h - \sum_{i=1}^N P_{imax} X_{ih}) \end{aligned} \quad (7)$$

**Passo 6:** Usando  $X_{ih}$  para resolver o Despacho Económico para obter  $P^*_{ih}$ . Calcular o valor primal;

$$J^* = \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^N [F_i(P^*_{ih}) + ST_i(1 - X_{i(h-1)})] X_{ih} \quad (8)$$

**Passo 7:** Calcular o intervalo de dualidade relativo;

$$\varepsilon = \frac{J^* - q}{q} \quad (9)$$

**Passo 8:** Calcular a função de *fitness* ou função de aptidão (FIT);

$$FIT = \frac{1}{1 + K\left(\frac{F_{max}}{F_r} - 1\right)} \quad (10)$$

**Passo 9:** Posicionar os cromossomas de acordo com o seu FIT;

**Passo 10:** Selecionar os parentes mais aptos para reprodução;

**Passo 11:** Aplicar a mutação e o *crossover* para obter novos cromossomas a fim de maximizar a função Lagrangeana;

**Passo 12:** Energia produzida = energia produzida +1;} Fim Enquanto

**Passo 13:** mostrar a solução final.

Para conhecer em detalhe a simbologia utilizada na formulação do problema do Despacho deste método recomenda-se a leitura da referência [13].

O LRGA é uma combinação do método de Relaxação Lagrangeana com Algoritmos Genéticos que incorporou este último com a finalidade de atualizar os multiplicadores de Lagrange e melhorar o desempenho do método LR. A vantagem do uso de multiplicadores de Lagrange normalizados, em vez de unidades de *on/off* de estado como parâmetros de codificação, é que o número de bits do cromossoma será totalmente independente do número de unidades e apenas dependente do número de horas. Isto é particularmente atraente em sistemas de larga escala. Os testes numéricos e os resultados dos autores deste método mostram que é possível encontrar uma solução ótima para o problema do Despacho [13].

## 4.5 Particle Swarm Optimization

Antes de se iniciar a explicação sobre a meta-heurística Otimização por Enxame de Partículas ou *Particle Swarm Optimization*, importa entender o conceito de inteligência de enxame ou *swarm intelligence*.

*Swarm Intelligence*, ou inteligência de enxame, é o termo utilizado para designar sistemas de inteligência artificial onde o comportamento coletivo dos indivíduos numa população causa simples soluções coerentes ou padrões a surgir [14].

O termo "enxame", ou população, é utilizado de forma genérica para se referir a qualquer coleção estruturada de agentes capazes de interagir. O exemplo clássico de um enxame é um enxame de abelhas. Entretanto, de maneira similar podemos considerar também que

outros sistemas, como por exemplo, um bando de pássaros, onde os agentes são os pássaros, ou até um engarrafamento, onde os agentes são os carros. A noção de enxame sugere um aspecto de movimento coletivo no espaço [14].

Logo, pode dizer-se que as interações coletivas de todos os agentes dentro do sistema levam, muitas vezes, a algum tipo de comportamento ou inteligência coletiva. Este tipo de inteligência artificial inclui qualquer tentativa de projetar algoritmos ou dispositivos distribuídos de solução de problemas sem ter um controlo centralizado, inspirado no comportamento coletivo de agentes sociais e outras sociedades animais [14].

A inteligência coletiva é uma propriedade de sistemas compostos por agentes não (ou pouco) inteligentes com capacidade individual limitada, capazes de apresentar comportamentos coletivos inteligentes. Tais comportamentos seguem as seguintes propriedades:

- Proximidade: os agentes devem ser capazes de interagir;
- Qualidade: os agentes devem ser capazes de avaliar seus comportamentos;
- Diversidade: permite ao sistema reagir a situações inesperadas;
- Estabilidade: nem todas as variações ambientais devem afetar o comportamento de um agente;
- Adaptabilidade: capacidade de se adequar a variações ambientais [14].

Pode agora iniciar-se a abordagem à meta-heurística *Particle Swarm Optimization*. O algoritmo de otimização por enxame de partículas é um tipo de inteligência de enxame inspirado no comportamento de bandos de pássaros. A busca por alimentos e a interação entre aves ao longo do voo são idênticas a um mecanismo de otimização. Neste caso, a área sobrevoada é equivalente ao espaço de pesquisa e encontrar o local com comida corresponde a encontrar a solução ótima. O algoritmo é feito pelos pássaros (partículas) que fazem uso da sua experiência e da experiência do próprio bando para encontrar a melhor região do espaço de pesquisa [14].



**Figura 21 - Bando de aves com comportamento coordenado [28]**

Em 1995, James Kennedy e Russel Eberhart, inspirados no comportamento social dos pássaros estudados por Heppner, desenvolveram esta técnica de otimização. Originalmente foi desenvolvida para problemas de otimização com variáveis contínuas [19].

Cada partícula mantém informação das coordenadas associadas à melhor solução encontrada por ela até então. Este valor é denominado de “*personal best*” (*pbest*). A partícula também tem acesso à informação relativa à melhor solução encontrada na sua vizinhança, denominado de “*global best*” (*gbest*). A ideia básica do PSO consiste em acelerar cada partícula na direção dos locais do *pbest* e *gbest*. O valor da aceleração varia aleatoriamente ao longo da pesquisa. A tabela 1 pretende fazer a analogia entre o PSO e o bando de pássaros [19].

Tabela 1 - Analogia entre o PSO e o bando de pássaros [19]

| <b>Termo</b>           | <b>Significado</b>   |
|------------------------|--|
| <b>Partícula</b>       | Pássaro  |
| <b>Enxame</b>          | Bando de Pássaros  |
| <b>Espaço de Busca</b> | Área sobrevoada pelos pássaros   |
| <b>Posição</b>         | Localização de cada pássaro durante o voo                              |
| <b>Solução Ótima</b>   | Localização do pássaro onde o ninho ou alimento foi encontrado         |
| <b><i>Fitness</i></b>  | Função de avaliação  |
| <b><i>Pbest</i></b>    | Melhor posição conhecida pelo pássaro (experiência individual)         |
| <b><i>gbest</i></b>    | Melhor posição conhecida pelo bando de pássaros (experiência coletiva) |

O algoritmo de técnica de otimização por enxame de partículas possui uma população de partículas, onde cada partícula representa uma possível solução para o problema de otimização. Cada partícula do exame pode ser representada por um objeto que possui associado a ele um “vetor posição” (posição da partícula no espaço de pesquisa) e um “vetor velocidade” (responsável por guiar as mudanças da posição das partículas durante a execução do processo) [19].

As partículas percorrem o espaço de pesquisa, tendo as suas velocidades atualizadas dinamicamente de acordo com o histórico das experiências individuais e coletiva de todo o enxame. Logo, a evolução do algoritmo PSO está associada à trajetória percorrida pelo enxame e ao tempo gasto para encontrar a melhor solução do problema [19].

O algoritmo básico de otimização por enxame de partículas (algoritmo PSO) pode ser descrito resumidamente utilizando os seguintes passos: dada uma população inicial de partículas, atualiza-se o vetor posição a partir do vetor velocidade de cada partícula até que se atinja o critério de paragem pré-definido. A figura 22 apresenta o fluxograma do referido algoritmo [19].

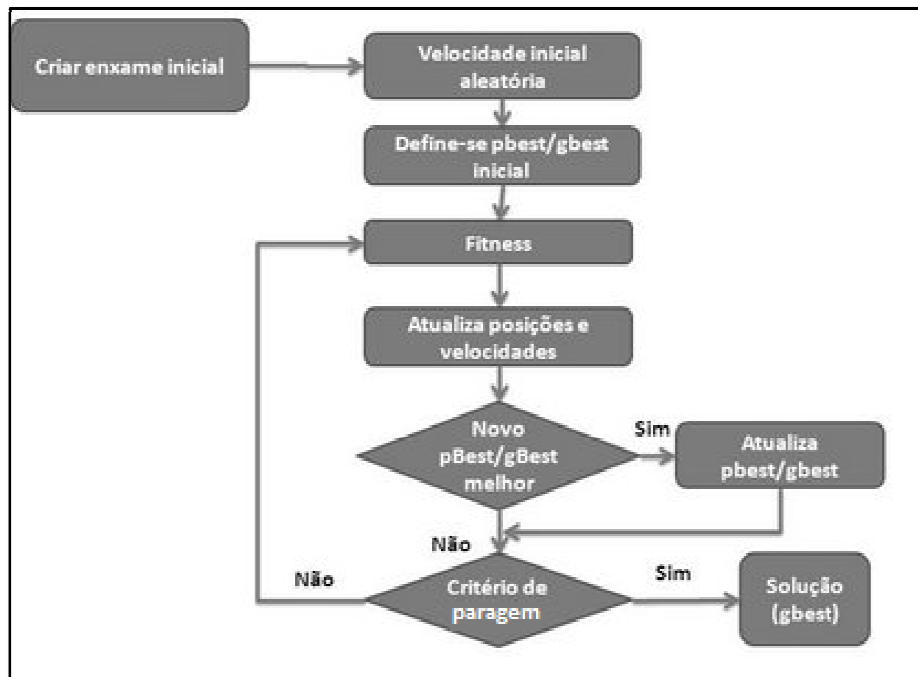


Figura 22 - Fluxograma do algoritmo básico do PSO [19]

O enxame é inicializado com os valores dos vetores de velocidade e posição gerados aleatoriamente. A primeira iteração do algoritmo inicia com a atribuição de valores aos parâmetros da equação de velocidade. Definem-se então os valores referentes ao enxame, constantes e o critério de paragem. Tendo já definido os valores para posição das partículas e suas respectivas velocidades, aplica-se o cálculo do *fitness* a cada partícula dessa população. Conforme explicado anteriormente, o *fitness* avalia o desempenho da partícula. Com as partículas do enxame avaliadas, extraem-se os *pbest* e o *gbest*. De seguida, as velocidades e as posições de cada partícula do enxame são atualizadas. Com as novas posições, caso o critério de paragem tenha sido atingido, a solução do problema encontrada é apresentada. Caso contrário, aplica-se novamente o *fitness* a este enxame, atualizam-se os valores de *pbest* e *gbest*, caso seja apresentada uma solução melhor, seguido da velocidade e posição de cada partícula do enxame. Isto repete-se até que o critério de paragem seja atingido [19].

Para determinar o critério de paragem do algoritmo PSO podem ser levadas em consideração duas variáveis. Uma é pelo número de iterações, ou seja, quando o algoritmo chega ao fim porque atingiu a última iteração. A outra é pela função de avaliação (*fitness*), ou seja, quando o algoritmo chegou ao fim porque alcançou um valor pré-definido para a função [19].

#### 4.6 Exemplo de Aplicação do *Particle Swarm Optimization* no problema do Despacho

Segundo os autores de [15] o PSO é um dos métodos que se pode implementar no Despacho de forma a obter os benefícios dos custos mínimos de geração, confiança máxima, melhores condições operacionais e operação sobre situações de emergência. Neste contexto, o

problema de otimização do Despacho de energia elétrica é relevante para ter em atenção os requisitos de qualidade e eficiência na geração de energia elétrica. Este surgiu como uma alternativa aos Algoritmos Genéticos [15].

O PSO, assim como os Algoritmos Genéticos, não trabalha diretamente com restrições. Contudo, através de uma formulação apropriada do problema de otimização, pode-se fazer com que o algoritmo manipule restrições [15].

A versão original do *Particle Swarm Optimization* opera em valores reais, segundo a qual o termo híbrido é destinado à combinação do PSO com Algoritmos Genéticos. No entanto, neste exemplo de aplicação e segundo a referência utilizada, irá ser apresentado um algoritmo “híbrido” do PSO, o *Hybrid Particle Swarm Optimization* (HPSO). Neste caso, “híbrido” serve para destacar o conceito da mistura do PSO de valor real, para resolver o Despacho Económico, com o PSO de valor binário, para resolver o Escalonamento da Produção, de modo executar de forma independente e simultaneamente [15].

De seguida, será apresentado o pseudocódigo proposto pelos autores do artigo [15], omitindo nesta dissertação a formulação do problema para que a abordagem a esta meta-heurística não se torne excessivamente detalhada. Contudo, no caso de existir a necessidade de conhecer ao pormenor o trabalho dos autores, aconselha-se a consulta do referido artigo.

Apresenta-se agora o pseudocódigo da ferramenta de otimização HPSO proposta para resolver o problema do Despacho Económico.

```
Do while exigência não é conhecida
If Energia total gerada < Exigida then
For i = 1 to MaxUnit
    Muda o gerador com máxima prioridade para operar
    consequentemente à máxima capacidade. Uma vez a energia
    total gerada ser maior que a exigida, menor o erro do
    gerador corrente em ordem a conhecer exatamente a
    exigência.
    Verifica a variedade; se exceder  $P_{max}$  ou inferior a  $P_{min}$ ,
    reinicia aleatoriamente dentro dos limites de potência
    do gerador.
Next i
Else if Energia total > Exigida then
For i = MaxUnit até 1 passo -1
    Grupo gerador com menor prioridade para operar à
    capacidade mínima de conformidade. Uma vez que a
    potência total gerada é menor, então a procura; adicione
    o erro para o atual gerador, para exatamente responder à
    exigência. Verifique o intervalo, se exceder  $P_{max}$  ou
    inferior a  $P_{min}$  reinicializar aleatoriamente dentro dos
    limites de potência de um gerador.
Next i
End if
Loop
```

Para concluir, o HPSO é uma nova abordagem na resolução do problema do Despacho que pode gerar ótimos resultados, principalmente por causa da sua natureza intrínseca de atualizações de posições e velocidades. O total da função objetivo é a soma dos objetivos e restrições, que são o custo do combustível, custos de arranque, reserva girante e potência solicitada. Para encontrar uma melhor solução, a energia produzida por N unidades geradoras é constantemente verificada para que as partículas factíveis a satisfazer a potência solicitada sejam sempre encontradas. Isto reduz a pressão da violação da restrição do total da função objetivo. Os tempos são tratados separadamente forçando o gerador a ligar ou desligar de forma a cumprir a restrição. Os resultados obtidos pelos autores deste método demonstraram que o HPSO é um método muito competente para resolver problemas do Despacho Económico.

## 4.7 Simulated Annealing

O *Simulated Annealing* (SA) é baseado nos resultados da termodinâmica. Tal como o próprio nome indica, o algoritmo explora uma analogia entre o modo como um metal arrefece e tende para uma estrutura cristalina de energia mínima e a procura por um mínimo num sistema qualquer [16].

O SA é usualmente referido como a mais antiga das meta-heurísticas e é seguramente um dos primeiros algoritmos a incorporar uma estratégia para evitar mínimos locais. As origens deste algoritmo encontram-se na mecânica estatística (algoritmo de *Metropolis*) e este foi primeiramente apresentado como um algoritmo de pesquisa para problemas combinatorios por Kirkpatrick. A ideia fundamental é a de permitir que a pesquisa possa evoluir para soluções de pior qualidade do que a solução atual, a fim de escapar de ótimos locais. Neste algoritmo, a probabilidade de fazer um tal movimento é diminuída à medida que a procura é realizada [16].

O princípio base do *Simulated Annealing* está relacionado com a seguinte observação física do comportamento da matéria: considerando que um material é levado a sua temperatura de fusão, então as suas moléculas ficam num estado muito desordenado e agitam-se livremente como e ilustrado na figura 23 [16].

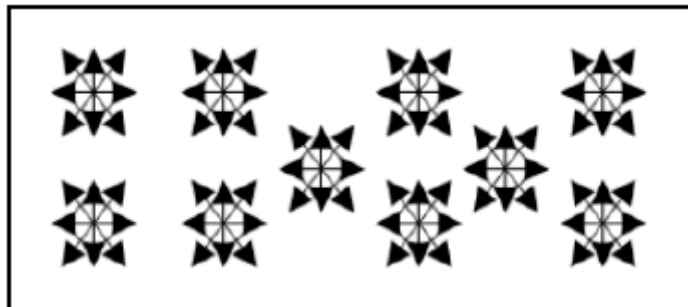


Figura 23 - Estado desordenado das moléculas da matéria em fusão [16]

Se arrefecermos bruscamente a amostra, o nível de energia baixa rapidamente e as moléculas vão encontrar-se num estado ainda muito desordenado, no qual o nível de energia

é muito superior ao de um cristal perfeito. Este estado, dito amorfo, está representado na figura 24, sendo menos estável que o estado ordenado na figura 25 [16].

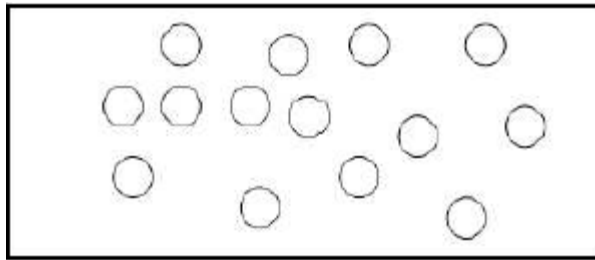


Figura 24 - Estado desordenado das moléculas devido a um arrefecimento rápido [16]

Contrariamente, se arrefecermos a amostra de forma lenta e gradual, as moléculas adquirem uma estrutura cristalina estável que tem um nível de energia mais reduzido como apresentado na figura 25 [16].

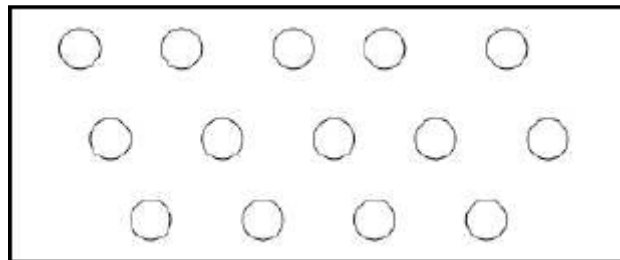


Figura 25 - Estado ordenado das moléculas devido a um arrefecimento lento [16]

Sendo assim, a maior vantagem do SA resulta da possibilidade de evitar mínimos locais, particularmente nos casos em que as técnicas tradicionais de otimização falham. O algoritmo emprega, para isso, uma pesquisa aleatória que, por vezes, aceita vizinhos cuja energia seja mais elevada. Ou seja, em algumas iterações, o SA aceita degradar a função de avaliação em vez de a reduzir. Entretanto, uma característica interessante deste está associada ao facto da probabilidade de se aceitar um vizinho de maior energia decresce com o tempo, o que se implementa com um parâmetro, a temperatura, que decresce ao longo do processo iterativo [16].

## 4.8 Exemplo de Aplicação do *Simulated Annealing* no problema do Despacho

A título de exemplo, irá mostrar-se agora um algoritmo utilizado para resolver o problema do Despacho Económico recorrendo à meta-heurística *Simulated Annealing*.

Segundo os autores do artigo [19] foi desenvolvido um algoritmo para resolver o problema do Despacho Económico a curto prazo. O algoritmo proposto é consideravelmente rápido e fornece soluções fiáveis próximas da solução ótima.

Na figura 26 é apresentado o fluxograma do algoritmo proposto.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Para mais informações aconselha-se a consulta da referência [19]

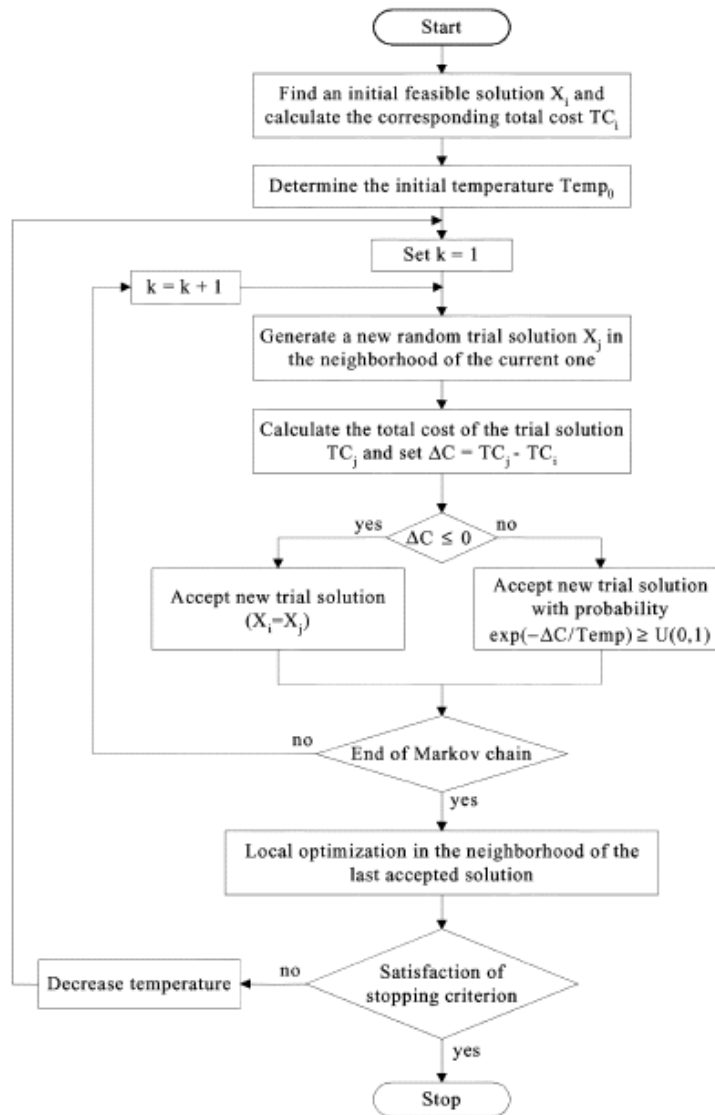


Figura 26 - Fluxograma do algoritmo Simulated Annealing desenvolvido

O algoritmo utiliza uma programação de arrefecimento simples, fazendo uma abordagem eficaz para a geração aleatória da solução inicial. A temperatura inicial do algoritmo é determinada de uma forma que a grande percentagem de transições propostas nas fases iniciais do algoritmo SA são aceites. As novas soluções viáveis necessárias em todas as fases do algoritmo são obtidas através do uso alternado de três mecanismos diferentes, que contribuem para uma exploração mais extensa do espaço de solução. A implementação de uma técnica de otimização local em cada temperatura acelera a convergência do algoritmo.

O algoritmo foi testado num sistema com mais de 100 unidades geradoras e provou ser robusto, capaz de resolver grandes problemas, tendo em consideração as restrições de taxa de rampa, com um tempo de execução razoável.



---

# CAPÍTULO V

## Simulador *Pool* Simétrico

---

## **5.1 Aplicação Desenvolvida – Simulador *Pool* Simétrico**

Neste capítulo apresentar-se-á de forma detalhada o modelo matemático da aplicação desenvolvida que permite simular o funcionamento de um mercado com modelo *Pool* Simétrico, adotando um modelo DC de trânsito de potências. Serão ainda descritos os procedimentos que tornaram possível a implementação de toda a aplicação, recorrendo ao *software* MATLAB. O simulador foi testado utilizando a rede de teste de 14 barramentos do IEEE, a qual sofreu algumas alterações face à sua versão original como se poderá verificar no seguimento deste capítulo.

A formulação matemática do problema foi feita com base num leilão monopériodo, onde cada período é considerado de forma isolada, recebendo ofertas simples de venda e aquisição de energia elétrica, compostas pela quantidade e preço de energia a transacionar, tendo em conta as restrições de equilíbrio da rede, capacidade de produção e limite de trânsito de potências das linhas. Na aplicação simulam-se as ações presentes no mercado diário. Este mercado, como parte integrante do mercado de produção de energia elétrica, tem por objetivo levar a cabo as transações de energia elétrica para o dia seguinte mediante a apresentação das ofertas por parte dos agentes do mercado habilitados para o efeito.

O funcionamento do simulador tentou ser o mais amigável possível do utilizador. Sucintamente, devem inserir-se as ofertas de compra e venda de energia elétrica e os contratos bilaterais físicos num ficheiro Excel com o nome “Ofertas”. De seguida, e começando por abrir a aplicação, no bloco que diz respeito ao Operador de Mercado deve-se clicar no botão “Simulação do *Pool*” e aguardar que os resultados do cruzamento das ofertas inseridas previamente sejam mostrados. De seguida deve-se clicar no botão “Benefício Social Líquido”.

Depois do Operador de Mercado (OM) ter executado a sua função passa-se agora ao bloco do Operador de Sistema. Começa-se por calcular o trânsito de potências a partir do despacho provisório resultante do OM, clicando no botão “Trânsito de Potências”. De seguida, procede-se à verificação da violação de restrições carregando no botão “Validação Técnica”. Caso não ocorra qualquer violação de restrição o despacho que segue é o provisório. No caso da ocorrência de violação de restrições técnicas deve proceder-se à otimização do despacho, recorrendo à meta-heurística Algoritmos Genéticos, bastando para isso clicar no botão “Otimizar Despacho” e aguardar que os resultados sejam mostrados. Neste seguimento, e após a otimização do despacho, procede-se à correção das ofertas previamente inseridas e faz-se um novo cruzamento de ofertas de compra e venda de energia, clicando no botão “Correção do *Pool*”. Por último, e apenas para verificação da boa otimização, volta-se a calcular o trânsito de potências para o novo despacho (Despacho Ótimo) e verifica-se se alguma restrição é violada.

Em qualquer momento da simulação podem-se consultar os dados da rede, as instruções de utilização da aplicação, efetuar nova simulação e sair da aplicação carregando nos botões apropriados na barra de ferramentas criada para o efeito.

## 5.2 Fluxograma Genérico do Simulador

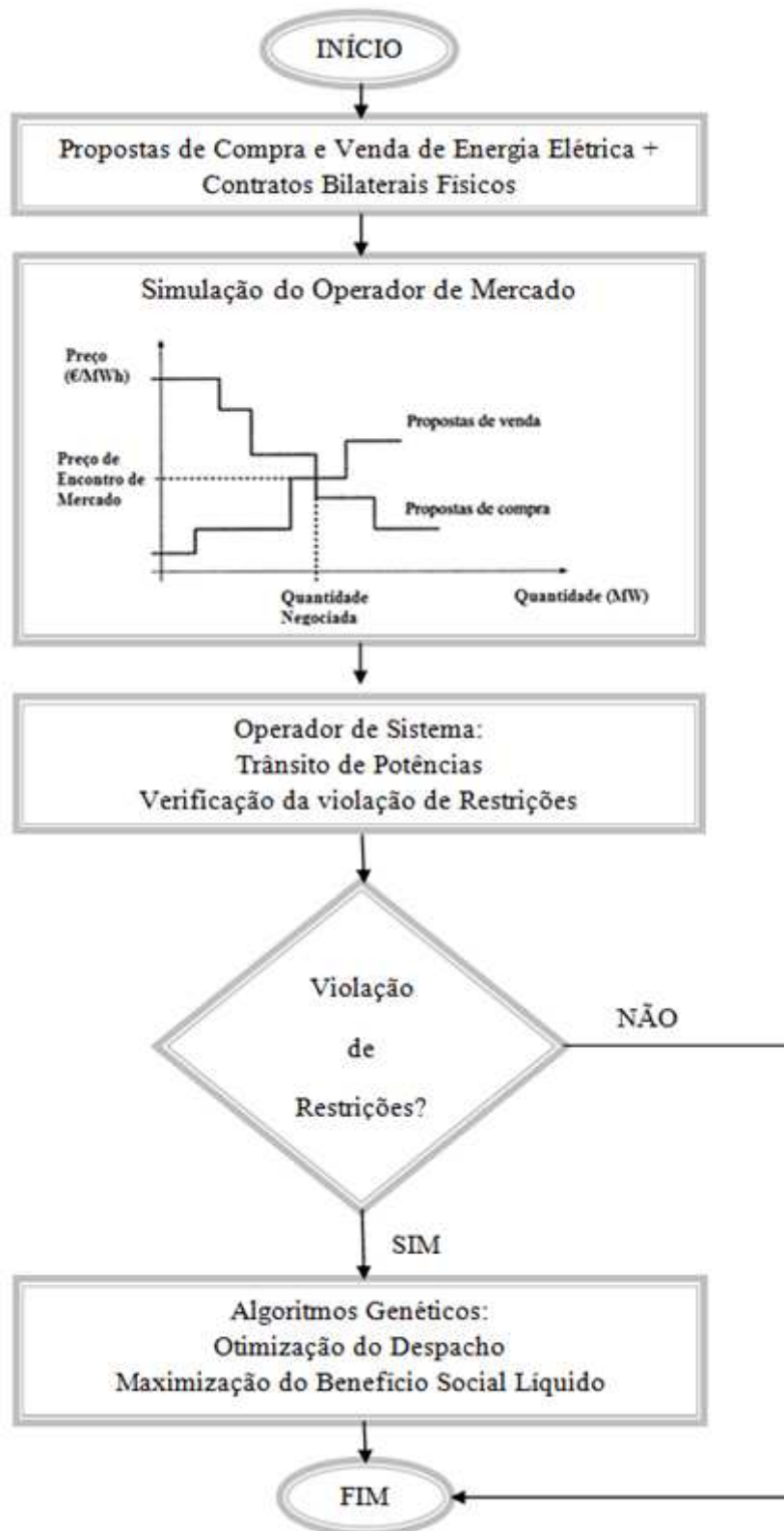


Figura 27 - Fluxograma genérico do simulador Pool Simétrico

### 5.3 Formulação Matemática do Problema

O problema deste trabalho passa por simular o funcionamento de um mercado cujo modelo seja *Pool* Simétrico, onde as transações de energia elétrica ocorrem no mercado diário. Antes da ocorrência dessas transações são efetuados leilões. Na literatura são comumente referenciados três tipos de leilões: monopériodo, multipériodo e *walrasiano*. Nesta formulação apenas foram consideradas as ofertas realizadas para uma determinada hora do dia (leilão monopériodo), onde os períodos são considerados de forma isolada.

O leilão monopériodo considera as horas uma a uma e por esse motivo não tem em conta as restrições intertemporais que poderão afetar os produtores. Em cada leilão horário é maximizado o benefício social líquido (no pressuposto de que as propostas dos produtores refletem adequadamente os custos marginais de produção), correspondente à atividade dos consumidores e dos produtores. Uma vez que este tipo de leilão não considera as restrições intertemporais dos produtores, o Operador de Mercado será sempre forçado a executar um processo de correção *a posteriori* para que as referidas restrições sejam satisfeitas. Contudo, as restrições como a indivisibilidade do 1º escalão das ofertas de venda de energia, remuneração mínima dos geradores, variação máxima da produção dos geradores, entre outras, não foram levadas em consideração na formulação deste problema por serem parte integrante do lançamento de ofertas complexas.

O leilão monopériodo deste trabalho foi formulado mediante o seguinte problema de otimização:

$$\max \quad Z = \sum_{i=1}^{N_D} c_{D_i} \times P_{D_i} - \sum_{j=1}^{N_G} c_{G_j} \times P_{G_j} \quad (11)$$

sujeito a:

$$\sum_{i=1}^{N_D} P_{D_i} = \sum_{j=1}^{N_G} P_{G_j} \quad (12)$$

$$0 \leq P_{D_i} \leq P_{D_i}^{max}, \quad \forall i \quad (13)$$

$$0 \leq P_{G_j} \leq P_{G_j}^{max}, \quad \forall j \quad (14)$$

$$-P_{ik} \leq P_{ik} \leq P_{ik}^{max} \quad (15)$$

Sendo,

$P_{D_i}$  valor da proposta de compra i;

$P_{G_j}$  valor da proposta de venda j;

$P_{D_i}^{max}$  valor máximo da proposta de compra i;

$P_{G_j}^{max}$  valor máximo da proposta de venda j;

|                |  |
|----------------|--|
| $c_{D_i}$      | preço da proposta de compra $i$ ;  |
| $c_{G_j}$      | preço da proposta de venda $j$ ;   |
| $N_D$          | número total de propostas de compra;   |
| $N_G$          | número total de propostas de venda;  |
| $P_{ik}$       | trânsito de potência ativa na linha que interliga os nós $i$ e $k$ , em MW;                    |
| $P_{ik}^{max}$ | limite superior do trânsito de potência ativa na linha que interliga os nós $i$ e $k$ , em MW. |

A função objetivo  $Z$ , expressão (11), corresponde à diferença entre os somatórios dos valores financeiros associados às propostas de compra e venda aceites. O primeiro somatório é referente às propostas de compra apresentadas e aceites pelo mercado, multiplicadas pelos seus respetivos preços de aquisição. O segundo somatório é referente às propostas de venda apresentadas e aceites pelo mercado, multiplicadas pelos seus respetivos preços de venda. A diferença entre os dois somatórios corresponde ao Benefício Social Líquido caso as propostas de venda sejam traduzidas pelos seus preços marginais de produção e está associada à área existente entre a curva agregada das propostas de compra e de venda de energia elétrica aceites.

A primeira restrição, expressão (12), diz respeito ao equilíbrio de mercado. A igualdade entre o valor total de produção e o valor total do consumo terá que cumprir-se.

A segunda restrição, expressão (13), indica o limite superior das propostas de compra e especifica que estas devem ser positivas.

A terceira restrição, expressão (14) indica o limite superior das propostas de venda e especifica que estas devem ser positivas.

A quarta restrição, expressão (15) indica os limites de trânsito de potência ativa nas linhas elétricas da rede.

## **5.4 Rede de Teste**

A rede de teste utilizada foi a rede de 14 barramentos do IEEE. Esta foi alvo de algumas alterações relativamente à sua versão original. Os compensadores síncronos foram substituídos por grupos geradores e o shunt capacitivo presente no barramento 9 foi desprezado. A razão para esta alteração advém do facto de se passar a ter cinco produtores de energia elétrica ao invés de ter apenas dois, como na versão original. Assim, em termos de simulação, haverá um maior número de lançamento de ofertas de venda e retratará mais fielmente a realidade. Na figura 28 está representado o esquema unifilar da rede.

### 5. 4. 1 Esquema Unifilar

O sistema elétrico é constituído por 14 barramentos, 20 ramos, 5 nós produtores e 11 centros consumidores.

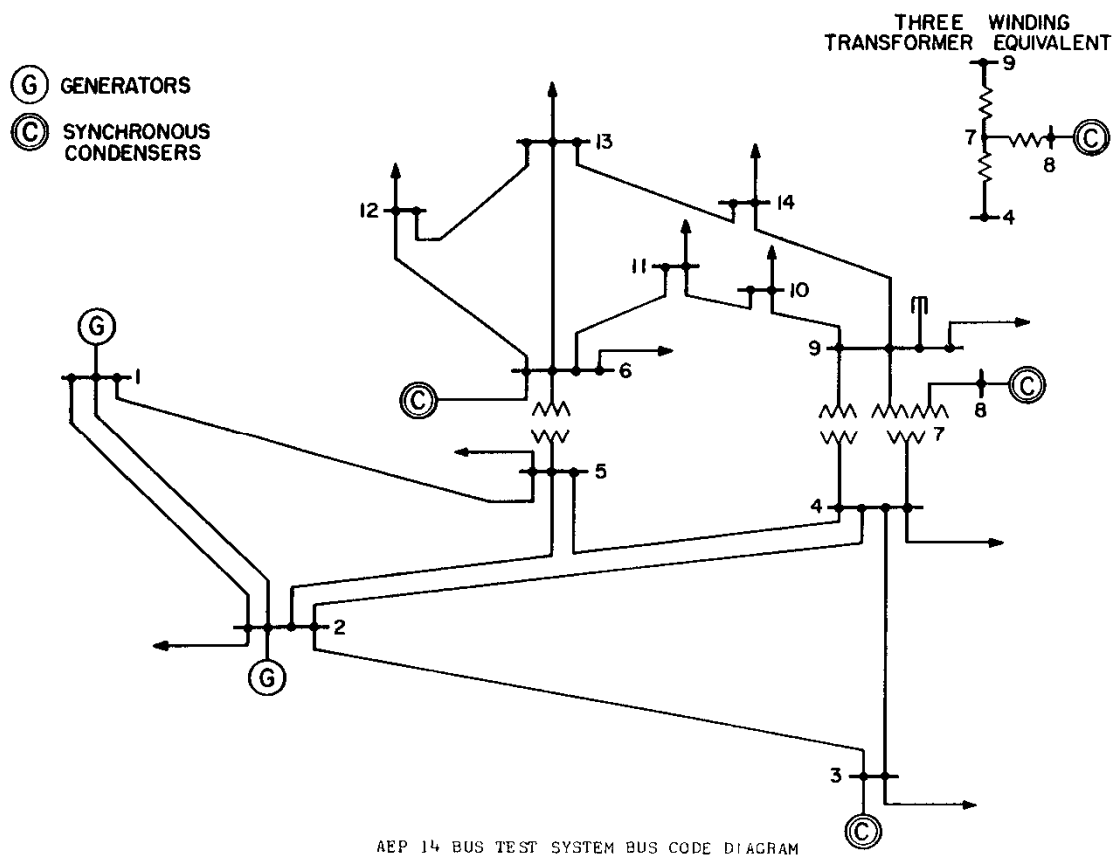


Figura 28 - Esquema unifilar da rede de teste de 14 barramentos do IEEE

### 5. 4. 2 Dados da Rede

Potência de base:  $S_b = 100$  MVA

Tabela 2 - Características das linhas

| Barramento de Origem | Barramento de Chegada | Resistência (p.u.) | Reatância (p.u.) | Admitância Transversal | $P_{\text{máx}}$ |
|----------------------|-----------------------|--------------------|------------------|------------------------|------------------|
| 1                    | 2                     | 0,01938            | 0,05917          | 0,0528                 | 150              |
| 1                    | 5                     | 0,05403            | 0,22304          | 0,0492                 | 150              |
| 2                    | 3                     | 0,04699            | 0,19797          | 0,0438                 | 150              |
| 2                    | 4                     | 0,05811            | 0,17632          | 0,034                  | 150              |
| 2                    | 5                     | 0,05695            | 0,17388          | 0,0346                 | 150              |
| 3                    | 4                     | 0,06701            | 0,17103          | 0,0128                 | 150              |
| 4                    | 5                     | 0,01335            | 0,04211          | 0                      | 150              |
| 4                    | 7                     | 0                  | 0,20912          | 0                      | 150              |
| 4                    | 9                     | 0                  | 0,55618          | 0                      | 150              |
| 5                    | 6                     | 0                  | 0,25202          | 0                      | 150              |

|    |    |         |         |   |     |
|----|----|---------|---------|---|-----|
| 6  | 11 | 0,09498 | 0,1989  | 0 | 320 |
| 6  | 12 | 0,12291 | 0,25581 | 0 | 320 |
| 6  | 13 | 0,06615 | 0,13027 | 0 | 320 |
| 7  | 8  | 0       | 0,17615 | 0 | 320 |
| 7  | 9  | 0       | 0,11001 | 0 | 320 |
| 9  | 10 | 0,03181 | 0,0845  | 0 | 320 |
| 9  | 14 | 0,12711 | 0,27038 | 0 | 320 |
| 10 | 11 | 0,08205 | 0,19207 | 0 | 320 |
| 12 | 13 | 0,22092 | 0,19988 | 0 | 320 |
| 13 | 14 | 0,17093 | 0,34802 | 0 | 320 |

Tabela 3 - Características dos barramentos

| Barramento | Tipo de Barramento | Tensão (p.u.) | Ângulo (°) | Produção Ativa (p.u.) | Carga Ativa (p.u.) |
|------------|--------------------|---------------|------------|-----------------------|--------------------|
| 1          | REF                | 1,06          | 0          | 2,324                 | 0                  |
| 2          | PV                 | 1,045         | 0          | 0,4                   | 0,9                |
| 3          | PV                 | 1,01          | 0          | 0                     | 0,9                |
| 4          | PQ                 | 1             | 0          | 0                     | 0,478              |
| 5          | PQ                 | 1             | 0          | 0                     | 0,076              |
| 6          | PV                 | 1,07          | 0          | 0                     | 0,8                |
| 7          | PQ                 | 1             | 0          | 0                     | 0                  |
| 8          | PV                 | 1,09          | 0          | 0                     | 0                  |
| 9          | PQ                 | 1             | 0          | 0                     | 0,295              |
| 10         | PQ                 | 1             | 0          | 0                     | 0,09               |
| 11         | PQ                 | 1             | 0          | 0                     | 0,035              |
| 12         | PQ                 | 1             | 0          | 0                     | 0,061              |
| 13         | PQ                 | 1             | 0          | 0                     | 0,65               |
| 14         | PQ                 | 1             | 0          | 0                     | 0,75               |

Tabela 4 - Características dos geradores

| Gerador | Barramento | $P_{\min}$ (MW) | $P_{\max}$ (MW) | $a$ (€/h) | $b$ (€/h.MW) | $c$ (€/h.MW <sup>2</sup> ) |
|---------|------------|-----------------|-----------------|-----------|--------------|----------------------------|
| 1       | 1          | 0               | 332,4           | -         | 20           | 0,043029                   |
| 2       | 2          | 0               | 140             | -         | 20           | 0,25                       |
| 3       | 3          | 0               | 100             | -         | 40           | 0,01                       |
| 4       | 6          | 0               | 100             | -         | 40           | 0,01                       |
| 5       | 8          | 0               | 100             | -         | 40           | 0,01                       |

Os coeficientes a, b e c da tabela 4 surgem da função quadrática de custo de combustível de um gerador, dada pela expressão (2).

Tabela 5 - Limite de trânsito de potências nas linhas

| LINHAS |         | Limite<br>Trânsito de<br>Potências |
|--------|---------|------------------------------------|
| Origem | Chegada |                                    |
| 1      | 2       | 150                                |
| 1      | 5       | 150                                |
| 2      | 3       | 150                                |
| 2      | 4       | 150                                |
| 2      | 5       | 150                                |
| 3      | 4       | 150                                |
| 4      | 5       | 150                                |
| 4      | 7       | 150                                |
| 4      | 9       | 150                                |
| 5      | 6       | 150                                |
| 6      | 11      | 320                                |
| 6      | 12      | 320                                |
| 6      | 13      | 320                                |
| 7      | 8       | 320                                |
| 7      | 9       | 320                                |
| 9      | 10      | 320                                |
| 9      | 14      | 320                                |
| 10     | 11      | 320                                |
| 12     | 13      | 320                                |
| 13     | 14      | 320                                |

Admitiu-se como valor máximo de todas as cargas 100 MW.

## 5.5 Operador de Mercado

O Operador de Mercado (OM) pretende determinar, essencialmente, através de um algoritmo de encontro de mercado, o preço de mercado a pagar aos produtores e a ser pago pelos consumidores e as propostas de compra e venda de energia aceites.

O OM recebe as ofertas de compra, por parte dos distribuidores, comercializadores, consumidores qualificados e os agentes externos cuja participação esteja autorizada, e as ofertas de venda, por parte dos produtores que se comprometem a cumprir as regras de funcionamento do mercado e que assinam o correspondente contrato de adesão.

Depois de apresentadas as ofertas de venda e aquisição de energia, o OM procede à sua ordenação. As propostas de venda são ordenadas por ordem crescente de preços, as propostas de compra por ordem decrescente e ambas são representadas graficamente por uma curva, respetivamente. A intersecção das duas curvas correspondentes às propostas de venda e às propostas de compra permite obter um ponto em que a ordenada corresponde ao *Market Clearing Price*, ou Preço de Encontro de Mercado, e a abcissa à *Market Clearing Quantity*, ou Quantidade Negociada.

O Preço de Mercado corresponde ao preço da energia elétrica para o qual há ofertas de compra cujo preço oferecido é igual ou superior ao preço das ofertas de venda aceites. Corresponde também a um preço marginal, no sentido em que seria o preço a que se remuneraria uma unidade extra de energia se o valor da carga aumentasse uma unidade. Este preço corresponde ao preço oferecido pelo último gerador a ser despachado no *Pool*, assumindo este gerador um poder grande sobre o mercado, principalmente quando a diferença entre a capacidade de produção instalada e a carga da rede é reduzida. Assim, este tipo de organização de mercado funciona melhor quanto maior for o número de agentes, não existindo domínio do mercado por parte de nenhum deles.

Por último, é determinado o Despacho Provisório que consiste em determinar a quantidade de energia que cada gerador irá produzir.

Para melhor perceber a função do OM e as ações inerentes à sua atividade no simulador desenvolvido apresenta-se na figura 29 um fluxograma que traduz a forma como são identificados os produtores despachados e os consumidores aceites pelo *Pool* numa determinada hora do período de programação.

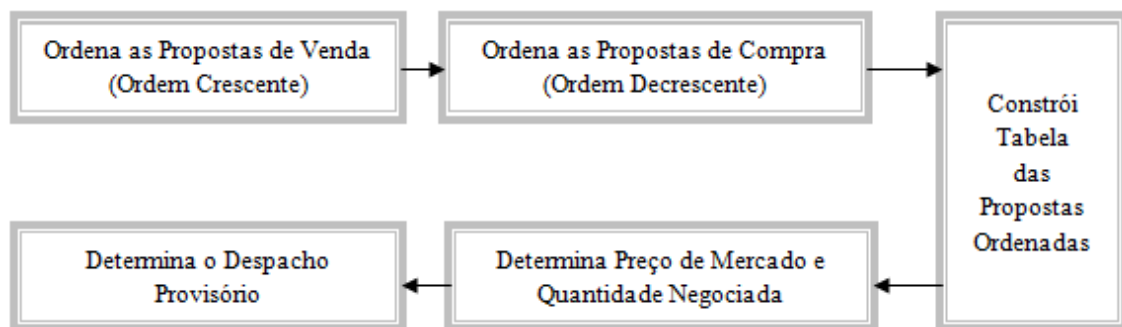


Figura 29 - Fluxograma das ações do Operador de Mercado

## 5.6 Operador de Sistema

No bloco do Operador de Sistema (OS) pretende-se fazer um estudo de trânsito de potências, de modo a obter as condições de operação em regime permanente do sistema de energia elétrica. Mais concretamente, dados os consumos e produções em cada nó do sistema, pretende-se conhecer os trânsitos de potência ativa nas linhas. Devido ao facto de ter sido utilizado o modelo DC de trânsito de potências, o trânsito de energia reativa, as perdas, as tensões, os seus módulos e fases foram desprezados. Mais abaixo, na secção 5.7, este processo será explicado com maior detalhe.

Atualmente, estes estudos constituem a base da análise de segurança do sistema. Em problemas de planeamento da exploração, os estudos de trânsitos de potência permitem simular o estado do sistema aquando da análise de cenários de produções e cargas.

Depois de determinado o trânsito de potências o OS verifica se alguma restrição técnica foi violada, neste caso a restrição de limite de trânsito de potências. Caso alguma restrição seja violada, procede-se à otimização do Despacho recorrendo à formulação da secção 5.3,

utilizando para isso a função *genetic algorithm* do MATLAB, e à correção das condições definidas previamente no *Pool*.

A figura 30 ajuda a perceber melhor as ações do Operador de Sistema no simulador.

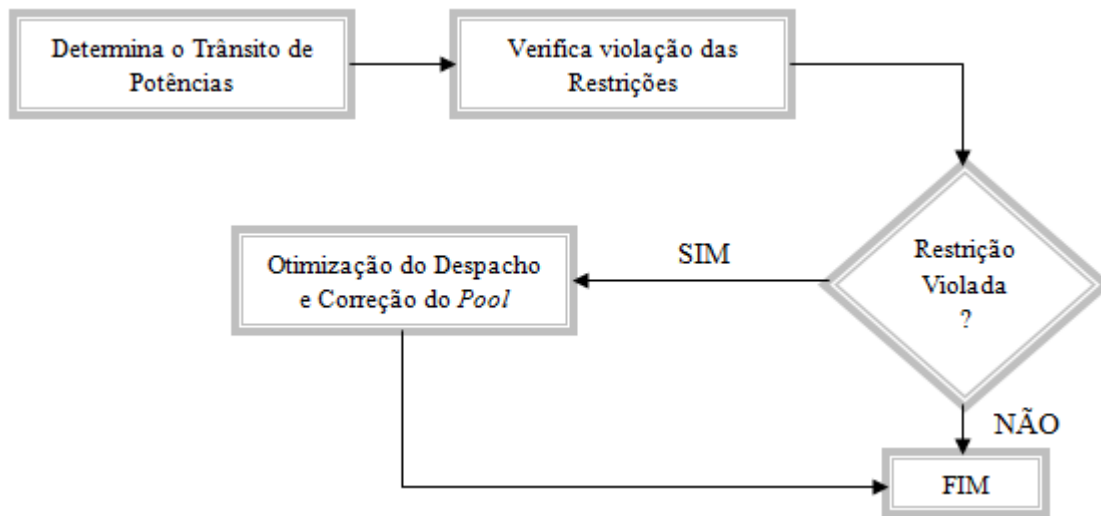


Figura 30 - Fluxograma das ações do Operador de Sistema

## 5.6 Trânsito de Potências

O modelo de resolução de trânsito de potências utilizado neste trabalho foi o modelo DC.

A linearização das equações permite a resolução direta (embora parcial) do problema, à custa de certas simplificações geralmente aceitáveis nas redes de tensões mais elevadas, com linhas aéreas. O nome inglês DC decorre do facto da estrutura do problema linearizado ser igual à de um problema de corrente contínua [17].

Dessas simplificações ou aproximações tem-se:

- Resistências desprezáveis ( $R \cong 0$ );
- Admitâncias à terra desprezáveis ( $Y \cong 0$ );
- Tensões próximas do valor nominal ( $V \cong 1$  pu)
- Desfasamentos pequenos entre barramentos contíguos ( $\text{sen } \theta_{ik} = \theta_{ik} = \theta_i - \theta_k$ , em radianos);
- Trânsito de Potência Reativa nulo;
- Perdas supostamente nulas.

O desenvolvimento das equações nodais poderá ser feito aplicando diretamente as aproximações às expressões gerais. Uma via alternativa será:

$$P_i = \sum_{k \neq i} P_{ik} = \sum_{k \neq i} \frac{\theta_i - \theta_k}{X_{ik}} \quad (i = 1, \dots, n) \quad (16)$$

$$P_i = \theta_i \cdot \sum_{k \neq i} \frac{1}{X_{ik}} + \sum_{k \neq i} \left(-\frac{1}{X_{ik}} \cdot \theta_k\right) \quad (17)$$

Definindo agora,

$$B'_{ii} = \sum_{k \neq i} \frac{1}{X_{ik}} \quad (18)$$

$$B'_{ik} = -\frac{1}{X_{ik}} \quad (i \neq k) \quad (19)$$

a expressão (17) poderá escrever-se da seguinte forma:

$$P_i = \sum_k (B'_{ik} \cdot \theta_k) \quad i = 1, \dots, n \quad (20)$$

Ou, matricialmente:

$$\mathbf{P} = \mathbf{B}' \cdot \boldsymbol{\theta} \quad (21)$$

Como o determinante de  $\mathbf{B}'$  é nulo, o sistema de equações é indeterminado, refletindo o facto de ser necessário definir a origem das fases. Fixando  $\theta_{\text{REF}}=0$  e eliminando uma equação, em geral a correspondente ao barramento de referência, obtém-se um sistema de equações resolúvel:

$$\hat{\mathbf{P}} = \hat{\mathbf{B}}' \cdot \hat{\boldsymbol{\theta}} \quad (22)$$

ou, supondo que o barramento de referência tem o número  $n$ :

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B'_{11} & B'_{12} & & B'_{1,n-1} \\ B'_{21} & & \dots & \vdots \\ \vdots & \dots & \dots & \vdots \\ B'_{n-1,1} & \dots & \dots & B'_{n-1,n-1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \vdots \\ \theta_{n-1} \end{bmatrix} \quad (23)$$

(ou seja, basta eliminar de  $\mathbf{B}'$  a linha e coluna do barramento de referência e eliminar o elemento  $n$  dos vetores  $\mathbf{P}$  e  $\boldsymbol{\theta}$ ).

Basta agora resolver o sistema de equações lineares:

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = (\hat{\mathbf{B}}')^{-1} \cdot \hat{\mathbf{P}} \quad (24)$$

para obter as fases das tensões (em radianos), o que permite calcular os valores do trânsito de potência nas linhas, através da expressão já conhecida:

$$P_{ik} = \frac{\theta_i - \theta_k}{X_{ik}} \quad (25)$$

Repare-se que, quando aplicável, o método apenas fornece valores para as fases das tensões e para os trânsitos de potência ativa nos ramos. Os módulos das tensões supõem-se, como

foi referido, iguais a 1 p.u., e o trânsito de potência reativa é desprezado, em virtude das aproximações efetuadas. Não obstante a estas limitações, o método é utilizado industrialmente, seja quando só se pretendem resultados aproximados (planeamento), seja quando é indispensável um modelo linear (certos problemas de otimização) [17].

Por outro lado, chama-se a atenção para o facto de, se a rede não se alterar mas se quiserem estudar vários regimes de funcionamento (variação de cargas, diversos despachos, etc.), não ser necessário inverter novamente a matriz. Torna-se assim muito fácil realizar estudos sucessivos sobre a mesma rede [17].

Por essa razão, optou-se neste trabalho por calcular o trânsito de potências nas linhas através da Matriz de Sensibilidades.

Para além da possibilidade de calcular as fases das tensões e, seguidamente, o trânsito de potência ativa nos ramos, o modelo DC permite relacionar diretamente os valores das potências ativas nos ramos e nos barramentos, sem chegar a calcular as fases.

Por comodidade, defina-se

$$\mathbf{Z}' = (\hat{\mathbf{B}}')^{-1} \quad (26)$$

para uso na expressão:

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = (\hat{\mathbf{B}}')^{-1} \cdot \hat{\mathbf{P}} = \mathbf{Z}' \cdot \hat{\mathbf{P}} \quad (27)$$

ou

$$\theta_i = \sum_{j \neq REF} Z'_{ij} \cdot P_j \quad i \neq REF \quad (28)$$

Substituindo na expressão do trânsito de potências, ter-se-á, para todas as linhas:

$$P_{ik} = \frac{\theta_i - \theta_k}{X_{ik}} = \frac{\sum_{j \neq REF} Z'_{ij} \cdot P_j - \sum_{j \neq REF} Z'_{kj} \cdot P_j}{X_{ik}} = \sum_{j \neq REF} \frac{Z'_{ij} - Z'_{kj}}{X_{ik}} \cdot P_j \quad (29)$$

A expressão (29) é válida quando i e k não coincidam com o barramento de referência. Embora a alteração a fazer seja simples (por ser  $\theta_i=0$  ou  $\theta_k=0$ , respetivamente), é mais cómodo definir, para este efeito apenas,  $Z'_{REF,j} = 0$ .

A consideração conjunta de todas as equações anteriores pode ser expressa de forma matricial como:

$$\mathbf{P}_L = \mathbf{A} \cdot \hat{\mathbf{P}} \quad (30)$$

onde  $\mathbf{A}$  é designada por Matriz de Sensibilidades, por indicar a sensibilidade do trânsito em cada ramo à variação das potências injetadas nos barramentos. Repare-se que, para uma dada rede, a matriz  $\mathbf{A}$  não é única, toda a vez que depende do barramento de referência considerado.

O elemento genérico da matriz de sensibilidades ( $A_{lj}$  ou  $A_{(i-k),j}$ ) relaciona a potência ativa na linha  $l$  (de  $i$  para  $k$ ) com a potência injetada no nó  $j$ , ou seja:

$$A_{lk} = A_{(i-k),j} = \frac{Z'_{ij} - Z'_{kj}}{X_{ik}} \quad (31)$$

A expressão (31) é válida se  $i$  ou  $k$  coincidirem com o barramento de referência, fazendo  $Z'_{REF,j} = 0$  [17].

O número de linhas da matriz  $\mathbf{A}$  será igual ao número de linhas da rede elétrica. O número de colunas da matriz  $\mathbf{A}$  será igual ao número de barramentos da rede elétrica com decremento de uma unidade ( $n^\circ$  barramentos  $- 1$ ).

A utilidade da matriz de sensibilidades não se resume unicamente a efetuar rapidamente os cálculos anteriores. Na verdade, os sinais dos elementos da matriz dão já indicações qualitativas sobre a influência nas linhas das variações de potência nos nós. No entanto, é possível ir mais além e definir ações de controlo, por exemplo, para evitar ultrapassar os limites térmicos de uma linha. Foi por esta razão que neste trabalho se optou pelo cálculo do trânsito de potências através da matriz de sensibilidades por questões de simplificação aquando da otimização do Despacho, devido à introdução da restrição do limite térmico das linhas.

### 5. 6. 1 Função *Genetic Algorithm* (*ga*)

A função *ga* encontra o mínimo da função recorrendo à meta-heurística Algoritmos Genéticos.

A sintaxe da função é:  $[x, fval] = ga(\text{fitnessfcn}, nvars, A, b, Aeq, beq, LB, UB, \text{nonlcon}, \text{options})$ .

Com esta sintaxe minimiza-se a função objetivo com os parâmetros padrão de otimização substituídos por valores nas opções de estrutura, que podem ser criadas usando a função *gaoptimset*.

Os campos da estrutura da função estão discriminados na tabela 6.

Tabela 6 - Campos da estrutura da função *ga* do MATLAB

|                   |  |
|-------------------|--|
| <i>fitnessfcn</i> | Função de <i>fitness</i>                             |
| <i>nvars</i>      | Número de variáveis                                  |
| <i>A</i>          | Matriz A para as restrições lineares de desigualdade |
| <i>b</i>          | Vetor b para as restrições lineares de desigualdade  |
| <i>Aeq</i>        | Matriz A para as restrições lineares de igualdade    |
| <i>beq</i>        | Vetor b para as restrições lineares de igualdade     |

**LB** Limite inferior de x (*lower bound*)

**UB** Limite superior de x (*upper bound*)

**nonlcon** Função de restrição não-linear

**options** Estrutura de opções criada usando *gaoptimset* ou a ferramenta de otimização

Para mais informações acerca desta função aconselha-se a sua consulta na *Function Browser* do MATLAB, bastando para isso escrever *help ga* na linha de comandos.

## 5.7 Funcionamento do Simulador

### 5.7.1 Interface com o Utilizador

O interface com o utilizador foi desenvolvido de forma a ser o mais amigável possível. O simulador encontra-se programado em MATLAB recorrendo à ferramenta GUI (*Graphical User Interface*). Esta ferramenta permite a construção de ambientes interativos para o utilizador, facilitando o uso mesmo para não especialistas.

A figura 31 ilustra o ambiente de trabalho da aplicação desenvolvida.

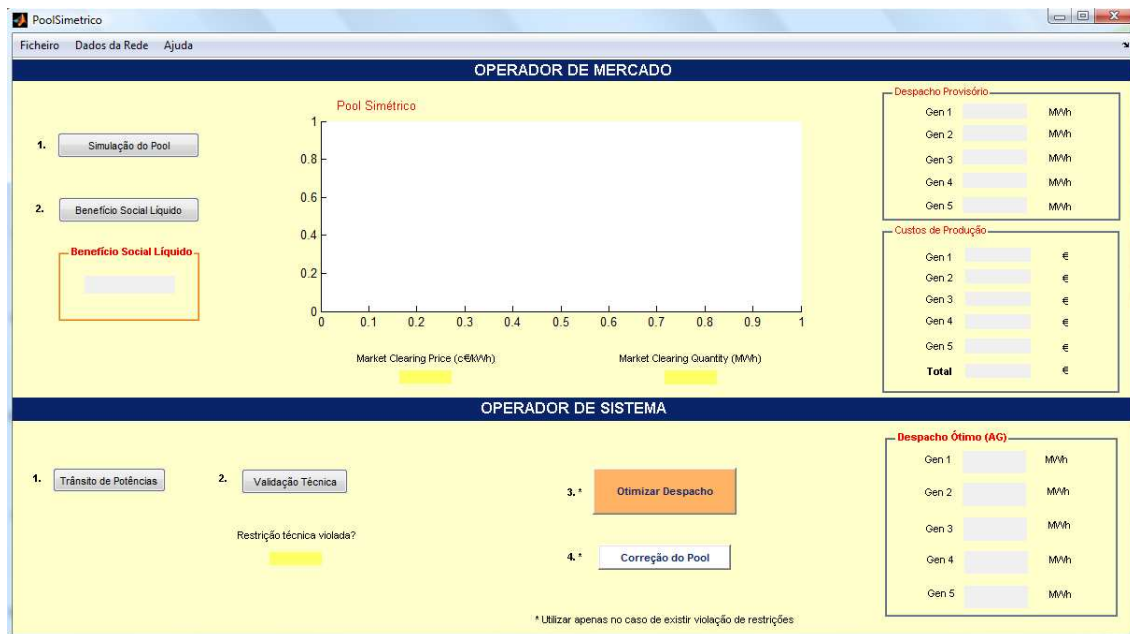


Figura 31 - Ambiente de trabalho do simulador Pool Simétrico

Na figura 32 chama-se à atenção para a barra de ferramentas criada. Nela estão presentes três botões: "Ficheiro", "Dados da Rede" e "Ajuda".

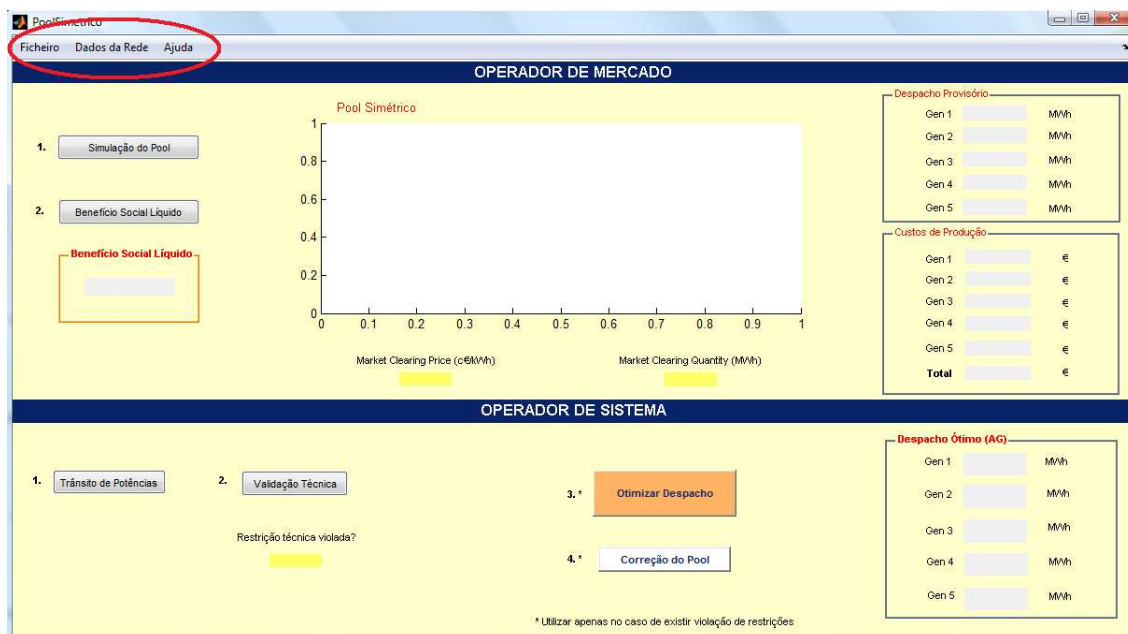


Figura 32 - Barra de ferramentas do simulador Pool Simétrico

No botão “Ficheiro” é possível clicar num outro botão para, a qualquer momento, fazer uma nova simulação ou sair da aplicação. Ao clicar no botão para sair da aplicação aparecerá uma caixa de texto para assegurar que o utilizador tem a certeza que pretende mesmo abandoná-la, tendo ainda a possibilidade de regressar à simulação caso tenha clicado no botão por lapso. A figura 33 ilustra a caixa de texto de saída da aplicação.

O botão “Dados da Rede” permite ao utilizador aceder, a qualquer momento, ao esquema, às características das linhas e às características dos barramentos da rede elétrica.

O botão “Ajuda” dá acesso ao botão “Instruções de Utilização” que permitirá ao utilizador que não conhece a aplicação aprender a fazer uso da mesma.



Figura 33 - Caixa de texto do botão de saída

### 5. 7. 2 Introdução de Dados

A introdução de dados deverá ser feita através do ficheiro desenvolvido no *software Microsoft Excel* denominado por “Ofertas”. O utilizador poderá apenas preencher os dados relativos às três primeiras folhas deste ficheiro, que representam as ofertas de venda (folha 1 – cor vermelha), ofertas de compra (folha 2 – cor verde) e contratos bilaterais (folha 3 – cor amarela). As figuras 34, 35 e 36 pretendem ilustrar as tabelas que poderão ser preenchidas pelo utilizador.

| OFERTAS DE VENDA - GERADORES |          |        |                  |                |
|------------------------------|----------|--------|------------------|----------------|
| Nó                           | Vendedor | Oferta | Quantidade (MWh) | Preço (c€/kWh) |
| 1                            | 1        | 1      |                  |                |
|                              | 1        | 2      |                  |                |
|                              | 1        | 3      |                  |                |
| 2                            | 2        | 1      |                  |                |
|                              | 2        | 2      |                  |                |
|                              | 2        | 3      |                  |                |
| 3                            | 3        | 1      |                  |                |
|                              | 3        | 2      |                  |                |
|                              | 3        | 3      |                  |                |
| 6                            | 4        | 1      |                  |                |
|                              | 4        | 2      |                  |                |
|                              | 4        | 3      |                  |                |
| 8                            | 5        | 1      |                  |                |
|                              | 5        | 2      |                  |                |
|                              | 5        | 3      |                  |                |

Figura 34 - Tabela de inserção de dados relativos às ofertas de venda

Na discriminação das ofertas de venda devem especificar-se os valores de quantidade e de preço energia elétrica, podendo cada produtor lançar até três ofertas. Devem preencher-se as células vazias com zeros caso não se pretenda efetuar os três lanços de ofertas de venda.

| OFERTAS DE COMPRA - CARGAS |    |                  |                |
|----------------------------|----|------------------|----------------|
| Comprador                  | Nó | Quantidade (MWh) | Preço (c€/kWh) |
| 1                          | 2  |                  |                |
| 2                          | 3  |                  |                |
| 3                          | 4  |                  |                |
| 4                          | 5  |                  |                |
| 5                          | 6  |                  |                |
| 6                          | 9  |                  |                |
| 7                          | 10 |                  |                |
| 8                          | 11 |                  |                |
| 9                          | 12 |                  |                |
| 10                         | 13 |                  |                |
| 11                         | 14 |                  |                |

Figura 35 - Tabela de inserção de dados relativos às ofertas de compra

No caso das ofertas de compra apenas poderá ser lançada uma oferta por comprador, especificando o preço e quantidade de energia elétrica pretendida. Devem preencher-se as células vazias com zeros caso não se pretenda efetuar os três lanços de ofertas de compra.

| CONTRATOS BILATERAIS |             |               |         |           |
|----------------------|-------------|---------------|---------|-----------|
| Contrato             | Nó Produtor | Nó Consumidor | E (MWh) | Q (MVarh) |
| 1                    | 2           | 4             |         |           |
| 2                    | 2           | 5             |         |           |
| 3                    | 1           | 3             |         |           |
| 4                    | 6           | 12            |         |           |
| 5                    | 3           | 2             |         |           |

Figura 36 - Tabela de inserção de dados relativos aos contratos bilaterais físicos

Quanto aos contratos bilaterais físicos definiu-se que foram estabelecidos cinco contratos deste tipo, podendo o utilizador especificar o valor de quantidade de energia transacionada.

Depois de introduzidos os dados relativos às ofertas de compra e venda de energia e contratos bilaterais físicos deve-se guardar o ficheiro na mesma pasta onde está gravado o *m file* do simulador.

## 5.8 Casos de Estudo

Esta aplicação foi testada na rede de 14 barramentos do *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE). No teste realizado apenas foi contemplado um período. Os produtores lançaram, cada um, três ofertas de venda de energia e cada comprador lançou uma oferta de compra de energia elétrica. Apenas são consideradas ofertas simples, onde é especificado unicamente a quantidade e o preço de venda ou aquisição de energia. As transações de energia simuladas dizem respeito ao mercado diário e a um mercado cujo funcionamento se baseie no modelo *Pool Simétrico*.

### 5.8.1 Caso de Estudo 1

Para a execução do *Pool Simétrico* os dados encontram-se ordenados de acordo com a estrutura apresentada na secção 5.8.2 e são apresentados de seguida nas tabelas 7, 8 e 9. Na tabela 7 são apresentadas as ofertas de venda de energia, na tabela 8 as ofertas de compra e na tabela 9 apresentam-se os dados correspondentes aos contratos bilaterais físicos.

Tabela 7 - Ofertas de venda do caso de estudo 1

| OFERTAS DE VENDA |          |        |                             |                |
|------------------|----------|--------|-----------------------------|----------------|
| Nó               | Vendedor | Oferta | Quantidade de Energia (MWh) | Preço (c€/kWh) |
| 1                | 1        | 1      | 120                         | 6,8            |
|                  |          | 2      | 50                          | 6,9            |
|                  |          | 3      | 30                          | 9,1            |
| 2                | 2        | 1      | 50                          | 6,6            |
|                  |          | 2      | 60                          | 6,7            |
|                  |          | 3      | 30                          | 20             |
| 3                | 3        | 1      | 15                          | 6,9            |
|                  |          | 2      | 30                          | 25             |

|   |   |   |    |     |
|---|---|---|----|-----|
|   |   | 3 | 20 | 7,6 |
| 6 | 4 | 1 | 20 | 8   |
|   |   | 2 | 10 | 40  |
|   |   | 3 | 20 | 8,1 |
| 8 | 5 | 1 | 10 | 5   |
|   |   | 2 | 20 | 7,6 |
|   |   | 3 | 50 | 8,4 |

Tabela 8 - Ofertas de compra do caso de estudo 1

| OFERTAS DE COMPRA |    |                             |                |
|-------------------|----|-----------------------------|----------------|
| Comprador         | Nó | Quantidade de Energia (MWh) | Preço (c€/kWh) |
| 1                 | 2  | 90                          | 15             |
| 2                 | 3  | 90                          | 12,5           |
| 3                 | 4  | 75                          | 5,5            |
| 4                 | 5  | 95                          | 7,2            |
| 5                 | 6  | 80                          | 8,9            |
| 6                 | 9  | 70                          | 6,7            |
| 7                 | 10 | 50                          | 6,6            |
| 8                 | 11 | 50                          | 5              |
| 9                 | 12 | 95                          | 4,5            |
| 10                | 13 | 65                          | 15             |
| 11                | 14 | 75                          | 12             |

Tabela 9 - Contratos bilaterais físicos do caso de estudo 1

| CONTRATOS BILATERAIS |             |               |                             |
|----------------------|-------------|---------------|-----------------------------|
| Contrato             | Nó Produtor | Nó Consumidor | Quantidade de Energia (MWh) |
| 1                    | 2           | 4             | 5                           |
| 2                    | 2           | 5             | 15                          |
| 3                    | 1           | 3             | 50                          |
| 4                    | 6           | 12            | 30                          |
| 5                    | 3           | 2             | 10                          |

A figura 37 ilustra a simulação do primeiro caso de estudo. Neste caso, a simulação do *Pool* Simétrico resultou num Despacho Provisório que não violou qualquer das restrições técnica. Portanto, o despacho a seguir é o provisório e a simulação terminou.

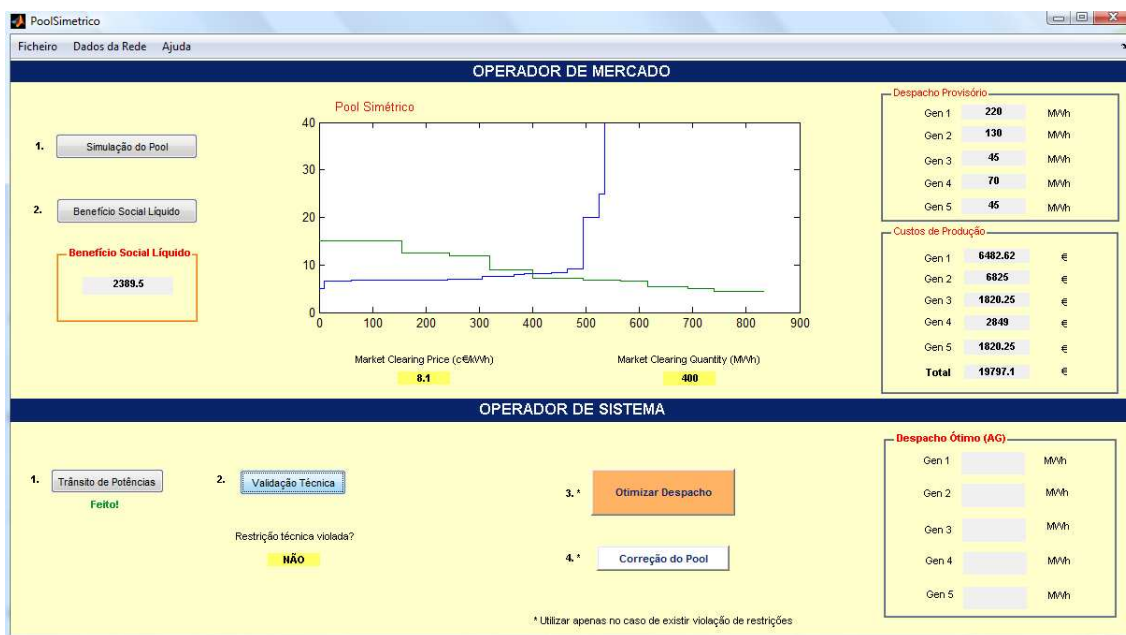


Figura 37 - Apresentação dos resultados no ambiente de trabalho da aplicação

Abaixo apresentam-se os resultados do Operador de Mercado e Operador de Sistema.

### 5. 8. 1. 1 Resultados do Operador de Mercado

A figura 38 ilustra o gráfico do *Pool* Simétrico representado pelo bloco do Operador de Mercado do simulador e a tabela 10 indica os valores do Benefício Social Líquido, do Preço de Encontro de Mercado e da Quantidade Negociada que resultaram da interseção das duas curvas.

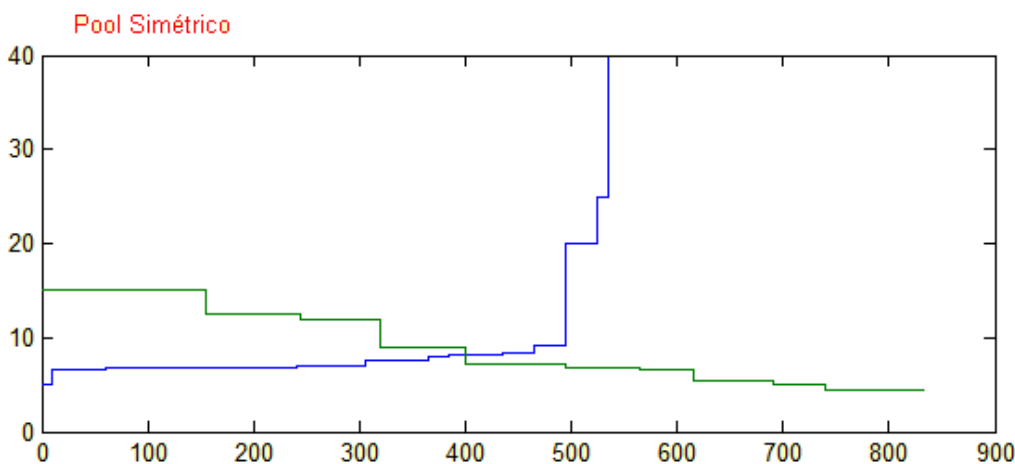


Figura 38 - Representação gráfica da simulação do caso de estudo 1

Legenda:

Linha Azul – Ofertas de Venda  
Linha Verde – Ofertas de Compra

Unidades do eixo dos xx: MWh  
Unidades do eixo dos yy: c€/kWh

**Tabela 10 - Resultados da interseção do cruzamento das ofertas de compra e venda de energia**

|  |            |
|--|------------|
| <b><i>Market Clearing Price</i></b>    | 8,1 c€/kWh |
| <b><i>Market Clearing Quantity</i></b> | 400 MWh    |
| <b>Benefício Social Líquido</b>        | 2389,5     |

As tabelas 11 e 12 apresentam os valores do Despacho Provisório e os custos de produção associados a esse despacho, respetivamente.

**Tabela 11 - Resultados do Despacho Provisório**

| <b>DESPACHO PROVISÓRIO</b> |         |
|----------------------------|---------|
| <b>Gerador 1</b>           | 220 MWh |
| <b>Gerador 2</b>           | 130 MWh |
| <b>Gerador 3</b>           | 45 MWh  |
| <b>Gerador 4</b>           | 70 MWh  |
| <b>Gerador 5</b>           | 45 MWh  |

Tabela 12 - Resultados dos custos de produção associados a cada gerador

| CUSTOS DE PRODUÇÃO |                  |
|--------------------|------------------|
| Gerador 1          | 6482,62 €        |
| Gerador 2          | 6825 €           |
| Gerador 3          | 1820,25 €        |
| Gerador 4          | 2849 €           |
| Gerador 5          | 1820,25 €        |
| <b>Total</b>       | <b>19797,1 €</b> |

### 5. 8. 1. 2 Resultados do Operador de Sistema

Tabela 13 - Resultados do trânsito de potências

| BARRAMENTOS |         | P       | P        |
|-------------|---------|---------|----------|
| Origem      | Chegada | p.u.    | MW       |
| 1           | 2       | 1,4336  | 143,3678 |
| 1           | 5       | 0,7663  | 76,6321  |
| 2           | 3       | 0,6984  | 69,8421  |
| 2           | 4       | 0,5401  | 54,0147  |
| 2           | 5       | 0,4951  | 49,5109  |
| 3           | 4       | -0,2515 | -25,1578 |
| 4           | 5       | -0,2172 | -21,7269 |
| 4           | 7       | 0,2330  | 23,3087  |
| 4           | 9       | 0,2227  | 22,2751  |
| 5           | 6       | 0,8941  | 89,4161  |
| 6           | 11      | -0,1941 | -19,4139 |
| 6           | 12      | 0,3220  | 32,2052  |
| 6           | 13      | 0,6662  | 66,6248  |
| 7           | 8       | -0,4500 | -45,0000 |
| 7           | 9       | 0,6830  | 68,3087  |
| 9           | 10      | 0,1941  | 19,4139  |
| 9           | 14      | 0,7116  | 71,1699  |
| 10          | 11      | 0,1941  | 19,4139  |
| 12          | 13      | 0,02205 | 2,2052   |
| 13          | 14      | 0,0383  | 3,8300   |

### 5. 8. 1. 3 Análise dos Resultados

Os resultados relativos ao funcionamento do *Pool* são passíveis de ser verificados a partir do gráfico fornecido pela aplicação, i.e., consideram-se aceites todas as propostas de venda e compra de energia elétrica até à interseção das duas curvas e isso pode comprovar-se graficamente.

Neste caso, particularmente, não houve registo de violação de restrições e, sendo assim, o despacho que segue é o Despacho Provisório e não foi necessário recorrer à otimização do problema.

As tabelas 14 e 15 demonstram as ofertas de venda e de compra de energia que foram aceites, respetivamente.

**Tabela 14 - Ofertas de venda aceites no final da simulação**

| <b>OFERTAS DE VENDA ACEITES</b>    |                       |                 |               |
|------------------------------------|-----------------------|-----------------|---------------|
| <b>Quantidade de Energia (MWh)</b> | <b>Preço (c€/kWh)</b> | <b>Vendedor</b> | <b>Oferta</b> |
| 10                                 | 5                     | 5               | 1             |
| 50                                 | 6,6                   | 2               | 1             |
| 60                                 | 6,7                   | 2               | 2             |
| 120                                | 6,8                   | 1               | 1             |
| 15                                 | 6,9                   | 3               | 1             |
| 50                                 | 6,9                   | 1               | 2             |
| 20                                 | 7,6                   | 3               | 3             |
| 20                                 | 7,6                   | 5               | 2             |
| 20                                 | 8                     | 4               | 1             |
| 20                                 | 8,1                   | 4               | 3             |

**Tabela 15 - Ofertas de compra aceites no final da simulação**

| <b>OFERTAS DE COMPRA ACEITES</b>   |                       |                  |           |
|------------------------------------|-----------------------|------------------|-----------|
| <b>Quantidade de Energia (MWh)</b> | <b>Preço (c€/kWh)</b> | <b>Comprador</b> | <b>Nó</b> |
| 90                                 | 15                    | 1                | 2         |
| 65                                 | 15                    | 10               | 13        |
| 90                                 | 12,5                  | 2                | 3         |
| 75                                 | 12                    | 11               | 14        |
| 80                                 | 8,9                   | 5                | 6         |

## 5. 8. 2 Caso de Estudo 2

Para a execução do *pool* simétrico os dados encontram-se ordenados de acordo com a estrutura apresentada na secção 5.7.2 e são apresentados de seguida nas tabelas 16 e 17. Na tabela 16 são apresentadas as ofertas de venda de energia e na tabela 17 as ofertas de compra. Os dados relativos aos contratos bilaterais físicos são apresentados na tabela 18.

Tabela 16 - Ofertas de venda do caso de estudo 2

| OFERTAS DE VENDA |          |        |                             |                |
|------------------|----------|--------|-----------------------------|----------------|
| Nó               | Vendedor | Oferta | Quantidade de Energia (MWh) | Preço (c€/kWh) |
| 1                | 1        | 1      | 100                         | 6,8            |
|                  |          | 2      | 115                         | 6,9            |
|                  |          | 3      | 65                          | 9,1            |
| 2                | 2        | 1      | 45                          | 6,6            |
|                  |          | 2      | 70                          | 6,7            |
|                  |          | 3      | 15                          | 20             |
| 3                | 3        | 1      | 60                          | 6,9            |
|                  |          | 2      | 25                          | 25             |
|                  |          | 3      | 10                          | 7,6            |
| 6                | 4        | 1      | 30                          | 8              |
|                  |          | 2      | 20                          | 40             |
|                  |          | 3      | 25                          | 8,1            |
| 8                | 5        | 1      | 50                          | 5              |
|                  |          | 2      | 5                           | 7,6            |
|                  |          | 3      | 40                          | 8,4            |

Tabela 17 - Ofertas de compra do caso de estudo 2

| OFERTAS DE COMPRA |    |                             |                |
|-------------------|----|-----------------------------|----------------|
| Comprador         | Nó | Quantidade de Energia (MWh) | Preço (c€/kWh) |
| 1                 | 2  | 90                          | 15             |
| 2                 | 3  | 90                          | 12,5           |
| 3                 | 4  | 75                          | 5,5            |
| 4                 | 5  | 95                          | 7,2            |
| 5                 | 6  | 80                          | 8,9            |
| 6                 | 9  | 70                          | 6,7            |
| 7                 | 10 | 50                          | 6,6            |
| 8                 | 11 | 50                          | 5              |
| 9                 | 12 | 95                          | 4,5            |
| 10                | 13 | 65                          | 15             |
| 11                | 14 | 75                          | 12             |

Tabela 18 - Contratos bilaterais físicos do caso de estudo 2

| CONTRATOS BILATERAIS |             |               |                             |
|----------------------|-------------|---------------|-----------------------------|
| Contrato             | Nó Produtor | Nó Consumidor | Quantidade de Energia (MWh) |
| 1                    | 2           | 4             | 5                           |
| 2                    | 2           | 5             | 15                          |
| 3                    | 1           | 3             | 100                         |
| 4                    | 6           | 12            | 30                          |
| 5                    | 3           | 2             | 10                          |

A figura 39 ilustra a simulação do segundo caso de estudo. Neste caso, a simulação do *Pool Simétrico* resultou num Despacho Provisório que violou uma restrição técnica, a restrição de limite de potência das linhas.

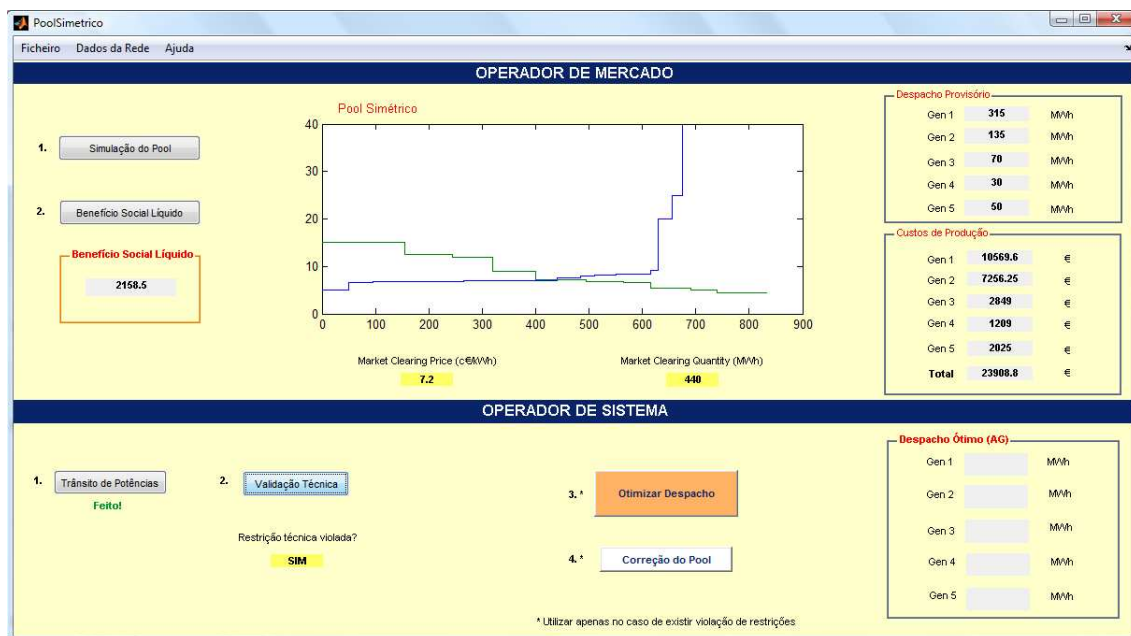


Figura 39 - Apresentação dos resultados no ambiente de trabalho da aplicação (primeira parte)

As tabelas 19 e 20 apresentam os valores do Despacho Provisório e os custos de produção associados a esse despacho, respetivamente.

Tabela 19 - Resultados do Despacho Provisório

| DESPACHO PROVISÓRIO |         |
|---------------------|---------|
| Gerador 1           | 315 MWh |
| Gerador 2           | 135 MWh |
| Gerador 3           | 70 MWh  |
| Gerador 4           | 30 MWh  |
| Gerador 5           | 50 MWh  |

Tabela 20 – Resultados provisórios dos custos de produção associados a cada gerador

| CUSTOS DE PRODUÇÃO |                  |
|--------------------|------------------|
| Gerador 1          | 6482,62 €        |
| Gerador 2          | 6825 €           |
| Gerador 3          | 1820,25 €        |
| Gerador 4          | 2849 €           |
| Gerador 5          | 1820,25 €        |
| <b>Total</b>       | <b>19797,1 €</b> |

Na tabela 21 apresenta-se o trânsito de potências que resultou da determinação do Despacho Provisório.

Tabela 21 - Resultados do trânsito de potências provisório

| BARRAMENTOS |         | P       | P      |
|-------------|---------|---------|--------|
| Origem      | Chegada | p.u.    | MW     |
| 1           | 2       | 1,7975  | 179,75 |
| 1           | 5       | 0,9524  | 95,24  |
| 2           | 3       | 0,8734  | 87,34  |
| 2           | 4       | 0,6639  | 66,39  |
| 2           | 5       | 0,6100  | 61,00  |
| 3           | 4       | -0,3265 | -32,65 |
| 4           | 5       | -0,2609 | -26,09 |
| 4           | 7       | 0,2855  | 28,55  |
| 4           | 9       | 0,2627  | 26,27  |
| 5           | 6       | 1,1516  | 115,16 |
| 6           | 11      | -0,2799 | -27,99 |
| 6           | 12      | 0,3094  | 30,94  |
| 6           | 13      | 0,6221  | 62,21  |
| 7           | 8       | -0,5000 | -50,00 |
| 7           | 9       | 0,7855  | 78,55  |
| 9           | 10      | 0,2799  | 27,99  |
| 9           | 14      | 0,7683  | 76,83  |
| 10          | 11      | 0,2799  | 27,99  |
| 12          | 13      | 0,0094  | 0,94   |
| 13          | 14      | -0,0183 | -1,83  |

Fazendo uma análise pormenorizada à tabela 21 pode constatar-se que a violação da restrição do limite de trânsito de potências das linhas ocorre na linha com origem no

barramento 1 e chegada no barramento 2. Esta informação pode ser consultada no ficheiro “Transito de Potencias”, na folha “Violação de Limite das Linhas”.

Portanto, deverá proceder-se como o descrito no passo 5 da secção 5.7.3. De seguida, a figura 40 apresenta a continuação da simulação com a apresentação de medidas corretivas baseadas num Despacho Ótimo.

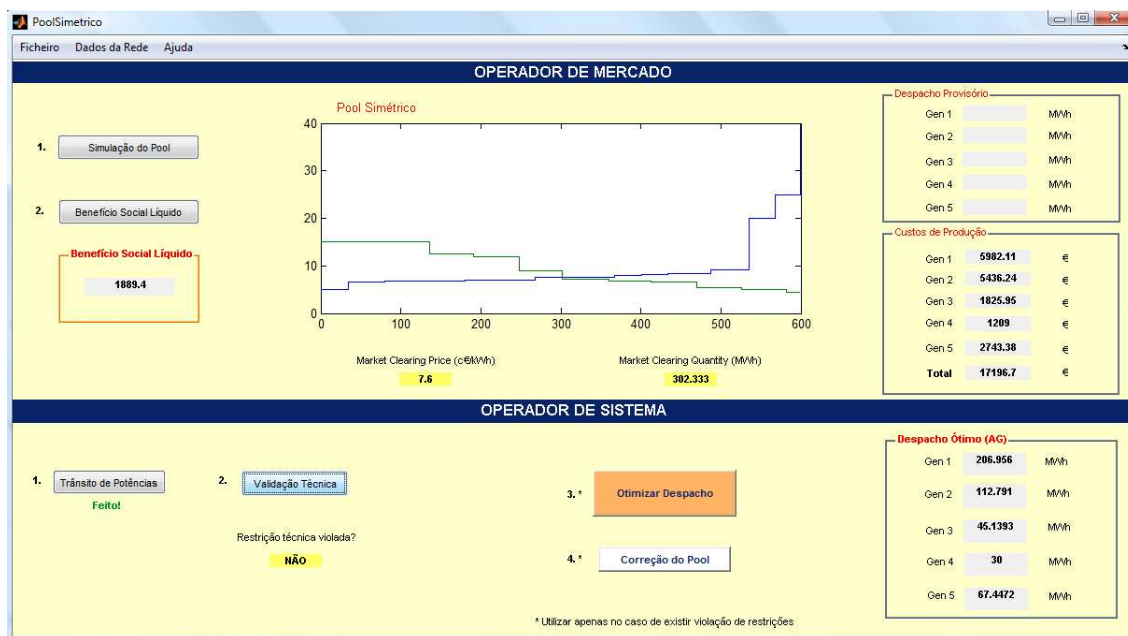


Figura 40 - Apresentação dos resultados no ambiente de trabalho da aplicação (final)

Chama-se a atenção para o facto de, ao ser premido o botão “Otimizar Despacho”, aparecer uma representação gráfica da evolução do processo iterativo da otimização do problema através da meta-heurística Algoritmos Genéticos, como ilustra a figura 41.

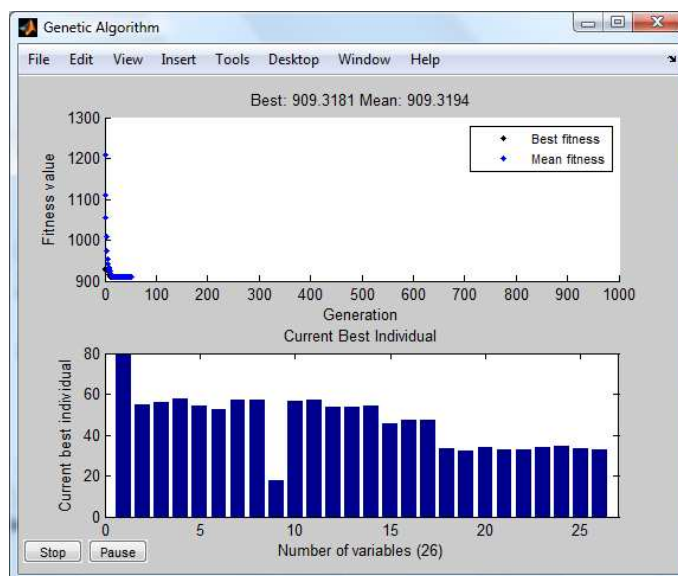


Figura 41 - Representação gráfica da evolução do processo iterativo da otimização do problema

De seguida, apresentam-se os resultados do Operador de Mercado e Operador de Sistema.

### 5. 8. 2. 1 Resultados do Operador de Mercado

A figura 42 ilustra o gráfico do *Pool Simétrico* representado pelo bloco do Operador de Mercado do simulador e a tabela 18 indica os valores do Benefício Social Líquido, do Preço de Encontro de Mercado e da Quantidade Negociada que resultaram da interseção das duas curvas.

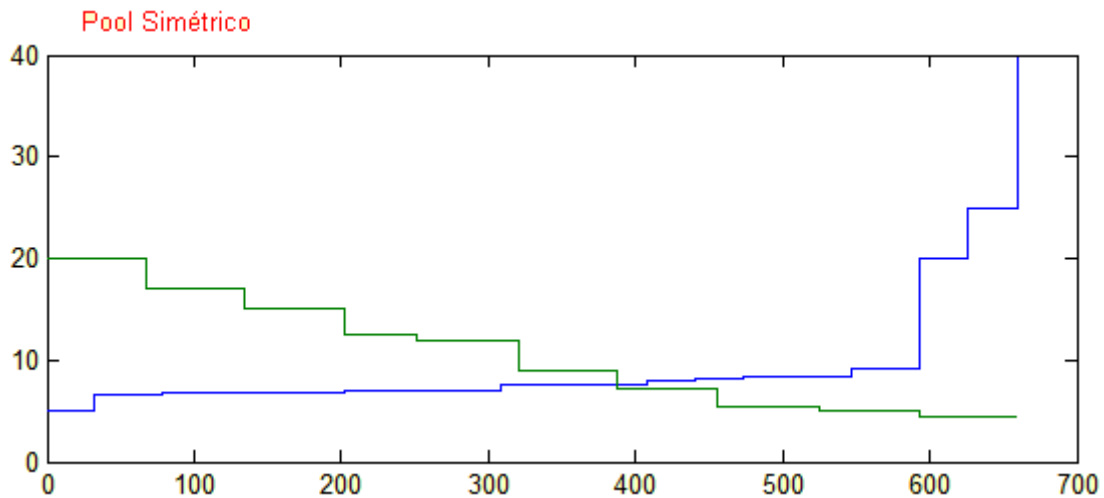


Figura 42 - Representação gráfica da simulação do caso de estudo 2

Legenda:

Linha Azul – Ofertas de Venda  
Linha Verde – Ofertas de Compra

Unidades do eixo dos xx: MWh  
Unidades do eixo dos yy: c€/kWh

Tabela 22 - Resultados da interseção do cruzamento das ofertas de compra e venda de energia

|                                 |            |
|---------------------------------|------------|
| <b>Market Clearing Price</b>    | 7,6 c€/kWh |
| <b>Market Clearing Quantity</b> | 302,33 MWh |
| <b>Benefício Social Líquido</b> | 1889,4     |

As tabelas 19 e 20 apresentam os valores do Despacho Ótimo e os custos de produção associados a esse despacho, respetivamente.

Tabela 23 - Resultados do Despacho Ótimo

| DESPACHO ÓTIMO |            |
|----------------|------------|
| Gerador 1      | 206,97 MWh |
| Gerador 2      | 112,79 MWh |
| Gerador 3      | 45,14 MWh  |
| Gerador 4      | 30 MWh     |

|           |           |
|-----------|-----------|
| Gerador 5 | 67,45 MWh |
|-----------|-----------|

Tabela 24 - Resultados dos custos de produção associados a cada gerador

| CUSTOS DE PRODUÇÃO |                  |
|--------------------|------------------|
| Gerador 1          | 5982,11 €        |
| Gerador 2          | 5436,24 €        |
| Gerador 3          | 1825,95 €        |
| Gerador 4          | 1209 €           |
| Gerador 5          | 2743,38 €        |
| <b>Total</b>       | <b>17196,7 €</b> |

### 5. 8. 2. 2 Resultados do Operador de Sistema

Tabela 25 - Resultados do trânsito de potências

| BARRAMENTOS |         | P       | P       |
|-------------|---------|---------|---------|
| Origem      | Chegada | p.u.    | MW      |
| 1           | 2       | 0,0877  | 8,77    |
| 1           | 5       | 0,1460  | 14,60   |
| 2           | 3       | 0,3142  | 31,42   |
| 2           | 4       | 0,1231  | 12,31   |
| 2           | 5       | 0,1575  | 15,75   |
| 3           | 4       | -0,2368 | -23,68  |
| 4           | 5       | 0,1350  | 13,50   |
| 4           | 7       | -0,3155 | -31,55  |
| 4           | 9       | 0,0168  | 1,68    |
| 5           | 6       | 0,2885  | 28,85   |
| 6           | 11      | -0,1453 | -14,53  |
| 6           | 12      | 0,2980  | 29,80   |
| 6           | 13      | 0,5820  | 58,20   |
| 7           | 8       | -1,0000 | -100,00 |
| 7           | 9       | 0,6845  | 68,45   |
| 9           | 10      | 0,1453  | 14,53   |
| 9           | 14      | 0,5560  | 55,60   |
| 10          | 11      | 0,1453  | 14,53   |
| 12          | 13      | -0,0020 | -0,20   |
| 13          | 14      | 0,0632  | 6,32    |

### 5. 8. 2. 3 Análise dos Resultados

Os resultados relativos ao funcionamento do *pool* são passíveis de ser verificados a partir do gráfico fornecido pela aplicação, i.e., consideram-se aceites todas as propostas de venda e compra de energia elétrica até à interseção das duas curvas e isso pode comprovar-se graficamente.

Neste caso, particularmente, houve registo de violação dos limites da capacidade de transporte das linhas e, sendo assim, o despacho que segue é o Despacho Ótimo, depois de efetuada a otimização do problema.

As tabelas 22 e 23 demonstram as ofertas de venda e de compra de energia que foram aceites, respetivamente.

Tabela 26 - Ofertas de venda aceites no final da simulação

| OFERTAS DE VENDA ACEITES    |                |          |        |
|-----------------------------|----------------|----------|--------|
| Quantidade de Energia (MWh) | Preço (c€/kWh) | Vendedor | Oferta |
| 34,2484                     | 5              | 5        | 1      |
| 45,7768                     | 6,6            | 2        | 1      |
| 47,0137                     | 6,7            | 2        | 2      |
| 53,3443                     | 6,8            | 1        | 1      |
| 33,5390                     | 6,9            | 3        | 1      |
| 53,6120                     | 6,9            | 1        | 2      |
| 33,1988                     | 7,6            | 5        | 2      |
| 34,2484                     | 5              | 5        | 1      |

Tabela 27 - Ofertas de compra aceites no final da simulação

| OFERTAS DE COMPRA ACEITES   |                |           |    |
|-----------------------------|----------------|-----------|----|
| Quantidade de Energia (MWh) | Preço (c€/kWh) | Comprador | Nó |
| 79,2960                     | 15             | 1         | 2  |
| 56,4418                     | 15             | 10        | 13 |
| 55,0575                     | 12,5           | 2         | 3  |
| 57,1560                     | 12             | 11        | 14 |
| 54,3820                     | 8,9            | 5         | 6  |
| 79,2960                     | 15             | 1         | 2  |



---

# CAPÍTULO VI

## Conclusões e Desenvolvimento Futuro

---

## Conclusões

A estrutura de um mercado de energia reflete a organização do próprio setor e das atividades que o constituem, nomeadamente a que advém do processo de liberalização.

No âmbito do processo de liberalização dos mercados, em que as atividades relacionadas com as redes se consideram monopólios naturais, a produção e a comercialização de energia elétrica estão abertas à concorrência, com a justificação de ser introduzida maior eficiência na gestão e operação dos recursos ligados a estas atividades.

Ao mercado grossista está associada a atividade de produção de eletricidade em regime de mercado, em que os agentes presentes na produção asseguram a colocação da mesma e os agentes que necessitam abastecer-se de eletricidade procuram adquiri-la, seja para satisfazer o fornecimento a clientes finais, seja para consumo próprio. Ao mercado retalhista está associada a atividade de comercialização, em que os agentes comercializadores concorrem para garantir o fornecimento dos clientes finais.

O modelo de liberalização do setor elétrico veio acrescentar a estas atividades principais a existência de mercados organizados, que se afirmam como plataformas de negociação tendencialmente independentes dos agentes tradicionais que nelas atuam.

A contratação de energia elétrica pode ser efetuada de várias formas, desde a contratação para o dia seguinte, mercado diário, para prazos mais longos, mercado a prazo, ou de forma bilateral e/ou através de mecanismos legais ou regulamentares específicos.

A criação de um mercado *spot*, onde os produtores vendem e os fornecedores/comercializadores compram a energia elétrica ao preço marginal do sistema, para cada hora ou meia hora do dia seguinte, fez aumentar os níveis de competitividade. Todavia, as especificidades técnicas do setor elétrico e a grande influência do preço dos combustíveis no custo de produção de eletricidade tornam o preço marginal do sistema muito volátil, que afeta fortemente os resultados dos participantes no mercado.

Contudo, analisando o funcionamento de alguns dos mais importantes mercados de energia elétrica europeus, apesar de genericamente eficientes, poderão também revelar-se insatisfatórios se as suas estruturas, regras de atividade ou algoritmos de funcionamento, de algum modo distorcerem regras básicas e essenciais ao bom funcionamento dos mercados.

A generalidade dos mercados mundiais onde ocorreu uma reestruturação optou por um modelo de mercado com estrutura mista, em que funciona em simultâneo um mercado centralizado de transação de energia elétrica, do tipo *Pool*, e é permitido o estabelecimento de contratos bilaterais. Este tipo de mercado parece querer indicar que é uma boa solução e servir de exemplo para outros mercados ainda não reestruturados.

Quanto ao modelo de mercado *Pool* Simétrico pode concluir-se que é caracterizado por haver a possibilidade se efetuarem ofertas de compra e venda de energia elétrica. O Operador de Mercado, relativamente a cada período, organiza as propostas recebidas e constrói curvas de oferta de venda e de compra. As ofertas de venda são dispostas por ordem crescente dos preços oferecidos, por parte dos produtores, e as ofertas de compra por

ordem decrescente dos preços respetivos, por parte dos comercializadores, consumidores elegíveis ou intermediários financeiros. Cada segmento dessas curvas representa uma proposta de compra ou venda caracterizada pelo preço e quantidade envolvida. O ponto de intersecção das duas curvas corresponde ao *Market Clearing Price* e a quantidade energia elétrica respetiva corresponde à *Market Clearing Quantity*.

As alterações que o sector energético tem vindo a sofrer ao longo dos últimos anos provocaram um forte impacto no problema do Despacho, como por exemplo, a passagem de uma organização vertical e com forte regulação para uma organização horizontal em que a produção, transporte e distribuição são da responsabilidade de diferentes entidades. Em cada tipo de mercado o Despacho Económico é feito de forma diferente com restrições distintas.

O Despacho Económico tem como objetivo determinar um primeiro despacho em função das ofertas de compra e de venda disponíveis. Cada central possui limites técnicos de operação e caracteriza-se do ponto de vista económico por uma função de custo. A resolução do problema implica a otimização com restrições. Na presente dissertação foi utilizada a meta-heurística Algoritmos Genéticos.

A aplicação desenvolvida no âmbito desta dissertação foi programada em MATLAB utilizando a ferramenta *Graphical User Interfaces* (GUI).

A rede de teste utilizada foi a rede de 14 barramentos do *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE).

A aplicação simula o funcionamento de um mercado com modelo *Pool* Simétrico e cumpre os objetivos que foram propostos. O lançamento das ofertas de compra e venda de energia elétrica é feito especificando o preço e a quantidade de energia a vender/comprar num ficheiro *Excel* criado para o efeito. O Operador de Mercado ordena as ofertas de venda por ordem crescente de preço e as de compra por ordem decrescente e da intersecção do cruzamento das duas curvas surge o *Market Clearing Price* e a *Market Clearing Quantity*. Por fim, e com base nas ofertas especificadas, o Operador de Mercado determina o Despacho Provisório.

Por sua vez, o Operador de Sistema valida o Despacho Provisório, verificando o trânsito de potências da rede elétrica. Na presente dissertação adotou-se o modelo de trânsito de potências menos pesado computacionalmente e fácil implementação, ou seja, o modelo DC. Caso ocorra a violação de alguma restrição, procede à otimização do problema, com vista à maximização do Benefício Social Líquido, corrigindo as ofertas anteriormente lançadas de forma a determinar o Despacho Ótimo viável. A meta-heurística Algoritmos Genéticos foi a meta-heurística utilizada neste trabalho, recorrendo à função *ga* do MATLAB. A qualquer momento da simulação o utilizador poderá consultar as instruções de utilização, os dados da rede, fazer uma nova simulação ou até mesmo sair da aplicação, utilizando a barra de ferramentas situada na parte superior.

No caso de estudo 1 não se verificou a violação de qualquer restrição e, portanto, os geradores foram despachados com os valores obtidos no Despacho Provisório.

No caso de estudo 2 verificou-se a violação de uma restrição técnica, ultrapassou-se o limite de trânsito de potência na linha que tem origem no barramento 1 e chegada no barramento 2. Portanto, foi necessário recorrer à otimização do despacho. Os geradores foram despachados com os valores obtidos no Despacho Ótimo no final da simulação.

Fazendo uma análise pormenorizada aos resultados apresentados, pode concluir-se que a determinação do Despacho Provisório, a sua validação técnica e a apresentação de medidas corretivas baseadas num Despacho Ótimo foram realizadas com sucesso.

O facto de se ter utilizado uma rede de teste de pequena dimensão não reflete o que se passa nos mercados reais mas revela-se eficaz no cumprimento dos objetivos deste trabalho. Trata-se, portanto, de um simulador básico de um mercado de energia cujo modelo de funcionamento se baseia no tipo *Pool Simétrico*.

As maiores dificuldades desta dissertação passaram pela utilização da ferramenta do MATLAB *Graphical User Interfaces*, ferramenta até então totalmente desconhecida para o autor deste trabalho, e pela implementação da otimização do problema formulado via Algoritmos Genéticos utilizando a função *ga* pré-definida pelo programa.

## **Desenvolvimento Futuro**

Como trabalho futuro, seria interessante desenvolver uma aplicação que simulasse o funcionamento de um mercado que adotasse o modelo *Pool* Simétrico para qualquer tipo de rede, não se limitando apenas a uma rede específica, como foi o caso deste trabalho. Seria interessante também permitir a integração de ofertas simples e de ofertas complexas de aquisição e venda de energia elétrica que integrassem condições/restrições técnicas ou económicas, tais como, a condição de indivisibilidade, a gradação de carga, as entradas mínimas, pagamentos máximos, paragem programada, entre outras. A consideração de leilões monopériodo e multipériodo também seria interessante.

Quanto às ações do Operador de Sistema, a adoção de métodos de resolução do trânsito de potências AC seria de considerar, bem como a possibilidade de escolha da meta-heurística de otimização do problema, para posteriormente se fazer a comparação dos resultados.

## Referências

- [1] *Web site*: <http://www.erse.pt/pt/>
- [2] Saraiva, J. P. T., da Silva, J. L. P. P., Ponce de Leão, M. T., “Mercados de Electricidade – Regulação e Tarificação de Uso das Redes”, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, FEUP edições, 1ª Edição, Porto - Portugal, 2002
- [3] Azevedo, F. M. T., “Gestão do Risco em Mercados Competitivos de Electricidade: Previsão de Preços e Optimização do *Portfolio* de Contratos”, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real - Portugal, Julho de 2007
- [4] Dalmazó, R. A., “A reforma do setor elétrico na Argentina”, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - Brasil
- [5] *Web site*: <http://html.rincondelvago.com/mercado-electrico-chileno.html>
- [6] Gomes, M. H. R., “Novos Mecanismos de Mercado de Energia Eléctrica e de Serviços Auxiliares em Sistemas Eléctricos”, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto – Portugal, Janeiro de 2007
- [7] Gutierrez, C. E. C., “Eliminação do Ruído por Encolhimento de *WAVELETS* – Uma Aplicação à Série de Preço Spot de Energia Elétrica do Brasil”, Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – Brasil, Agosto de 2002
- [8] *Web site*: <http://www.loboeibeas.com.br/artigos-e-cartas-circulares/o-mercado-atacadista-de-energia-eletrica-e-algumas-das-questoes-polemicas-que-ele-suscita>
- [9] *Web site*: <http://www.mibel.com/>
- [10] Gomes, N., “Optimização nos Sistemas de Energia”, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto – Portugal, 2010
- [11] Rocha, J. M. N., “Optimização de Despacho Económico Integrando Previsão de Variabilidade de Produção Hídrica, Eólica e Solar”, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto – Portugal, Julho de 2010
- [12] Rodrigues, N. M., “Um Algoritmo Cultural para Problemas de Despacho de Energia Elétrica”, Universidade Estadual de Maringá, Maringá – Brasil, 2007
- [13] Chuan-Ping Cheng, Chih-Wen, Chun-Chang Liu, “Unit Commitment by Lagrangian Relaxation and Genetic Algorithms”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 15, no. 2, May 2010
- [14] Caraciolo, M. P., “Multi-Ring: Uma Nova Topologia para Otimização por Enxame de Partículas (PSO)”, Escola Politécnica de Pernambuco, Recife – Brasil, Maio de 2008

- [15] T. O. Ting, M. V. C. Rao, and C. K. Loo, “A Novel Approach for Unit Commitment Problem via an Effective Hybrid Particle Swarm Optimization”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 21, no. 1, February 2006
- [16] Sousa, P. M., “Distribuição Optimizada dos Aparelhos de Corte numa Rede de Distribuição de Média Tensão”, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto – Portugal, Junho de 2009
- [17] Matos, M. A., “Introdução ao Trânsito de Potências - Apontamentos para a disciplina de Sistemas Eléctricos de Energia I”, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto – Portugal, 1999
- [18] Santos, J. C., Lima, F. G. M., “Estudo de Metaheurísticas Aplicadas ao Problema do Despacho Económico”, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Mato Grosso do Sul – Brasil, 2009
- [19] Simopoulos, D. N., Kavatza, S. D., Vournas, C. D., “Unit Commitment by an Enhanced Simulated Annealing Algorithm”, IEEE, 2006
- [20] *Web site:* <http://www.lookchem.com/country/AR/Argentina.html>
- [21] *Web site:* <http://rtundisi.wordpress.com/2009/05/20/>
- [22] *Web site:* <http://www.corbacho.info/finlandia/ES/2009/07/finlandia-suomi-laponia-vikingos-paises-nordic-escandinavia/>
- [23] *Web site:* [http://www.curso-objetivo.br/vestibular/roteiro\\_estudos/questao\\_irlanda.aspx](http://www.curso-objetivo.br/vestibular/roteiro_estudos/questao_irlanda.aspx)
- [24] *Web site:* <http://pz-c-7.blogspot.pt/2012/07/brasil.html>
- [25] *Web site:* <http://www.temastop.com/mapa-da-america-do-norte/>
- [26] *Web site:* <http://www.actionpa.org/cleanenergy/>
- [27] *Web site:* [http://wikitravel.org/pt/Pen%C3%ADnsula\\_Ib%C3%A9rica](http://wikitravel.org/pt/Pen%C3%ADnsula_Ib%C3%A9rica)
- [28] *Web site:* [http://www.petfriends.com.br/news/news\\_materia125.htm](http://www.petfriends.com.br/news/news_materia125.htm)

**Web Sites**

EDP - Energias de Portugal: <http://www.edp.pt>, Portugal

ERSE - Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos: <http://www.erse.pt>, Portugal

OMIE – Operador del Mercado de Energía – Polo Español, S. A.: <http://www.omel.es>, Espanha

OMIP – Operador de Mercado de Energia – Polo Português, S. A.: <http://www.omip.pt>, Portugal

MATLAB: <http://www.mathworks.com/products/matlab/>

REN – Redes Energéticas Nacionais: <http://www.ren.pt>, Portugal

## Glossário

**Agentes de Mercado** – são as empresas habilitadas para atuar no mercado de produção como vendedores e compradores de eletricidade. Podem atuar como agentes do mercado os produtores, comercializadores de último recurso e comercializadores de eletricidade, assim como os consumidores diretos de energia elétrica e as empresas ou consumidores residentes noutros países externos ao mercado, que possuam a certificação de comercializadores.

**Contratos Bilaterais** – contratos que relacionam diretamente entidade produtoras, por um lado, e comercializadores ou clientes elegíveis, por outro, em que são estabelecidos acordos que englobam o preço e a modulação da energia a produzir/consumir ao longo de um intervalo de tempo.

**Independent System Operator (ISO)** – entidade com funções de coordenação técnica da exploração do sistema de transporte. Deverá receber informação relativa aos contratos bilaterais em termos dos nós da rede e das potências envolvidas, bem como sobre os despachos económicos resultantes da atividade dos mercados centralizados. Deverá proceder a um conjunto de estudos por forma a avaliar a viabilidade técnica do conjunto contratos/despacho para cada intervalo do dia seguinte, prestando especial atenção às situações de congestionamento.

**Mercado Diário** – mercado no qual se realizam a maioria das transações. Neste mercado devem participar como ofertantes todas as unidades de produção disponíveis, que não estão vinculadas a um contrato bilateral físico, bem como os comercializadores não residentes registados como vendedores. A parte requerente no mercado diário são os comercializadores de último recurso, comercializadores, consumidores diretos e agentes externos registados como compradores.

**Mercado de Eletricidade** – conjunto de transações derivadas da participação dos agentes do mercado nas sessões dos mercados diário e intradiário, mercado a prazo e da aplicação dos procedimentos de operação técnica do sistema.

**Mercado Intradiário** - é um mercado de ajustes no qual podem participar como requerentes e ofertantes as unidades de produção, os comercializadores de último recurso, os comercializadores, os consumidores diretos e os comercializadores de último recurso que tiverem a condição de agentes do mercado. No caso dos compradores no mercado diário, para poderem acorrer ao mercado intradiário, têm de ter participado na correspondente sessão do mercado diário ou na execução de um contrato bilateral físico. No caso dos produtores têm de ter participado na correspondente sessão do mercado diário ou na execução de um contrato bilateral físico ou ter estado indisponível para a sua participação no mercado diário e ter ficado disponível posteriormente.

**Mercados Centralizados** – são mercados onde existe um local, físico ou eletrónico, para se realizarem as transações.

**Propostas Simples** – neste tipo de propostas não se admite qualquer interação temporal entre as propostas transmitidas por uma mesma entidade. As propostas simples apresentadas

pelas unidades de produção poderão incluir um a cinco blocos para cada hora e unidade de produção de que são titulares. Estas apenas incluem a indicação de preço e quantidade propostos.

**Propostas Complexas** – as propostas complexas são aquelas que, incluindo os requisitos exigidos pelas propostas simples, incluirão adicionalmente todas ou algumas das seguintes condições: máxima rampa de variação de potência, rentabilidade mínima, indivisibilidade, condição de número mínimo de horas consecutivas de aceitação completa do primeiro bloco da proposta de venda e energia máxima.

**Serviços Auxiliares** – são todos os serviços necessários ao acesso e à exploração de redes de transporte ou distribuição, incluindo sistemas de compensação de carga, mas excluindo os meios exclusivamente reservados aos operadores da rede de transporte no exercício das suas funções.

**Serviços de Sistema** – são os serviços necessários para a operação do sistema elétrico com adequados níveis de segurança, estabilidade e qualidade de serviço. Dividem-se em serviços obrigatórios e serviços complementares. Os serviços obrigatórios são os que uma central normalmente dispõe para além da produção de energia ativa e compreendem a regulação de tensão e de frequência, e a manutenção da estabilidade. Os serviços complementares são os que uma central pode, eventualmente, disponibilizar: compensação síncrona, compensação estática, reserva, arranque autónomo, entre outros.

---

# APÊNDICE

## Instruções de Utilização

Neste anexo definem-se os passos que o utilizador deverá seguir para uma boa utilização da aplicação desenvolvida.

### ▪ **Passo 1: Inserção de Dados**

O utilizador deverá inserir, nos livros apropriados, as Ofertas de Venda, Ofertas de Compra e Contratos Bilaterais no ficheiro *Excel* "Ofertas", disponibilizado com este simulador e que deve constar na pasta atual do MATLAB (*Current Folder*).

### ▪ **Passo 2: Abrir a Aplicação**

Abrindo o programa MATLAB deverá escrever-se na *Command Window* o nome do *m file* da aplicação, **PoolSimetrico**.

### ▪ **Passo 3: Bloco do Operador de Mercado**

Começar por clicar no botão "1. Simulação do Pool". Ao clicar neste botão o simulador irá ordenar as ofertas de venda por ordem crescente de preço e as ofertas de compra por ordem decrescente. Tendo a tabela das ofertas de compra e venda ordenadas procede ao cruzamento das ofertas e representa-o graficamente. Da interseção do cruzamento das ofertas surge o *Market Clearing Price* e a *Market Clearing Quantity*. Por último, é apresentado o Despacho Provisório e os custos de produção associados a esse despacho.

De seguida, clicando no botão "2. Benefício Social Líquido" o Benefício Social Líquido, que representa a área existente entre a curva agregada das propostas de compra e de venda de energia elétrica aceites, é calculado e apresentado.

### ▪ **Passo 4: Bloco do Operador de Sistema**

Começar por premir o botão "1. Trânsito de Potências". O simulador irá calcular o trânsito de potências da rede recorrendo ao modelo DC. Os resultados serão apresentados num ficheiro *Excel*, denominado por "Transito de Potencias", que, por sua vez, deverá também constar na *Current Folder* do MATLAB.

De seguida, deve clicar-se no botão "2. Validação Técnica". Ao premir este botão o simulador irá verificar se alguma restrição técnica foi violada. No caso de existir a violação das restrições técnicas, o Operador de Sistema devolverá um "SIM", caso contrário, devolverá um "NÃO". Caso ocorra a violação de restrições deve avançar-se para o Passo 4. Caso não haja violação de restrições o despacho que segue é o provisório e a simulação do lançamento das ofertas previamente definidas pode dar-se por terminada.

▪ **Passo 5: Otimização do Despacho (via Algoritmos Genéticos)**

Deve começar-se por clicar no botão "3. Otimizar Despacho". O simulador irá proceder à maximização do Benefício Social Líquido e, portanto, à otimização do Despacho recorrendo à função *ga*.

De seguida, pressiona-se o botão "4. Correção do Pool" e aguarda-se que o cruzamento das ofertas de compra e venda de energia corrigidas seja efetuado e o novo gráfico do *pool* simétrico aparecerá no eixo, apresentando um novo *Market Clearing Price* e uma nova *Market Clearing Quantity*.

Por último, deve voltar-se a efetuar o trânsito de potências (clicando no botão 1 do Operador de Sistema) e verificar se alguma restrição foi violada com a finalidade de garantir a boa otimização do simulador (clicar no botão 2 do Operador de Sistema).