

**Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto**



**FEUP**

**Optimização de despacho económico integrando  
previsão de variabilidade de produção hídrica,  
eólica e solar**

João Mauro das Neves Rocha

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

Orientador: Prof. Dr. Cláudio Monteiro

Julho de 2010

© João Mauro das Neves Rocha, 2010

# Resumo

O problema de despacho económico tem um papel fundamental no funcionamento do sistema eléctrico de energia (SEE). O objectivo de um problema de despacho económico é determinar a melhor combinação de potências de entre as unidades produtoras que devem entrar em funcionamento, 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. Nos sistemas de produção com produção hídrica associada é necessário entrar com os recursos hídricos disponíveis, sendo necessária uma coordenação entre a produção térmica e a produção hídrica, com o objectivo de se determinar a quantidade óptima de energia hídrica e térmica a gerar no período programado para o despacho.

A produção proveniente de fontes de energia renováveis e a sua integração no SEE e nos mercados de electricidade tem crescido rapidamente. Esta situação resulta num aumento dos desequilíbrios de produção, fazendo com que as remunerações dos produtores diminuam, devido ao aumento das penalizações por desvios de produção. Assim, a previsão da produção renovável terá um papel cada vez mais importante na integração das energias renováveis no SEE, tornando mais competitiva a sua participação no mercado de electricidade.

Nesta dissertação é apresentado um novo e eficiente método de optimização - GraSO (*Gradient Swarm Optimization*) - que será aplicado a problemas de despacho económico com produção hídrica associada. É proposta uma formulação do problema através do mapeamento dos limites de estratégia de despacho económico que têm sido utilizados nos últimos anos em Portugal, conseguindo-se através de uma estratégia diferente uma melhor optimização do despacho, para um caso real.

Nesta dissertação também é realizada a optimização do problema de despacho económico proposto para três cenários de previsão distintos da produção hídrica, eólica e solar. É analisado o impacto que as diferentes previsões têm no despacho realizado e nos custos de despacho, assim como, a influência destas na remuneração dos produtores da sua participação no mercado de electricidade.

**Palavras-chave:** Despacho Económico, GraSO, Algoritmos de Optimização, Custo do Despacho, Remuneração dos Mercados de Electricidade, Previsão de Produção Renovável.



# Abstract

*The economic dispatch problem has a key role in the operations of the electric energy system (SEE). The purpose of an economic dispatch problem is to determine the best schedule output of the committed units, so as to meet the needs of the load at the lowest possible cost of operation, satisfying the system equality and inequality constraints. In power systems with water production associated is necessary to enter with the water resources available and needed coordination between the thermal and hydro power in order to determine the optimal amount of hydro and thermal generating in the period scheduled for the dispatch.*

*The production from renewable energy sources and their integration into SEE and electricity markets has grown rapidly. This results in an increase in the power imbalance, making the revenues of producers to decrease due to increased penalties for the imbalances. Therefore, forecasting of renewable production will play an increasingly important role in the integration of renewable energy in SEE, making more competitive it participation in the electricity market.*

*This dissertation presents a novel and efficient method of optimization - GraSO (Gradient Swarm Optimization) - which will be applied to economic dispatch problems associated with water production. It proposed a formulation of the problem by mapping the boundaries of economic dispatch strategy that have been used in recent years in Portugal, achieving a better economic dispatch optimization through a different strategy, for a real case.*

*This dissertation is also performed to optimize the proposed economic dispatch problem in three different scenarios of hydro, wind and solar power forecast. It is analyzed the impact that the different forecast have in dispatch optimization and in dispatch costs, as well as the influence of theses in the revenue of the producers for their participation in the electricity market.*

**Keywords:** *Economic Dispatch, GraSO, Optimization Algorithms, Dispatch Cost, Electricity Markets Revenue, Renewable Power Forecasting.*



# Agradecimentos

Agradeço os meus pais, aos meus amigos, e a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização desta dissertação.

Obrigado pela paciência.

*Thanks Boss. See you around!*





*“I’d rather be hated for who I am than loved for who I’m not.”*

Kurt Cobain



# Índice

Resumo .....	iii
Abstract.....	v
Agradecimentos .....	vii
Índice.....	xi
Lista de Figuras .....	xiii
Lista de Tabelas .....	xvii
Abreviaturas e Símbolos .....	xix
<b>Capítulo 1 .....</b>	<b>1</b>
Introdução.....	1
1.1 - Enquadramento .....	1
1.2 - Motivação .....	4
1.3 - Objectivos.....	4
1.4 - Estrutura da dissertação.....	5
1.5 - Informação usada nesta dissertação.....	6
1.6 - Ferramentas utilizadas no desenvolvimento desta dissertação .....	6
<b>Capítulo 2 .....</b>	<b>7</b>
Estado da arte .....	7
2.1 - Introdução.....	7
2.2 - Despacho económico .....	7
2.3 - Formulação do problema de despacho económico .....	9
2.3.1 - Formulação básica de despacho económico .....	9
2.3.2 - Restrições de operação das unidades produtoras.....	10
2.3.3 - Funções de custo não lineares considerando os efeitos das válvulas de injeção .....	12
2.3.4 - Funções de custo não lineares considerando uma multiplicidade de combustíveis .....	13
2.4 - Despacho económico com coordenação hidro-térmica .....	13
2.4.1 - Formulação de um problema de coordenação hidro-térmica .....	15
2.5 - Efeitos das energias renováveis na optimização do despacho económico .....	17
2.5.1 - Importância da previsão na integração da produção renovável no SEE.....	17
2.5.2 - Impactos da integração das energias renováveis nos mercados de electricidade .....	19

<b>Capítulo 3</b> .....	<b>27</b>
GraSO - Uma nova técnica de optimização de despacho económico .....	27
3.1 - Introdução .....	27
3.2 - Diferentes métodos para optimização de despacho económico.....	27
3.2.1 - Optimização de enxames de partículas (PSO).....	27
3.2.2 - Algoritmos genéticos (GAs) .....	30
3.2.3 - Programação evolucionária (EP) ou estratégias de evolução (ES) .....	31
3.2.4 - Evolução diferencial .....	32
3.3 - Conceito do GraSO.....	32
3.4 - Descrição do algoritmo .....	33
3.5 - Inclusão no GraSO de restrições de igualdade e desigualdade .....	39
3.6 - Adaptação do GraSO a um problema de despacho económico .....	41
<b>Capítulo 4</b> .....	<b>47</b>
Metodologia proposta .....	47
4.1 - Introdução .....	47
4.2 - Formulação do problema de despacho económico proposto.....	47
4.2.1 - Curva dos custos dos combustíveis das unidades térmicas .....	47
4.2.2 - Rampas da capacidade de variação da produção.....	49
4.2.3 - Limite máximo da produção hídrica .....	49
4.2.4 - Limites da produção hídrica em função da água armazenada .....	51
4.2.5 - Limites de armazenamento de água .....	55
4.2.6 - Limite fixo de descarga .....	56
4.2.7 - Restrição de balanço .....	56
4.3 - Remuneração dos produtores de energia no mercado de electricidade .....	57
<b>Capítulo 5</b> .....	<b>59</b>
Resultados.....	59
5.1 - Despacho económico obtido através do GraSO.....	59
5.2 - Cenários de previsão .....	65
5.2.1 - Previsão perfeita .....	66
5.2.2 - Previsão real .....	66
5.2.3 - Sem previsão .....	66
5.3 - Impacto da previsão no despacho económico .....	67
5.4 - Impacto da previsão na remuneração dos produtores eólicos .....	73
5.5 - Conclusões .....	76
<b>Capítulo 6</b> .....	<b>79</b>
Conclusões e Futuros Desenvolvimentos.....	79
6.1 - Conclusões gerais .....	79
6.2 - Futuros Desenvolvimentos .....	80
<b>Referências</b> .....	<b>81</b>

# Lista de Figuras

Figura 1.1 - Origem da energia no consumo anual em Portugal [49] .....	2
Figura 1.2 - Evolução da potência eólica total ligada em Portugal [49] .....	3
Figura 2.1 - Curva típica do custo de produção de um gerador térmico clássico [42].....	8
Figura 2.2 - Três situações de operação possíveis de uma unidade de produção (a - produção constante, b - aumento da produção, c - diminuição da produção) [8].....	10
Figura 2.3 - Curva potência/custo com zonas de operação proibitivas [8] .....	11
Figura 2.4 - Curva potência/custo sobre válvulas de injeção [8] .....	12
Figura 2.5 - Função seccional de custo incremental e quadrática de um gerador [7].....	13
Figura 2.6 - Funções do custo imediato e futuro [22].....	14
Figura 2.7 - Decomposição temporal hierárquica para o HGSP [22]. .....	15
Figura 2.8 - Previsão para a evolução da capacidade instalada do sistema eléctrico Português (2006-2025) [53].....	17
Figura 2.9 - Integração das energias renováveis no mercado de electricidade [34] .....	20
2.10 - Oferta e procura no mercado diário em Portugal na hora 17 do dia 23 de Outubro de 2007 [38].....	21
Figura 2.11 - Sessões do mercado intra-diário [38].....	21
Figura 2.12 - Comparação entre o preço do mercado diário e o preço de reserva, para a semana de 28 de Maio a 3 de Junho de 2010, para o mercado de electricidade Português [54] .....	22
Figura 2.13 - Desequilíbrio do sistema e da potência eólica [35] .....	23
Figura 2.14 - Impacto financeiro teórico dos erros de previsão do vento [35] .....	24
Figura 3.1 - O mecanismo de pesquisa do PSO [12].....	29
Figura 3.2 - Fluxograma do algoritmo GraSO [41].....	33
Figura 3.3 - Evolução do parâmetro $\varphi$ em situações longe de soluções óptimas [41] .....	35

Figura 3.4 - Evolução do parâmetro $\varphi$ em situações perto de soluções óptimas [41] .....	35
Figura 3.5 - Comportamento do enxame de partículas perto da solução óptima [41] .....	36
Figura 3.6 - Comportamento do enxame de partículas longe da solução óptima [41] .....	37
Figura 3.7 - Comportamento das funções de activação sigmóides invertidas [41].....	38
Figura 3.8 - Penalidade a ser aplicada às variáveis para estas se afastar dos seus limites (adaptado de [16]).....	40
Figura 3.9 - Análise comparativa da utilização do GraSO num problema de despacho económico [41] .....	41
Figura 3.10 - Sequência de etapas do GraSO para o escalonamento da potência térmica e potência hídrica .....	45
Figura 4.1 - Curva dos custos com a produção térmica agregada .....	48
Figura 4.2 - Rampas da capacidade de variação da unidade térmica .....	49
Figura 4.3 - Produção hídrica em centrais de albufeira e em centrais de fio de água .....	50
Figura 4.4 - Limite máximo da produção hídrica em função da potência média das últimas vinte e quatro horas .....	51
Figura 4.5 - Potência hídrica, potência hídrica média e energia hídrica armazenada acumulada.....	52
Figura 4.6 - Limites da produção hídrica em função da energia hídrica armazenada acumulada, para o ano de 2009 .....	54
Figura 4.7 - Limites da produção hídrica em função da energia hídrica armazenada acumulada, para o ano de 2010 .....	55
Figura 5.1 - Comparação entre o despacho térmico obtido pelo GraSO e o real, para o dia 26 de Abril de 2010 .....	60
Figura 5.2 - Comparação entre o despacho hídrico obtido pelo GraSO e o real, para o dia 26 de Abril de 2010 .....	60
Figura 5.3 - Comparação entre o despacho térmico obtido pelo GraSO e o real, para o dia 28 de Abril de 2010 .....	61
Figura 5.4 - Comparação entre o despacho hídrico obtido pelo GraSO e o real, para o dia 28 de Abril de 2010 .....	61
Figura 5.5 - Comparação entre o despacho térmico obtido pelo GraSO e o real, para os últimos 5 dias de Abril de 2010.....	62
Figura 5.6 - Comparação entre o despacho hídrico obtido pelo GraSO e o real, para os últimos 5 dias de Abril de 2010.....	63
Figura 5.7 - Comparação entre a energia hídrica armazenada acumulada obtida pelo GraSO e a real, para os últimos 5 dias de Abril de 2010 .....	64
Figura 5.8 - Comparação entre a o custo do despacho obtido pelo GraSO e o real, para os últimos 5 dias de Abril de 2010.....	65

Figura 5.9 - Comparação entre a previsão perfeita, a previsão real e a persistência da produção eólica, para um período de 48 horas .....	67
Figura 5.10 - Evolução do custo de despacho para os diferentes cenários de previsão, ao longo do mês de Abril de 2010.....	68
Figura 5.11 - Comparação entre a produção renovável obtida através dos diferentes cenários de previsão, durante alguns dias do mês de Abril de 2010 .....	69
Figura 5.12 - Evolução do preço do mercado diário e da reserva ao longo de um período do mês de Abril de 2010 .....	70
Figura 5.13 - Custo do despacho total para os três cenários de previsão, para alguns dias do mês de Abril de 2010 .....	71
Figura 5.14 - Despacho escalonado para o mercado diário para os três cenários de previsão, para alguns dias do mês de Abril de 2010 .....	72
Figura 5.15 - Desvios de produção eólica para diferentes cenários de previsão, para alguns dias de Abril de 2010 .....	73
Figura 5.16 - Evolução do lucro da participação dos produtores eólicos no mercado de electricidade, para diferentes cenários de previsão, durante alguns dias do mês de Abril de 2010.....	75





## Lista de Tabelas

Tabela 5.1 - Comparação entre o custo de despacho real e o obtido através do GraSO.....	64
Tabela 5.2 - Comparação entre os custos de despacho para os diferentes cenários de previsão.....	67
Tabela 5.3 - Média do preço de mercado, preço da reserva para elevar a produção e preço de reserva para reduzir a produção, no mercado Português em Abril de 2010 .....	70
Tabela 5.4 - Comparação do custo de despacho total dos produtores de energia térmica para os diferentes cenários de previsão .....	71
Tabela 5.5 - Penalizações e compensações totais para os diferentes cenários de previsão, devido a desvios de produção eólica, no mês de Abril de 2010.....	74
Tabela 5.6 - Lucro da participação dos produtores eólicos no mercado de electricidade, para diferentes cenários de previsão, em Abril de 2010 .....	74
Tabela 5.7 - Lucro da participação dos produtores eólicos no mercado de electricidade, para uma previsão optimizada através do factor $\delta$ , em Abril de 2010 .....	76



# Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas (ordenadas por ordem alfabética)

EP	<i>Evolutionary Programming</i>
ES	<i>Evolution Strategies</i>
GAs	<i>Genetic Algorithms</i>
GPESO	<i>Genetic Particle Evolutionary Swarm Optimization</i>
GPSO	<i>Genetic Particle Swarm Optimization</i>
GraSO	<i>Gradient Swarm Optimization</i>
HGSP	<i>Hydrothermal Generation Scheduling Problem</i>
HTC	<i>Hydrothermal Coordination</i>
IPSO	<i>Improved Particle Swarm Optimization</i>
LRS	<i>Local Random Search</i>
MDE	<i>Modified Differential Evolution</i>
NPSO	<i>New Particle Swarm Optimization</i>
PRE	Produção em Regime Especial
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
PSO-RDL	<i>Particle Swarm Optimization with Recombination and Dynamic Linkage Discovery</i>
REN	Rede Eléctrica Nacional
RSM	<i>Response Surface Methodologies</i>
SEE	Sistema Eléctrico de Energia
TSO	<i>Transmission System Operator</i>
UC	<i>Unit Commitment</i>

Lista de símbolos (ordenados por ordem alfabética)

$c$	Custo da penalização por desvios de produção
<i>Consumo</i>	Consumo de potência previsto
$c1, c2$	Constante de aceleração
$d$	Desvio da produção proposta ao mercado
$DR$	Limite inferior das rampas
$E_h$ acumulada	Energia hídrica armazenada acumulada

$E_h$ acumulada <sub>max</sub>	Energia hídrica máxima armazenada acumulada
$E_h$ acumulada <sub>min</sub>	Energia hídrica mínima armazenada acumulada
exportações	Previsão das exportações realizadas
$F_{custo}$	Função de custo
$F_{s1}$	Função de activação sigmóide invertida 1
$F_{s2}$	Função de activação sigmóide invertida 2
$F_T$	Custo total da produção
$I$	Remuneração a receber do mercado pelos produtores
importações	Previsão das importações realizadas
$it$	Número de iterações
$I_{total}$	Lucro líquido dos produtores
$L$	Número de linhas de transmissão
$m$	Parâmetro de penalidade
$max_{it}$	Número máximo de iterações
$M€$	Milhões de euros
$N$	Número de geradores térmicos
$n_{PZ}$	Número de unidades que têm zonas proibitivas de operação
$n_{swarm}$	Número de partículas que compõem cada enxame
$N(\mu, \sigma^2)$	Distribuição Gaussiana
$P_{albufeira}$	Produção hídrica de albufeira
$P_{bombagem}$	Bombagem
$P_c$	Produção prevista proveniente da cogeração
$P_{carvão}$	Potência térmica de carvão
$P_{ciclo-combinado}$	Potência térmica de ciclo-combinado
$P_D$	Carga total requerida
$p^d$	Preço de reserva para descer a produção
$P_e$	Produção prevista proveniente da geração eólica
penalidade	Penalidade utilizada no algoritmo para impedir a violação dos limites
$P_{fio\ de\ água}$	Produção hídrica de fio de água
$P_{fuel}$	Potência térmica de <i>fuel</i>
$P_h$	Potência hídrica
$P_h$ armazenada	Potência hídrica armazenada em cada hora
$P_h$ max	Potência hídrica máxima
$P_h$ min	Potência hídrica mínima
$P_{i,k}^l$	Limite inferior da zona de operação proibitiva
$P_{i,k}^u$	Limite superior da zona de operação proibitiva
$P_{Lf,k}$	Potência real na linha $k$
$P_{Loss}$	Perdas totais
$P_{mh}$	Produção prevista proveniente das mini-hídricas
$P_{real}$	Potência real produzida
$p_{reg}$	Preço de regulação
$P_s$	Previsão da produção solar esperada
$p^s$	Preço de reserva para subir a produção
$p_{spot}$	Preço de mercado
$P_t$	Potência térmica
$P_t(t - 1)$	Produção térmica da hora anterior

$P_t \max$	Potência térmica máxima
$P_t \min$	Potência térmica mínima
$pZ_i$	Número de zonas proibidas
$\hat{P}$	Potência produzida prevista
$q(j, t)$	Taxa de descarga da unidade hídrica $j$ no intervalo de tempo $t$
$Q(j, t)$	Limite fixo de descarga
$q^{\max}$	Limite máximo da taxa de descarga
$q^{\min}$	Limite mínimo da taxa de descarga
$r(j, t)$	Taxa de entrada no reservatório $j$ durante o intervalo de tempo $t$
$r1, r2$	Número aleatório entre [0, 1]
$R_{\text{swarm}}^2$	Coefficiente de determinação da partícula do enxame
$R_{\varphi}^2$	Coefficiente de determinação de $\varphi$
$s(j, t)$	Taxa de derrame do reservatório $j$ durante o intervalo de tempo $t$
$S_R$	Reserva girante requerida do sistema
$UR$	Limite superior das rampas
$V(j, t)$	Volume de armazenamento do reservatório $j$ no fim do intervalo de tempo $t$
$V_E$	Volume final de armazenamento de água
$V^{\max}$	Limite máximo de volume de armazenamento de água
$V^{\min}$	Limite mínimo de volume de armazenamento de água
$V_i^k$	Velocidade da partícula na iteração $k$
$V_i^{k+1}$	Velocidade da partícula na iteração $k + 1$
$V_s$	Volume inicial de armazenamento de água
$X_{\text{best}}$	Melhor partícula do enxame
$X_i^{k+1}$	Posição da partícula na presente iteração ( $k + 1$ )
$x_{\max}$	Valor máximo das variáveis que compõem a função objectivo
$x_{\min}$	Valor mínimo das variáveis que compõem a função objectivo
$X_{\text{queen}}$	Rainha do enxame
$X_{\text{swarm}}$	Partícula do enxame
$\sigma^2$	Variância da distribuição Gaussiana
$\mu$	Valor médio
$\varphi$	Distância entre a rainha do enxame e cada uma das partículas
$\alpha$	Parâmetro de escala interno do algoritmo
$\sigma_{\varphi}$	Desvio-padrão entre a rainha e as partículas do enxame
$\sigma_{\text{Fitness}}$	Desvio-padrão para todas as partículas que compõem o enxame
$\nabla_{\varphi}$	Gradiente de $\varphi$
$\Delta_{\varphi}$	Varição normalizada de $\varphi$
$\delta$	Factor de optimização da previsão



# Capítulo 1

## Introdução

A presente dissertação foi desenvolvida no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores da Universidade do Porto.

Neste trabalho de dissertação é feita uma adaptação de uma nova técnica de optimização para a resolução de problemas de despacho económico, utilizando-se diferentes previsões, com o objectivo de se observar o impacto da variabilidade da produção hídrica, eólica e solar no custo do despacho económico.

Este capítulo contempla uma abordagem inicial ao problema, contextualizando-o. São definidos os objectivos e a motivação inerentes à realização desta dissertação. Na parte final é feita uma pequena descrição da sua estrutura e do trabalho realizado.

### 1.1 - Enquadramento

A energia eléctrica está no cerne da sociedade moderna, sendo uma componente essencial do nosso estilo de vida e um factor determinante na competitividade da economia.

Um sistema eléctrico de energia é basicamente composto por centrais de geração, linhas de transmissão, transformadores e cargas. Estes são capazes de produzir energia eléctrica suficiente para alimentar as exigências da carga [1]. O objectivo da exploração de um sistema eléctrico de energia (SEE) é o transporte da energia eléctrica dos centros de produção para os locais de consumo com máxima continuidade, custos mínimos, máximo de segurança para as pessoas e equipamentos, tensão e frequência nos limites impostos nos regulamentos. Estes objectivos são muitas vezes antagónicos, pelo que há necessidade de procurar soluções de compromisso [42].

As várias actividades necessárias à exploração de um SEE, não têm todas o mesmo escalonamento no tempo. Existem as actividades a curto-prazo, que incluem a previsão da carga, *unit commitment* (UC), despacho económico, estudos do fluxo de carga óptimo, coordenação hidro-térmica, preços, atribuição de combustível, e análises de segurança. Noutras situações, o planeamento de operações é dado num contexto mais amplo que, juntamente com o planeamento de operações a curto-prazo, incluem o planeamento de actividades a médio-prazo cobrindo um período de alguns anos, como a manutenção, taxa de previsão, e o planeamento da configuração da rede. Seja qual for o contexto adoptado, o

principal objectivo é que a exploração do SEE seja capaz de ir ao encontro das exigências do sistema ao menor custo possível, com um elevado nível de fiabilidade e qualidade [31].

O planeamento das operações do sistema torna-se assim numa tarefa extremamente complicada, pois este tem que ter em consideração os seus efeitos em diferentes horizontes temporais. Para complicar ainda mais a tarefa dos operadores, as energias renováveis, como a energia eólica e solar, têm-se tornado em fontes de energia significativas, fazendo com que seja necessário lidar com uma vasta gama de incertezas. Estas incluem incertezas de localização, temporização, capacidade e disponibilidade da produção, e ainda incertezas na direcção do fluxo de potência e nas regras e restrições reguladoras [32].

De facto, o sector energético tem tido nos últimos anos um forte desenvolvimento, em especial no que se refere às energias renováveis, devido ao crescimento da procura de energia que se tem verificado. A Figura 1.1 mostra esse crescimento que se tem verificado em Portugal, sendo acompanhado pelo crescimento da Produção em Regime Especial (PRE), que no caso inclui a produção eólica e a cogeração.

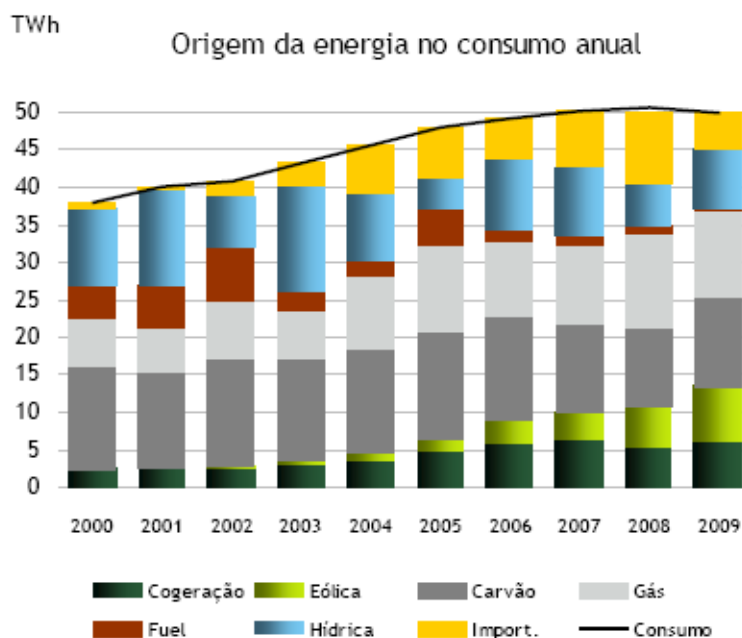


Figura 1.1 - Origem da energia no consumo anual em Portugal [49]

Os combustíveis fósseis estão na origem de grandes catástrofes ambientais e alterações climáticas, para além de representarem custos elevados. São estes aspectos que têm suscitado uma aposta na promoção da produção de energia eléctrica com base em fontes de energia renovável, em detrimento de fontes que promovam a emissão de gases com efeito de estufa. Motivada pelo Protocolo de Kyoto, a Comissão Europeia estabeleceu o objectivo de duplicar a quota das energias renováveis no consumo bruto de energia de 6% em 1997 para 12% em 2010. Esta directiva tem como meta atingir 22,1% de quota indicativa de electricidade produzida a partir de fontes de energia renovável, no consumo de electricidade total da Comunidade até 2010 [43].

Assim, é expectável que a penetração de fontes renováveis intermitentes na rede eléctrica irá aumentar no futuro, com especial destaque para o crescimento da energia



eólica. Em Portugal, esse crescimento tem sido particularmente elevado nos últimos cinco anos, como está demonstrado no gráfico da Figura 1.2.

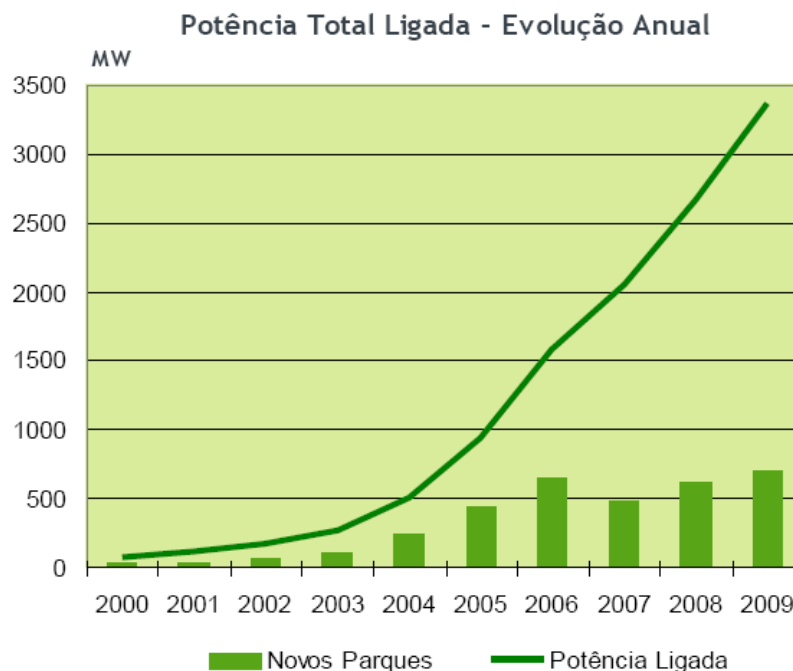


Figura 1.2 - Evolução da potência eólica total ligada em Portugal [49]

O sector eléctrico tem sentido nos últimos anos uma rápida evolução, com o surgimento de mercados abertos de electricidade, o crescente aumento da integração da produção distribuída e em particular a partir de energia eólica. Esta aposta na produção de energia a partir das energias renováveis resulta num agravamento da incerteza associada à previsão de cenários de produção, uma vez que estas energias dependem de factores climáticos que se fazem sentir a cada instante, factores esses, como a precipitação e o vento, que são de difícil previsão.

A origem destas mudanças do sistema eléctrico está relacionada com diversos factores, entre eles, a liberalização do mercado de electricidade, aumento do consumo e exigência de maior fiabilidade e sustentabilidade do sistema, aumento do preço do petróleo, crescente preocupação com as questões ambientais e fortes desenvolvimentos de tecnologias de aproveitamento das fontes de energia renováveis para a produção de energia.

Tal situação tem aumentado as preocupações quanto aos custos do sistema, em especial, se estas novas tecnologias de produção serão capazes de substituir a capacidade e flexibilidade das centrais de produção tradicionais. Como a intermitência e a incontabilidade são características intrínsecas nos sistemas de produção de electricidade baseados nas energias renováveis, a capacidade de manter o balanço entre a procura e a oferta tem sido a maior preocupação, uma vez que os erros de previsão podem levar a desequilíbrios e conseqüentemente a um aumento dos custos [45]. Esses aumentos dos custos devem-se à necessidade da utilização de reservas para equilibrar a produção, que são muitas vezes providenciadas por unidades de produção convencionais. Pelo que, a potência proveniente de fontes renováveis deve ser tida em conta no compromisso e despacho de

outras unidades do sistema e, conseqüentemente, terá influência nas receitas operacionais de outras tecnologias de produção [46].

## 1.2 - Motivação

Com a evolução que se tem verificado nos sistemas de energia, o problema de despacho económico tem ganho cada vez mais importância, tendo em conta que este envolve vários aspectos do sistema de energia.

O aumento do consumo de energia que se tem vindo a verificar nos últimos anos, juntamente com a escalada do preço do petróleo, fazem com que a redução dos custos de operação do sistema, e conseqüentemente, a redução dos custos do despacho, seja cada vez mais uma prioridade. Até porque, os custos de produção são muito elevados, pelo que, qualquer optimização do despacho económico que permita uma pequena redução dos custos tem um impacto significativo.

O crescente aumento da influência da produção hidroeléctrica no sistema de produção, assim como o aumento da competição no mercado de energia, faz com que o planeamento conjunto da produção de energia hídrica e térmica, da forma mais económica, se assuma como umas das tarefas mais importantes nos sistemas de energia.

As energias renováveis têm um impacto cada vez maior na operação de sistemas eléctricos, trazendo problemas em como proceder-se à sua integração nos mercados de electricidade. Uma vez que a produção das mini-hídricas, dos geradores eólicos e dos geradores solares não coincidem muitas vezes com a procura do mercado ou a carga do sistema, situação agravada pelos erros de previsão da produção, que trazem grande incerteza às operações do sistema. Uma boa previsão é assim fundamental para se ultrapassar este problema, uma vez que permite fazer a ponte da produção a partir de fontes de energia renováveis com a produção das centrais convencionais e a previsão do consumo, possibilitando uma menor necessidade de recorrer à energia de reserva, baixando assim o custo da integração das energias renováveis no sistema.

## 1.3 - Objectivos

Nesta secção são apresentados os objectivos da presente dissertação. Neste trabalho pretende-se fazer a optimização do despacho económico através de uma nova técnica de optimização, integrando previsão de produção renovável, para se avaliar os custos que os erros de previsão implicam para o despacho. Assim, os objectivos desta dissertação são:

- Modelização de restrições numa nova técnica de optimização - GraSO;
- Adaptação do GraSO à resolução de problemas de despacho económico;
- Mapeamento dos limites estratégicos utilizados nos últimos anos, para criar uma metodologia que permita uma melhor optimização do despacho económico;

- Integração de diferentes previsões da produção hídrica, eólica e solar na optimização do despacho económico, como forma de aferir o valor da previsão no despacho;
- Demonstração de que a utilização de melhores previsões da produção a partir das energias renováveis pode aumentar as remunerações a receber pelos produtores pela sua participação no mercado de electricidade.

## 1.4 - Estrutura da dissertação

A presente dissertação é composta por seis capítulos.

O Capítulo 1 é de natureza introdutória, onde se apresenta a motivação para a realização deste trabalho, bem como os objectivos que se propõem alcançar no desenvolvimento da dissertação.

No Capítulo 2 apresenta-se o estado da arte no que se refere tanto à formulação de problemas de despacho económico, como de problemas de coordenação hidro-térmica. Neste capítulo é ainda abordado o impacto da integração das energias renováveis e da sua imprevisibilidade no SEE, assim como é descrito o funcionamento do mercado de electricidade e como este lida com os erros de previsão.

No Capítulo 3 apresenta-se o estado da arte de alguns algoritmos evolucionários que têm vindo a ser utilizados na optimização de problemas de despacho económico. É também apresentado neste capítulo um novo algoritmo de optimização que foi desenvolvido em [41]. É explicado o funcionamento do algoritmo GraSO, bem como as adaptações realizadas nesta dissertação para que o algoritmo consiga resolver problemas de optimização de despacho económico. É ainda explicada a modelização de restrições realizada nesta dissertação para o GraSO.

No capítulo 4 é apresentada a metodologia desenvolvida no âmbito do trabalho desta dissertação. É feita a análise dos dados recolhidos de despacho real, e com base nisso, é proposto um problema de despacho económico a otimizar. É também descrita neste capítulo a formulação para determinar a remuneração a receber pelos produtores que participam no mercado de electricidade, bem como os custos de despacho dos produtores térmicos após a correcção dos desvios de produção.

No capítulo 5 são discutidos os resultados obtidos pela aplicação do GraSO adaptado no Capítulo 3, ao problema de despacho económico proposto no capítulo 4. São também descritos neste capítulo os diferentes casos de previsão em estudo, sendo discutido o custo do despacho obtido para diferentes cenários de previsão de produção hídrica, eólica e fotovoltaica, assim como, a remuneração obtida pelos produtores que participam no mercado de electricidade, para os mesmos cenários de previsão.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões deste trabalho de dissertação, assim como é feita uma referência a como este trabalho pode ser futuramente desenvolvido.

## 1.5 - Informação usada nesta dissertação

Muitos dos dados utilizados nesta dissertação foram obtidos através da Rede Eléctrica Nacional (REN). Esses dados são relativos à produção proveniente de centrais a carvão, *fuel*, ciclo-combinado, à produção das hídricas de fio de água e albufeira, à produção das PRE (hídrica, térmica, eólica e fotovoltaica), aos valores de bombagem, importações, exportações e consumo, todos eles referentes aos anos de 2009 e 2010. Para além destes valores, foram também recolhidos os dados relativo ao preço do mercado diário [55] e da reserva [56] para o mesmo período de tempo.

Também foram utilizados nesta dissertação, valores de previsão da produção hídrica, eólica e fotovoltaica, para o ano de 2010, cedidos pela SmartWatt.

## 1.6 - Ferramentas utilizadas no desenvolvimento desta dissertação

No desenvolvimento desta dissertação foi utilizado para a análise e tratamento de dados o Excel do Microsoft Office, que permitiu mapear a estratégia de despacho utilizada nos últimos anos. Para a modelização e determinação de parâmetros de funções foi utilizada a ferramenta Solver presente no Excel. O Solver também foi utilizado para a determinação do factor de optimização de uma previsão. Toda a programação efectuada para a adaptação da técnica de optimização GraSO a problemas de despacho económico e na modelização das restrições do GraSO foi realizada em VBA, com interface em Excel.

# Capítulo 2

## Estado da arte

### 2.1 - Introdução

Para se fornecer energia eléctrica, de forma fiável e económica, aos consumidores, as empresas produtoras de energia eléctrica enfrentam diversos problemas técnicos e económicos no que se refere à operação, planeamento e controlo dos sistemas de energia. A maioria dos problemas de optimização dos sistemas de energia, como é o caso do despacho económico, apresentam características complexas e não lineares, com pesadas restrições de igualdade e desigualdade [2].

O consumo de energia tem vindo a crescer, em especial, devido ao aumento da população e à industrialização dos países desenvolvidos. Como consequência os sistemas de energia enfrentam problemas de estabilidade. Neste contexto, o aumento da produção de energia com origem em fontes renováveis e a reestruturação do mercado de electricidade, tendem a agravar estes problemas de estabilidade, uma vez que é introduzido o conceito de competição. Assim, são estabelecidos contractos que procuram essencialmente interesses económicos, criando impactos negativos na estabilidade do sistema. Assim, o planeamento dos sistemas eléctricos tem um papel crucial nos dias de hoje [57].

Na operação e controlo dos sistemas eléctricos de energia, devido à variação da carga e à não possibilidade de armazenamento da energia eléctrica, dada a previsão horária da carga para o dia ou a semana seguinte, os operadores de sistema devem escalar a potência real a fornecer pelas unidades de produção, para ir de encontro à procura ao longo do horizonte temporal, resultando daí o despacho económico [3].

### 2.2 - Despacho económico

Os investimentos em unidades de produção de energia eléctrica são elevados, e os recursos necessários à sua operação são consideráveis e limitados. Assim, actualmente, um dos principais objectivos na operação dos mercados de electricidade descentralizados é a optimização destes recursos [50].

Com o desenvolvimento de modernos sistemas de energia, o problema de despacho económico tem recebido crescente atenção, uma vez que diversos aspectos dos sistemas de energia estão

envolvidos. Com o aumento do consumo de energia mundial e o “boom” do preço do petróleo nos anos mais recentes, a redução dos custos de operação do sistema de energia torna-se num assunto da mais alta importância. O problema de despacho económico consiste na alocação da totalidade da produção necessária de entre as unidades de produção disponíveis, assumindo-se que o UC é previamente determinado. O objectivo consiste em minimizar o custo do combustível, sujeito a restrições tanto físicas como operacionais [4, 5]. Como resultado, o objectivo do problema de despacho económico 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. [2, 4]. O objectivo de um despacho moderno é o de explorar a rede muito mais perto do seu limite de segurança [42]. Uma vez que os custos de produção são bastante elevados, um despacho óptimo permite a poupança de uma considerável quantidade de dinheiro [6].

Por questões de simplicidade, nos problemas tradicionais de despacho económico, a função de custo de cada unidade produtora tem vindo a ser aproximada por uma função quadrática, sendo considerada a restrição de balanço separadamente da capacidade limite de geração, e é resolvida usando técnicas de programação matemática, como sendo o multiplicador de Lagrange, método do gradiente e o método de Newton. Estes métodos conseguem resolver eficientemente problemas de despacho económico, 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 [6, 7]. Na Figura 2.1 está representada uma curva típica dos custos de produção de um gerador térmico clássico.

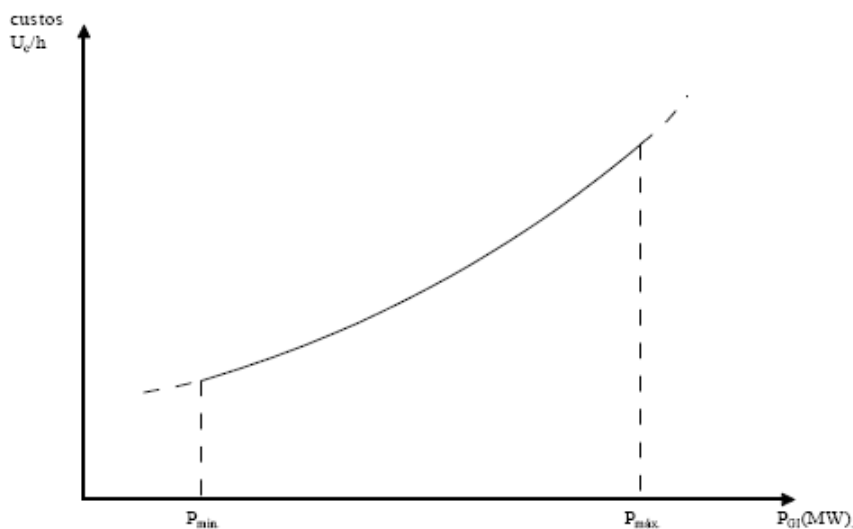


Figura 2.1 - Curva típica do custo de produção de um gerador térmico clássico [42]

Contudo, num problema prático de despacho, as funções de custo das unidades produtoras são altamente não lineares, devido a zonas de operação proibitivas, válvulas de injeção, aos efeitos da multiplicidade de combustíveis, limites das rampas dos geradores, etc., 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 optimização onde a função objectivo é altamente não linear, com restrições de igualdade e desigualdade, que não pode ser resolvido directamente através de métodos matemáticos tradicionais, uma vez que estes têm maior probabilidade de falhar na

localização da solução óptima, resultado daí erros consideráveis. Todos estes aspectos tornam este problema de encontrar um mínimo global bastante complexo [2, 5].

O problema de despacho económico também pode ser formulado de uma maneira dinâmica, que é de mais complicada resolução, 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 económico 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 optimização dinâmico tendo em conta as restrições impostas ao funcionamento do sistema, gerando limites para as rampas de capacidade de variação das unidades térmicas [52].

## 2.3 - Formulação do problema de despacho económico

### 2.3.1 - Formulação básica de despacho económico

O despacho económico é dos mais importantes problemas a resolver na operação e planeamento de um sistema de energia. O objectivo do problema de despacho económico é minimizar o custo total do combustível de centrais térmicas, sujeito a restrições de operação de um sistema de energia. Em geral, pode ser formulado matematicamente com uma função objectivo e duas restrições [2, 6].

$$F_T = \sum_{i=1}^N F_i(P_i) \quad (2.1)$$

$$F_i(P_i) = a_i + b_i P_i + c_i P_i^2 \quad (2.2)$$

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.

$$\sum_{i=1}^N P_i = P_D + P_{Loss} \quad (2.3)$$

Onde  $P_D$  é a carga total requerida e  $P_{Loss}$  são as perdas totais. Estas perdas são uma função da potência produzida, que podem ser representadas usando coeficientes B como de seguida:

$$P_{Loss} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N P_i B_{ij} P_j + \sum_{i=1}^N B_{0i} P_i + B_{00} \quad (2.4)$$

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

$$P_{i,min} \leq P_i \leq P_{i,max} \quad (2.5)$$

Onde  $P_{i,min}$  e  $P_{i,max}$  são a mínima e máxima potência produzida pelo gerador  $i$ , respectivamente.

### 2.3.2 - Restrições de operação das unidades produtoras

Em problemas de despacho económico mais complexos, para além da restrição de balanço e da restrição dos limites de produção dos geradores, podem ainda existir restrições dos limites de rampa dos geradores, restrições considerando zonas proibitivas de operação, restrição da reserva girante e restrição do fluxo da linha.

Alguns artigos na literatura focam-se nos aspectos económicos do despacho económico, assumindo que a potência produzida pelos geradores pode ser ajustada instantaneamente. Embora esta assunção seja útil por permitir a simplificação do problema, não reflecte o verdadeiro processo de operação das unidades produtoras. A gama de operação para estas unidades é restringida pelas suas rampas limites. A Figura 2.2 mostra três situações possíveis nas quais o gerador produz durante o intervalo de tempo entre  $t-1$  e  $t$ . A Figura 2.2a mostra a unidade a produzir um valor constante de potência, a Figura 2.2b mostra a unidade a aumentar a sua produção, enquanto que na Figura 2.2c a unidade encontra-se a diminuir a sua produção [8].

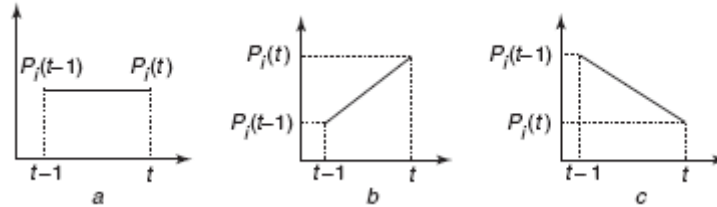


Figura 2.2 - Três situações de operação possíveis de uma unidade de produção (a - produção constante, b - aumento da produção, c - diminuição da produção) [8]

O limite inferior e superior das rampas pode ser escrito da seguinte forma [6]:

$$P_i - P_i^0 \leq UR_i \quad e \quad P_i^0 - P_i \leq DR_i \quad (2.6)$$

Onde  $P_i^0$  é a potência produzida anteriormente pelo gerador  $i$ .  $UR_i$  e  $DR_i$  são limites superiores e inferiores das rampas do gerador  $i$ , respectivamente.

As restrições dos limites das rampas e os limites de potência das unidades produtoras podem ser escritas numa única restrição de desigualdade como a seguinte [6]:

$$\max\{P_{i,min}, P_i^0 - DR_i\} \leq P_i \leq \min\{P_{i,max}, P_i^0 + UR_i\} \quad (2.7)$$



Em alguns casos, as unidades de produção não conseguem funcionar em toda a sua gama de operação, devido a limitações físicas de operação. As zonas de operação proibitivas de uma unidade térmica típica podem dever-se a vibrações num rolamento do eixo causadas pelo vapor, ou podem dever-se a falhas da própria máquina ou em equipamento auxiliar a elas associadas, tais como caldeiras, bombas de alimentação, etc. Na prática, a forma da curva potência/custo na vizinhança das zonas proibitivas é difícil de determinar através de testes reais de desempenho ou a partir de registos operacionais. Em termos reais, os melhores resultados em termos económicos são alcançados evitando a operação das unidades nestas zonas. As funções de custo que consideram as zonas de operação proibitivas podem ser representadas como na Figura 2.3 [8].

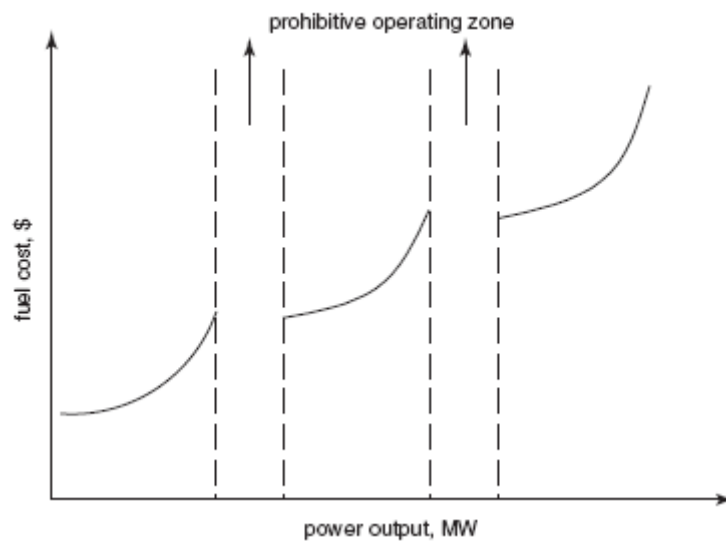


Figura 2.3 - Curva potência/custo com zonas de operação proibitivas [8]

Assim, para unidades de produção com zonas proibitivas de operação, existem restrições adicionais na gama de operação da unidade [6].

$$P_i \in \begin{cases} P_{i,min} \leq P_i \leq P_{i,1}^l \\ P_{i,k-1}^u \leq P_i \leq P_{i,k}^l \\ P_{i,pz_i}^u \leq P_i \leq P_{i,max} \end{cases}, \quad k = 2,3, \dots, pz_i \quad i = 1,2, \dots, n_{pz} \quad (2.8)$$

Onde  $P_{i,k}^l$  e  $P_{i,k}^u$  são, respectivamente, os limites inferior e superior da zona de operação proibitiva do gerador  $i$ . Aqui,  $pz_i$  é o número de zonas proibidas da unidade  $i$  e  $n_{pz}$  é o número de unidades que têm zonas proibitivas de operação.

Outra restrição que pode ser considerada num problema de despacho económico é o requisito da existência de uma reserva girante do sistema. A restrição da reserva girante do sistema, para assegurar a segurança do sistema de energia, é sumarizada da seguinte forma [7]:

$$\sum_{i=1}^N \{ \text{Min}(P_{i,max} - P_i, UR_i) \} \geq S_R \quad (2.9)$$

Onde  $S_R$  é a reserva girante requerida do sistema.

No caso da existência de restrições de fluxo na linhas, temos que [7]:

$$|P_{Lf,k}| \leq P_{Lf,k}^{max}, \quad k = 1, 2, \dots, L \quad (2.10)$$

Onde  $P_{Lf,k}$  é a potência real na linha  $k$  e  $L$  é o número de linhas de transmissão.

### 2.3.3 - Funções de custo não lineares considerando os efeitos das válvulas de injeção

Uma característica que causa a não linearidade da função objectivo de um problema de despacho económico é as válvulas de injeção nas centrais térmicas. O efeito das válvulas de injeção (*valve point effect*) é muitas vezes modelado como uma função sinusoidal rectificadora recorrente (modelo Walter-Sheble), como aquela que está representada na Figura 2.4 [8].

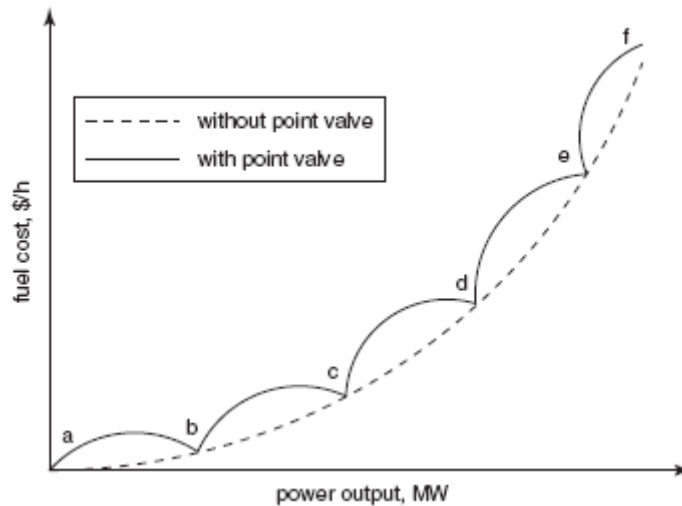


Figura 2.4 - Curva potência/custo sobre válvulas de injeção [8]

As unidades de produção com turbinas a vapor com várias válvulas apresentam uma grande variação nas funções de custo. Uma vez que as válvulas de injeção dão origem a *ripples*, a função de custo contém maior não linearidade. Assim, para o caso de se considerar este efeito, à função objectivo comum deve-lhe ser adicionada funções sinusoidais, resultando na seguinte função [2]:

$$F_i(P_i) = a_i + b_i P_i + c_i P_i^2 + |e_i \times \sin(f_i \times (P_{i,min} - P_i))| \quad (2.11)$$

Onde  $e_i$  e  $f_i$  são coeficientes do gerador  $i$  que reflectem os efeitos das válvulas de injeção.

### 2.3.4 - Funções de custo não lineares considerando uma multiplicidade de combustíveis

Se considerarmos que as unidades despachadas são fornecidas por diversas fontes de combustível, então cada unidade deve ser representada por várias funções de custo, reflectindo os efeitos das mudanças do tipo de combustível, como mostra a Figura 2.5 [7].

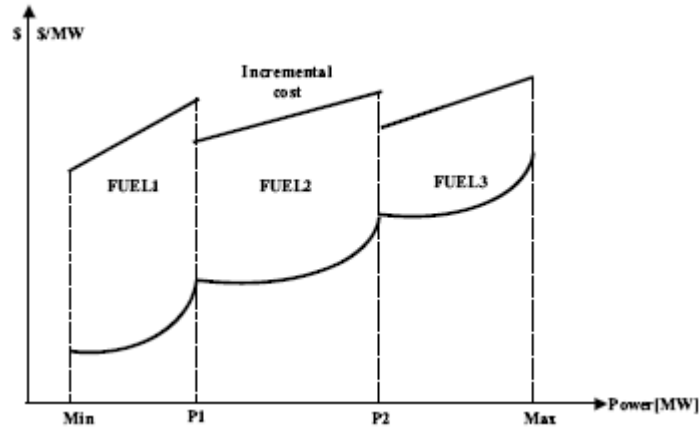


Figura 2.5 - Função seccional de custo incremental e quadrática de um gerador [7]

As funções quadráticas que habitualmente representam a curva potência/preço do gerador com múltiplos combustíveis estão representadas de seguida [2].

$$F_i(P_i) = \begin{cases} a_{i1} + b_{i1}P_i + c_{i1}P_i^2 & \text{if } P_{i\min} \leq P_i \leq P_{i1} \\ a_{i2} + b_{i2}P_i + c_{i2}P_i^2 & \text{if } P_{i1} \leq P_i \leq P_{i2} \\ \vdots & \vdots \\ a_{in} + b_{in}P_i + c_{in}P_i^2 & \text{if } P_{i(n-1)} \leq P_i \leq P_{i\max} \end{cases} \quad (2.12)$$

Onde  $a_{ip}, b_{ip}, c_{ip}$  são os coeficientes de custo do gerador  $i$  para o  $p$  nível de potência. Em geral, os combustíveis são fornecidos por fornecedores no âmbito de um grande número de contratos entre os fornecedores e os utilizários. Determinar a selecção dos combustíveis para cada unidade é ditada pelos contratos, e pode ser resolvida através de um despacho económico de combustíveis [6].

## 2.4 - Despacho económico com coordenação hidro-térmica

O planeamento da produção de energia hídrica e térmica, da forma mais económica, tornou-se numa importante tarefa nos sistemas de energia modernos, devido ao aumento da competição no mercado da energia [19].

Em [51] é desenvolvido um problema de coordenação hidro-térmica sob um ambiente de mercado de electricidade, e os resultados obtidos demonstram que, pode-se obter uma boa optimização do despacho económico se no escalonamento da produção térmica e produção hídrica for tido em conta tanto a procura como o preço de mercado. No entanto,

neste artigo, ao invés da produção hídrica servir apenas como auxiliar da produção térmica, é proposto que esta seja também, parte activa na competição do mercado.

Num sistema de energia dominado por unidades térmicas, as hídricas são planeadas para produzir nos períodos de maior carga, uma vez que são mais baratas e podem ser ligadas e desligadas mais eficientemente [20].

O objectivo nos problemas de coordenação hidro-térmica (HTC) é determinar a quantidade óptima de energia hídrica e térmica a gerar no período programado. O problema de HTC é um problema de optimização do sistema de potência altamente não linear e com complicadas restrições. Para resolver o problema de HTC os problemas de UC e despacho económico devem ser optimizados [10].

A operação óptima de sistemas com unidades hídricas, durante um prazo periódico, é mais complicada do que em sistemas que tenham apenas unidades térmicas. Isto porque, unidades hídricas, tanto electricamente (como a alimentação das mesmas cargas) como hidraulicamente são dependentes uma da outra [20, 21]. Outra razão para a dificuldade de resolução deste tipo de problemas é a limitada capacidade de armazenamento de energia dos reservatórios de água, juntamente com a natureza estocástica da sua disponibilidade. Assim, a alocação dos recursos hídricos é uma tarefa complicada que requer considerações a longo-prazo, porque a água que é usada hoje não estará presente no futuro, aumentando desta forma os custos operacionais futuros [22]. Ou seja, o operador tem que optar por utilizar os recursos hídricos no imediato, evitando o custo da produção térmica complementar, ou optar por utilizá-los no futuro, accionando a produção térmica no presente. Em geral, no caso das centrais hidroeléctricas, embora existam custos de operação e manutenção crescentes com o nível de produção, pode-se desprezar a parcela referente ao custo variável, por ser fracamente influenciada pelo nível de produção. Por outro lado, nas centrais térmicas, o custo de operação é fortemente influenciado pelo nível de produção [30].

O custo desta decisão pode ser representado em função do volume de água armazenada, como mostra a Figura 2.6.

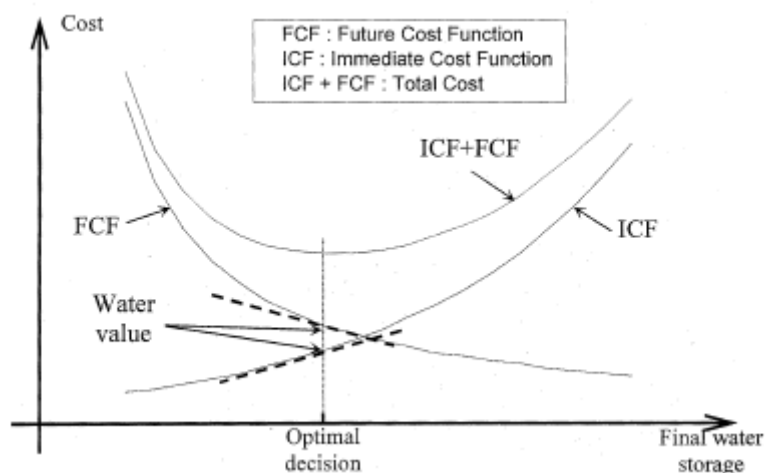


Figura 2.6 - Funções do custo imediato e futuro [22]

A produção hídrica tem um custo de oportunidade associado à produção térmica deslocada. Como se pode observar pela Figura 2.6, se é usada uma grande quantidade de

água no presente, o custo imediato (obtido através da resolução dos problemas de UC e despacho económico) diminui, e a quantidade de água disponível no futuro diminui. Como consequência, se está disponível menos água, os custos futuros irão aumentar [22].

O HTC é uma das etapas do problema de escalonamento da geração hidro-térmica (HGSP), que é ainda constituído por mais duas etapas que são o problema de UC e o problema de despacho económico. Na Figura 2.7 observa-se as três etapas que constituem um HGSP separadas usando uma decomposição temporal hierárquica [22, 50].

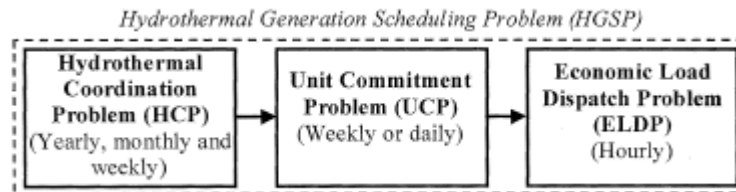


Figura 2.7 - Decomposição temporal hierárquica para o HGSP [22].

#### 2.4.1 - Formulação de um problema de coordenação hidro-térmica

O principal objectivo de um planeamento HTC consiste em minimizar o custo da produção térmica satisfazendo as restrições térmicas e hídricas. Um problema de HTC pode, em geral, ser formulado da seguinte forma [10, 20]:

$$\min F_T = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^N F_j(P_S(j, t)) \quad (2.13)$$

Onde  $F_T$  é a função de custo da produção total,  $P_S(j, t)$  a potência produzida pela unidade térmica  $j$  no intervalo de tempo  $t$ ,  $F_j(P_S(j, t))$  é o custo de produção para  $P_S(j, t)$ ,  $N$  é o número de unidades térmicas e  $T$  é o número de intervalos de tempo.

A função de custo da produção de energia térmica é expressa como de seguida:

$$F_j(P_S(j, t)) = a_j + b_j P_S(j, t) + c_j P_S^2(j, t) \quad (2.14)$$

Uma das restrições associadas a um problema de HTC é a de balanço da carga:

$$\sum_{j=1}^M P_H(j, t) + \sum_{j=1}^N P_S(j, t) - P_D(t) - P_L(t) = 0 \quad (2.15)$$

Onde  $M$  é o número de unidades hídricas,  $P_D(t)$  é a carga requerida do sistema no intervalo de tempo  $t$  e  $P_L(t)$  as perdas totais do sistema no intervalo de tempo  $t$ .

As restrições da capacidade de produção térmica e hídrica também se incluem nas restrições de um problema de HTC:

$$P_S(j)^{\min} \leq P_S(j, t) \leq P_S(j)^{\max} \quad (2.16)$$

$$P_H(j)^{\min} \leq P_H(j, t) \leq P_H(j)^{\max} \quad (2.17)$$

Onde  $P_S(j)^{min}$  é a potência mínima produzida pela unidade térmica  $j$ ,  $P_S(j)^{max}$  é a potência máxima produzida pela unidade térmica  $j$ ,  $P_H(j)^{min}$  é a potência mínima produzida pela unidade hídrica  $j$  e  $P_H(j)^{max}$  é a potência máxima produzida pela unidade hídrica  $j$ .

Outra restrição a ter em consideração para a produção hídrica é descarga total de água:

$$Q_{tot}(j) = \sum_{t=1}^T q(j, t) \quad (2.18)$$

Onde  $q(j, t)$  representa a taxa de descarga da unidade hídrica  $j$  no intervalo de tempo  $t$ . Como limites da taxa de descarga existe o limite de fluxo:

$$q^{min} \leq q(j, t) \leq q^{max} \quad (2.19)$$

E o limite fixo de descarga:

$$q(j, t) = Q(j, t) \quad (2.20)$$

Por último, temos a equação da continuidade hidráulica:

$$V(j, t) = V(j, t - 1) + [r(j, t) - q(j, t) - s(j, t)]n_t \quad (2.21)$$

Onde  $V(j, t)$  é o volume de armazenamento do reservatório  $j$  no fim do intervalo de tempo  $t$ ,  $r(j, t)$  é a taxa de entrada no reservatório  $j$  durante o intervalo de tempo  $t$ ,  $s(j, t)$  é a taxa de derrame do reservatório  $j$  durante o intervalo de tempo  $t$ , e  $n_t$  é o comprimento do intervalo de tempo  $t$ . Como limites de armazenamento de água, existe o limite de volume, o volume inicial e o volume final:

$$V^{min} \leq V(j, t) \leq V^{max} \quad (2.22)$$

$$V(j, t)|_{t=0} = V_s \quad (2.23)$$

$$V(j, t)|_{t=T} = V_E \quad (2.24)$$

Em [23] é desenvolvido um algoritmo de evolução diferencial modificado (MDE) para o problema de escalonamento hidro-térmico a curto-prazo. Essas modificações incidem a nível da inicialização e da mutação para que o algoritmo consiga lidar eficientemente com as restrições do volume de armazenamento final do reservatório. Assim, o algoritmo proposto não necessita de utilizar funções de penalização e explora a solução óptima utilizando um menor esforço computacional. Quando comparado com as técnicas convencionais verificou-se que este algoritmo não apresenta limitações no que se refere à dimensão do problema e é independente do valor inicial das variáveis, apresentando melhores resultados que outros algoritmos evolucionários.

## 2.5 - Efeitos das energias renováveis na optimização do despacho económico

O uso de energias renováveis para a produção de electricidade vai continuar a crescer no futuro, devido a pressões ambientais, principalmente aquelas relacionadas com o aquecimento global. Consequentemente, o papel das energias renováveis torna-se cada vez mais significativo na operação de sistemas eléctricos [24]. Esta situação implica a necessidade de integrar esta energia no sistema de abastecimento de electricidade existente, que foi essencialmente concebido para grandes unidades térmicas [34].

A actual tendência para o crescimento generalizado da integração da produção distribuída a partir de energias renováveis e cogeração (designada, na legislação portuguesa, Produção em Regime Especial ou PRE) conduz a uma situação caracterizada por uma maior incerteza resultante da dificuldade de previsão dos cenários de produção. Tal resulta, em parte, da implementação da Directiva Europeia 2001/77/EC de promoção da produção de electricidade a partir de energias renováveis, onde se requer prioridade para a produção proveniente de energia renovável, sendo, por isso, a rede receptora obrigada a receber a energia eléctrica recebida por estas unidades de produção [39].

Na Figura 2.8 está representado o crescimento expectável para a capacidade instalada proveniente das diversas fontes de energia, no sistema eléctrico em Portugal, onde se pode constatar o considerável aumento da capacidade instalada de energias renováveis [53].

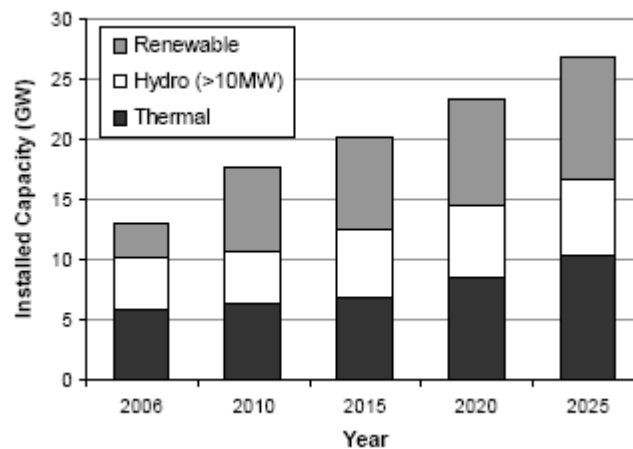


Figura 2.8 - Previsão para a evolução da capacidade instalada do sistema eléctrico Português (2006-2025) [53]

### 2.5.1 - Importância da previsão na integração da produção renovável no SEE

As dificuldades com as energias renováveis, apesar das suas vantagens para o ambiente, são os problemas de continuidade e segurança associados com a sua operação. A potência produzida por alguma geração renovável, como geradores solares e eólicos, é determinada pelas condições climáticas, e os padrões de funcionamento irão, por conseguinte, seguir estas condições naturais. Estes padrões podem não coincidir com o perfil de carga do sistema ou com a procura do mercado. Nos mercados de electricidade, a operação de todos os produtores comerciais deve ser sensível aos mecanismos de oferta e de procura dos mercados

de electricidade. É claro que o problema de como integrar as energias renováveis nos mercados de electricidade necessita de uma consideração especial e vai requerer novos métodos para programar as potências resultantes [25]. A previsão tem um papel chave no que respeita a ultrapassar este desafio. A previsão é a condição prévia para a integração de grande parte das fontes de energia renovável no sistema eléctrico de energia, uma vez que faz a ligação da produção dependente das condições climatéricas com a produção escalonada das centrais convencionais e a previsão do consumo, com esta última prevista com uma precisão razoável. A previsão está directamente ligada à necessidade de energia de reserva, e consequentemente ao custo da integração das energias renováveis no sistema [34].

Em [33] é apresentada uma ferramenta de controlo, de forma a conseguir-se alcançar uma elevada penetração de fontes renováveis no sistema eléctrico de energia, sem deterioração da qualidade do serviço oferecido aos consumidores. Esta ferramenta de controlo minimiza os custos de produção através do escalonamento óptimo das unidades produtoras, tendo em consideração as restrições das unidades térmicas, e as previsões a curto-prazo da carga e dos recursos renováveis. De notar que, para a previsão da velocidade do vento e da radiação solar é usado o método da persistência, ou seja, assume-se que a potência fornecida pelos recursos renováveis, durante o período de escalonamento, apresenta um valor constante, igual à média dos valores passados.

Em [40] é feito um estudo dos impactos técnicos, operacionais, e no mercado, de uma larga integração de produção eólica no sistema eléctrico, sendo dadas recomendações sobre medidas a tomar no sentido de que, no futuro, a sua integração seja facilitada.

O consumo de energia eléctrica é geralmente maior durante o dia e ao início da noite, quando as cargas industriais são mais elevadas e as luzes estão ligadas. Por outro lado, durante a madrugada e manhã cedo o consumo é significativamente mais baixo, uma vez que as pessoas se encontram a dormir. Com a integração das energias renováveis no SEE, é mais provável que, durante as horas de vazio, ocorram grandes desequilíbrios entre a produção e o consumo, uma vez que a produção renovável, em especial a produção eólica, pode ser excessiva. No entanto, durante estas horas os desequilíbrios provocados por produção em excesso são mais complicados de resolver, uma vez que nas horas de ponta sempre se pode colocar as centrais térmicas a produzir nos seus limites mínimos ou exportar a energia em excesso para Espanha, mas tal situação não é possível nas horas de vazio. Neste caso, a solução pode passar pelo armazenamento (bombagem) ou chegar-se ao extremo de ter que se cortar na produção renovável [53].

Em [53] é criada uma metodologia que permite quantificar os desequilíbrios entre a produção e o consumo, que ocorrem durante as horas de vazio e as horas de ponta, assim como caracterizar esse tipo de desequilíbrios. Concluindo-se que, o aumento da integração das energias renováveis pode provocar falta de produção durante as horas de ponta, e excesso de produção durante as horas de vazio.

De entre as energias renováveis, a energia eólica é a mais imprevisível e a que pode ter mais impacto nos sistemas eléctricos de energia. Como a energia eólica é muito menos previsível do que é a carga do sistema, a integração de energia eólica significativa necessita que os cálculos do UC sejam feitos mais frequentemente, preferencialmente sempre que uma nova previsão de energia eólica esteja disponível. A disponibilidade de informações precisas e de medições quase em tempo-real do vento são uma necessidade para decisões de UC e de despacho económico [26].



Os erros de previsão do vento trazem uma grande incerteza para as operações do sistema, uma vez que a potência eólica em tempo-real podem ser bastante diferente do que foi previsto. A segurança do sistema pode ser prejudicada devido a uma diminuição imprevista de potência eólica, porque a capacidade de variação de potência das unidades convencionais do sistema pode não ser suficiente para acomodar esta mudança. Assim como, uma grande variação ascendente de produção eólica pode ser desfavorável num sistema que não tenha reservas descendentes de outros recursos. Esta situação pode acontecer bastantes vezes durante a noite, quando o vento é normalmente mais forte e a carga mais baixa [27]. Vários estudos indicam que a energia eólica não causará impactos significativos nas reservas, se as técnicas de previsão do vento forem melhoradas. Aliás, existem estudos que avaliam os benefícios financeiros de boas previsões [28].

Muitas vezes, na gestão do SEE, é atribuído um elevado nível de reserva girante, tendo em consideração a natureza intermitente da produção eólica, desta forma, reduzem-se os benefícios provenientes da utilização de energia eólica. As previsões da produção, até 48 horas de antecedência, contribuem para uma operação do sistema eléctrico segura e económica. Também, com o aumento de importância dos mercados de electricidade, a previsão da produção eólica é útil para os produtores de energia eólica que propuseram as suas ofertas ao mercado diário. Aumentar o valor da geração eólica através da melhoria dos sistemas de previsão é uma das prioridades da pesquisa na área da energia eólica, para os próximos anos [43].

Em [29] é apresentado um *Trade-Off* entre os riscos e os custos no despacho económico com a inclusão da penetração da energia eólica, uma vez que, apesar da energia eólica ter a vantagem de reduzir as emissões e o consumo de reservas de combustíveis insubstituíveis, a penetração de energia eólica no tradicional sistema baseado em combustíveis levanta questões de segurança, devido à sua imprevisibilidade. Ou seja, a previsão exacta da produção expectável de um parque eólico é praticamente impossível, primeiramente devido à natureza estocástica do vento, mas também, devido à transformação altamente não linear da velocidade do vento para energia eléctrica. Neste artigo, é formulado um problema de despacho económico com um duplo objectivo, considerando a penetração de energia eólica, que aborda os impactos de segurança e económicos como objectivos conflituosos, através de um algoritmo PSO modificado que deriva as soluções de *Trade-Off* óptimas respeitando os dois objectivos especificados.

Em [27] testam-se vários cenários de previsão da potência produzida pelo vento, e os resultados mostram que os erros nessa previsão têm grande impacto na programação das unidades de produção no mercado diário (*day-ahead market*) com implicações para o despacho em tempo-real. Os resultados mostram que uma melhor previsão de vento pode definitivamente baixar o custo do despacho.

### 2.5.2 - Impactos da integração das energias renováveis nos mercados de electricidade

O operador do sistema de transmissão (TSO) é o responsável pela manutenção do equilíbrio do sistema entre a produção e o consumo. Na maioria dos países, um mecanismo de mercado baseado num sistema de ordem de mérito é usado para compensar os desequilíbrios.

Tendo em consideração que o impacto do erro de previsão do vento é proporcional à capacidade eólica instalada, o desequilíbrio total do sistema vai aumentar com a integração de grandes quantidades de energia eólica. O que causará um aumento nos custos de

balanceamento do sistema [35]. Numa configuração de mercado ideal e eficiente, todos os operadores das centrais teriam em consideração a incerteza da previsão na decisão do UC e despacho económico. Isto levaria a mudanças na operação das centrais comparando com a programação das operações baseada em expectativas determinísticas, uma vez que as funções de custo da produção são normalmente não lineares e não separáveis no tempo [48]. A Figura 2.9 mostra como as fontes de energia renovável são integradas no mercado energético, na maioria dos países.

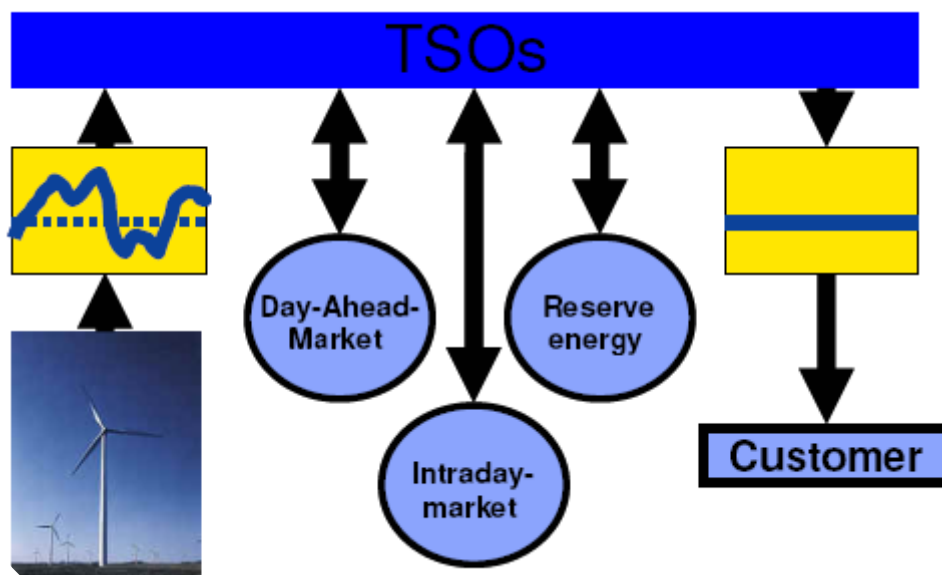
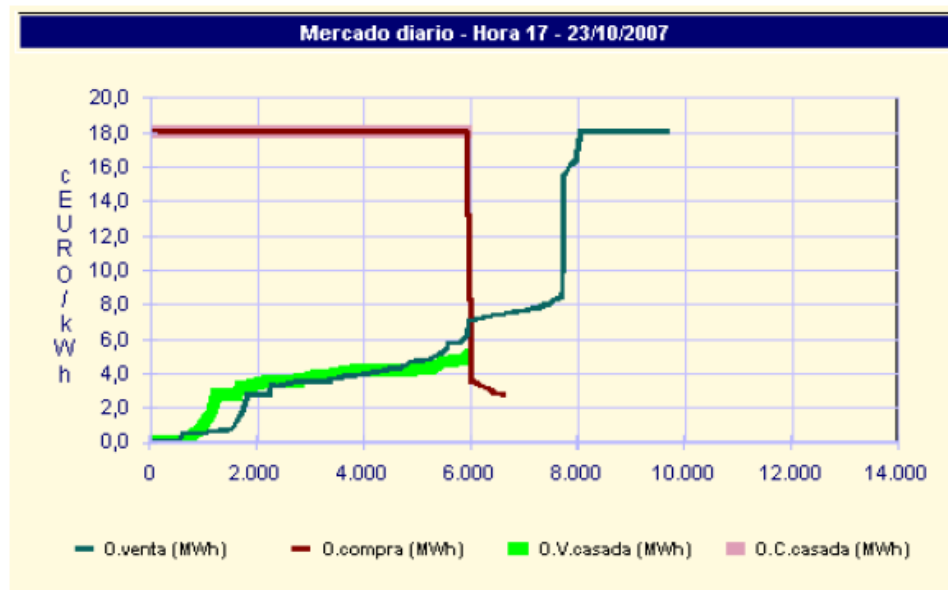


Figura 2.9 - Integração das energias renováveis no mercado de electricidade [34]

Uma previsão precisa no dia anterior é de uma grande importância para evitar desvios no equilíbrio entre a produção e a carga do sistema, e para fechar as posições de energia em aberto, na medida do possível, no mercado diário (*day-ahead market*) [34]. Do lado da oferta, cada produtor, para cada hora, submete ofertas de venda, composta por pares de preço e quantidade. Do lado da procura, para cada hora, os distribuidores e comercializadores de electricidade submetem ofertas de compra. O preço de equilíbrio da energia, para cada hora, obtém-se da oferta marginal de venda - de preço mais alto - necessária para a satisfação da procura. Para cada hora define-se um preço único, que remunera identicamente todas as unidades de oferta seleccionadas a produzir no âmbito do leilão competitivo. Assim, cada agente produtor que tenha realizado uma oferta de preço infra-marginal, ou seja, com um preço inferior ao preço de equilíbrio, recebe o preço de equilíbrio e não necessariamente o preço da sua oferta de venda [38]. Este funcionamento do mercado diário está exemplificado na Figura 2.10.

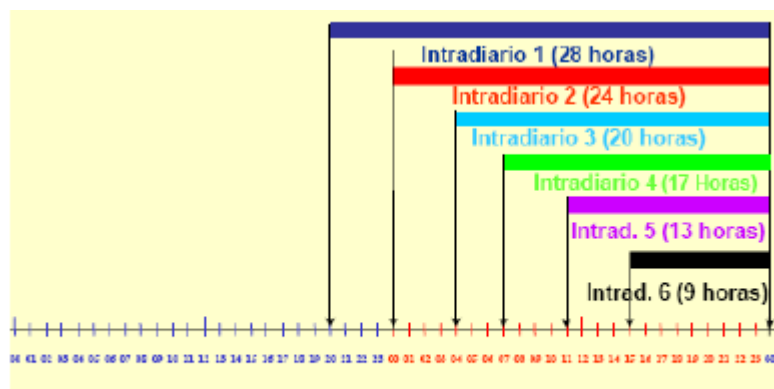


**Nota:** Ofertas de Venda; Ofertas de Compra; Ofertas de Venda Casada; Ofertas de Compra Casada

**Fonte:** OMEL

#### 2.10 - Oferta e procura no mercado diário em Portugal na hora 17 do dia 23 de Outubro de 2007 [38]

Erros na previsão têm que depois ser ajustados no mercado intra-diário (*intra-day market*), que compreende seis sessões de negociação diárias, em aproximação ao momento da entrega da energia [38].



**Nota:** no eixo das abcissas representam-se as horas em que ocorrem os mercados

**Fonte:** OMEL

Figura 2.11 - Sessões do mercado intra-diário [38]

Para tal, é necessária uma actualização frequente das previsões durante o próprio dia. Quaisquer erros de previsão que persistam são depois equilibrados com a reserva de energia em tempo real. Assim, com o carácter obrigatório associado à Regulação Primária, o Mercado de Serviços do Sistema estabelece a sequência de mobilização dos grupos que prestam, em cada hora, os serviços de sistema associados às Reservas de Regulação Secundária e Terciária. A reserva primária corresponde a uma reacção automática dos geradores a uma variação da

frequência. A reserva de regulação secundária é a acção de um conjunto específico de geradores associados com o objectivo de reduzir a zero o desvio entre a produção e o consumo numa determinada área de controlo. Por fim, a reserva de regulação terciária tem por função a reposição das reservas secundárias como resultados das ofertas do Mercado de Reservas de Regulação Terciária [36].

De facto, a produção eólica não pode ser escalonada com a mesma certeza que é escalonada a produção convencional, tendo as suas flutuações impacto tanto na gestão das reservas secundárias, como na gestão das reservas terciárias [40]. Contudo, este impacto nas reservas não é principalmente devido às flutuações da potência eólica em si, mas sim devido à sua imprevisibilidade (parcial). Se a potência eólica fosse flutuante mas perfeitamente previsível, as centrais convencionais teriam também que funcionar de forma mais variável, mas este funcionamento poderia ser programado com antecedência e estabelecido nos tradicionais mercados diários. É a imprevisibilidade da potência eólica que implica um aumento do uso das reservas com correspondentes implicações no preço [48].

A previsão da produção renovável é o principal instrumento para tornar esta produção despachável, no entanto, haverá sempre desvios entre a previsão e a potência realmente produzida. Pelo que, os produtores de energia eólica têm que considerar os seus rendimentos no mercado de electricidade como uma combinação do preço que resulta do mercado e o custo dos desequilíbrios. A energia em excesso pode ser vendida ao preço de reserva para baixar a produção, enquanto que a falta de energia tem de ser comprada ao preço de reserva para subir a produção. Normalmente estes desequilíbrios são penalizadores visto que, os preços de reserva para subir a produção são usualmente superiores e os preços de reserva para baixar a produção inferiores ao preço estabelecido no mercado diário [43]. Tal situação é visível na Figura 2.12, onde se observa a comparação entre o preço do mercado diário e o preço de reserva, para a semana de 28 de Maio a 3 de Junho de 2010, para o mercado de electricidade Português [54].

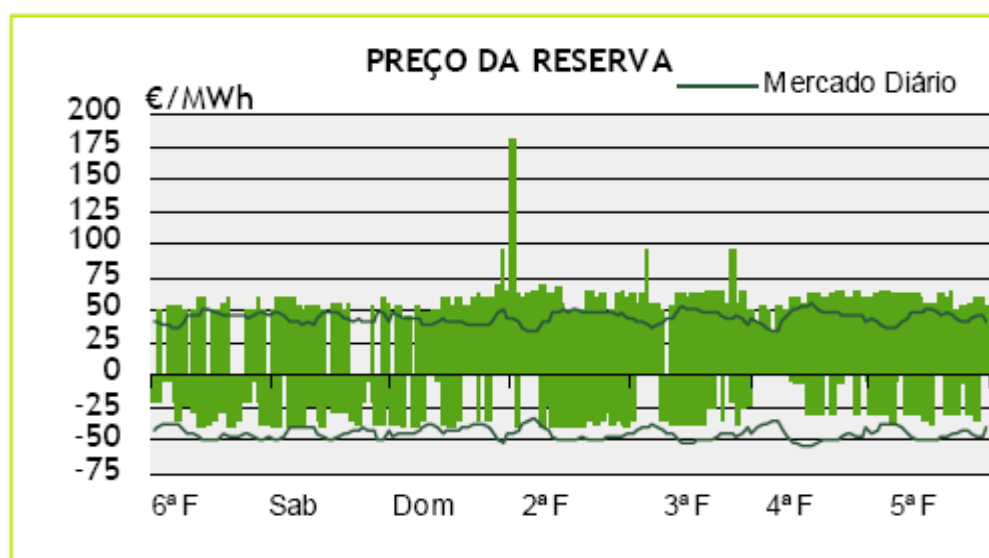


Figura 2.12 - Comparação entre o preço do mercado diário e o preço de reserva, para a semana de 28 de Maio a 3 de Junho de 2010, para o mercado de electricidade Português [54]

O facto de a energia de regulação ter quase sempre um custo superior à energia que se negocia no mercado diário, deve-se a que esta é apenas utilizada em pequenos intervalos de tempo, e tem que estar sempre pronta para entrar em funcionamento para que a produção contínua dessa capacidade não possa ser vendida no mercado diário [44].

Segundo o manual de procedimentos do gestor do sistema [37], as energias de regulação mobilizadas serão valorizadas ao preço marginal das ofertas de regulação assignadas em cada período de programação, distinguindo-se a reserva a subir e a baixar. A energia de regulação secundária valorizar-se-á ao preço da última oferta de energia de regulação terciária encontrada em cada hora, tanto a subir como a baixar, utilizada da para substituir ou completar a energia de regulação secundária usada. Também em [37], é dito que, a valorização da produção dos grupos térmicos que não tenham sido encontrados nas diferentes sessões de mercado e que tenham sido mobilizados pelo gestor do sistema, realizar-se-á somando ao preço da produção oferecida, o sobrecusto resultante de dividir o custo de arranque na energia total programada. No caso das reduções de produção, estas serão valorizadas pela diferença entre o preço de encontro e o do valor máximo entre as ofertas de energia apresentadas no processo de resoluções de restrições técnicas e as apresentadas no mercado diário.

Os erros de previsão do vento dependem essencialmente de três factores. O primeiro deles é o método usado para a previsão da produção eólica, que podem ser métodos mais complexos ou o simples método da persistência. O segundo factor é o número de turbinas eólicas em que a previsão é feita, e a sua posição geográfica. O último factor é o quão antes a produção eólica é antecipada.

O erro de previsão do vento tem dois efeitos nos mecanismos de balanço entre a produção e o consumo: um nos volumes de energia requeridos, e outro no preço. Sendo a energia eólica uma fonte de desequilíbrio, isto acarreta um aumento da energia necessária para equilibrar o sistema. Contudo o erro de previsão tanto pode aumentar o desequilíbrio do sistema, como o pode reduzir. A Figura 2.13 mostra a situação em que o erro de previsão do vento aumenta o desequilíbrio (Figura 2.13 - A), e o caso em que o erro de previsão do vento diminui o desequilíbrio do sistema (Figura 2.13 - B) [35].

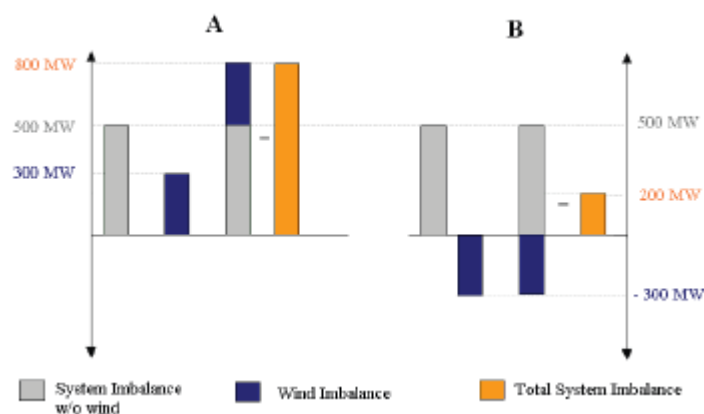


Figura 2.13 - Desequilíbrio do sistema e da potência eólica [35]

No que se refere ao preço, como é necessário um aumento da energia requerida, o TSO tem que aceitar as ofertas que estão mais longe na ordem de mérito, fazendo com que o preço de mercado seja mais elevado. Uma vez que a curva quantidade de oferta/preço está a aumentar, o custo adicional introduzido pelo erro de previsão do vento quando este aumenta o desequilíbrio (Figura 2.14 à esquerda) é maior do que a economia que é conseguida quando o erro de previsão compensa esse mesmo desequilíbrio (Figura 2.14 à direita). Como resultado, o custo total dos mecanismos de equilíbrio do sistema vão aumentar [35].

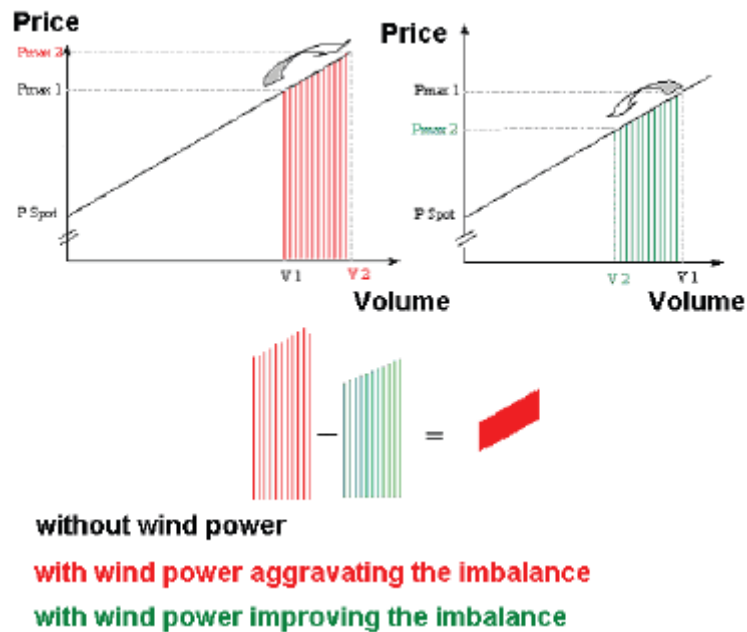


Figura 2.14 - Impacto financeiro teórico dos erros de previsão do vento [35]

Em [44] é apresentado o funcionamento do mercado *Nordpool* nas situações em que se verificam desvios entre a produção prevista e a produção real. A remuneração a receber do mercado pelos produtores  $I$  na hora  $i$  consiste em multiplicar a potência prevista  $\hat{P}_i$  pelo preço de mercado  $p_{spot}$ .

$$I_i = \hat{P}_i \cdot p_{spot} \quad (2.25)$$

O custo da penalização  $c$  para a hora  $i$  resulta da multiplicação do erro da previsão pelo preço de regulação  $p_{reg}$ , sendo o erro da previsão definido pela diferença entre a potência prevista  $\hat{P}_i$  e a potência real  $P_i$ .

$$c_i = (\hat{P}_i - P_i) \cdot p_{reg} \quad (2.26)$$

Quando os produtores de energia eólica produzem menos do que o que propuseram ao mercado, a potência em falta tem que ser adquirida ao preço da reserva para aumentos de produção, que usualmente são mais elevados que o preço do mercado diário. Quando a

produção de potência eólica é superior à proposta ao mercado, a produção supérflua é vendida ao preço da reserva para diminuições de produção, que é inferior ao preço do mercado diário, resultando num custo negativo em (2.26). Por fim, o lucro líquido é resultado do dinheiro a receber do mercado pelos produtores subtraindo o custo das penalizações, para o período de tempo total.

$$I_{total} = \sum_i I_i - c_i \quad (2.27)$$

Para se obter a maior receita, para os produtores eólicos, propor ao mercado o valor mais provável ou o valor esperado da previsão nem sempre é a melhor opção. Depende da diferença entre as penalidades por necessidade de elevar ou baixar a produção, sendo a melhor proposta a que apresentar o menor valor de penalização [47].

Para a geração intermitente como a mini-hídrica, eólica e solar, as remunerações do mercado têm tendência a diminuir pelos custos dos desequilíbrios, devidos a erros de previsão. Esta situação pode expor os produtores de energia proveniente de fontes intermitentes a custos excessivos, tornando a participação destes no mercado de electricidade arriscada [43].

Em [43] são desenvolvidas ferramentas para avaliar a precisão das previsões da produção eólica. Estas ferramentas podem ter um papel importante nas trocas de energia eólica nos mercados de electricidade liberalizados uma vez que podem prevenir ou reduzir penalidades em consequência de erros de previsão. No artigo em questão, pretende-se avaliar diferentes estratégias de ofertas ao mercado diário de electricidade, propostas essas baseadas em modelos avançados de previsão da produção eólica, ou em métodos que têm em consideração as incertezas da previsão da potência eólica e o preço estimado para os desequilíbrios de potência. Demonstrando que, a estimação das incertezas da previsão permitem atenuar situações de risco e minimizar os custos dos desequilíbrios, a longo prazo.





## Capítulo 3

# GraSO - Uma nova técnica de optimização de despacho económico

### 3.1 - Introdução

As técnicas de optimização têm vindo a ser utilizadas com sucesso na resolução de um número importante de problemas do sistema de energia. Os investigadores no campo da energia têm estado bastante activos tanto na formulação de novos ou mais abrangentes problemas de optimização, como na utilização de métodos modernos de optimização para a sua resolução [9].

O alvo da optimização dos sistemas de energia é o campo de estudo no qual o objectivo é minimizar os custos operacionais e fixos do sistema. Isto é, optimizar uma função objectivo específica sujeita a um certo número de restrições, devidas aos factores de controlo e operação do sistema. Várias técnicas de optimização convencionais têm sido empregadas neste campo. A variedade destas técnicas é consequência do facto de os problemas de optimização nos sistemas eléctricos de energia serem diversos. Dependendo da natureza e características do problema, eles são tipicamente classificados de acordo com a sua função objectivo e respectivas restrições. A função objectivo e as restrições podem ser lineares ou não lineares, discretas ou contínuas [10].

### 3.2 - Diferentes métodos para optimização de despacho económico

Nos últimos anos, foram desenvolvidos diversos métodos para resolver problemas de optimização de despacho económico como o algoritmo genético, programação evolucionária ou estratégias de evolução, evolução diferencial, e optimização de enxame de partículas.

#### 3.2.1 - Optimização de enxames de partículas (PSO)

O PSO sugerido por Eberheart e Kennedy, em 1995, é baseado na analogia de um bando de pássaros e num cardume de peixes. O PSO imita o comportamento de indivíduos num grupo

(enxame) para maximizar a sobrevivência das espécies. Tem vindo a ser notado que, os membros de um grupo partilham informação entre eles, facto que leva ao aumento da eficiência do grupo. O algoritmo PSO pesquisa usando um grupo de indivíduos, similar a outras técnicas de optimização heurísticas baseadas em inteligência artificial. Cada indivíduo corresponde a uma solução candidata para o problema. Os indivíduos num enxame aproximam-se da solução óptima através da sua presente velocidade, experiência passada, e da experiência dos seus vizinhos [2].

A velocidade de uma partícula é influenciada por três componentes, nomeadamente, inercial, cognitiva, e social. A componente inercial simula o comportamento inercial do pássaro para voar na direcção anterior. A componente cognitiva modela a memória do pássaro sobre a sua melhor posição anterior, e a componente social modela a memória do pássaro sobre a melhor posição entre as partículas (interacção dentro do grupo) [6]. Uma cooperação construtiva, ao invés da sobrevivência do melhor, é o princípio fundamental do PSO [11].

Em [6] é proposta uma nova versão do clássico PSO (NPSO) para resolver problemas de despacho económico não lineares. Neste artigo é feita uma divisão no comportamento cognitivo do movimento da partícula. Ou seja, a partícula é criada para também se lembrar da sua pior posição. Esta modificação ajuda a explorar o espaço de pesquisa mais eficazmente. A fim de explorar convenientemente a região de soluções promissoras, é feita uma simples pesquisa aleatória local (LRS), integrada no novo algoritmo, resultando assim o algoritmo NPSO-LRS.

Em [5] os autores propõem dois algoritmos PSO modificados para a resolução de problemas de despacho económico com a opção de múltiplos combustíveis. Em vez de usar os três parâmetros do tradicional PSO, os métodos propostos usam apenas dois parâmetros para que o peso do ajuste dos parâmetros seja reduzido. Outra vantagem é a poupança em tempo de computação, uma vez que um dos números aleatórios é eliminado.

As principais vantagens do algoritmo PSO são sumarizadas como; conceito simples, fácil implementação, robustez para controlar parâmetros, e eficiência computacional quando comparado com algoritmos matemáticos e outras técnicas heurísticas de optimização. O PSO pode ser facilmente aplicado a problemas de optimização não lineares e descontínuos. E ainda, o PSO pode gerar uma solução de elevada qualidade no menor tempo de computação e tem uma característica de convergência mais estável do que outros métodos estocásticos [6]. Ao contrário de métodos matemáticos para resolver problemas de optimização, este algoritmo não precisa de nenhuma informação de gradiente sobre a função objectivo ou de erro, e consegue obter a melhor solução de forma independente [1]. Embora as abordagens baseadas no PSO tenham bastantes vantagens, podem ficar presas em mínimos locais quando confrontadas com problemas com soluções muito restritas, devido à limitada capacidade de pesquisa local/global [6]. Outra desvantagem do PSO é a sua falta de fundação matemática sólida para análises a ser superado no futuro desenvolvimento de teorias pertinentes. Também pode ter algumas limitações para aplicações de despacho económico em tempo real, como o despacho em cinco minutos considerando restrições de rede, uma vez que o PSO é também uma variante de técnicas estocásticas de optimização que requerem relativamente maior tempo de computação do que as abordagens matemáticas [7].

De acordo com o algoritmo PSO, um enxame de partículas que tenha restrições predefinidas, começa a explorar o espaço de pesquisa. A performance de cada partícula é avaliada pelo valor da função objectivo, e considerando um problema de minimização, neste caso, a partícula com menor valor tem melhor desempenho. A melhor experiência de cada

partícula nas iterações é guardada na sua memória e chamada melhor marca pessoal (Pbest). O melhor valor de Pbest (menor valor) nas iterações determina o melhor valor global (Gbest) [1].

Usando o conceito de Pbest e Gbest, a velocidade de cada partícula é actualizada em (3.1):

$$V_i^{k+1} = V_i^k + c1r1(X_{pbest} - X_i^k) + c2r2(X_{gbest} - X_i^k) \quad (3.1)$$

Onde:

$V_i^{k+1}$  é a velocidade da partícula na presente iteração ( $k + 1$ );

$V_i^k$  é a velocidade da partícula na iteração  $k$ ;

$r1, r2$  são números aleatórios entre  $[0, 1]$ ;

$c1, c2$  representam a constante de aceleração.

Depois disto, as partículas “voam” para uma nova posição:

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1} \quad (3.2)$$

Onde:

$X_i^{k+1}$  é a posição da partícula na presente iteração ( $k + 1$ );

$X_i^k$  é a posição da partícula na iteração  $k$ ;

$V_i^{k+1}$  é a velocidade da partícula na iteração  $k + 1$ .

O mecanismo de pesquisa do PSO é demonstrado na Figura 3.1 [12].

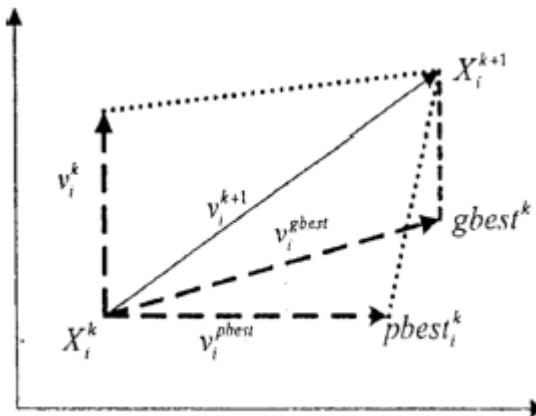


Figura 3.1 - O mecanismo de pesquisa do PSO [12]

Após a introdução do PSO, muitas variações têm sido propostas para o PSO básico por diversos investigadores [13].

Em [2] é proposto um PSO melhorado para resolver problemas de despacho económico com funções de custo não lineares, a que os autores denominam de IPSO, que combina o algoritmo PSO com a técnica de sequências caóticas. O algoritmo aplicado inclui sequências

caóticas para o parâmetro do peso, métodos de tratamento das restrições de igualdade e desigualdade, e criação da posição inicial. A aplicação de sequências caóticas é uma estratégia poderosa para melhorar a capacidade global de pesquisa e escapar dos mínimos locais. Este algoritmo apresenta melhores soluções, para problemas de despacho económico considerando os efeitos das válvulas de injeção e multiplicidade de combustíveis, do que outras abordagens heurísticas.

Em [4] os autores propõem uma hibridização de algoritmos genéticos e PSO. O objectivo é melhorar a performance do PSO incorporando o conceito de ligação, que é um mecanismo essencial nos algoritmos genéticos, e projectar uma nova técnica de identificação de ligação chamada *dynamic linkage discovery* para resolver o problema de ligação em problemas de optimização de parâmetros reais. Para fazer bom uso da informação obtida é ainda criado um operador de recombinação. Combinando PSO, *dynamic linkage discovery* e o operador de recombinação, é proposta uma nova metodologia de optimização chamada PSO-RDL. Para a resolução de problemas de despacho económico com este algoritmo as restrições de igualdade e desigualdade têm que ser devidamente tratadas. Para tal, são utilizados os conceitos de reparação e penalidades, que se revelaram bastante eficazes na procura da solução óptima global dos problemas de despacho económico testados.

### 3.2.2 - Algoritmos genéticos (GAs)

Os GAs, que foram apresentados por Holland, são uma pesquisa com uma base populacional estocástica e algoritmos de optimização livremente modelados após o paradigma da evolução. Os GAs conduzem a pesquisa pelo espaço de soluções usando um processo de selecção natural e operadores genéticos [4]. Este processo leva à evolução de populações de indivíduos que são melhores que os indivíduos anteriores. A essência dos GAs consiste numa população de cadeias de bits transformadas por três operadores genéticos: selecção, recombinação e mutação. Cada cadeia (chamada cromossoma) representa uma possível solução do problema que está a ser optimizado, e cada bit (ou grupo de bits) representa o valor de alguma variável do problema (gene). Estas soluções são classificadas por uma função de avaliação, que dá melhores valores às melhores soluções. Cada solução tem que ser avaliada pela função objectivo para produzir um valor. O par composto pelo cromossoma e o melhor valor representam um indivíduo. O operador de selecção cria uma nova população (ou geração) seleccionando indivíduos da população antiga, privilegiando o melhor. A recombinação é o principal operador genético e consiste em trocar partes do cromossoma entre indivíduos. A recombinação não é executada em todos os pares de indivíduos, sendo a sua frequência controlada por uma probabilidade de recombinação. O último operador é a mutação e consiste em mudar uma parte aleatória da cadeia que representa o indivíduo [3].

Em [14] é apresentado um algoritmo genético melhorado para a resolução de despacho económico, onde são introduzidos novos operadores de recombinação e mutação. Neste algoritmo, ao perceber a operação de recombinação, a descendência espalha-se por todo o domínio para que haja uma maior possibilidade de se obter o mínimo global. E ao perceber a mutação, cada gene vai ter a oportunidade de alterar o seu valor. O domínio de pesquisa do gene seleccionado será contratado a uma taxa controlada por uma função monótona decrescente. Consequentemente, o domínio da pesquisa vai ficando mais pequeno quando o número de iterações aumenta a fim de realizar de forma mais eficaz o processo de ajuste. Ao introduzirem-se estas operações genéticas, obtiveram-se resultados onde o algoritmo proposto converge de forma mais rápida para o óptimo global que outros GAs.

### 3.2.3 - Programação evolucionária (EP) ou estratégias de evolução (ES)

Os métodos EP e ES são baseados em mecanismos de selecção natural [15]. Estas duas variantes da computação evolucionária correspondem ao que se pode designar por métodos de fenótipo, ou seja, em que a construção da representação das soluções de um problema se baseia unicamente nas próprias variáveis do problema, sem passar por qualquer algoritmo intermédio de codificação/descodificação, como acontece nos GAs [16].

A EP e ES diferem dos tradicionais GAs em dois aspectos: a EP/ES usa os parâmetros de controlo (valores reais), mas não os seus códigos como nos tradicionais GAs, e a EP/ES depende principalmente da mutação e selecção, mas não da recombinação, como os GAs. Assim, considerável tempo de computação pode ser poupado na EP/ES. A mutação é muitas vezes implementada adicionando um número aleatório ou um vector de uma certa distribuição (por exemplo, uma distribuição Gaussiana) a um parente. O grau da variação da mutação Gaussiana é controlado pelo seu desvio-padrão. Na EP/ES auto-adaptativa este parâmetro não é pré-fixado; ao contrário, é desenvolvido juntamente com as variáveis de adaptação [17, 11].

A exemplo de qualquer processo dito “evolucionário”, a ES e a EP dependem da definição de uma função de adaptação que estabelece um ambiente e reflecte uma medida da qualidade de cada alternativa (ou solução). Esta função de adaptação (*fitness function*) tem o mesmo papel que a função objectivo dos problemas de optimização; como tal, para além da valorização das soluções, ela pode incluir penalidades por violação de restrições. Na verdade, o conceito de função de adaptação pode ser representado de uma forma bastante flexível. O requisito fundamental é que seja capaz de estabelecer uma relação de ordem no espaço das alternativas, de tal forma que a sua ordenação corresponda às preferências de um Agente de Decisão [16].

A variação ou diversidade é essencial para tornar efectiva a selecção. Ela permite a cobertura do espaço de busca ou das soluções. A variação exprime quão diferente são os descendentes das gerações anteriores, enquanto a diversidade se refere a quão diferentes são, entre si, os indivíduos numa mesma geração. Quando a evolução depende fortemente da diversidade, a perda desta conduz usualmente a uma interrupção precoce dos algoritmos evolucionários, em pontos sub-óptimos. Quando a evolução depende fortemente da variação, é necessário garantir que se verifica progresso suficiente de geração para geração: uma variação demasiado pequena pode conservar um processo capturado num óptimo local enquanto que uma variação excessiva pode perturbar irremediavelmente um processo de convergência [16].

Em geral, com pouco conhecimento sobre o óptimo global, é difícil restringir o espaço de pesquisa a uma região suficientemente pequena. As soluções iniciais estão normalmente longe do óptimo global e portanto, onde passos maiores podem vir a ser benéficos. Mas com o progredir da evolução, soluções posteriores podem estar mais perto do óptimo global e o tamanho dos passos deve ser reduzido gradualmente para possibilitar uma convergência rápida. Infelizmente, não existe maneira de prever o ponto de transição para a mudança do tamanho dos passos de maiores para mais pequenos [17].

Em [52] é feita a optimização de um problema de despacho económico, sem restrições quanto à forma da curva dos custos, utilizando programação evolucionária, provando-se ser um método muito eficiente, apresentando uma convergência para a solução óptima bastante rápida.

### 3.2.4 - Evolução diferencial

A evolução diferencial é uma técnica de computação evolucionária recentemente desenvolvida. A evolução diferencial é um algoritmo evolucionário extremamente poderoso, contudo bastante simples, que melhora uma população de indivíduos ao longo de várias gerações através dos operadores de mutação, recombinação e selecção. A evolução diferencial apresenta boas características de convergência e requer poucos parâmetros de controlo, que se mantêm fixos ao longo de todo o processo de optimização e necessita de um ajuste mínimo. Esta técnica apresenta três parâmetros de controlo essenciais: o factor de escala, a constante de recombinação e o tamanho da população. O factor de escala é um valor entre o intervalo (0, 2] que controla a quantidade de perturbação no processo de mutação. A constante de recombinação é um valor entre o intervalo [0, 1] que controla a diversidade da população. O tamanho da população determina o número de indivíduos na população e fornece ao algoritmo diversidade suficiente para este pesquisar o espaço de soluções [3].

Em [18] é apresentada uma optimização de enxame de partículas genético evolucionário (GPESO) para a resolução de despacho económico. O algoritmo GPESO é baseado na optimização de enxame de partículas genético (GPSO). O GPSO é derivado do PSO tradicional, que foi incorporado com mecanismos de reprodução genética, nomeadamente recombinação e mutação. Para melhorar o desempenho da pesquisa do GPSO, a evolução diferencial é incorporada ao GPSO como uma perturbação para combater a convergência prematura e a reduzida diversidade verificada em implementações do GPSO. No GPESO, a cada geração, o GPSO gera uma solução para cada partícula com informação do seu vizinho, depois do qual a evolução diferencial gera uma nova solução para a partícula com toda a informação de todo o enxame, e a melhor é aceite como a nova solução da partícula. Como consequência, os melhores genes são modificados e guardados. Os resultados de despacho económico obtidos neste artigo, indicam que este algoritmo é mais eficiente que algoritmos PSO e evolução diferencial aplicados separadamente.

## 3.3 - Conceito do GraSO

Em [41] é desenvolvido um novo algoritmo de optimização - GraSO - que usa um enxame para criar um modelo RSM para o objecto que está a ser optimizado dentro do espaço de pesquisa. A partir da rainha do enxame, que consiste na melhor solução do enxame, uma nova região é criada baseada numa variação segundo uma distribuição Gaussiana. A nova rainha movimenta-se em função de uma média pesada da curva de ajuste polinomial de segundo grau e a melhor solução do enxame. O peso é medido pelo coeficiente de determinação da curva de ajuste. Um ajuste adaptativo do actual espaço de pesquisa é realizado por duas funções sigmóides invertidas, controlado pelo coeficiente de determinação para a avaliação de cada partícula. A primeira avaliação é efectuada em relação com o gradiente de segundo grau do enxame, e a segunda refere-se à variação normalizada da distância entre a rainha do enxame e cada uma das partículas.

### 3.4 - Descrição do algoritmo

Na Figura 3.2 está representado o fluxograma com a descrição do algoritmo GraSO.

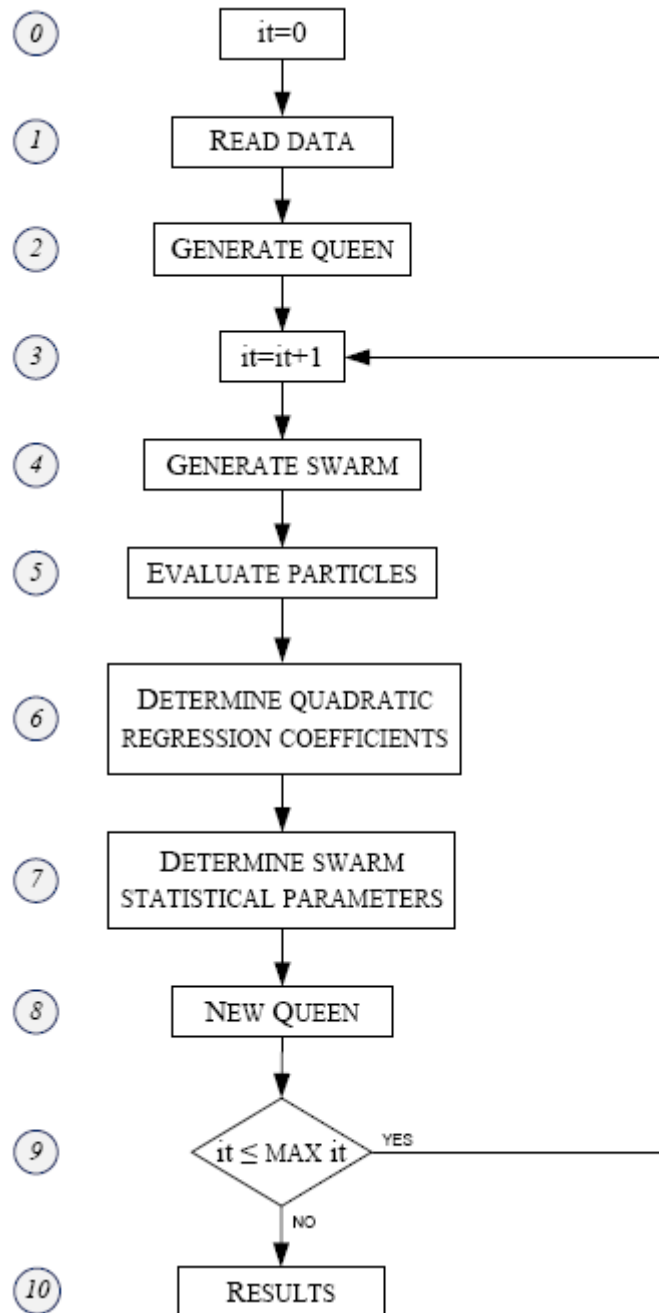


Figura 3.2 - Fluxograma do algoritmo GraSO [41]

A etapa 0 representa o início do processo iterativo.

O passo 1 corresponde à subrotina *read data*, onde todos os parâmetros iniciais inseridos pelo utilizador na folha de Excel são lidos e convertidos para a memória do algoritmo. Nesses parâmetros está incluído o tamanho do enxame, ou seja, o número de partículas que compõem cada enxame ( $n_{swarm}$ ); o número máximo de iterações ( $max_{it}$ ); o mínimo e

máximo das variáveis que compõem a função objectivo, que delimitam os espaço de pesquisa ( $x_{min}$  e  $x_{max}$ ); a variância inicial  $\sigma^2$  da distribuição Gaussiana  $N(\mu, \sigma^2)$  para cada partícula  $x_i$ .

No passo 2 é gerada aleatoriamente a primeira rainha do enxame para a iteração inicial através do método *min-max*, como expresso em (3.3).

$$X_{queen} = Rnd(0, 1) \times (x_{i,max} - x_{i,min}) + x_{i,min} \quad (3.3)$$

No passo 3 é incrementada a variável *it*, que representa a presente iteração em que se encontra o algoritmo, para se iniciar a pesquisa de uma nova rainha do enxame, com todos os processos subjacentes.

Na etapa 4 do algoritmo do GraSO é gerada aleatoriamente cada partícula do enxame ( $X_{swarm}$ ), segundo uma distribuição normal com média  $\mu$  e variância  $\sigma^2$ . Cada partícula é estabelecida como uma distribuição Gaussiana inversa com a média representada pela rainha do enxame e a variância sendo a que foi definida pelo utilizado, isto para  $it = 1$ . Nas iterações seguintes, a variância é um parâmetro auto-adaptativo interno do programa, estimado através de parâmetros estatísticos do enxame e pelas funções de activação  $F_{s1}$  (3.12) e  $F_{s2}$  (3.13), ambas calculadas no passo 8. O novo  $\varphi$  é determinado pela distância entre a rainha do enxame e cada uma das partículas, como representado de seguida:

$$\varphi = \frac{|X_{queen} - X_{swarm}|}{\alpha} \quad (3.4)$$

Onde  $\alpha = 0,675$  e foi calculado experimentalmente em [41].

O parâmetro  $\varphi$  é calculado para se perceber se as melhores partículas geradas se encontram longe ou perto da rainha do enxame.

Na Figura 3.3 pode observar-se o comportamento de um enxame onde as respectivas partículas não têm capacidade de decisão suficiente para determinar se partículas próximas ou afastadas representam boas soluções.

Na Figura 3.4 é possível verificar o comportamento do parâmetro  $\varphi$  próximo do óptimo. Constata-se pelo gradiente positivo que partículas aleatoriamente geradas longe da rainha do enxame representam piores soluções para o problema que se pretende otimizar.



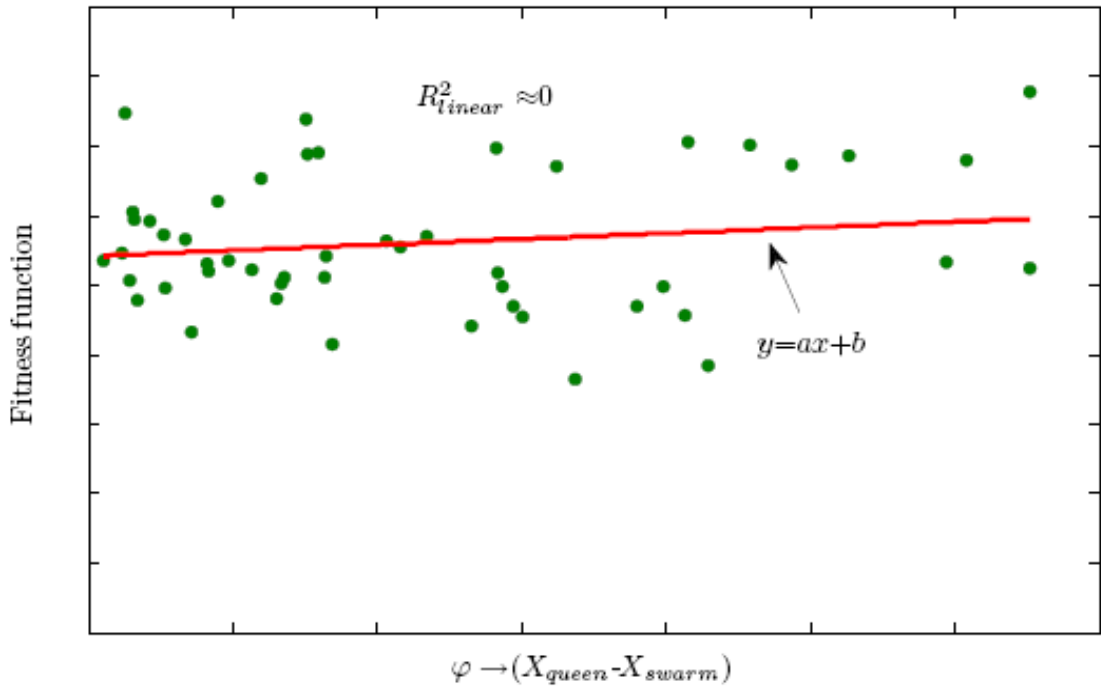


Figura 3.3 - Evolução do parâmetro  $\varphi$  em situações longe de soluções óptimas [41]

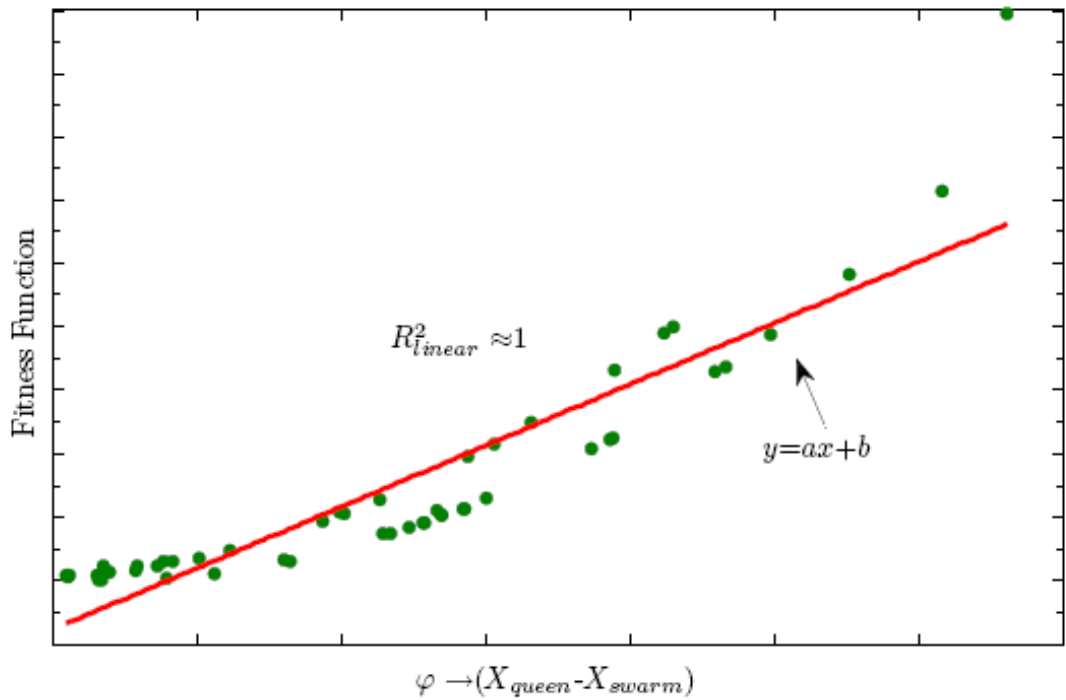


Figura 3.4 - Evolução do parâmetro  $\varphi$  em situações perto de soluções óptimas [41]

No passo 5 do algoritmo, o objectivo é determinar a melhor partícula,  $F_{best}$ , de cada iteração, assim como a sua posição no espaço do enxame,  $X_{best}$ . Se a função objectivo da partícula que está a ser avaliada for menor que a melhor função objectivo encontrada até então, essa função passa a ser a melhor e a posição passa a ser a posição dessa partícula.

Na etapa 6, tenta estimar-se, através do método dos mínimos quadrados, os coeficientes de regressão quadráticos da parábola que melhor se ajustem ao comportamento do enxame de partículas. Se o termo ao quadrado é positivo, a curva é convexa e existe um mínimo local ou global. Se o termo ao quadrado é negativo, a curva é côncava e existe um máximo local ou global.

No passo 7, o objectivo é calcular diversos parâmetros estatísticos do enxame.

Um desses parâmetros é o  $R_{swarm}^2$ , que representa o coeficiente de determinação da partícula do enxame, indicando o quão bom é o modelo quadrático criado para a partícula, como se observar nas Figuras 3.5 e 3.6, e calcula-se da seguinte forma:

$$R_{swarm}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_{swarm}} (F(X_{swarm}) - F(\bar{X}_{swarm}))^2}{\sum_{i=1}^{n_{swarm}} (F(X_{quadratic}) - F(\bar{X}_{swarm}))^2} \quad (3.5)$$

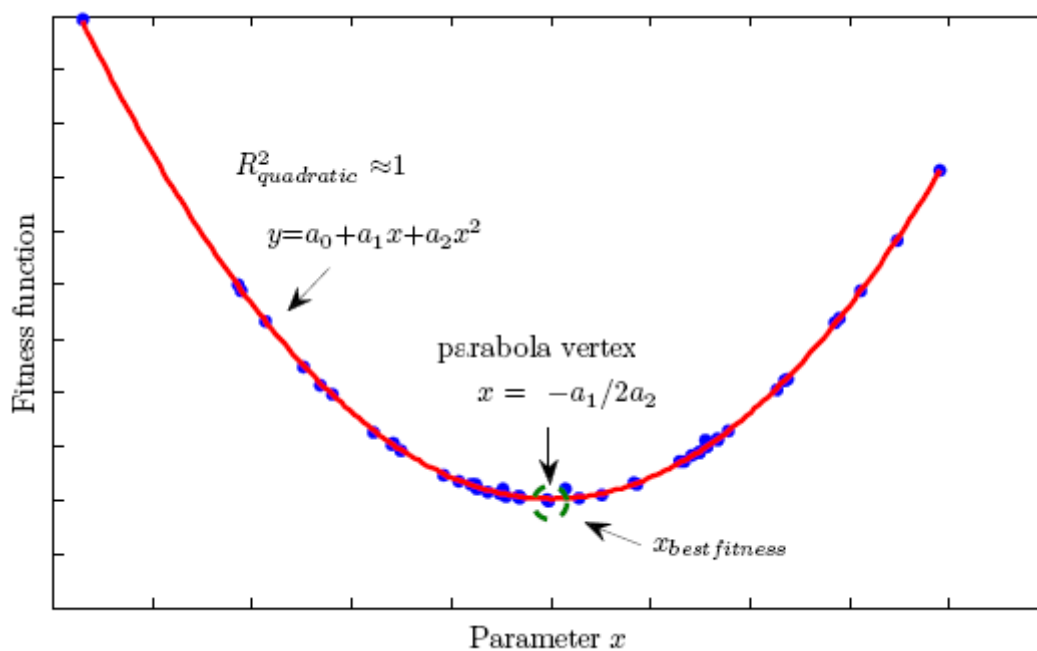


Figura 3.5 - Comportamento do enxame de partículas perto da solução óptima [41]

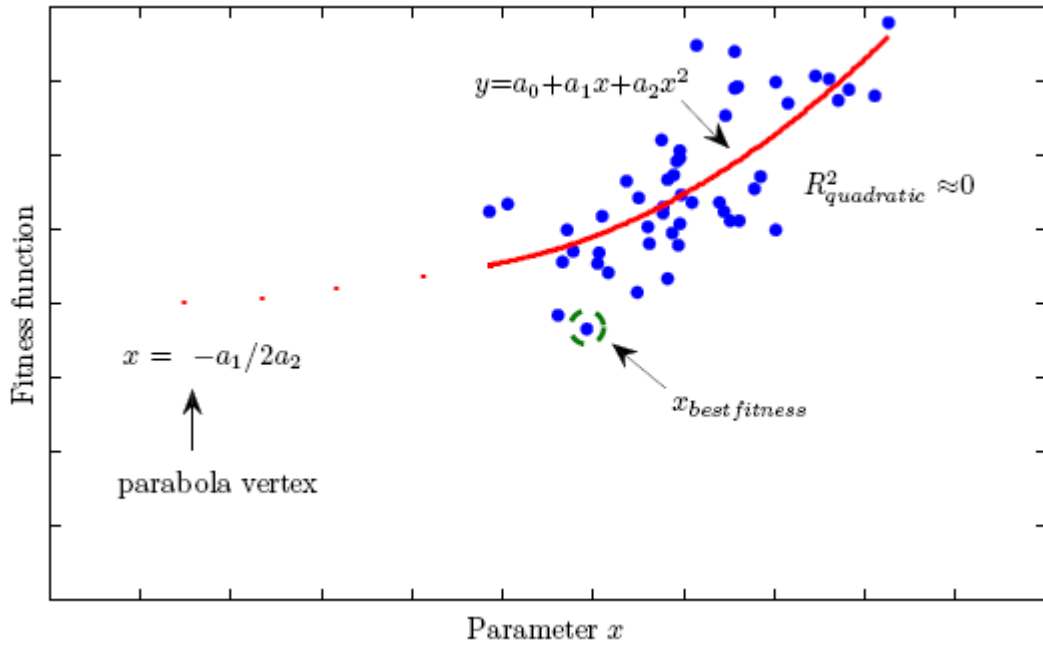


Figura 3.6 - Comportamento do enxame de partículas longe da solução ótima [41]

Outro parâmetro que é calculado neste passo é o  $R_{\varphi}^2$ , que representa o coeficiente de determinação de  $\varphi$ , que dá indicação da qualidade do modelo linear criado para o  $\varphi$ , como está representado nas Figuras 3.3 e 3.4, e que se determina como de seguida:

$$R_{\varphi}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_{swarm}} (F(\varphi_{swarm}) - F(\bar{\varphi}_{swarm}))^2}{\sum_{i=1}^{n_{swarm}} (F(\varphi_{linear}) - F(\bar{\varphi}_{swarm}))^2} \quad (3.6)$$

O parâmetro seguinte a calcular é o  $\sigma_{\varphi}$ , que consiste no desvio-padrão entre a rainha,  $X_{queen}$ , e as partículas do enxame,  $X_{swarm}$ .

$$\sigma_{\varphi} = \sqrt{\frac{1}{n_{swarm}} \sum_{i=1}^{n_{swarm}} (X_{queen} - X_{swarm})^2} \quad (3.7)$$

O algoritmo também calcula o  $\sigma_{Fitness}$ , que representa o desvio-padrão para todas as partículas que compõem o enxame.

$$\sigma_{Fitness} = \sqrt{\frac{1}{n_{swarm}} \sum_{i=1}^{n_{swarm}} (F(X_{queen}) - F(X_{swarm}))^2} \quad (3.8)$$

Outro parâmetro é o gradiente de  $\varphi$ ,  $\nabla_{\varphi}$ , que é calculado pela seguinte expressão:

$$\nabla_{\varphi} = \frac{\partial F(\varphi_i)}{\partial \varphi_i} \quad (3.9)$$

Por último, tem-se o parâmetro  $\Delta_{\varphi}$ , que é a variação normalizada de  $\varphi$ .

$$\Delta\varphi = \frac{1}{1 + h\nabla\varphi\left(\frac{\sigma\varphi}{\sigma_{Fitness}}\right)} \quad (3.10)$$

Na etapa 8 do fluxograma do algoritmo, é determinada a nova rainha do enxame com base no  $R_{swarm}^2$ , no vértice da parábola e na melhor partícula. Quando  $R_{swarm}^2$  é aproximadamente 1, as partículas geradas através da distribuição Gaussiana têm um comportamento semelhante ao da curva de ajuste quadrática, desta forma a nova rainha deve ir na direcção do vértice da parábola, como se pode observar na Figura 3.5.

Pelo contrário, no caso de  $R_{swarm}^2$  ser aproximadamente 0, a confiança da curva de ajuste quadrática é nula e a nova rainha deve seguir a partícula com o melhor valor da função objectivo dessa iteração. Esse comportamento é visível na Figura 3.6.

Assim, para se criar um peso médio entre o melhor valor da função objectivo e o mínimo da parábola, a nova rainha é determinada da seguinte forma:

$$X_{queen} = R_{swarm}^2 \times \left(\frac{-a_1}{2a_2}\right) + (1 - R_{swarm}^2) \times X_{best} \quad (3.11)$$

A variância é mutada para a próxima geração do enxame, através das funções  $F_{s1}$  e  $F_{s2}$ , que se podem observar nas Figuras 3.7a e 3.7b.

$$F_{s1}(R_{\varphi_i}^2) = 1 - \frac{(1-\Delta\varphi)}{1 + e^{(-10R_{\varphi_i}^2+5)}} \quad (3.12)$$

$$F_{s2}(R_{x_i}^2) = 1 - \frac{(1,5-1)}{1 + e^{(-50R_{x_i}^2+5)}} \quad (3.13)$$

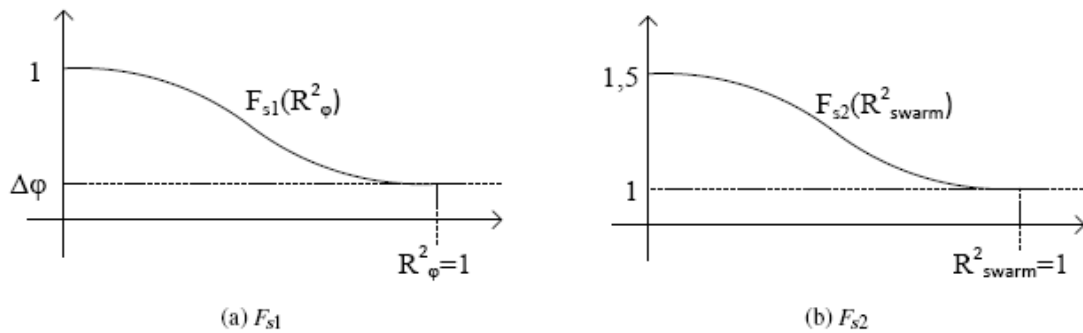


Figura 3.7 - Comportamento das funções de activação sigmóides invertidas [41]

Com a função  $F_{s1}$  pretende-se alargar o espaço de pesquisa para a próxima iteração, caso  $R_{swarm}^2$  seja muito fraco. Pelo contrário, se  $R_{swarm}^2$  é aproximadamente 1, muito pouca ou nenhuma variação é feita no espaço de pesquisa.

Com a função  $F_{s2}$  o comportamento é semelhante, uma vez que para valores de  $R_{\varphi}^2$  próximos de 1, está-se próximo da solução óptima e o algoritmo deve reduzir o espaço de pesquisa para a próxima iteração. No entanto, se  $R_{\varphi}^2$  apresentar valores baixos, nada deve

acontecer uma vez que não existe confiança, e de certeza que  $R_{swarm}^2$  também apresentará valores baixos, como tal o domínio no problema deverá ser alargado.

A nova variância é calculada multiplicando as duas funções de activação e a variância da iteração anterior, como representado de seguida:

$$\sigma_{it+1}^2 = \sigma_{it}^2 \times F_{s1}(R_{\varphi}^2) \times F_{s2}(R_{swarm}^2) \quad (3.14)$$

No passo 9, caso o número de iterações atinja o máximo definido pelo utilizador, o processo se termina. Se o número de iterações ainda for inferior ao máximo, então o algoritmo volta ao passo 3.

Por fim, na etapa 10, quando as iterações atingem o número máximo, são apresentados os resultados obtidos. Nos resultados estão incluídos a função objectivo, as variáveis independentes do problema e a variância.

### 3.5 - Inclusão no GraSO de restrições de igualdade e desigualdade

Um dos objectivos desta dissertação consiste na modelização de restrições no GraSO, característica que este não possui em [41], uma vez que foi utilizado para problemas sem restrições.

A primeira abordagem que se considerou consistiu na criação de um novo indivíduo sempre que o anterior não cumpria as restrições, gerando-se indivíduos continuamente até se encontrar uma solução viável. Contudo, esta estratégia para fazer cumprir as restrições, em que o algoritmo apenas avança quando todos os indivíduos cumprem as restrições, revelou-se um método com um tempo de computação bastante elevado, que aumentava com o aumento das variáveis que constituíam cada um dos indivíduos pertencentes ao enxame, tornando-se mesmo impossível, em algumas situações, o algoritmo encontrar uma solução viável, ficando preso num ciclo infinito.

Assim, a abordagem que foi utilizada para incluir restrições no algoritmo GraSO, foi estabelecendo-se penalizações aos indivíduos que violem as restrições, fazendo com que estes fizessem piorar o valor da função de adaptação (*fitness function*), fazendo com que as partículas se afastem das zonas onde são penalizadas, para que sejam escolhidas como a melhor solução do enxame. Desta forma, em vez de se forçar uma solução viável, deixa-se que o algoritmo vá descartando, ao longo das iterações, as soluções que não cumpram as restrições, fazendo com que o tempo de computação diminua significativamente.

Os métodos de penalidades foram criados para resolver um problema, resolvendo uma sequência de problemas sem restrições especialmente escolhidos. Ou seja, é efectuada uma transformação ao problema original e é feita a resolução de uma sequência de outros problemas, sem restrições, derivados do inicial, pelos métodos conhecidos para este tipo de problemas. Nos métodos de penalidades, a região de soluções admissíveis é alargada a todo o espaço, mas é aplicada uma penalização à função objectivo nos pontos que estão fora da região admissível original [59].

A expressão da penalidade utilizada no GraSO para impedir a violação dos limites está representada em (3.15), pois apresenta bons resultados em problemas de optimização.

$$\text{penalidade} = 1000 \times m(X - X_{\text{limite}})^2 \quad (3.15)$$

Onde:

$X$  é a variável que ultrapassou o limite;

$X_{\text{limite}}$  é o limite que foi ultrapassado;

$m$  é o parâmetro de penalidade.

O parâmetro de penalidade  $m$  é ajustável, apresentando um valor diferente de acordo com a importância da restrição que está a ser violada. A escolha deste parâmetro requer alguma experimentação, uma vez que, para valores pequenos de  $m$ , a distorção da função objectivo é pequena, mas o óptimo encontrado pode estar longe do verdadeiro óptimo. Por outro lado, usando um valor elevado de  $m$ , o óptimo encontrado pode ser próximo do mínimo, mas a distorção pode ser tão grande que a função objectivo pode ter mínimos fictícios.

Ou seja, neste caso, o termo de penalidade é tanto maior quanto mais afastadas estiverem as partículas da região de soluções admissíveis e é nulo se a partícula estiver dentro dos limites. A este tipo de penalidades dá-se o nome de penalidades exteriores, e são apropriadas tanto para as restrições de igualdade como para as restrições de desigualdade.

Existem situações em que o que se pretende não é impor limites à variável a restringir, mas sim minimizar a distância dessa variável aos seus limites, ou seja penalizar a variável à medida que esta se afasta do valor central entre o seu limite máximo e mínimo. Essa penalidade é modelizada no GraSO e é aplicada tal como está exemplificado na Figura 3.8, onde a penalização aumenta à medida que a partícula se afasta do valor óptimo. Este tipo de penalidades chama-se penalidades interiores, não sendo apropriadas para restrições de igualdade.

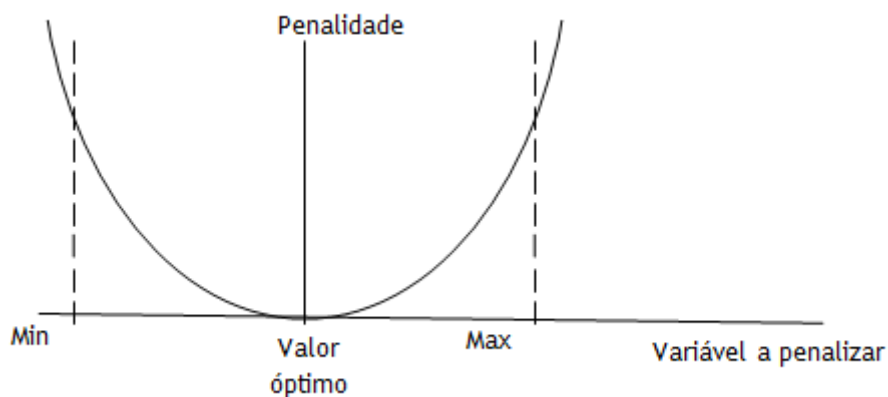


Figura 3.8 - Penalidade a ser aplicada às variáveis para estas se afastar dos seus limites (adaptado de [16])

### 3.6 - Adaptação do GraSO a um problema de despacho económico

Uma simples técnica para a optimização de problemas é o Microsoft Excel Solver, no entanto, quando se tentou este método para a optimização de um simples problema de despacho económico, verificou-se que as capacidades do software não eram suficientes para resolver um problema desta complexidade. Ainda se recorreu à plataforma Risk Solver, que é a ferramenta de optimização mais poderosa para Excel, que consegue resolver problemas de despacho económico mais simples, mas a partir do momento que o número de variáveis e restrições aumentam, esta ferramenta deixa de conseguir resolver o problema de despacho económico com eficácia, uma vez que ficava preso em óptimos locais, ou na solução inicial.

Como tal, e tendo em conta os resultados obtidos em [41] pelo GraSO na resolução de um simples problema de despacho (Figura 3.9) quando comparado com outros algoritmos evolucionários, decidiu-se pela utilização deste algoritmo para a optimização do problema de despacho económico proposto nesta dissertação.

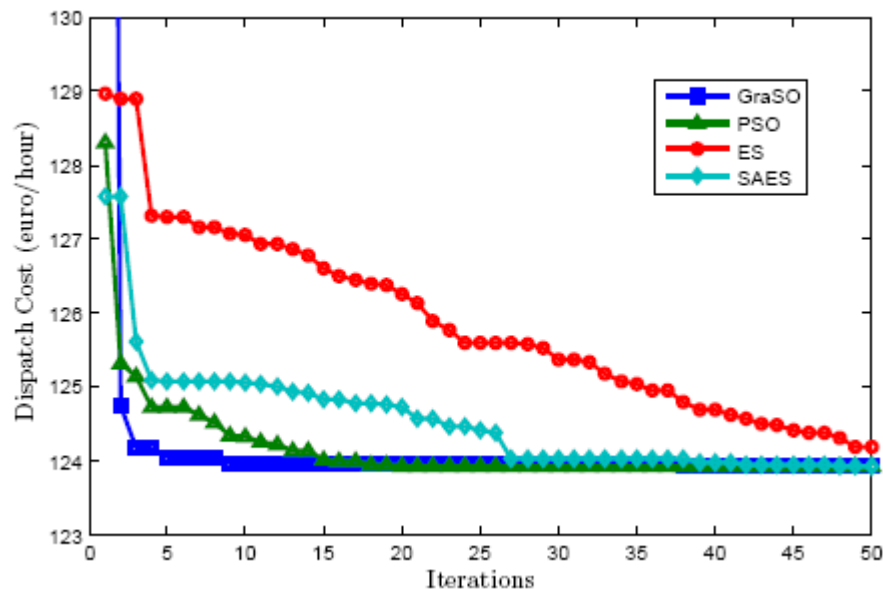


Figura 3.9 - Análise comparativa da utilização do GraSO num problema de despacho económico [41]

As principais modificações a realizarem-se no algoritmo GraSO proposto em [41] para adaptá-lo a problemas de despacho económico, estão essencialmente relacionadas com as restrições que é necessário adicionar tanto de igualdade como de desigualdade, através da modelização explicada no subcapítulo 3.5, assim como, a elevada quantidade de valores que é necessário o algoritmo ler da folha de Excel, para fazer cumprir essas mesmas restrições.

Assim, foi necessária uma modificação total do interface do algoritmo com o Excel, tanto para possibilitar a resolução de problemas com um elevado número de variáveis, como para permitir a leitura por parte do algoritmo das mais diversas variáveis que serão incluídas nas restrições do problema de optimização de despacho económico. As restrições de igualdade

correspondem essencialmente ao fluxo de potência, enquanto que as restrições de desigualdade estão normalmente relacionadas com limites operacionais.

As primeiras modificações no algoritmo que se realizaram foram no passo 1 do fluxograma da Figura 3.2. Uma vez que, tratando-se de um problema de despacho económico, é necessário ler da folha de Excel um elevado número de variáveis, como sendo os limites das rampas de capacidade de variação da produção térmica, limites de armazenamento da energia hídrica, os coeficientes da função objectivo a minimizar, e ainda, a produção da PRE térmica, PRE hídrica, PRE eólica, PRE fotovoltaica, as importações, as exportações, e por fim o consumo.

No passo 2, 4 e 8 onde é gerada a rainha, o enxame e a nova rainha, respectivamente, estes são calculados como foi explicado anteriormente, não havendo alterações. No entanto, para um problema de despacho económico com produção hídrica associada, a rainha e o enxame têm que cumprir uma série de restrições, para a produção térmica ( $P_t$ ) e produção hídrica ( $P_h$ ).

Assim, após a geração tanto da rainha como do enxame, verifica-se se estes cumprem tanto os limites das rampas de capacidade de variação térmica, como os limites da produção térmica.

$$P_{t \min} < P_t < P_{t \max} \quad (3.16)$$

$$DR < P_t(t) - P_t(t - 1) < UR \quad (3.17)$$

Onde:

$P_t(t - 1)$  é a produção térmica da hora anterior, tendo em consideração que  $\Delta t$  corresponde a uma hora;

$UR$  é o limite superior das rampas de capacidade de variação das unidades térmicas;

$DR$  é o limite inferior das rampas de capacidade de variação das unidades térmicas.

Para balancear a potência, é necessário criar uma restrição de igualdade, para que se satisfaça a condição de que a produção tem que ser igual ao consumo. No entanto, como a produção hídrica, para além da produção térmica, também é escalonada pelo algoritmo, decidiu-se gerar a produção hídrica subtraindo ao consumo a soma das restantes produções, cumprindo-se assim a restrição de balanço.

$$P_h = \text{Consumo} - P_{total-hídrica} \quad (3.18)$$

Onde:

*Consumo* é o consumo de potência previsto;

$P_{total-hídrica}$  é a soma de todas as produções, com excepção da produção hídrica.

Associada à produção hídrica escalonada está a energia hídrica armazenada acumulada ( $E_h \text{ acumulada}$ ), que limita a  $P_h$  que se consegue produzir. Tendo em conta que a água que se



consegue armazenar numa central hídrica é limitada, esse facto limita, consequentemente, a energia que se consegue armazenar.

$$E_{h\text{ acumulada}_{min}} < E_{h\text{ acumulada}} < E_{h\text{ acumulada}_{max}} \quad (3.19)$$

Em que,  $E_{h\text{ acumulada}_{min}}$  e  $E_{h\text{ acumulada}_{max}}$  são a energia hídrica acumulada mínima e máxima, respectivamente, que se consegue armazenar.

Como foi dito, este limite de armazenamento de água limita por sua vez a produção hídrica que se consegue escalonar.

$$P_{h_{min}} < P_h < P_{h_{max}} \quad (3.20)$$

Este limite da produção hídrica é um limite dinâmico, uma vez que é necessário estar constantemente a calcular o armazenamento acumulado, e como tal, a gama de valores sobre a qual a produção hídrica pode variar está em constante modificação. Caso alguma destas restrições aqui apresentadas seja violada, o que o algoritmo faz é igualar a variável em questão ao limite que não foi respeitado.

Após o escalonamento da produção hídrica e as alterações feitas a esta, para que se cumpra os limites estabelecidos, é feito um ajuste da produção térmica (3.21), apenas se a restrição de igualdade entre o consumo e a produção não for satisfeita.

$$P_t = \text{Consumo} - P_{total-térmica} \quad (3.21)$$

Onde:

$P_{total-térmica}$  é a soma de todas as produções, com excepção da produção térmica.

Uma vez feito este ajuste de produção, é adoptada uma estratégia de penalidades para que indivíduos com maus valores para a função objectivo sejam eliminados do enxame, e as restrições tenham mais possibilidades de serem satisfeitas, através da modelização explicada no subcapítulo 3.5.

Outra situação, em que se adoptou o uso de penalidades foi para o cumprimento dos limites de descarga, onde a produção hídrica escalonada  $P_{h\text{ gerada}}$  tem que ser igual à produção hídrica que se verificou na realidade  $P_{h\text{ real}}$ , durante o período de tempo  $n$  do despacho.

$$\sum_{i=1}^n P_{h\text{ real}} = \sum_{i=1}^n P_{h\text{ gerada}} \quad (3.22)$$

Estas penalidades por violação de restrições serão incluídas na função objectivo do problema de optimização. No caso das penalidades que são aplicadas às rampas da capacidade de variação das unidades térmicas, estas são aplicadas mesmo que as rampas não ultrapassem os limites, através do método demonstrado na Figura 3.8. O objectivo desta penalização é que estas variações constituam uma distribuição normal centrada em zero, que é o que acontece na realidade, uma vez que as variações na produção térmica implicam um

aumento dos custos. Assim, para se favorecer as soluções em que as rampas não se encontram muito próximas dos seus limites, é aplicada uma penalização que vai aumentando à medida que as rampas se aproximam dos seus limites e conseqüentemente se afastam do zero.

A função objectivo é representada por uma função polinomial quadrática, que modeliza os custos de produção das unidades térmicas, onde  $a, b$  e  $c$  são os coeficientes de custo da unidade térmica.

$$F_{custo}(P_t) = a.P_t^2 + b.P_t + c \quad (3.23)$$

O funcionamento sequencial do algoritmo GraSO, no que respeita ao escalonamento e coordenação entre a produção térmica e hídrica, está representado na Figura 3.10.

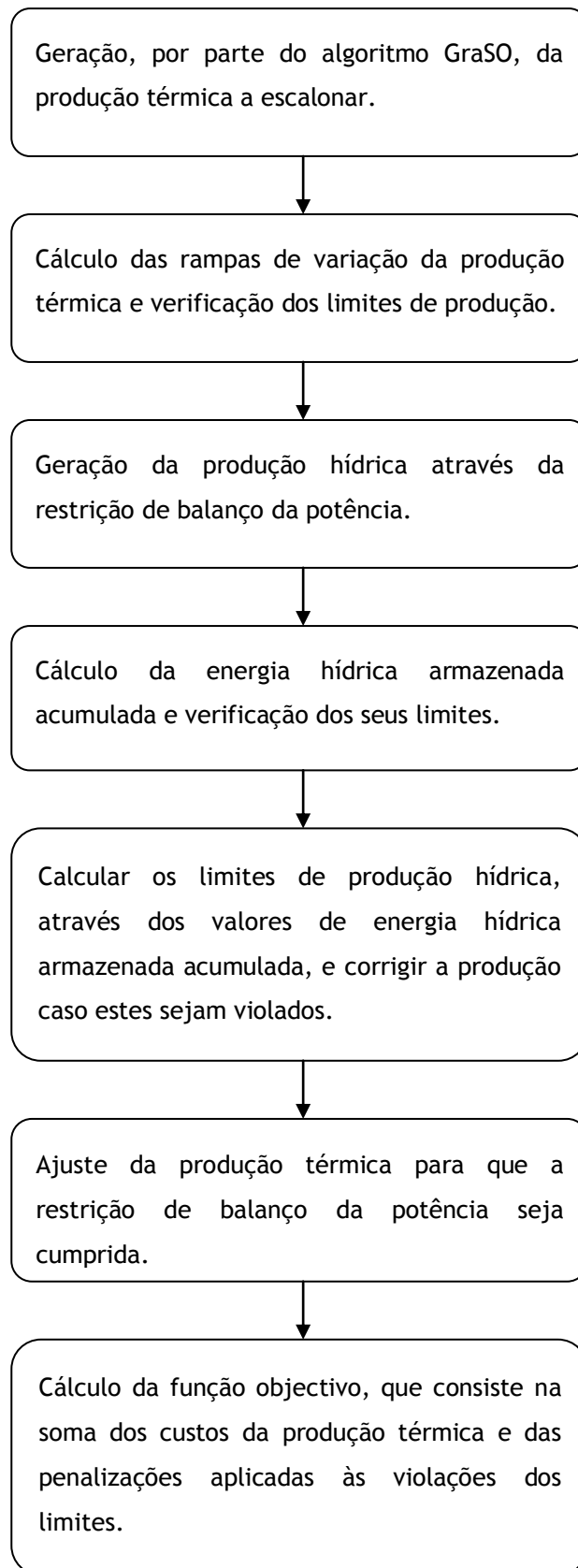


Figura 3.10 - Sequência de etapas do GraSO para o escalonamento da potência térmica e potência hídrica



# Capítulo 4

## Metodologia proposta

### 4.1 - Introdução

Para a formulação do problema de despacho económico proposto, foram utilizados apenas dados públicos, fornecidos pela REN, correspondentes ao ano de 2009 até Abril de 2010. O despacho económico realizado é agregado por tipo de central, assumindo-se a existência de apenas uma central térmica e uma central hídrica responsáveis pela totalidade da produção gerada. Esta simplificação deve-se ao facto de não estar acessível informação quanto aos custos por central. Também se considera que o preço de mercado é igual ao custo de operação, para além de se desprezarem as perdas. O despacho económico é realizado para períodos de vinte e quatro horas, com início na hora zero. É de salientar que o caso que se estuda é um caso real, pelo que todos os valores recolhidos que permitiram criar esta metodologia são reais.

### 4.2 - Formulação do problema de despacho económico proposto

#### 4.2.1 - Curva dos custos dos combustíveis das unidades térmicas

Inicialmente, para a formulação do problema de despacho económico, pensou-se em fazer uma curva de custos para os diferentes tipos de unidades térmicas (ciclo-combinado, carvão e *fuel*). Contudo, após a análise dos dados da produção de cada uma delas constatou-se que o *fuel* representa uma pequena percentagem da potência térmica total gerada (aproximadamente 1%). Assim como, o carvão e o ciclo-combinado apresentam uma curva dos custos bastante semelhante entre eles. Após esta análise, optou-se por fazer um despacho económico agregado por centrais térmicas, ou seja, considerou-se apenas uma produção térmica agregada, que é composta pela soma da produção das centrais a carvão, de ciclo-combinado e de *fuel*.

$$P_t = P_{\text{carvão}} + P_{\text{ciclo-combinado}} + P_{\text{fuel}} \quad (4.1)$$

Com esta formulação, consegue-se aliviar o esforço computacional do problema, reduzindo-se o número de restrições deste, mantendo a formulação coerente com os dados recolhidos.

Na Figura 4.1 está representada a curva dos custos para a produção dos três tipos de centrais térmicas agregada.

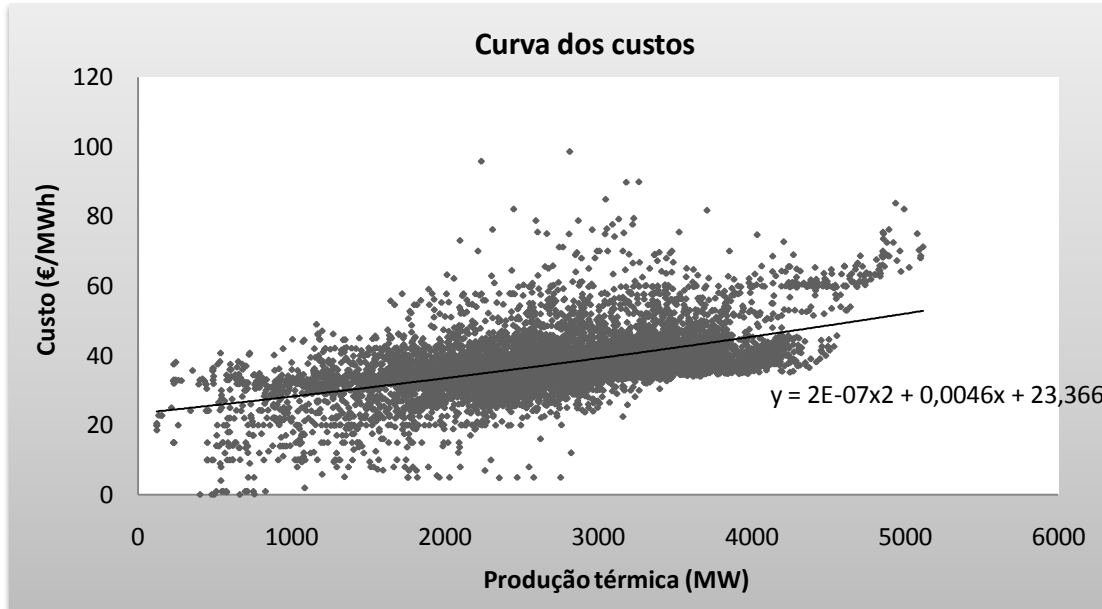


Figura 4.1 - Curva dos custos com a produção térmica agregada

Através da curva dos custos, obteve-se a função objectivo, que se pretende minimizar, do problema de despacho económico proposto. Esta função corresponde aos custos dos combustíveis das centrais térmicas que se pretende minimizar, e que variam com a potência produzida.

$$F_{custo}(P_t) = 2 \times 10^{-7}P_t^2 + 0,0046P_t + 23,366 \quad (4.2)$$

Onde:

$F_{custo}$  é o custo dos combustíveis das unidades térmicas agregadas (€/MWh);  
 $P_t$  é a produção térmica (MW).

Analisando-se a curva dos custos, observou-se ainda os limites de funcionamento das centrais térmicas.

Assim, a primeira restrição do problema proposto corresponde aos limites da produção térmica, em MW.

$$0 < P_t < 5100 \quad (4.3)$$

#### 4.2.2 - Rampas da capacidade de variação da produção

A potência dos geradores térmicos não pode ser ajustada instantaneamente, uma vez que os geradores térmicos não têm essa capacidade, ao contrário das unidades hídricas, onde o ajuste é praticamente instantâneo. Assim, decidiu-se incluir nesta formulação essa incapacidade das centrais térmicas, para evitar grandes variações de produção térmica, tornando a formulação mais próxima do que acontece na realidade. Na Figura 4.2, estão representadas as rampas de variação de produção do gerador térmico, de acordo com a frequência com que se verificam ao longo do ano de 2009 e início de 2010, de acordo com os dados recolhidos.

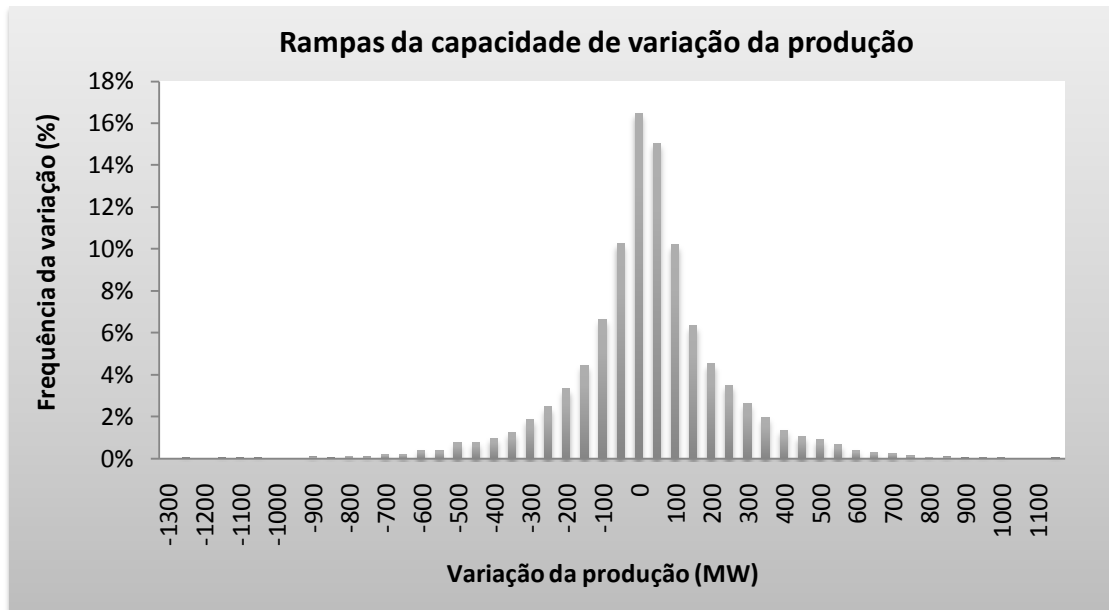


Figura 4.2 - Rampas da capacidade de variação da unidade térmica

Através da Figura 4.2 observou-se os limites de variação da produção térmica, constituindo estes, outra restrição do problema de despacho económico, e que está representada em (4.4), em MW.

$$-550 < P_t(t) - P_t(t - 1) < 550 \quad (4.4)$$

#### 4.2.3 - Limite máximo da produção hídrica

No que respeita à produção hídrica, observaram-se os gráficos do histórico da produção da hídrica de albufeira e de fio de água, e verificou-se que os seus comportamentos ao longo do ano são bastante semelhantes (Figura 4.3).

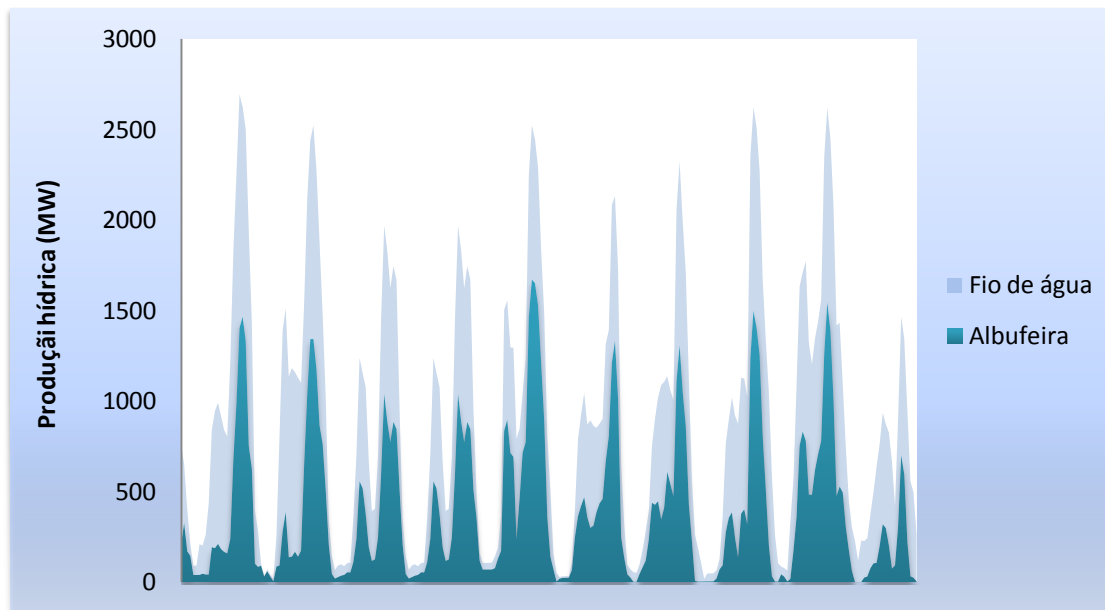


Figura 4.3 - Produção hídrica em centrais de albufeira e em centrais de fio de água

Como tal, decidiu-se juntar ambas as produções numa só produção hídrica, agregando-se desta forma as centrais hídricas numa só, subtraindo-se ainda à soma das potências hídricas a bombagem. Assim, obteve-se uma única variável correspondente à produção hídrica  $P_h$ :

$$P_h = P_{albufeira} + P_{fio\ de\ água} - P_{bombagem} \quad (4.5)$$

Com a variável da potência hídrica definida, tentou-se encontrar o limite máximo da produção hídrica em função da produção hídrica média das últimas vinte e quatro horas, que fosse de encontro à potência hídrica máxima das últimas vinte e quatro horas. A função encontrada para definir produção máxima de hídrica está representada em (4.6), obtendo-se desta forma outra restrição para o problema de despacho económico proposto.

$$P_h < \frac{2 \times P_{h\ max}}{1 + e^{(-P_{h\ med} \times \frac{4}{P_{h\ max}})}} - P_{h\ max} \quad (4.6)$$

Onde:

$P_{h\ max}$  é a potência hídrica máxima das últimas vinte e quatro horas, em MW;

$P_{h\ med}$  é a potência hídrica média das últimas vinte e quatro horas, em MW.

Esta equação foi conseguida após a observação do gráfico representado na Figura 4.4, onde é possível observar que os valores de potência hídrica obtidos com a função encontrada coincidem exactamente com a potência hídrica máxima das últimas vinte e quatro horas.



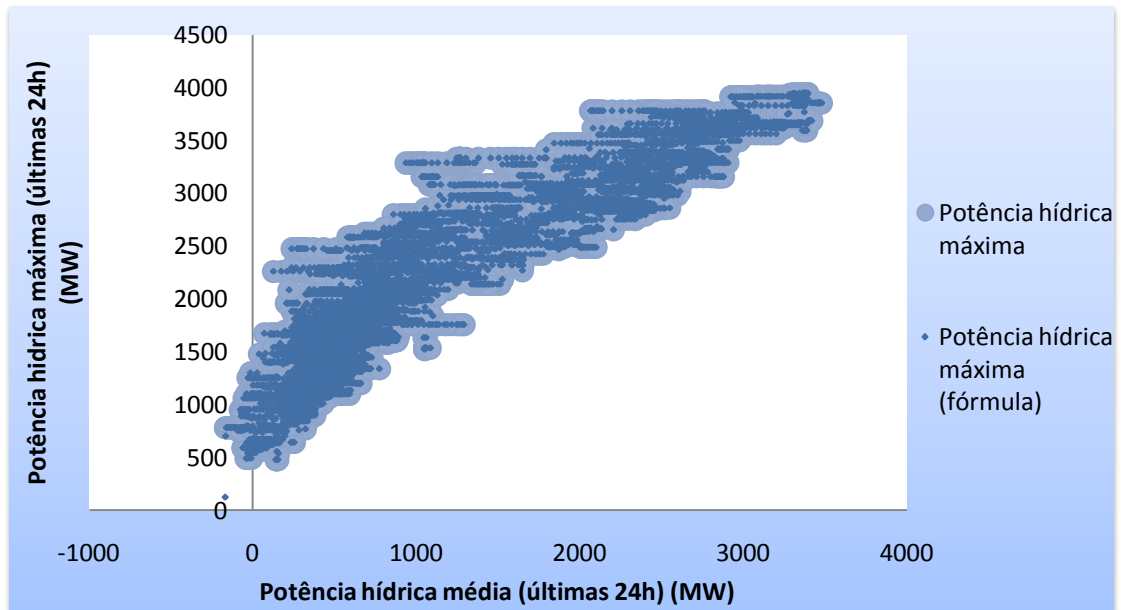


Figura 4.4 - Limite máximo da produção hídrica em função da potência média das últimas vinte e quatro horas

Esta restrição é importante para limitar a produção hídrica, tendo em consideração a produção realizada pela central nas últimas vinte e quatro horas, mapeando-se os limites de potência hídrica que têm vindo a ser utilizados nos últimos anos.

#### 4.2.4 - Limites da produção hídrica em função da água armazenada

Para se poder observar o impacto da água armazenada, na produção hídrica da central, começou-se por calcular a potência armazenada a cada hora (4.7).

$$P_{h \text{ armazenada}} = P_{h \text{ med}} + P_h \quad (4.7)$$

Onde:

$P_{h \text{ armazenada}}$  é a potência hídrica armazenada em cada hora, em MW.

Com este valor obtém-se a energia hídrica armazenada acumulada ao longo do tempo, ou seja, a energia total acumulada que a central conseguiu armazenar, através da soma da potência armazenada da hora anterior com a da hora actual (4.8).

$$E_{h \text{ acumulada}}(t) = P_{h \text{ armazenada}}(t - 1) + P_{h \text{ armazenada}}(t) \quad (4.8)$$

Onde:

$E_{h \text{ acumulada}}(t)$  é a energia hídrica armazenada acumulada, em MWh;  
 $P_{h \text{ armazenada}}(t - 1)$  é a potência hídrica armazenada na hora anterior, em MW.

Através de uma amostra de valores dos dados fornecidos pela REN da produção hídrica, construiu-se um gráfico com a comparação da potência hídrica produzida com a energia hídrica armazenada acumulada (Figura 4.5), observando-se que existe uma relação directa entre a energia acumulada e a potência produzida. Quando a produção hídrica aumenta verifica-se uma diminuição da energia acumulada, pelo contrário, quando a produção diminui, inclusive nas horas em que existe bombagem, a energia hídrica armazenada acumulada sofre um aumento.

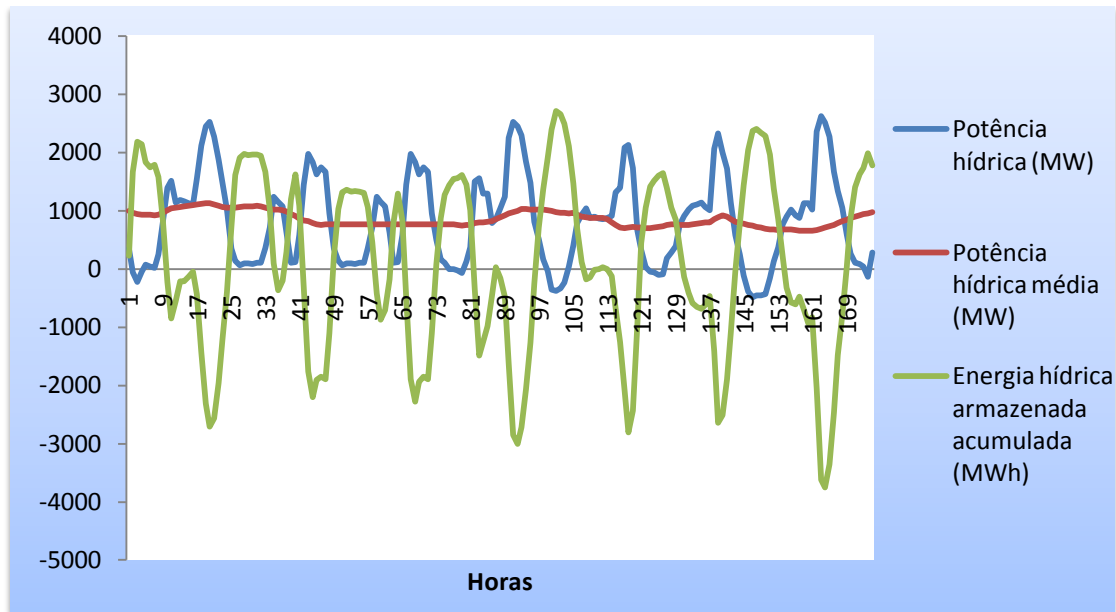


Figura 4.5 - Potência hídrica, potência hídrica média e energia hídrica armazenada acumulada

Após a observação desta relação, desenhou-se o gráfico da potência hídrica em função da energia hídrica armazenada acumulada (Figura 4.6), existindo uma relação matemática entre elas, que é expressa por uma linha de tendência (4.9).

$$P_h = 2 \times 10^{-5} \cdot E_{h\text{ acumulada}}^2 - 0,4859 \cdot E_{h\text{ acumulada}} + 759,64 \quad (4.9)$$

Como se pode observar no gráfico da Figura 4.6, existe uma relação quadrática entre a potência hídrica produzida e a energia hídrica armazenada acumulada. Desta forma, a estimação do limite máximo e mínimo de produção hídrica é feita da seguinte forma:

$$P_h = a \cdot E_{h\text{ acumulada}}^2 + b \cdot E_{h\text{ acumulada}} + c \quad (4.10)$$

Onde  $a$  é o coeficiente que controla a velocidade com que curva aumenta ou decresce a partir do vértice. Se este for negativo a curva é côncava, se for positivo a curva é convexa. O coeficiente  $b$  representa o declive da curva ao atravessar o eixo da produção hídrica (eixo dos  $yy$ ). A variável  $c$  permite fazer o ajuste da cota da curva. Esta variável permite elevar e baixar a curva de maneira a esta ir de encontro ao limite máximo e mínimo, respectivamente.

O ajuste destes três parâmetros, para que a curva delimite a produção hídrica máxima e mínima, é feito recorrendo a uma formulação que é semelhante à que é feita no método dos mínimos quadrados. No entanto, neste caso são introduzidas penalidades, de forma a fazer a curva aproximar-se dos pontos máximos ou pontos mínimos, dependendo se se pretende encontrar o limite máximo ou mínimo.

A formulação matemática consiste em minimizar a função  $d$  (4.11), em função das variáveis  $a$ ,  $b$  e  $c$ .

$$d = \sum_{i=1}^n \text{abs}(P_{h_i} - P_{h \text{ real}_i}) \cdot k \quad (4.11)$$

Onde, para aproximar a curva aos pontos máximos tem-se:

$$\begin{cases} k = 1, & \text{se } P_{h_i} - P_{h \text{ real}_i} > 0 \\ k = 10, & \text{se } P_{h_i} - P_{h \text{ real}_i} < 0 \end{cases} \quad (4.12)$$

E para se aproximar a curva aos pontos mínimos tem-se:

$$\begin{cases} k = 40, & \text{se } P_{h_i} - P_{h \text{ real}_i} > 0 \\ k = 1, & \text{se } P_{h_i} - P_{h \text{ real}_i} < 0 \end{cases} \quad (4.13)$$

O valor de  $d$  corresponde ao desvio total entre o valor de potência hídrica obtido através da expressão (4.10) e o valor da potência hídrica real que efectivamente se verificou ao longo do período da amostra de valores.  $P_{h_i}$  representa a potência hídrica obtida através da expressão (4.10) na hora  $i$ , enquanto  $P_{h \text{ real}_i}$  é a potência hídrica produzida na realidade, durante a hora  $i$ . A variável  $k$  corresponde à penalidade que é imposta à função a minimizar. Em (4.12), como o objectivo é aproximar a curva dos valores máximo da produção hídrica, penaliza-se mais os valores de produção inferiores à potência real, e menos os valores superiores a essa mesma potência, para desta forma a curva aumentar a sua cota, indo de encontro ao limite máximo da produção hídrica. Em (4.13), sendo o objectivo limitar a produção mínima, são mais fortemente penalizados os valores de produção hídrica superiores aos reais, fazendo com que desta forma a curva diminua em termos de cota, aproximando-se do limite inferior. Os diferentes valores do parâmetro  $k$  foram escolhidos após alguns testes, até se encontrar aqueles que faziam com que a curva se aproxima-se mais dos limites mínimo e máximo da produção hídrica.

As variáveis  $a$ ,  $b$  e  $c$  são encontradas através do *Solver* do Excel, usando a formulação expressa em (4.11) e (4.12) para se encontrar o limite máximo da produção hídrica, e usando as expressões (4.11) e (4.13) para se encontrar o respectivo limite mínimo.

As expressões obtidas correspondentes à limitação, máxima e mínima, da produção hídrica em função da energia hídrica armazenada acumulada estão representadas na Figura 4.6.

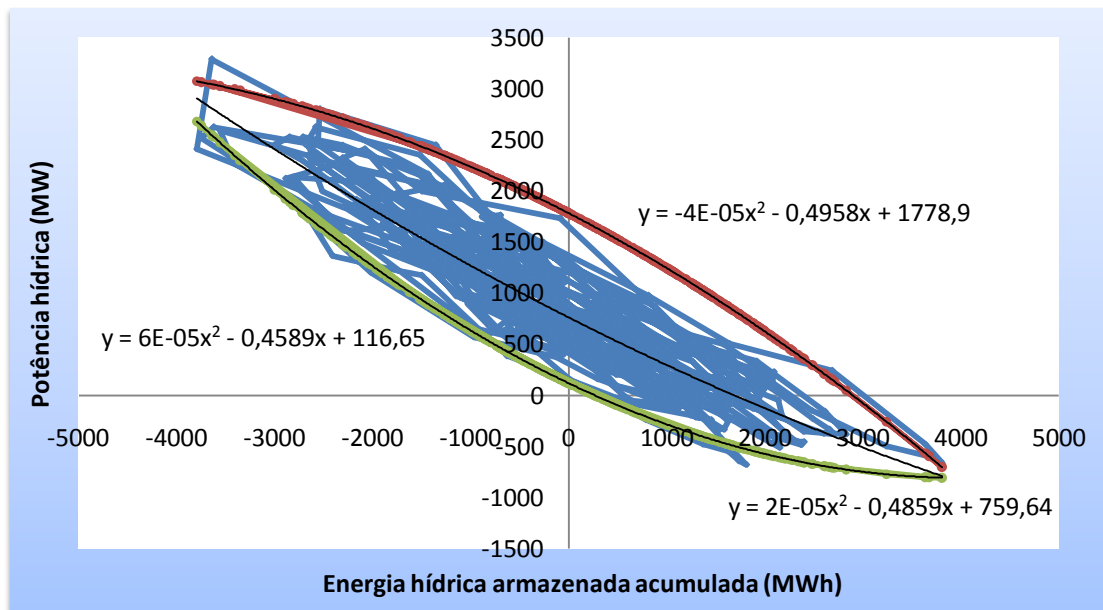


Figura 4.6 - Limites da produção hídrica em função da energia hídrica armazenada acumulada, para o ano de 2009

Acontece que, como decorrer da dissertação, foram sendo publicados os valores de produção hídrica correspondentes a 2010, e verificou-se que esta estava a aumentar significativamente em relação aos valores de 2009, elevando-se os valores de produção hídrica a novos máximos.

Tendo estes factos em consideração, repetiu-se a formulação matemática representada em (4.11), (4.12) e (4.13), agora para valores recolhidos em 2010. As funções que representam os limites de produção hídrica obtidos estão visíveis na Figura 4.7, onde facilmente se observam as diferenças para aquilo que sucedeu em 2009, tendo-se uma produção hídrica substancialmente maior.

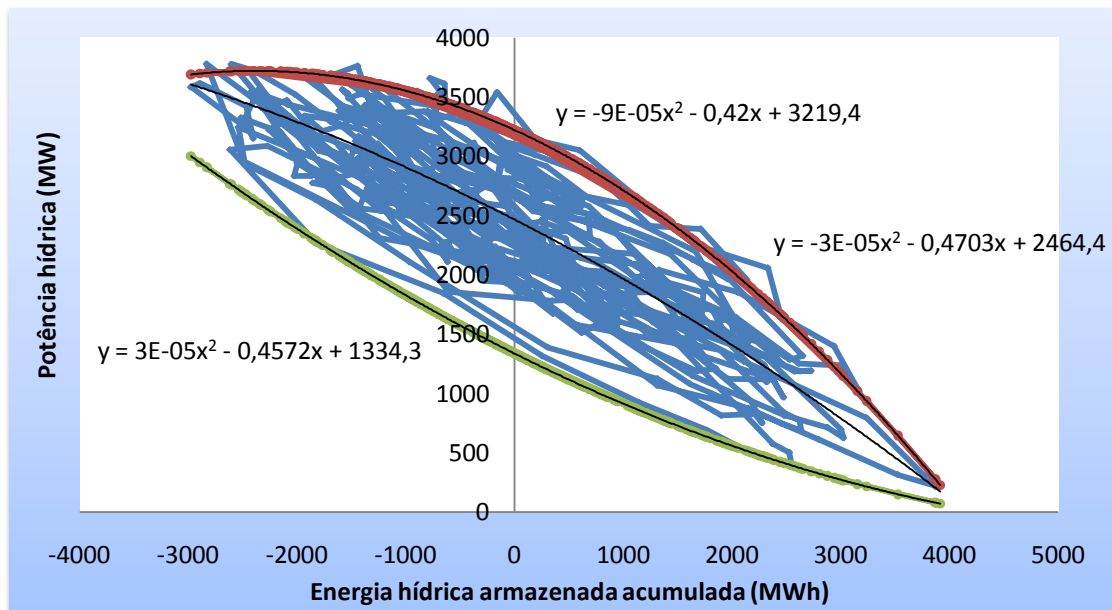


Figura 4.7 - Limites da produção hídrica em função da energia hídrica armazenada acumulada, para o ano de 2010

Através das Figuras 4.6 e 4.7, podemos formular os limites máximos e mínimos da produção hídrica, em função da energia armazenada acumulada.

Como a produção hídrica foi mais baixa em 2009 e tem sido mais elevada em 2010, o limite inferior vai ser retirado da Figura 4.6, e o limite superior retirado da Figura 4.7. Assim, a restrição do problema de despacho económico proposto, relativamente aos limites da produção hídrica para uma determinada energia armazenada, pode-se representar da seguinte forma:

$$6 \times 10^{-5} \cdot E_{h \text{ acumulada}}^2 - 0,4589 \cdot E_{h \text{ acumulada}} + 166,65 < P_h < -9 \times 10^{-5} \cdot E_{h \text{ acumulada}}^2 - 0,42 \cdot E_{h \text{ acumulada}} + 3219,4 \quad (4.14)$$

Observando-se os gráficos das Figuras 4.6 e 4.7, pode-se verificar que, quanto mais negativa for a energia hídrica armazenada acumulada, significa que se está a produzir mais potência hídrica, pelo que se está a gastar a água armazenada. Quando a energia armazenada acumulada vai ficando cada vez maior, isso significa que se está a produzir menos potência hídrica, ou mesmo que se está a recorrer à bombagem, o que faz com que o valor da água armazenada aumente.

#### 4.2.5 - Limites de armazenamento de água

As centrais hídricas apresentam limites quanto à quantidade de água que conseguem armazenar, o que tem impactos na energia acumulada por uma unidade hídrica ao longo do tempo. Através da Figura 4.6 e Figura 4.7 consegue-se observar quais os limites máximos e mínimos de energia armazenada acumulada que se têm verificado nos últimos anos, e a partir desse histórico definiram-se esses limites da seguinte forma, em MW:

$$-3000 < E_{h\text{ acumulada}} < 3000 \quad (4.15)$$

#### 4.2.6 - Limite fixo de descarga

A potência hídrica a ser escalonada, para além de cumprir com os limites máximos e mínimos apresentados anteriormente, tem que ser igual à potência hídrica que se verificou na realidade. Isto é, não se pode gastar mais água que aquela que efectivamente foi gasta, senão corresse o risco de a produção hídrica escalonada ser excessivamente elevada, baixando drasticamente a produção térmica e consequentemente o custo do despacho, o que não corresponderia à realidade. Assim, outra restrição para o problema de despacho económico proposto consiste na igualdade entre a média diária da potência hídrica efectivamente produzida e a média diária da potência hídrica escalonada através da metodologia proposta (4.16).

$$\sum_{i=1}^n P_{h\text{ real}}/n = \sum_{i=1}^n P_h/n \quad (4.16)$$

Em termos reais, é óbvio que quando se faz o despacho não se sabe ao certo qual será a produção hídrica. No entanto, essa suposição é feita no problema proposto, uma vez que as previsões da produção hídrica têm um erro muito reduzido (cerca de 5%), pelo que a aproximação que é feita nesta dissertação não implica um erro significativo.

#### 4.2.7 - Restrição de balanço

Uma condição essencial num problema de despacho económico é que a produção seja igual ao consumo, assim, a restrição de balanço do problema de despacho económico proposto nesta dissertação é a seguinte:

$$\text{Consumo} = P_t + P_h + P_{mh} + P_e + P_s + P_c + \text{importações} - \text{exportações} \quad (4.17)$$

Onde:

*Consumo* é o consumo de potência previsto  
*P<sub>mh</sub>* é a produção prevista proveniente das mini-hídricas  
*P<sub>e</sub>* é a produção prevista proveniente da geração eólica  
*P<sub>s</sub>* é a previsão da produção solar esperada  
*P<sub>c</sub>* é a produção prevista proveniente da cogeração  
*importações* é a previsão das importações realizadas  
*exportações* é a previsão das importações realizadas

No caso da metodologia utilizada as perdas são desprezadas.

### 4.3 - Remuneração dos produtores de energia no mercado de electricidade

No caso da produção a partir de fontes de energia renováveis, existirão sempre desvios entre a previsão e a potência efectivamente produzida. Desta forma, os produtores de energia, em que esta é proveniente de fontes renováveis, têm que considerar o seu rendimento como sendo a combinação entre os ganhos provenientes das trocas no mercado diário, e os custos devidos aos desvios de produção.

A formulação proposta para a remuneração dos participantes no mercado de electricidade, que propõem uma determinada potência  $\hat{P}$  e que produzem na realidade  $P_{real}$ , que se adoptou nesta dissertação está representada em (4.18).

$$I = p_{spot}\hat{P} + \begin{cases} p^d d & , d \geq 0 \\ p^s d & , d < 0 \end{cases} \quad (4.18)$$

Onde:

$d = (P_{real} - \hat{P})$  é o desvio da produção proposta;  
 $p^d$  é o preço de reserva para descer a produção;  
 $p^s$  é o preço de reserva para subir a produção.

Com esta formulação, se os produtores de energia proveniente de fontes de energia renováveis produzirem mais do que tinham previsto são compensados com o preço de reserva para baixar a produção. Se produzirem menos do que tinham previsto são penalizados com o preço de reserva para subir a produção.

No caso dos produtores térmicos, os seus desvios de produção não são por culpa própria, mas têm que contar com as implicações que os desvios das produções das energias de origem renovável possam ter no custo de despacho, devido às correcções que estes terão então que fazer, em tempo real, para compensar os desvios causados por esse tipo de produção. Assim, para os produtores térmicos, o custo total de despacho  $F_{custo_{total}}(P_t)$  consiste na soma entre o custo do despacho proposto no mercado diário  $F_{custo}(P_t)$  e os custos de despacho adicionais por desvios de produção térmica em relação ao despacho realizado com a previsão perfeita, causados pela intermitência da produção renovável.

$$F_{custo_{total}}(P_t) = F_{custo}(P_t) + \begin{cases} p^s g & , g \geq 0 \\ p^d g & , g < 0 \end{cases} \quad (4.19)$$

Onde:

$g = (P_{real} - \hat{P})$  é o desvio da produção proposta.

Com esta formulação, se os produtores de energia térmica tiverem que produzir mais do que tinham previsto são penalizados com um custo de despacho adicional proporcional ao preço de reserva para subir a produção. Se tiverem que produzirem menos do que tinham previsto são compensados com o preço de reserva para baixar a produção, permitindo uma diminuição do custo de despacho.

Quando são considerados os mercados de electricidade, a melhor previsão nem sempre é aquela que se aproxima mais dos valores reais, mas sim, aquela que permite aos produtores obterem a maior remuneração possível [43].

Assim, os produtores de energia intermitente, como eólica e solar, poderão multiplicar as suas previsões por um factor de optimização  $\delta$ , tendo em consideração os preços da reserva, de forma a conseguirem aumentar a sua remuneração.

A previsão optimizada da potência produzida  $P_{optimizada}$ , para permitir uma maior remuneração, pode ser obtida através da seguinte equação:

$$P_{optimizada} = \delta \times \hat{P} \quad (4.20)$$

Este factor de optimização pode ser determinado através da maximização da equação (4.18), substituindo  $\hat{P}$  por  $P_{optimizada}$ .

Para se poder quantificar as perdas, devido aos desequilíbrios criados pelas previsões reais relativamente a uma hipotética previsão perfeita, definiu-se um lucro relativo, que está definido em (4.21).

$$I_{relativo} = 1 - \frac{I_{previsão\ real}}{I_{previsão\ perfeita}} \quad (4.21)$$

Neste trabalho de dissertação, fizeram-se algumas simplificações relativamente ao funcionamento do mercado de electricidade, entre elas considerou-se que todos os produtores de energia participam no mercado de electricidade sob as mesmas regras, ou seja, estes propõem as suas ofertas ao mercado diário no dia anterior e são responsáveis pelos desvios de produção relativos ao que propuseram previamente ao mercado. Os custos necessários para equilibrar a produção e o consumo são cobrados aos participantes do mercado, proporcionalmente aos seus desvios. Não é considerado o mercado intra-diário, nem os contratos bilaterais.



# Capítulo 5

## Resultados

### 5.1 - Despacho económico obtido através do GraSO

Para se testar a eficácia das alterações efectuadas no algoritmo GraSO e a metodologia proposta nos Capítulos 3 e 4, realizou-se o despacho económico, com coordenação hidro-térmica, para os últimos cinco dias de Abril de 2010.

Este teste foi realizado supondo-se a existência de previsões perfeitas tanto das PRE (térmica, hídrica, eólica e fotovoltaica), como do consumo, importações e exportações. O caso estudado nesta dissertação é um caso real, em que todos os valores utilizados são reais, e o despacho obtido é comparado com o despacho real que foi realizado para o mesmo período de tempo.

É também de referir que o despacho realizado é para um horizonte temporal de vinte e quatro horas, ou seja, o escalonamento do despacho tem início na hora zero e é realizado para as vinte e quatro horas seguintes. Pelo que o despacho é escalonado para blocos de vinte e quatro horas, no entanto, o despacho seguinte está dependente e é influenciado pelo despacho que se realizou nas vinte e quatro horas anteriores.

Na Figura 5.1 está representado o despacho térmico obtido através do GraSO para o dia 26 de Abril de 2010, juntamente com o despacho real que se realizou nesse mesmo dia.

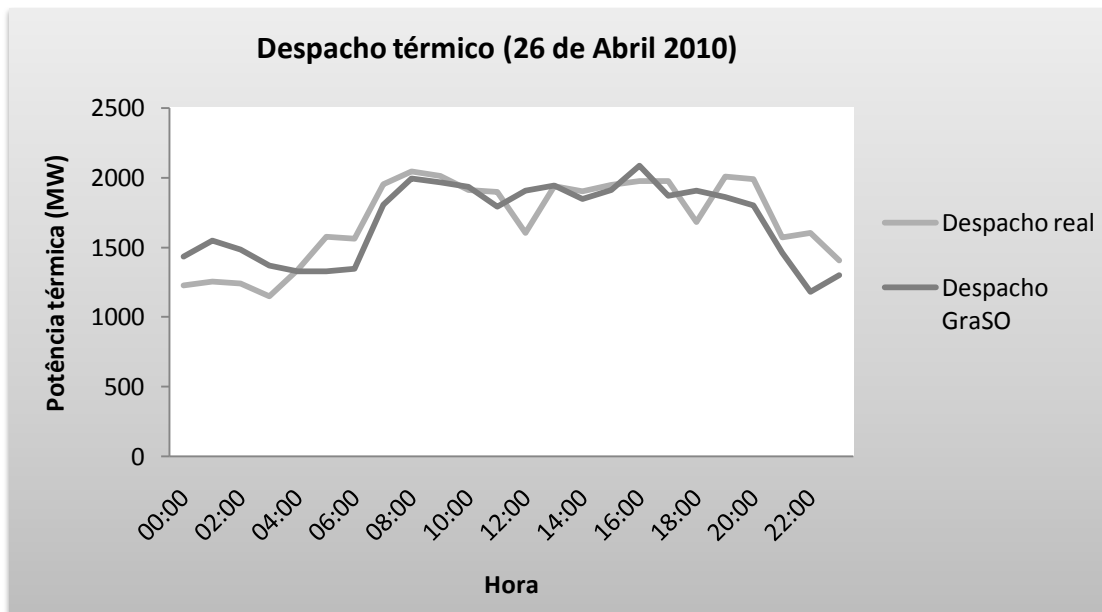


Figura 5.1 - Comparação entre o despacho térmico obtido pelo GraSO e o real, para o dia 26 de Abril de 2010

Como se pode observar pela Figura 5.1, o despacho obtido pelo GraSO apresenta uma estratégia diferente daquela que foi utilizada na realidade, sendo, no entanto, bastante similar em algumas horas do dia.

O despacho hídrico é complementar do despacho térmico, para que a restrição de balanço entre o consumo e a produção seja cumprida. A Figura 5.2 mostra o despacho hídrico obtido pelo GraSO em comparação com aquele que foi efectivamente escalonado para o dia 26 de Abril de 2010, onde se observa claras semelhanças de estratégia.

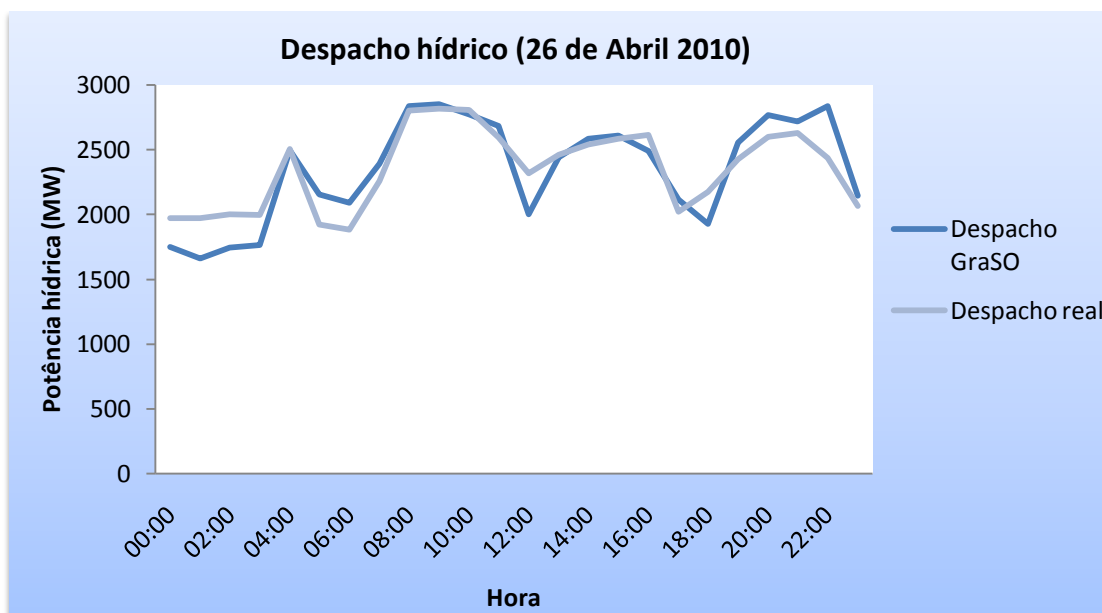


Figura 5.2 - Comparação entre o despacho hídrico obtido pelo GraSO e o real, para o dia 26 de Abril de 2010

Contudo, houve dias em que a estratégia de despacho obtida através do GraSO foi totalmente diferente da que se verificou na realidade, como no dia 28 de Abril (Figura 5.3).

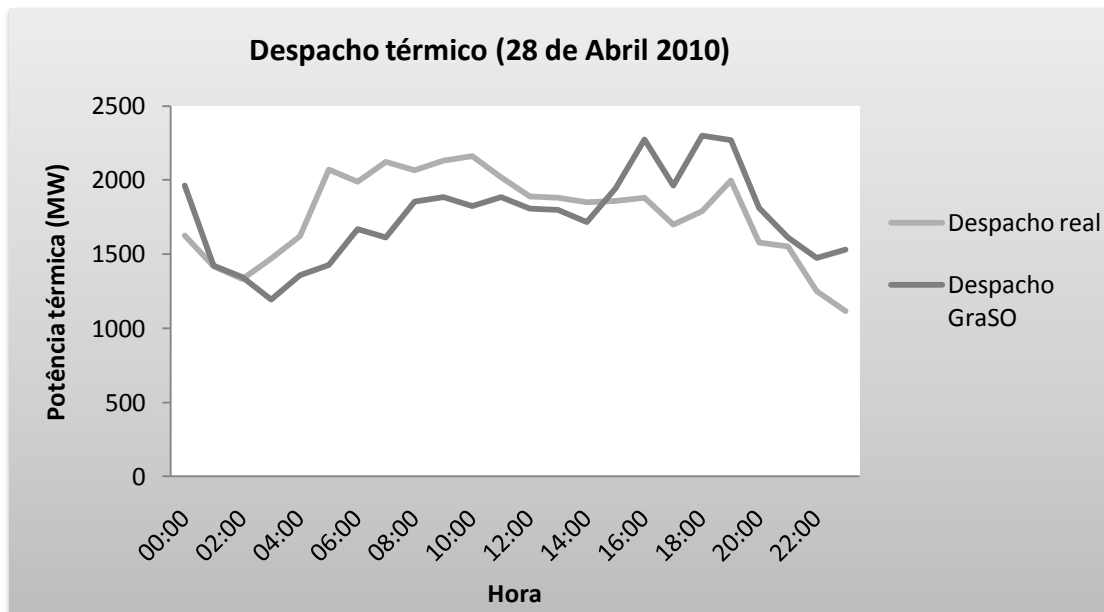


Figura 5.3 - Comparação entre o despacho térmico obtido pelo GraSO e o real, para o dia 28 de Abril de 2010

O despacho hídrico realizado em coordenação com o despacho térmico representado na Figura 5.3 pode ser observado na Figura 5.4.

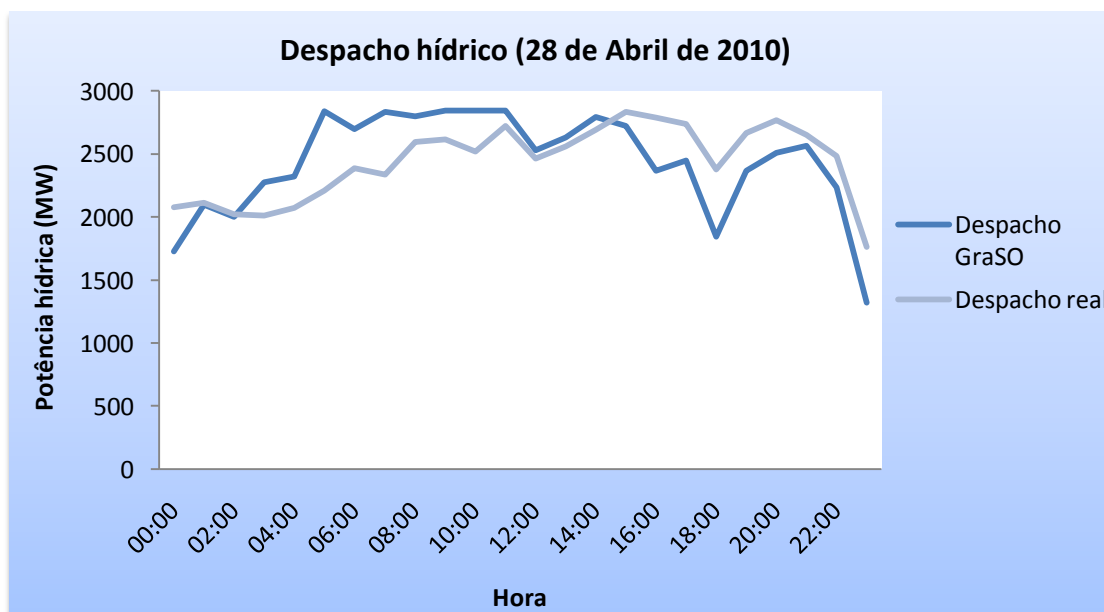


Figura 5.4 - Comparação entre o despacho hídrico obtido pelo GraSO e o real, para o dia 28 de Abril de 2010

Nestes dois dias, em que a estratégia de despacho adoptada é bastante aproximada da real, vê-se que houve horas em que a produção térmica foi claramente superior à efectivamente verificada, contrastando com outras em que a produção é significativamente

inferior. Isto demonstra que o GraSO, mesmo limitado na sua movimentação em busca de uma solução óptima, devido às diversas restrições do problema de optimização, conseguiu realizar uma estratégia de despacho diferente da que foi efectuada na realidade. De salientar que, mesmo nestas situações, a produção térmica total ao longo do dia é a mesma, apenas existindo estratégias distintas.

Na Figura 5.5 pode-se observar o despacho obtido para os cinco dias testados, onde é visível que este é muito semelhante, por um período de várias horas, ao despacho que foi escalonado na realidade. Esta situação pode-se dever ao facto de os limites estratégicos de despacho mapeados no Capítulo 4, apesar de permitirem uma estratégia diferente, tendo em consideração o elevado número de restrições, a gama de soluções óptimas possíveis para o problema de despacho proposto é muito estreita, não permitindo que o despacho obtido através do GraSO varie significativamente em relação ao que foi realizado na realidade.

Através da Figura 5.5 e 5.6 vê-se que o GraSO, através das modificações efectuadas, conseguiu realizar a optimização do problema de despacho económico proposto, cumprindo todas as restrições. É possível observar-se a coordenação entre a produção térmica e a produção hídrica, onde se verifica que a produção hídrica tem um custo de oportunidade que está associado à produção térmica. Na Figura 5.6, quando há um aumento da produção hídrica, observa-se na Figura 5.5 uma diminuição da produção térmica, o que fará com que o custo do despacho diminua. No entanto, após esse aumento de produção hídrica verifica-se para as horas seguintes uma diminuição dessa mesma produção, e o conseqüente aumento da produção térmica, o que implicará um aumento dos custos. Estes factos devem-se à quantidade de água que é possível armazenar, que é limitada, pelo que existe uma gestão da água que é utilizada para que não se esgote de imediato toda a água armazenada, o que teria como consequência um aumento dos custos de despacho no futuro, pelo que a alocação da potência hídrica tem que ter em atenção um horizonte temporal a longo-prazo.

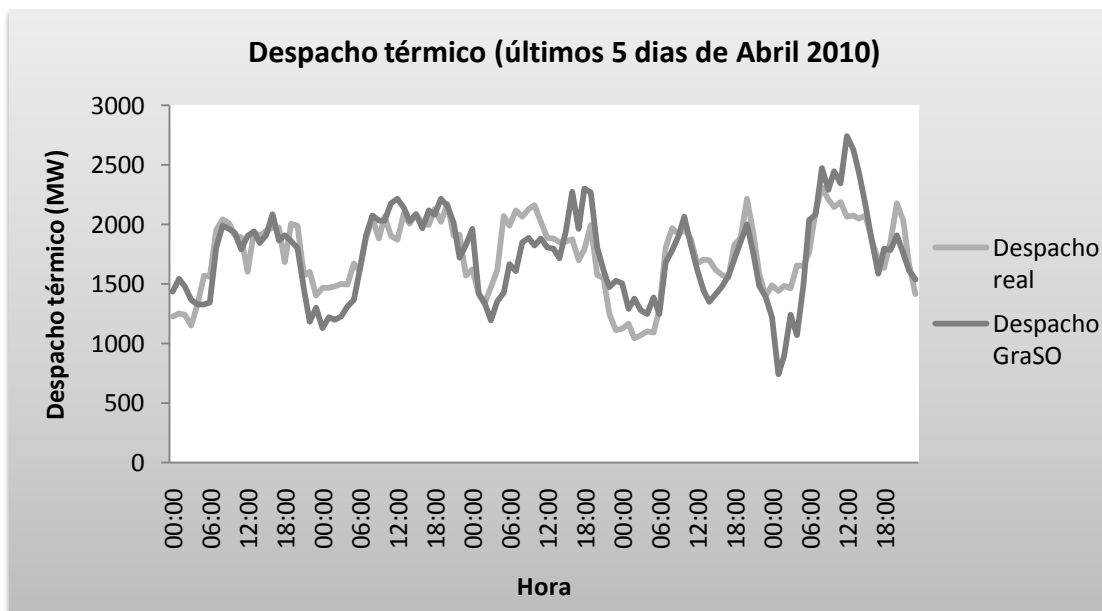


Figura 5.5 - Comparação entre o despacho térmico obtido pelo GraSO e o real, para os últimos 5 dias de Abril de 2010

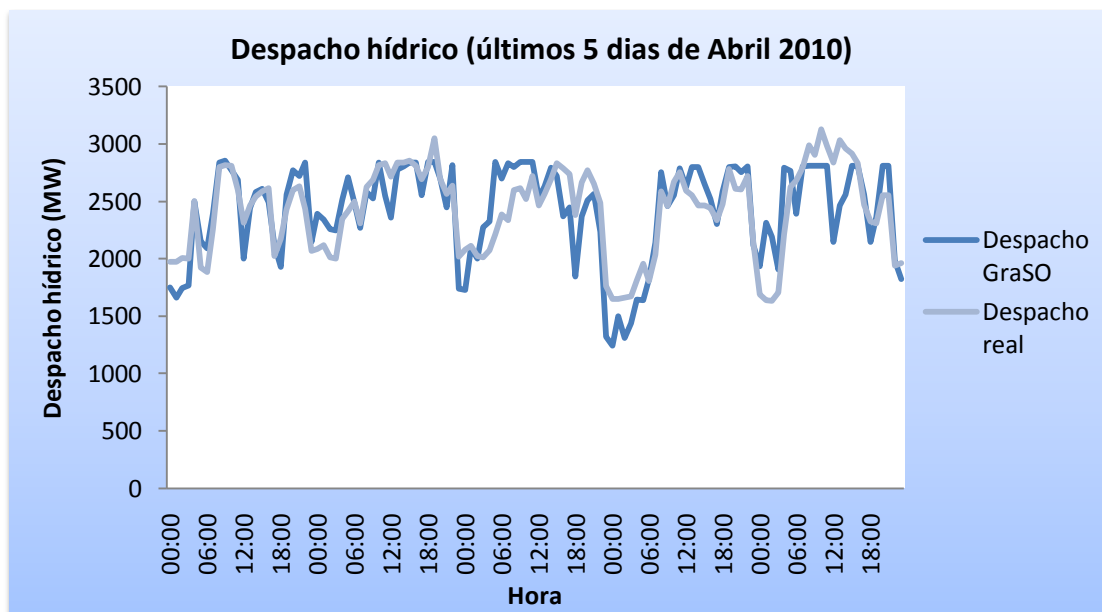


Figura 5.6 - Comparação entre o despacho hídrico obtido pelo GraSO e o real, para os últimos 5 dias de Abril de 2010

Na Figura 5.7 pode-se observar o armazenamento acumulado de água que se obteve com o despacho escalonado pelo GraSO. Quando se aumenta a potência hídrica a energia armazenada acumulada começa a diminuir, quando a produção diminui, isso permite que o valor de água armazenada volte a aumentar. É possível verificar que existem horas em que o GraSO armazenou mais energia hídrica que no despacho real, o que permitiu algumas horas mais à frente turbinar uma maior quantidade de água do que a que se turbinou na realidade. No entanto, também se pode observar que houve horas em que a água armazenada foi menor, o que implicou que posteriormente não fosse possível produzir tanta potência hídrica como a que se verificou na realidade.

Em termos globais, a energia hídrica armazenada foi superior à energia hídrica real armazenada, contudo, a produção hídrica realizada foi ligeiramente inferior à real, pelo que se justifica esse armazenamento acumulado superior. O importante a retirar da Figura 5.7 é que o GraSO nem acumulou demasiada água, nem gastou demasiada água, quando comparando com a energia armazenada real, fazendo assim uma boa gestão da água disponível.

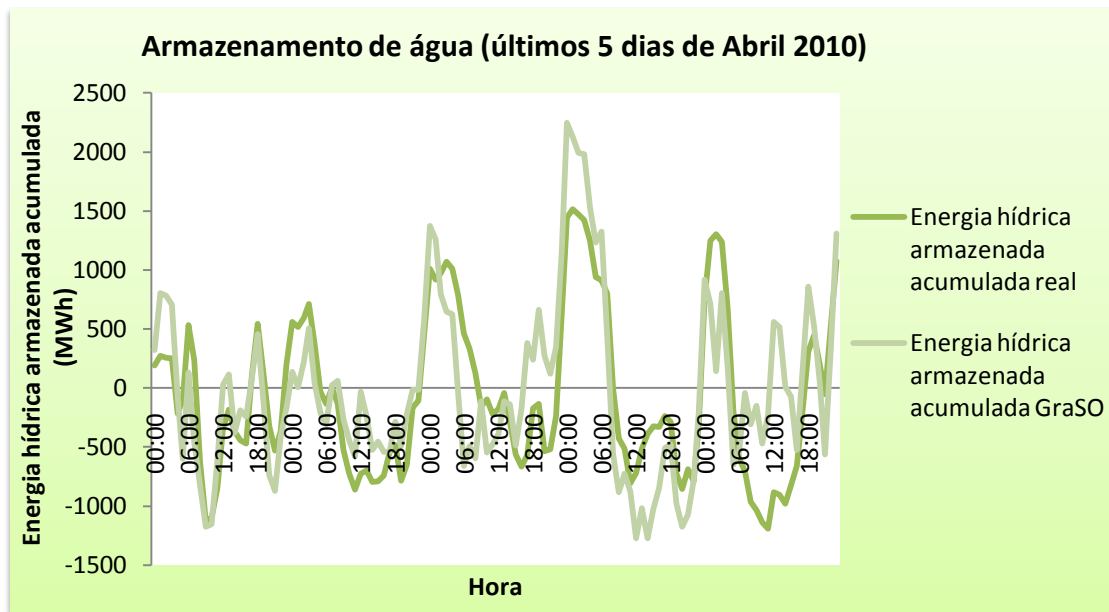


Figura 5.7 - Comparação entre a energia hídrica armazenada acumulada obtida pelo GraSO e a real, para os últimos 5 dias de Abril de 2010

No que se refere à minimização do custo de despacho, que é o objectivo de um problema optimização de despacho económico, a Tabela 5.1 mostra uma comparação entre os custos obtidos pelo GraSO, através da formulação proposta no Capítulo 4, e os custos do despacho económico real. Uma vez que o caso em estudo se trata de um caso real, esta comparação é importante para aferir da validade da utilização do algoritmo de optimização GraSO para a resolução de problemas de despacho económico.

Tabela 5.1 - Comparação entre o custo de despacho real e o obtido através do GraSO

Potência hídrica média (MW)		Custo de despacho (€/MWh)		Dia
Real	GraSO	Real	GraSO	Abril 2010
2351,32	2350,55	31,77	31,69	26
2552,43	2553,31	32,55	32,47	27
2436,41	2435,94	32,13	32,03	28
2287,14	2285,17	31,20	31,10	29
2486,70	2484,47	32,61	32,57	30

Na Tabela 5.1 é possível observar que o custo do despacho obtido através da metodologia apresentada nesta dissertação é consistentemente inferior ao custo do despacho que foi realizado na realidade, para todos os cinco dias testados. Esta situação verifica-se mesmo quando a potência hídrica produzida é inferior à real, o que demonstra que a estratégia de despacho adoptada pelo GraSO permite obter custos inferiores, mesmo utilizando maior potência térmica que a que foi utilizada no despacho real. Conseguindo-se assim, através do mapeamento dos limites de estratégia utilizados nos últimos anos, uma estratégia diferente,

estabelecida pelo GraSO, que permite uma melhor optimização do despacho, isto para o caso real que aqui se estudou.

Contudo, o custo obtido nunca é muito inferior ao custo do despacho real, como se pode verificar na Figura 5.8, mesmo utilizando uma estratégia de despacho distinta. O que provoca esta situação é o facto de a curva dos custos da produção térmica, representada na Figura 4.1, ter uma curvatura pouco acentuada, sendo quase linear, o que faz com que, produzindo-se a mesma potência térmica que a que foi produzida na realidade, que é uma das restrições implícitas na formulação adoptada, a curva não permite grandes variações no custo do despacho.

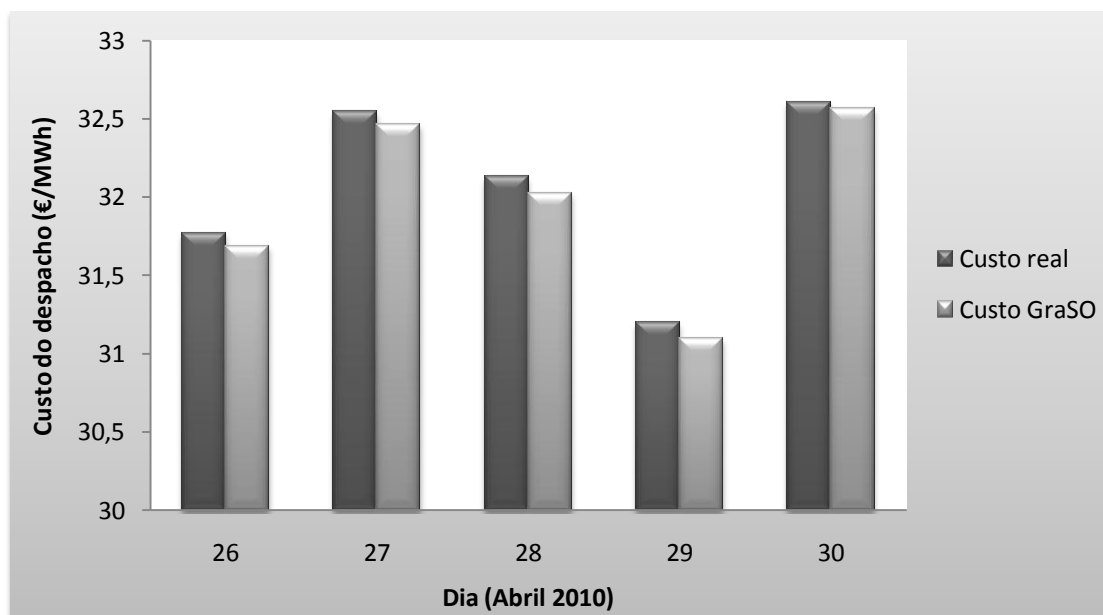


Figura 5.8 - Comparação entre a o custo do despacho obtido pelo GraSO e o real, para os últimos 5 dias de Abril de 2010

Contudo, fica demonstrado por estes resultados, que a modelização de restrições no GraSO, realizada nesta dissertação, que é baseada em métodos de penalidades, foi eficiente no cumprimento das restrições estabelecidas, permitindo a optimização de um problema real de despacho económico.

## 5.2 - Cenários de previsão

Neste trabalho de dissertação realizou-se a optimização do despacho económico para um horizonte temporal de vinte e quatro horas, através do GraSO, para três casos de previsões distintas, para desta forma se poder aferir do impacto que a previsão das PRE tem no custo final do despacho.

### 5.2.1 - Previsão perfeita

No primeiro caso, assume-se que a previsão é perfeita, isto é, os valores reais são utilizados como previsão, pelo que não existem erros de previsão. Desta forma, a produção irá sempre ao encontro das necessidades dos consumidores, não havendo portanto, desvios das ofertas que foram feitas ao mercado diário. Este é um cenário é hipotético, pois tal nunca poderia acontecer, no entanto, é um cenário importante para se poder perceber as diferenças entre cenários reais e um cenário óptimo, como é este da previsão perfeita.

### 5.2.2 - Previsão real

Outro caso estudado é a resolução do problema de despacho económico utilizando uma previsão real, obtida através de um método de previsão simples. Neste caso são usadas as previsões para a PRE hídrica, a PRE eólica e a PRE fotovoltaica, cedidas gentilmente pela empresa SmartWatt.

Quanto à PRE térmica e ao consumo, uma vez que o erro de previsão destas é bastante reduzido, são considerados os valores reais, sem risco de se estar a introduzir um erro significativo. Também se assume que as importações e as exportações são conhecidas. O objectivo de estudo deste cenário de previsão consiste em se observar o comportamento do despacho escalonado num cenário mais realista, em que a intermitência das PRE já é tida em consideração.

### 5.2.3 - Sem previsão

No último caso, não se considera qualquer previsão, apenas se utiliza o diagrama (consumo-PRE) médio diário. Ou seja, assume-se que a produção de cada uma das PRE será igual à média produzida por estas nas 24 horas anteriores, um método de previsão que se denomina por método da persistência. Este tipo de previsão tem habitualmente uma performance mais fraca que modelos de previsão mais avançados, mesmo para previsões a curto-prazo, em especial se as variações de produção forem mais acentuadas.

Na Figura 5.9 estão representadas a previsão perfeita, ou seja, os valores que efectivamente se verificaram na realidade, a previsão real e a persistência para a produção eólica, num período de 48 horas. Como se pode observar, a previsão real é quase sempre mais próxima da previsão perfeita que a persistência, havendo, no entanto, algumas horas em que o contrário se verifica.

Estas diferenças, que se observam na Figura 5.9, entre os três cenários de previsão terão impactos diferentes no escalonamento do despacho realizado, e são esses impactos que se pretendeu observar e analisar.



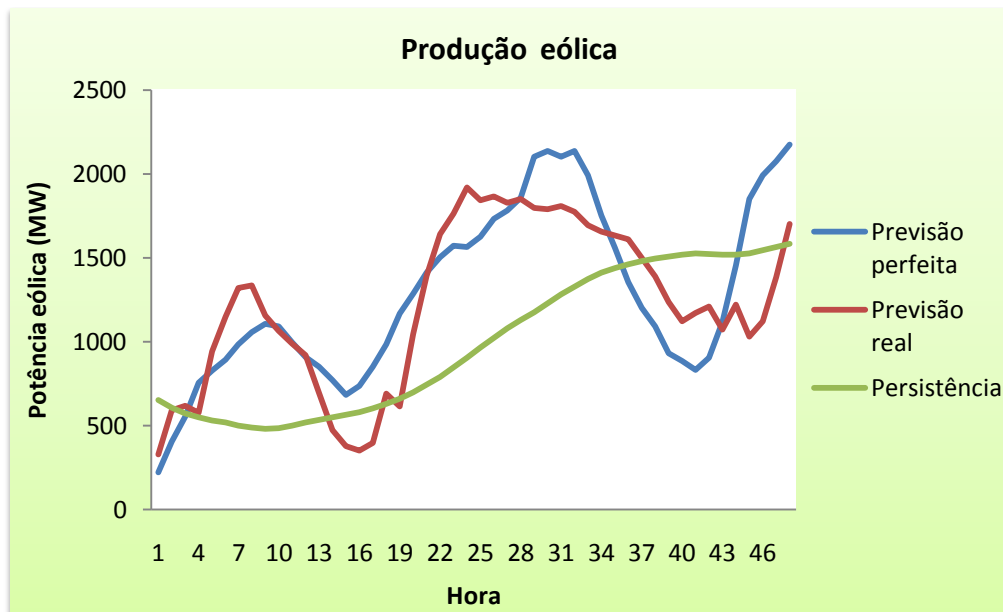


Figura 5.9 - Comparação entre a previsão perfeita, a previsão real e a persistência da produção eólica, para um período de 48 horas

### 5.3 - Impacto da previsão no despacho económico

Para se observar qual o impacto que a previsão da produção proveniente das energias renováveis tem no custo de despacho, foi realizado o despacho, para períodos de vinte e quatro horas com início na hora zero, para o mês de Abril de 2010, para os casos de estudo estabelecidos no subcapítulo 5.2. Os resultados apresentados são para um caso real, para o mês de Abril de 2010, onde as produções e preços de mercado são os que de facto de verificaram na realidade.

Os custos de despacho obtidos, para os diferentes cenários de previsão, estão indicados na Tabela 5.2. Estes custos representam os custos de despacho da produção que foi proposta durante o mercado diário.

Tabela 5.2 - Comparação entre os custos de despacho para os diferentes cenários de previsão

Custo de despacho (€/MWh)	Cenário de previsão
35,69	Previsão Perfeita
35,64	Previsão Real
35,81	Persistência

Na Figura 5.10 está representada a evolução do custo de despacho para os três cenários de previsão, para todo o mês de Abril de 2010.

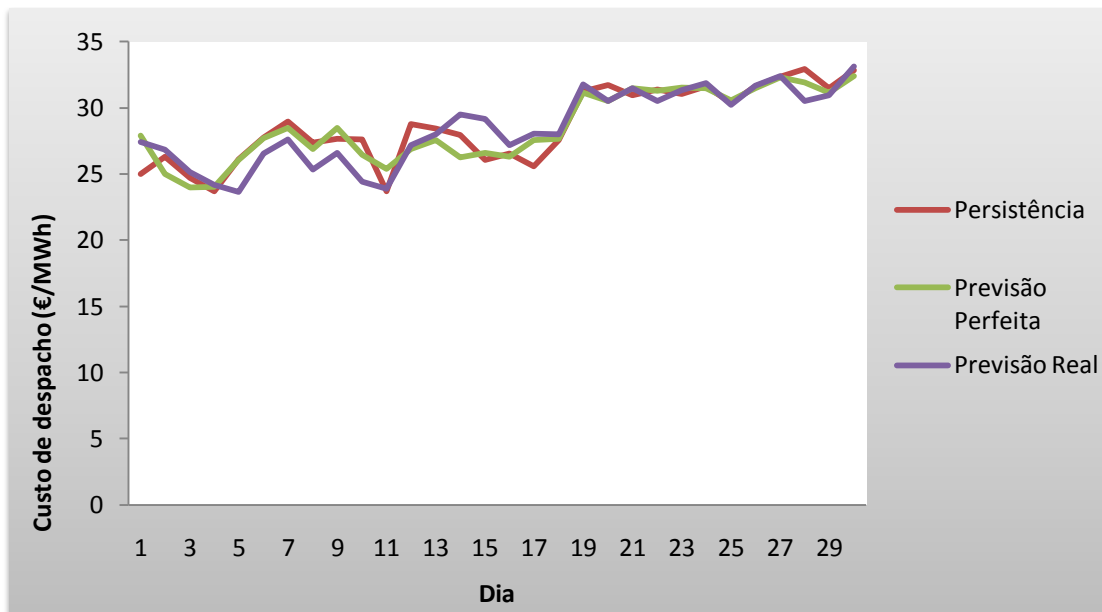


Figura 5.10 - Evolução do custo de despacho para os diferentes cenários de previsão, ao longo do mês de Abril de 2010

Na Figura 5.10 é possível observa-se que nos primeiros 15 dias de despacho o custo é bastante diferente para as diferentes previsões, o que se fica a dever ao facto de nestes dias a produção renovável, que consiste na soma da produção mini-hídrica, eólica e fotovoltaica, ter sido bastante elevada, pelo que diferentes previsões implicam maiores diferenças nos custos. Nos últimos 15 dias, como a produção renovável é mais residual, a previsão desta já não tem um impacto tão grande no custo de despacho, pelo que os custos são mais aproximados.

Através da Tabela 5.2 e da Figura 5.10 observa-se que o custo de despacho obtido num cenário de previsão real é inferior ao custo de despacho num cenário de previsão perfeita. Esta situação acontece uma vez que a previsão real ficou normalmente, durante o mês de Abril de 2010, acima dos valores de produção renovável que efectivamente se vieram a verificar, como mostra a Figura 5.11. A produção renovável corresponde à soma da produção eólica, fotovoltaica e mini-hídrica. Isto implica que, o despacho, no caso da previsão real, foi realizado esperando-se uma maior produção renovável, pelo que a produção térmica escalonada foi inferior à verificada no cenário de previsão perfeita, resultando assim também num custo de despacho inferior.

O contrário acontece com um cenário de persistência, onde o custo de despacho é superior ao cenário de previsão perfeita, uma vez que a produção renovável é inferior à produção renovável num cenário de previsão perfeita, o que implica uma maior utilização das centrais térmicas, tendo como consequência um custo de despacho superior.

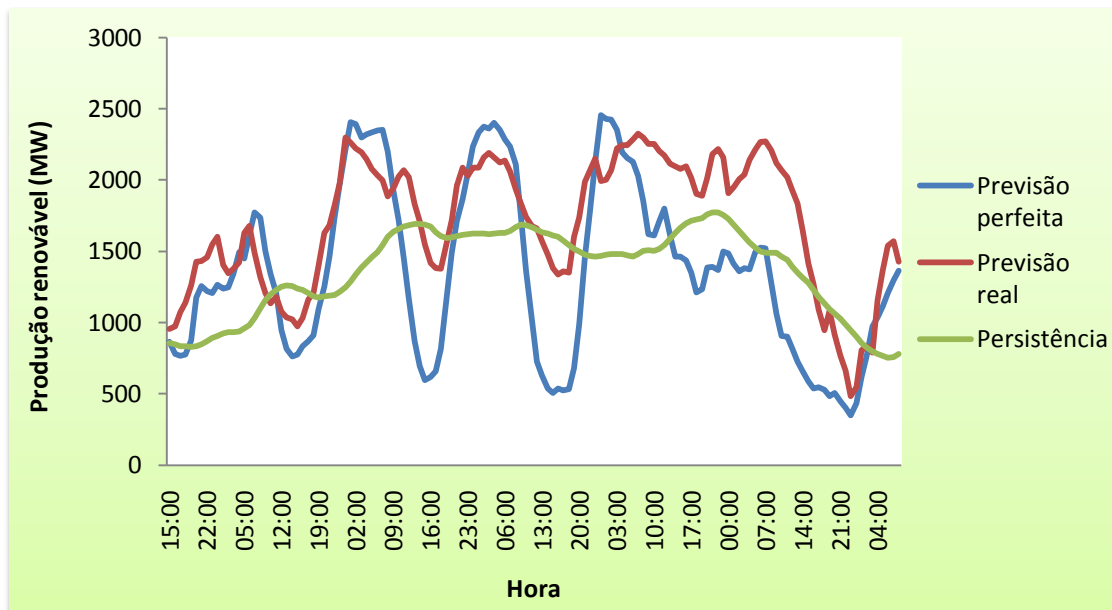


Figura 5.11 - Comparação entre a produção renovável obtida através dos diferentes cenários de previsão, durante alguns dias do mês de Abril de 2010

Contudo, com a realização do despacho no dia anterior num cenário de previsão real e de persistência, a produção depois não vai de encontro com as necessidades dos consumidores em tempo real, ao contrário do que sucede num cenário de previsão perfeita. Esta situação faz com que nos cenários de previsão real e de persistência existam desvios em relação ao despacho óptimo que se realizou com previsão perfeita. Esses desvios terão que ser corrigidos em tempo real, com um tempo de actuação muito curto, o que fará com que o custo de despacho aumente nesses cenários de previsão.

Efectivamente, um custo de despacho inferior no mercado diário, que é indicado no dia anterior, não implica que o custo real do despacho, realizado no dia seguinte, mantenha o mesmo custo, uma vez que desvios de produção implicarão um aumento de produção que não estava programado no despacho realizado no dia anterior. Este aumento de produção traz custos de despacho superiores, fazendo com que o custo do despacho obtido no dia anterior e proposto ao mercado diário suba significativamente.

Como tal, o custo do despacho total obtido pelos produtores térmicos consiste na soma entre o custo do despacho programado e proposto no mercado diário e o custo de despacho adicional por desvios de produção térmica em relação ao despacho realizado com a previsão perfeita, causadas pela intermitência da produção renovável, como está indicado na equação (4.19).

O preço de reserva para baixar a produção não é o mesmo que o preço de reserva para subir a produção. Na Tabela 5.3 é apresentada a média do preço de reserva para subir e para baixar a produção, e a média do preço do mercado diário, no mercado Português para o mês de Abril de 2010, onde se pode observar que o preço de reserva para subir a produção é 27% superior ao preço do mercado diário, e o preço de reserva para baixar a produção é inferior 68% ao preço estabelecido no mercado diário.

Tabela 5.3 - Média do preço de mercado, preço da reserva para elevar a produção e preço de reserva para reduzir a produção, no mercado Português em Abril de 2010

Data	Preço médio do mercado diário (€/MWh)	Preço da reserva médio para aumentar a produção (€/MWh)	Preço da reserva médio para diminuir a produção (€/MWh)
Abril 2010	25,90	35,57	8,35

A Figura 5.12 mostra a evolução do preço do mercado diário e de reserva durante um período do mês de Abril de 2010, onde se observa que, consistentemente, o preço de reserva para subir a produção é superior ao preço do mercado diário, ao invés do preço de reserva para baixar a produção que é inferior.

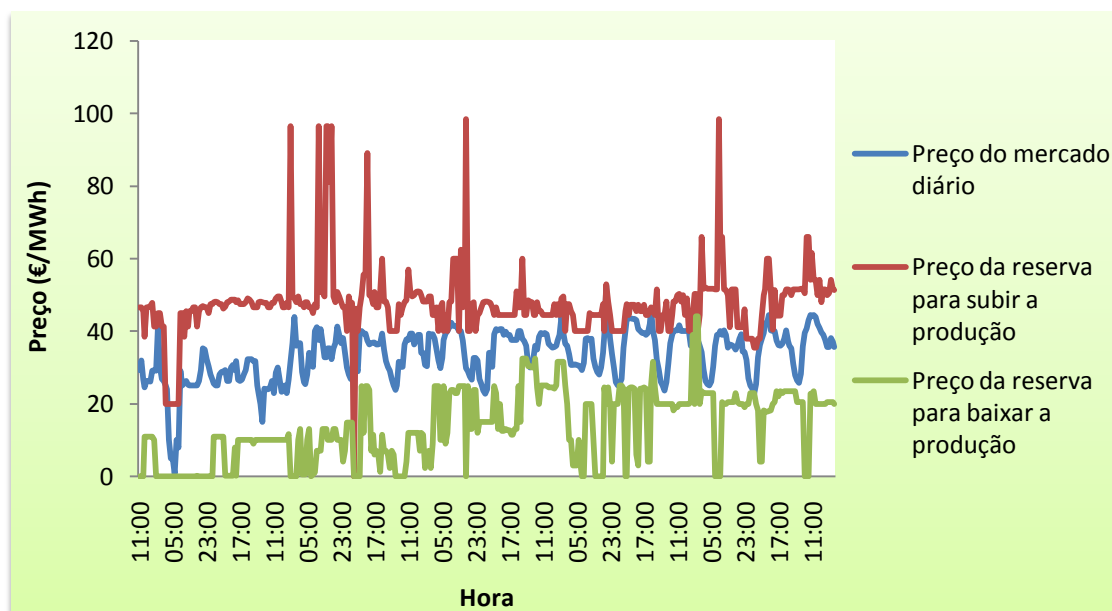


Figura 5.12 - Evolução do preço do mercado diário e da reserva ao longo de um período do mês de Abril de 2010

Como umas das suposições que é feita nesta dissertação é a de que o custo de operação das centrais térmicas é igual ao custo de mercado, observando-se a Tabela 5.3 e a Figura 5.12, é possível verificar que o despacho realizado em tempo real para suprir os desvios de produção, que corresponde ao mercado de reserva, implicará custos de despacho superiores em relação ao custo do despacho que é realizado no dia anterior no mercado diário.

Na Tabela 5.4 está representado o custo do despacho total obtido pelos produtores de energia térmica, no mês de Abril de 2010, para os três cenários de previsão propostos nesta dissertação, utilizando-se a equação (4.19).

Tabela 5.4 - Comparação do custo de despacho total dos produtores de energia térmica para os diferentes cenários de previsão

Custo de despacho no mercado diário (M€)	Custo de despacho no mercado de reserva (M€)	Custo de despacho total (M€)	Cenário de previsão
23,507	0	23,507	Previsão perfeita
23,287	3,3830	26,670	Previsão real
23,972	3,6815	27,654	Persistência

Na Figura 5.13 está representada a evolução do custo total de despacho para os diferentes cenários de previsão, para uma amostra do mês de Abril de 2010. É possível verificar-se que em algumas horas a persistência apresenta um custo mais próximo da previsão perfeita que o custo obtido com a previsão real, isto também se fica a dever ao facto de o modelo de previsão utilizado para a obtenção da previsão real ser relativamente simples, não permitindo ganhos muito elevados em relação à persistência. No entanto, no geral, o custo de despacho da previsão perfeita é inferior ao da previsão real, e este é inferior ao da persistência.

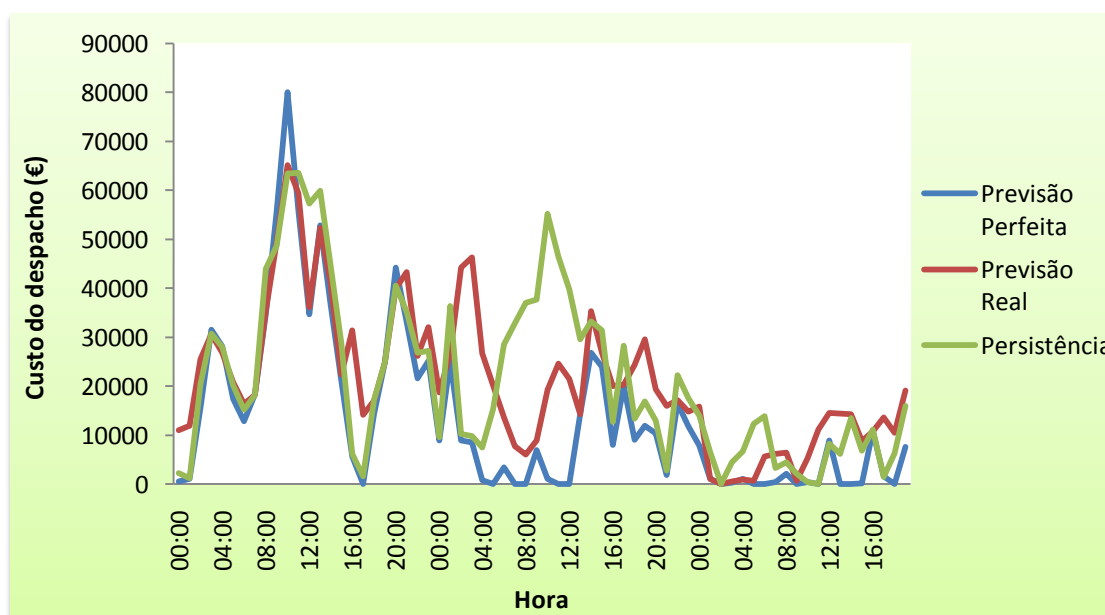


Figura 5.13 - Custo do despacho total para os três cenários de previsão, para alguns dias do mês de Abril de 2010

Como se pode observar na Tabela 5.4, apesar de com previsão perfeita se obter um custo de despacho no mercado diário superior ao obtido com a previsão real, o custo de despacho total é inferior, uma vez que, como não existem desvios de produção, não é necessário modificar o despacho realizado no dia anterior, fazendo com que os custos se mantenham iguais.

No caso do cenário de previsão real, os desvios causados pelos erros de previsão implicam uma modificação no despacho realizado no dia anterior, e estas modificações realizadas em

tempo real têm um custo superior do que se tivessem sido feitas no dia anterior, fazendo com que o custo total de despacho aumente. Assim, resulta que o custo de despacho dos produtores de energia térmica é inferior num cenário em que a previsão da produção eólica, solar e mini-hídrica fosse perfeita, ao invés de se ter uma previsão que, por muito pequeno que seja o erro, terá sempre desvios de produção, o que fará aumentar a produção negociada no mercado de reserva e consequentemente o custo de despacho.

No caso da persistência, como esta é a que apresenta maiores desvios em relação ao despacho realizado com a previsão perfeita, é a que necessita que maiores ajustes de despacho sejam feitos em tempo real, pelo que é o cenário que sai mais penalizado, resultando assim no custo de despacho mais elevado dos três cenários de previsão.

Na Figura 5.14 mostra os diferentes despachos realizados para cada cenário de previsão, obtidos através da otimização do GraSO. Estes são os despachos realizados antes das correcções devidas aos desvios de produção. É possível observar-se os desvios, tanto do despacho obtido com previsão real como com persistência, em relação ao despacho óptimo obtido com a utilização da previsão perfeita.

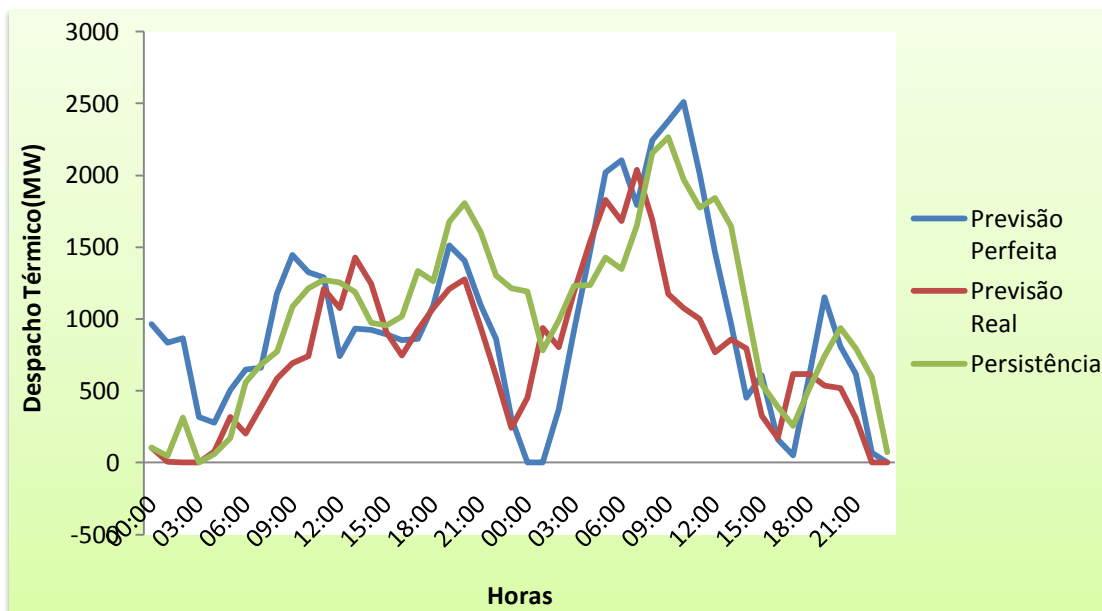


Figura 5.14 - Despacho escalonado para o mercado diário para os três cenários de previsão, para alguns dias do mês de Abril de 2010

Estes resultados demonstram que, a variabilidade da produção eólica, hídrica e fotovoltaica tem influência no despacho realizado, o que terá impacto no custo de despacho. De facto, o custo de despacho obtido com a utilização de uma previsão obtida através de métodos de previsão, mesmo que simples, é inferior ao obtido com a persistência. O custo de despacho mínimo possível, que é o que é obtido com uma previsão perfeita, é elevado em cerca de 15% usando a persistência, enquanto utilizando uma previsão real o custo de despacho é elevado em apenas 12%. Estes resultados podiam ser significativamente melhorados se a previsão real utilizada nesta dissertação tivesse sido obtida através de métodos de previsão mais avançados.

## 5.4 - Impacto da previsão na remuneração dos produtores eólicos

A produção eólica é, de entre as produções renováveis, aquela que apresenta uma maior crescimento, maior variação e a de mais difícil previsão, mesmo com técnicas de previsão a curto-prazo, como sendo o método de análise de sequência do tempo, o método das redes neurais, e o método da previsão numérica do tempo climático, que apresentam erros entre os 15 e os 30% [58]. Desta forma, os desvios de produção eólica são mais acentuados, pelo que a participação desta nos mercados de electricidade é a que apresenta um maior impacto. Para além disso, a sua produção é superior à produção fotovoltaica e à proveniente das mini-hídricas, pelo que apenas se considera nesta dissertação o impacto da previsão na remuneração dos produtores eólicos, visto que para os restantes produtores de energias renováveis o impacto da previsão é bastante mais reduzido.

Através da Tabela 5.3 e da Figura 5.12, apresentada anteriormente, é possível verificar-se que o preço de reserva para baixar a produção é muito inferior ao preço de reserva para subir a produção. Assim, a penalização que os produtores eólicos têm que pagar por terem produzido menos do que aquilo que tinham proposto ao mercado é bastante superior à compensação que recebem por produzirem mais do que o que propuseram no mercado diário. E tendo em consideração que os preços para subir a produção, que penalizam os produtores, são superiores ao preço do mercado diário, e os preços de baixar a produção, que compensam os produtores, são inferiores ao preço do mercado diário, os desvios de produção são de evitar ao máximo.

Na Figura 5.15 pode-se observar os desvios de produção dos diferentes cenários de previsão em relação à produção eólica que efectivamente se verificou durante um período do mês de Abril de 2010.

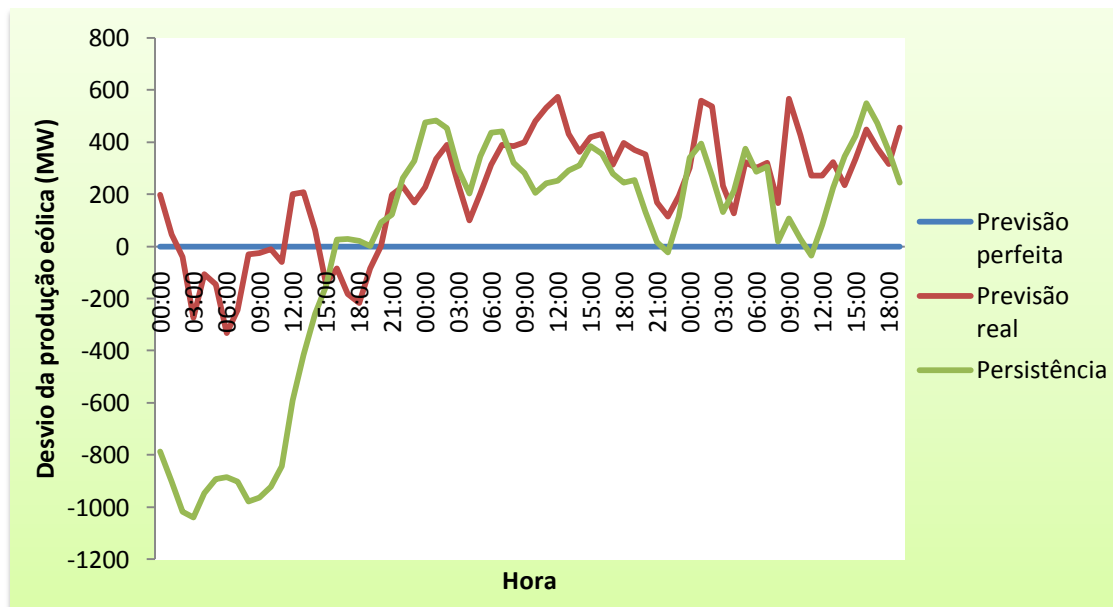


Figura 5.15 - Desvios de produção eólica para diferentes cenários de previsão, para alguns dias de Abril de 2010

Como é evidente na Figura 5.15, a previsão perfeita não apresenta qualquer desvio de produção, pelo que neste cenário não existem penalizações a ser atribuídas aos produtores.

Os cenários de previsão real e de persistência já apresentam desvios de produção, contudo, é visível na Figura 5.15 que a previsão real apresenta menores desvios que a persistência. Assim, pode-se concluir que uma melhor previsão contribui para a redução dos desequilíbrios entre a potência produzida e a potência proposta ao mercado, permitindo desta forma reduzir também as penalizações que esses desequilíbrios implicam para os produtores eólicos.

A Tabela 5.5 mostra as penalizações e compensações totais a ser aplicadas aos produtores eólicos, para os diferentes cenários de previsão, para o mês de Abril de 2010, considerando os preços de reserva para aumentar e diminuir a produção, e os desvios de produção. Pode-se observar que, no cenário de utilização da persistência como previsão, a compensação recebida pelos produtores eólicos é superior em comparação com a compensação a receber pelos produtores que utilizassem a previsão real, no entanto a penalização também é superior, o que se deve à maior amplitude dos desvios de produção observáveis na Figura 5.15. Como o preço de reserva é para subir a produção é muito superior ao preço de reserva para baixar a produção, isso faz com que as penalizações a aplicar aos produtores eólicos são bem mais elevadas que as compensações a que estes têm direito quando produzem mais do que o que tinham indicado ao mercado. Efectivamente, no caso da utilização da persistência, a compensação é 88% inferior à penalização, e quando é utilizada a previsão real a diferença aumenta para os 94%, utilizando-se a equação (4.21).

Tabela 5.5 - Penalizações e compensações totais para os diferentes cenários de previsão, devido a desvios de produção eólica, no mês de Abril de 2010

Previsão perfeita		Previsão real		Persistência	
Penalização (M€)	Compensação (M€)	Penalização (M€)	Compensação (M€)	Penalização (M€)	Compensação (M€)
0	0	5,399	0,3249	5,417	0,6405

O cálculo da remuneração obtida pelos produtores eólicos foi realizado através da equação (4.18) apresentada no Capítulo 4 desta dissertação. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 - Lucro da participação dos produtores eólicos no mercado de electricidade, para diferentes cenários de previsão, em Abril de 2010

Remuneração do mercado (M€)	Compensações - Penalizações (M€)	Lucro dos produtores eólicos (M€)	Cenário de previsão
13,201	0	13,201	Previsão perfeita
14,631	-5,0738	9,5576	Previsão real
13,761	-4,7767	8,9839	Persistência



Através da Tabela 5.6, pode-se observar que utilizando-se uma melhor previsão o lucro obtido pelos produtores eólicos é superior. Com previsão perfeita obtém-se o lucro máximo, que é reduzido em 28% no caso da utilização de uma previsão real, baixando ainda mais o lucro num cenário em que se utiliza a persistência para a previsão da produção eólica, sendo neste caso 32% inferior quando comparado com o lucro numa situação de previsão perfeita. Estes resultados demonstram que os lucros obtidos pelos produtores de energia proveniente de fontes renováveis, neste caso em específico dos produtores de energia eólica, estão directamente relacionados com a qualidade da previsão da sua produção, sendo que, melhorando a previsão, melhoram também os seus rendimentos resultantes da sua participação no mercado de electricidade.

Na Figura 5.16 é possível constatar-se a evolução do lucro dos produtores eólicos ao longo de alguns dias do mês de Abril de 2010.

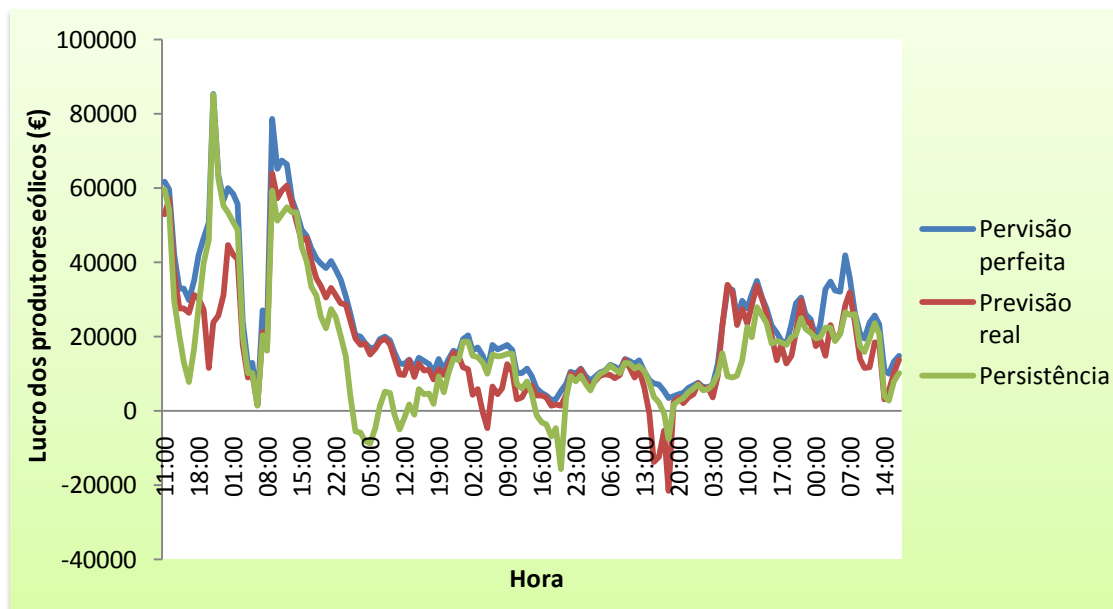


Figura 5.16 - Evolução do lucro da participação dos produtores eólicos no mercado de electricidade, para diferentes cenários de previsão, durante alguns dias do mês de Abril de 2010

A Figura 5.16 mostra que o lucro da persistência é o que apresenta maior variação, apresentando por vezes um lucro elevado, mas também é quando se obtêm os maiores prejuízos, visto que os desvios de produção também são mais elevados, como mostra a Figura 5.15.

É de notar que, quando a produção eólica é mais elevada, o que acontece no início do mês de Abril, é quando se pode obter os maiores lucros, contudo, dependendo da qualidade da previsão, também é quando se podem obter os maiores prejuízos. Já quando a produção eólica é mais residual, como se verifica no final do mês de Abril, o risco de prejuízos é bastante inferior, mas os lucros obtidos também não são substanciais.

Outra forma de os produtores maximizarem os seus rendimentos é modificando as previsões realizadas, através da multiplicação de um factor que é determinado tendo em consideração os preços de reserva, como foi formulado em (4.20) no Capítulo 4.

Através do Solver, realizou-se a maximização da remuneração expressa em (4.18), resultando um factor de optimização e um lucro para os produtores eólicos que estão representados na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 - Lucro da participação dos produtores eólicos no mercado de electricidade, para uma previsão optimizada através do factor  $\delta$ , em Abril de 2010

Remuneração do mercado (M€)	Compensações - Penalizações (M€)	Lucro dos produtores eólicos (M€)	Factor de optimização ( $\delta$ )
13,423	-3,7877	9,6348	0,917

Observando-se a Tabela 5.7, verifica-se o lucro dos produtores eólicos obtido através da previsão optimizada é superior ao lucro obtido utilizando-se a previsão real sem a multiplicação do factor de optimização, representado na Tabela 5.6. Esta maximização do lucro foi conseguida através da diminuição das penalizações, mesmo que tal requeresse uma diminuição da remuneração a receber da participação no mercado diário.

O factor de optimização obtido é inferior a 1, o que indica que, se os valores da previsão real que foi realizada fossem ligeiramente inferiores, o lucro dos produtores eólicos teria sido superior. Estes resultados fazem sentido, tendo em consideração os preços de mercado expressos na Tabela 5.3, onde o preço de reserva para subir a produção é 27% superior ao preço do mercado diário, e o preço de reserva para baixar a produção é 68% inferior. Ou seja, os resultados obtidos demonstram que, compensa aos produtores de energia de natureza intermitente fazerem as suas previsões por baixo, de forma a evitarem as maiores penalizações que são atribuídas aquando da necessidade de se aumentar a produção para ir de encontro ao consumo, conseguindo, desta maneira, maximizar o lucro que obtêm da sua participação no mercado de electricidade, tornando menos arriscada essa mesma participação.

## 5.5 - Conclusões

Através dos resultados obtidos, é possível concluir que as adaptações que se realizaram no algoritmo GraSO permitiram que este conseguisse resolver problemas de optimização de despacho económico com bons resultados. Prova disso são os resultados observáveis na Figura 5.5, onde se obteve um despacho muito similar ao verificado na realidade, apenas utilizando para tal, os limites estratégicos de despacho utilizados nos últimos anos e que foram tornados públicos, sem, contudo, qualquer conhecimento da estratégia de despacho utilizada na realidade. Esta optimização de despacho económico não muito diferente da verificada na realidade está muito relacionada com as restrições do problema de despacho económico proposto, que restringem em muito a gama de soluções óptimas possíveis, não permitindo que haja uma diferença maior entre os dois despachos. Contudo, apesar de as diferenças serem ligeiras, a estratégia de despacho adoptada pelo GraSO permitiu que se obtivesse uma melhor optimização do despacho que a que se realizou na realidade. Como se observa pela Tabela 5.1 e pela Figura 5.8, o custo do despacho obtido é inferior, para todos os dias testados, ao

despacho real, mesmo quando se utiliza menor produção hídrica, e tem-se que obrigatoriamente ter uma produção térmica superior. Isto demonstra que, com uma estratégia de despacho diferente, é possível obter-se uma coordenação entre a produção hídrica e a produção térmica que possibilite uma diminuição do custo do despacho económico.

Os resultados obtidos quando realizada a optimização do despacho económico para três cenários de previsão diferentes, que estão representados na Tabela 5.4, permitem concluir que, a variabilidade da produção eólica, mini-hídrica e fotovoltaica tem impacto no custo de despacho total a ser realizado pelos produtores térmicos. Observou-se que, previsões mais fracas desta mesma variabilidade fazem com que o custo de despacho obtido por estes produtores, aquando da sua participação no mercado de electricidade, seja superior quando comparado com previsões mais próximas da realidade. Esta situação deve-se à existência de uma maior necessidade de se fazer alterações ao despacho anteriormente programada no mercado diário, causadas pelos desvios de produção, pelo que fazer essas correcções de produção implicam custos de despacho adicionais. Assim, piores previsões da produção proveniente de energias renováveis até podem fazer com que o custo do despacho realizado no dia anterior no mercado diário seja inferior ao custo de despacho utilizando-se melhores previsões. Contudo, o custo de despacho total em cenários de previsão mais fracos é sempre superior, uma vez que existe uma maior necessidade de se recorrer às reservas, que normalmente implicam custos superiores, fazendo com que o custo de despacho seja mais elevado do que quando a previsão é melhor.

No que se refere ao lucro que os produtores de energia proveniente de fontes renováveis, em particular dos produtores de energia eólica, obtêm da sua participação no mercado de electricidade, os resultados obtidos permitem concluir que a previsão da produção tem um grande impacto nesse mesmo lucro. Sendo que, previsões mais próximas da previsão perfeita permitem que os lucros obtidos sejam mais elevados. No entanto, se os produtores fizerem as suas previsões por baixo, tendo em consideração os preços de reserva, isso permite diminuir as penalizações, aumentando assim o seu lucro.



# Capítulo 6

## Conclusões e Futuros Desenvolvimentos

### 6.1 - Conclusões gerais

Um dos objectivos deste trabalho de dissertação consistiu em tentar demonstrar que o algoritmo de optimização GraSO criado em [41] poderia ser modificado para que se conseguisse resolver de forma eficaz, problemas de optimização de despacho económico, salientando-se que o estudo realizado foi sempre para um caso real. Os resultados obtidos no Capítulo 5 demonstram que tal objectivo foi alcançado, obtendo-se uma optimização que conseguiu reduzir os custos de despacho quando comparando com os custos do despacho que foi escalonado na realidade, para blocos de vinte e quatro horas, com início na hora zero. O GraSO demonstrou uma boa reacção às restrições de igualdade e de desigualdade impostas, tanto para a produção térmica como para os recursos hídricos disponíveis. Assim como, as penalizações aplicadas para cumprir as restrições foram muito bem sucedidas, provando-se ser esta uma boa solução na diminuição do tempo necessário para se alcançar a solução óptima do problema através do GraSO.

Outro objectivo desta dissertação passou pelo desenvolvimento da formulação de um problema despacho económico com produção hídrica associada, utilizando apenas para tal valores públicos disponibilizados pela REN, mapeando-se desta forma os limites de estratégia que têm vindo a ser utilizados nos últimos anos. Com estes limites, conseguiu-se fazer uma formulação do problema de despacho económico que permitiu, através do GraSO, obter uma estratégia de despacho diferente da utilizada na realidade, resultando numa melhor optimização de despacho que a que foi conseguida na realidade.

Também nesta dissertação, pretendia-se demonstrar o impacto que a previsão da produção com origem em fontes de energia renováveis pode ter na optimização do despacho económico, assim como no custo de despacho, para uma situação de despacho real. Os resultados obtidos mostram que a previsão da variabilidade da produção eólica, mini-hídrica e fotovoltaica tem impacto na optimização do despacho realizado, impacto esse que terá repercussões no custo de despacho. Os resultados evidenciam que, quando são utilizadas melhores previsões da produção proveniente de energias renováveis, estas permitem menores desvios de produção, e consequentemente, menor necessidade de modificações do despacho

realizado no dia anterior, permitindo, desta forma, uma menor necessidade de se recorrer às reservas, o que faz com que os custos de despacho não sejam tão elevados, demonstrando-se a importância que a previsão tem nos dias de hoje para facilitar a integração energias renováveis no SEE e no mercado de electricidade, aumentando assim a sua competitividade, uma vez que permitem não elevar tanto os custos de despacho, e aumentar as remunerações dos produtores de energia proveniente de fontes de energia renováveis.

## **6.2 - Futuros Desenvolvimentos**

Como trabalhos futuros, os possíveis desenvolvimentos que se podem realizar em relação a esta dissertação estão relacionados com a desagregação das centrais térmicas e das centrais hídricas. As diferentes centrais têm características e custos distintos, pelo que seria interessante observar-se o impacto da previsão da variabilidade da produção hídrica, eólica e solar na optimização do despacho das diferentes centrais. Contudo, isto implicaria a necessidade de se ter o conhecimento dos custos por central, como essa informação não estava disponível, não foi possível a realização desse trabalho nesta dissertação.

## Referências

- [1] Zaraki, A.; Bin Othman, M.F.; , "Implementing Particle Swarm Optimization to Solve Economic Load Dispatch Problem," *Soft Computing and Pattern Recognition*, 2009. SOCPAR '09. International Conference, pp.60-65, 4-7 Dec. 2009
- [2] Jong-Bae Park; Yun-Won Jeong; Woo-Nam Lee; Joong-Rin Shin; , "An improved particle swarm optimization for economic dispatch problems with non-smooth cost functions," *Power Engineering Society General Meeting*, 2006. IEEE, pp.7 pp., 0-0 0
- [3] Karthikeyan, S.P.; Palanisamy, K.; Varghese, L.J.; Raglend, I.J.; Kothari, D.P.; , "Comparison of Intelligent Techniques to Solve Economic Load Dispatch Problem with Line Flow Constraints," *Advance Computing Conference, 2009. IACC 2009. IEEE International*, pp.446-452, 6-7 March 2009
- [4] Ying-Ping Chen; Wen-Chih Peng; Ming-Chung Jian; , "Particle Swarm Optimization With Recombination and Dynamic Linkage Discovery," *Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, *IEEE Transactions*, vol.37, no.6, pp.1460-1470, Dec. 2007
- [5] Chang-Huang Chen; Chin-Chung Lin; , "Simple particle swarm optimization for economic dispatch with piecewise quadratic fuel cost function," *Innovative Technologies in Intelligent Systems and Industrial Applications*, 2009. CITISIA 2009, pp.412-417, 25-26 July 2009
- [6] Jong-Bae Park; Yun-Won Jeong; Joong-Rin Shin; Lee, K.Y.; , "An Improved Particle Swarm Optimization for Nonconvex Economic Dispatch Problems," *Power Systems*, *IEEE Transactions*, vol.25, no.1, pp.156-166, Feb. 2010
- [7] Lee, K.Y.; Jong-Bae Park; , "Application of Particle Swarm Optimization to Economic Dispatch Problem: Advantages and Disadvantages," *Power Systems Conference and Exposition*, 2006. PSCE '06. 2006 IEEE PES, pp.188-192, Oct. 29 2006-Nov. 1 2006

- [8] Pereira-Neto, A.; Unsihuay, C.; Saavedra, O.R.; , "Efficient evolutionary strategy optimisation procedure to solve the nonconvex economic dispatch problem with generator constraints," *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-* , vol.152, no.5, pp. 653- 660, 9 Sept. 2005
- [9] Sasson, A.M.; Merrill, H.M.; , "Some applications of optimization techniques to power systems problems," *Proceedings of the IEEE* , vol.62, no.7, pp. 959- 972, July 1974
- [10] Farhat, I.A.; El-Hawary, M.E.; , "Interior point methods application in optimum operational scheduling of electric power systems," *Generation, Transmission & Distribution, IET* , vol.3, no.11, pp.1020-1029, Nov. 2009
- [11] Sinha, N.; Purkayastha, B.S.; Purkayastha, B.; , "Hybrid PSO/self-adaptive improved EP for economic dispatch with nonsmooth cost function," *Evolutionary Computation, 2007. CEC 2007. IEEE Congress on*, pp.2917-2922, 25-28 Sept. 2007
- [12] El-Sonbaty, A.E.-S.; Yonssef, H.K.M.; Ibrahim, D.K.; , "A proposed particle swarm optimization technique for solving non-linear economic dispatch problem," *Power Systems Conference, 2006. MEPCON 2006. Eleventh International Middle East* , vol.2, pp.606-611, 19-21 Dec. 2006
- [13] Selvakumar, A.I.; Thanushkodi, K.; , "A New Particle Swarm Optimization Solution to Nonconvex Economic Dispatch Problems," *Power Systems, IEEE Transactions*, vol.22, no.1, pp.42-51, Feb. 2007
- [14] Ling, S.H.; Lam, H.K.; Leung, F.H.F.; Lee, Y.S.; , "Improved genetic algorithm for economic load dispatch with valve-point loadings," *Industrial Electronics Society, 2003. IECON '03. The 29th Annual Conference of the IEEE* , vol.1, pp. 442- 447 vol.1, 2-6 Nov. 2003
- [15] Kit Po Wong; , "Computational intelligence applications in unit commitment, economic dispatch and load flow," *Advances in Power System Control, Operation and Management, 1997. APSCOM-97. Fourth International Conference on (Conf. Publ. No. 450)* , vol.1, no., pp.54-59 vol.1, 11-14 Nov 1997
- [16] Miranda. V. *Computação evolucionária*. Technical report, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto/INESC, 2005
- [17] Sinha, N.; Chakrabarti, R.; Chattopadhyay, P.K.; , "Evolutionary programming techniques for economic load dispatch," *Evolutionary Computation, IEEE Transactions*, vol.7, no.1, pp. 83- 94, Feb 2003
- [18] Li Jian; Chen Peng; Liu Zhiming; , "Solving the Economic Dispatch in Power System by Genetic Particle Evolutionary Swarm Optimization," *Computer Science and Software Engineering, 2008 International Conference on* , vol.1, pp.451-454, 12-14 Dec. 2008



- [19] Samudi, C.; Das, G.P.; Ojha, P.C.; Sreeni, T.S.; Cherian, S.; , "Hydro thermal scheduling using particle swarm optimization," Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2008. T&D. IEEE/PES., pp.1-5, 21-24 April 2008
- [20] Rahimullah, B.N.S.; Rahman, T.K.A.; , "Short-term Hydrothermal Generation Scheduling Using Evolutionary Computing Technique," Research and Development, 2006. SCOReD 2006. 4th Student Conference, pp.220-223, 27-28 June 2006
- [21] Ozyon, S.; Yasar, C.; Aslan, Y.; Temurtas, H.; , "Solution to environmental economic power dispatch problems in hydrothermal power systems by using genetic algorithm," Electrical and Electronics Engineering, 2009. ELECO 2009. International Conference, pp.1-387-1-391, 5-8 Nov. 2009
- [22] Gil, E.; Bustos, J.; Rudnick, H.; , "Short-term hydrothermal generation scheduling model using a genetic algorithm," Power Systems, IEEE Transactions on , vol.18, no.4, pp. 1256- 1264, Nov. 2003
- [23] Lakshminarasimman, L.; Subramanian, S.; , "Short-term scheduling of hydrothermal power system with cascaded reservoirs by using modified differential evolution," Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings- , vol.153, no.6, pp.693-700, November 2006
- [24] Warsono; King, D.J.; Ozveren, C.S.; , "Economic Load Dispatch for a power system with renewable energy using Direct Search Method," Universities Power Engineering Conference, 2007. UPEC 2007. 42nd International, pp.1228-1233, 4-6 Sept. 2007
- [25] Warsono; King, D.J.; Ozveren, C.S.; Bradley, D.A.; , "Economic Load Dispatch Optimization of Renewable Energy in Power System Using Genetic Algorithm," Power Tech, 2007 IEEE Lausanne, pp.2174-2179, 1-5 July 2007
- [26] Warsono; King, D.J.; Ozveren, C.S.; Bradley, D.A.; , "Economic Load Dispatch Optimization of Renewable Energy in Power System Using Genetic Algorithm," Power Tech, 2007 IEEE Lausanne, pp.2174-2179, 1-5 July 2007
- [27] Jianhui Wang; Audun Botterud; Vladimiro Miranda; Cláudio Monteiro; Gerald Sheble; , "Impact of Wind Power Forecasting on Unit Commitment and Dispatch," 2009
- [28] Yuan-Kang Wu; Jing-Shan Hong; , "A literature review of wind forecasting technology in the world," Power Tech, 2007 IEEE Lausanne, pp.504-509, 1-5 July 2007
- [29] Lingfeng Wang; Singh, C.; , "Tradeoff Between Risk and Cost in Economic Dispatch Including Wind Power Penetration Using Particle Swarm Optimization," Power System Technology, 2006. PowerCon 2006. International Conference on , pp.1-7, 22-26 Oct. 2006
- [30] Amendola, A. F.; , " Meta-Heurísticas de Optimização Aplicadas à Coordenação Hidrotérmica," Universidade Federal do Rio de Janeiro, Junho de 2007

- [31] Baozheng Liu; Ping Ren; Liqun Gao; Nan Li; , "A New Combinatorial Meta-heuristic Algorithm for Stochastic Electric Power System Production Costing and Operations Planning," *Intelligent Control and Automation, 2006. WCICA 2006. The Sixth World Congress on* , vol.2, no., pp.7429-7433, 0-0 0
- [32] Pei Zhang; Shanshan Liu; Ruilin Xu; Xinyu Liu; Li Feng; , "Assessing System Risk and Integrating Operation and Planning Functions for Chongqing Power using EPRI Probabilistic Risk Assessment Program," *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2010 Asia-Pacific* , pp.1-6, 28-31 March 2010
- [33] Nogaret, E.; Stavrakakis, G.; Bonin, J.C.; Kariniotakis, G.; Papadopoulos, M.; Hatziargyriou, N.; Papathanassiou, S.; Gatopoulos, J.; Karagounis, E.; Halliday, J.; Dutton, G.; Pecas-Lopes, J.; Androutsos, A.; Pligoropoulos, P.; , "A new expert system based control tool for power systems with large integration of PVs and wind power plants," *Photovoltaic Energy Conversion, 1994., Conference Record of the Twenty Fourth. IEEE Photovoltaic Specialists Conference - 1994, 1994 IEEE First World Conference on* , vol.1, pp.1052-1055 vol.1, 5-9 Dec 1994
- [34] Ernst, B.; Reyer, F.; Vanzetta, J.; , "Wind power and photovoltaic prediction tools for balancing and grid operation," *Integration of Wide-Scale Renewable Resources Into the Power Delivery System, 2009 CIGRE/IEEE PES Joint Symposium* , pp.1-9, 29-31 July 2009
- [35] Lavier, V.; Giralt-Devant, M.; , "Impact of the wind forecast error on the French balancing system," *PowerTech, 2009 IEEE Bucharest* , pp.1-6, June 28 2009-July 2 2009
- [36] Esteves, J.; "Energia Eólica e Gestão Técnica do Sistema Eléctrico: A Perspectiva da Regulação," ERSE, 10 de Fevereiro 2010
- [37] REN, "Manual de Procedimentos do Gestor do Sistema", Dezembro de 2008 (disponível em <http://www.mercado.ren.pt/DocReg/SubReg/BibManProcedimentos/MPGS.pdf>)
- [38] Relatório sobre a formação dos preços grossistas da energia eléctrica em Portugal no segundo semestre de 2007, Autoridade da Concorrência, Maio de 2009
- [39] Maria Helena Osório Pestana de Vasconcelos, "Avaliação e Controlo de Segurança de Redes Interligadas com Grande Penetração Eólica com base em Métodos de Aprendizagem Automática," Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2007
- [40] European Transmission System Operators (TSO), "European Wind Integration Study (EWIS) Towards a Successful Integration of Wind Power into de European Electricity Grids", Final Report, January 2007
- [41] Mesquita, F. G. G.; , "Design Optimization of Stand-Alone Hybrid Energy Systems," Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Fevereiro de 2010

- [42] Barbosa F. M.; , “Exploração de Sistema Eléctricos de Energia”, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2006
- [43] Pinson P.; Chevallie C.; Kariniotakis G.; , “Optimizing Benefits from Wind Power Participation in Electricity Markets using Advanced Tools for Wind Power Forecasting and Uncertainty Assessment,” École des Mines de Paris, Center of Energy Studies, 2004
- [44] Holttinen H.; “Optimal electricity market for wind power,” VTT Processes, Energy Production, May 2004
- [45] Blach M.; Strbac G.; “Value of storage in providing balancing services for electricity generation systems with wind penetration,” Manchester Center for Electric Energy, February 2005
- [46] Ummels B.C.; Pelgrum E.; Kling W.L.; “Integration of large-scale wind power and use of energy storage in the Netherlands’ electricity supply,” IET Renewable Power Generation, June 2007
- [47] Angarita J. M.; Usaola J. G.; “Combining hydro-generation and wind energy: Biddings and operation on electricity spot markets,” Universidad Carlos III de Madrid, May 2005
- [48] Brand H.; Barth R.; Weber C.; Meibom P.; Swider D. J.; “Extension of Wind Power - Effects on Markets and Costs of Integration,” Institute of Energy Economics and the Rational Use of Energy (IER), University of Stuttgart, 4th International Energiewirtschaftstagung, 2004
- [49] Baptista V.; “Perspectiva da Gestão Técnica do Sistema Eléctrico,” REN, Fevereiro 2010
- [50] Onate, P.E.; Ramirez, J.M.; , "Optimal operation of hydrothermal systems in the short term," *Power Symposium, 2005. Proceedings of the 37th Annual North American* , pp. 113- 119, 23-25 Oct. 2005
- [51] Zeng Ming; Wu Zhi-fu; Liu Bao-hua; Yuan De; Lu Ye; , "An Economic Dispatching Model of Hydro-Therm System Under Market Environment and its Application," *Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific, 2005 IEEE/PES* , pp.1-7, 2005
- [52] Shailti Swamp, K.; Natarajan, A.; , "Constrained optimization using evolutionary programming for dynamic economic dispatch," *Intelligent Sensing and Information Processing, 2005. Proceedings of 2005 International Conference*, pp. 314- 319, 4-7 Jan. 2005
- [53] Faias S.; Sousa J.; Castro R.; , “Forecasting the Impact of Increasing Integration of Renewable Sources in the Power Unbalance during Peak and Off-Peak Hours,” , 2006

- [54] REN, Informação Semanal do Mercado de Electricidade Português, para a semana 22 de 2010, (disponível em [http://www.mercado.ren.pt/PressReleases/BiblInfSemanal/2010\\_22.pdf](http://www.mercado.ren.pt/PressReleases/BiblInfSemanal/2010_22.pdf))
- [55] REN, Dados dos preços do mercado diário, 2010, (disponível em <http://www.mercado.ren.pt/InfOP/MercOMEL/Paginas/Preços.aspx>)
- [56] REN, Dados dos preços da reserva, 2010, (disponível em <http://www.mercado.ren.pt/InfOP/MercOMEL/Paginas/Reserva.aspx>)
- [57] Arias, D.A.; Mota, A.A.; Mota, L.; Castro, C.A.; , "A bilevel programming approach for power system operation planning considering voltage stability and economic dispatch," *Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2008 IEEE/PES* , pp.1-6, 13-15 Aug. 2008
- [58] Zhi Li; Xueshan Han; , "Risk constrained unit commitment considering uncertainty of wind power and load," *Sustainable Power Generation and Supply, 2009. SUPERGEN '09. International Conference*, pp.1-5, 6-7 April 2009
- [59] Correia A.; Matias J.; Serôdio C.; , "Métodos de Penalidade Exacta para Resolução de Problemas de Optimização não Linear," 2008