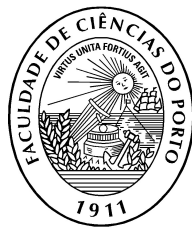


Ana Filipa de Castro Amarante e Ribeiro

**OPTIMIZAÇÃO DA OPERAÇÃO DE UM
CONJUNTO DE APROVEITAMENTOS
HIDROELÉCTRICOS EM CASCATA, EM
AMBIENTE DE MERCADO**



FACULDADE DE CIÊNCIAS
UNIVERSIDADE DO PORTO

Departamento de Matemática
Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

Setembro de 2009 - Julho de 2010

Ana Filipa de Castro Amarante e Ribeiro

**OPTIMIZAÇÃO DA OPERAÇÃO DE UM
CONJUNTO DE APROVEITAMENTOS
HIDROELÉCTRICOS EM CASCATA, EM
AMBIENTE DE MERCADO**

*Dissertação submetida à Faculdade de Ciências da
Universidade do Porto como parte dos requisitos para a obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Matemática*

Orientadores:

Prof.^a.Dr.^a. Maria do Carmo Miranda Guedes

Dr.^a. Sónia Vilela

Departamento de Matemática
Faculdade de Ciências da Universidade do Porto
Setembro de 2009 - Julho de 2010

AGRADECIMENTOS

Este espaço é dedicado àqueles que, de alguma forma, contribuíram para que este projecto fosse realizado. Não sendo viável nomeá-los a todos, há no entanto alguns a quem não posso deixar de manifestar o meu sincero agradecimento.

À Dr^a. Sónia Vilela (REN) desejo expressar o meu maior agradecimento pela motivação, encorajamento e orientação da presente dissertação, pelos ensinamentos que me transmitiu em consequência do seu profundo conhecimento e vasta experiência e pelo espírito crítico e construtivo que me inculcou.

À Prof^a. Dr^a. Maria do Carmo Miranda Guedes (FCUP) desejo expressar o meu agradecimento pela orientação, apoio, disponibilidade, exigência e empenho sempre demonstrados, bem como por todo o incentivo para continuar os meus estudos e se possível com este projecto.

Ao Prof. Dr. Gueorgui Vitalievitch Smirnov (U. Minho) agradeço o compromisso assumido, a disponibilidade, o empenho que colocou neste trabalho, assim como as sugestões, os esclarecimentos e o interesse continuado sobre os resultados do trabalho.

À Dr^a. Natália Tavares e à Eng^a. Helena Azevedo (REN) agradeço a atenção e confiança depositadas.

A todos os meus colegas da REN, especialmente à Dr^a. Joana Santos e ao Eng^o. Nuno Martins, agradeço o bom ambiente de trabalho proporcionado e a ajuda dispensada no decurso do estágio.

A todos os meus colegas de curso agradeço o apoio, ajuda e encorajamento no decorrer do estágio.

Ao José Pedro, ouvinte atento de algumas dúvidas, inquietações, desânimos e sucessos, pelo apoio, confiança e valorização sempre tão entusiasta do meu trabalho.

Aos meus pais e irmã pela paciência, compreensão e apoio dado nos momentos de maior necessidade e por sempre me incentivarem perante os desafios, a fazer mais e melhor.

A todas as pessoas que, directa ou indirectamente, contribuíram para a execução desta Tese de Mestrado.

RESUMO DO TRABALHO DE ESTÁGIO

O estágio realizou-se na Divisão de Planeamento de Longo Prazo da REN Serviços, S.A. (Redes Energéticas Nacionais), no Departamento de Métodos e Modelos, de Setembro de 2009 a Julho de 2010.

Teve como objectivo a construção de um modelo que permita a gestão da operação de uma cascata hidroeléctrica em ambiente de mercado, visando a maximização do lucro e tendo em consideração as características físicas dos aproveitamentos e as características técnicas dos equipamentos para turbinar e bombear.

Durante o período de estágio foi preciso estudar algumas áreas da Matemática, nomeadamente Programação Dinâmica[9], Programação Matemática e Controlo Óptimo. Foi este último o método escolhido para modelar o problema.

O passo seguinte foi construir um modelo que representasse o problema o melhor possível.

Seguiu-se uma fase de aprendizagem, teste e experimentação do software, sucedendo-se a implementação do modelo encontrado, após o qual se realizaram numerosos testes, atingindo-se o objectivo pretendido.

A simulação do problema possibilitou estudar o desempenho do sistema hidroeléctrico em diversos ambientes. No entanto, este é apenas um primeiro modelo, simplificado, do problema real, embora os resultados sejam suficientemente interessantes para se poder prosseguir com este tipo de abordagem.

PALAVRAS-CHAVE:

Turbinamento, Bombagem, Descarregamento, Caudais, Cascata, Optimização, Controlo Óptimo e Gestão.

Summary of the work developed at the training post

The training develops at the Divisão de Planejamento de Longo Prazo da REN Serviços, S.A. (Redes Energéticas Nacionais) (Long Term Planning Division of REN) in the Departamento de Métodos e Modelos (Method and Models Department) from September 2009 to July 2010.

REN's mission is to guarantee the uninterrupted supply of electricity and natural gas at the lowest cost, meeting quality and safety criteria, maintaining the balance between supply and demand in real time, defending the legitimate interests of market agents and reconciling its missions as a system operator and network operator.

The objective was to build a model that allowed to manage the operation of a hydro-electric cascade in electricity market in order to maximize profit, taking into account the physical and technical characteristics of the hydro-electric plants.

During the training period was necessary to study certain areas of mathematics, including Dynamic Programming, Mathematical Programming and Optimal Control. Optimal control was proposed to model the problem.

The next step was to build a model that represents the problem as best as possible.

It was followed by a phase of learning, testing and experimenting with suitable software for the calculations that would be needed.

Followed by implementation, after which numerous tests took place leading to the desired objective.

The simulation of the problem allowed to study the performance of the hydroelectric system under several conditions.

Although, this is just a first model, and a simplification of the real problem, the results are sufficiently interesting to continue with this approach.

KEY-WORDS:

Turbinning, Pumping, Discharged, Flow rates, Cascade, Optimization, Optimal Control and Management.

APRESENTAÇÃO DO LOCAL DE ESTÁGIO-REN,S.A.

A REN - Rede Eléctrica Nacional, S.A. foi criada em 18 de Agosto de 1994, na sequência da cisão da EDP - Electricidade de Portugal. A sua origem remonta à criação, em 1947, da CNE - Companhia Nacional de Electricidade.

Em 2007 deu-se a constituição da REN - Redes Energéticas Nacionais, SGPS, e em 2008 iniciou-se a actividade da REN Serviços.

A REN actua em duas áreas de negócio principais: (i) o transporte de electricidade em muito alta tensão e a gestão técnica global do Sistema Eléctrico Nacional e (ii) o transporte de gás natural em alta pressão e a gestão técnica global do Sistema Nacional de Gás Natural, a recepção, armazenamento e regaseificação de gás natural liquefeito e o armazenamento subterrâneo de gás natural, sendo titular das respectivas concessões de serviço público.

A REN está ainda presente no negócio das telecomunicações, explorando a capacidade excedentária de telecomunicações das respectivas redes de electricidade e de gás natural, e na da comercialização de energia, através da participação de 90% no Operador do Mercado Ibérico de Energia (Pólo Português), S.A. ("OMIP"), o pólo português do mercado ibérico para a transacção de derivados de electricidade.

O sector eléctrico em Portugal pode ser dividido em cinco actividades principais: produção, transporte, distribuição, comercialização de electricidade e operação dos mercados organizados de electricidade.

A electricidade é produzida com recurso a diversas tecnologias e a diferentes fontes primárias de energia (carvão, gás, fuel, gasóleo, água, vento, biomassa, entre outros). Em Portugal, os principais produtores são a EDP Produção, a Turbogás e a Tejo Energia.

A REN opera a RNT (Rede Nacional de Transporte) que liga os produtores aos centros de consumo, assegurando o equilíbrio entre a procura e a oferta. No âmbito do respectivo contrato de concessão, a REN é a única entidade de transporte de electricidade em Portugal continental.

Os pontos de entrega da RNT permitem alimentar a rede de distribuição a partir da

qual são abastecidos a maioria dos consumidores finais.

Este estágio foi realizado na Divisão de Planeamento de Longo Prazo da REN - Serviços, S.A. que realiza, entre outras actividades, a análise de diferentes estratégias de evolução do sector energético nacional, o desenvolvimento e implementação de metodologias e modelos de planeamento energético e a previsão da procura de electricidade.

A maior parte destes estudos apoiam-se na utilização de ferramentas matemáticas, que simulam e optimizam a exploração integrada de um sistema electroprodutor hídrico e térmico.

Conteúdo

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objectivos	2
1.2	Descrição do relatório	2
2	APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA	5
2.1	Aproveitamento de recursos energéticos	5
2.2	Horizonte temporal	7
2.3	Dificuldades	7
3	MODELO	9
3.1	Variáveis e equações	9
3.2	Restrições	12
3.3	Função objectivo	13
3.4	Descrição dos casos em estudo	14
3.4.1	Problema com duas albufeiras em cascata	14
3.4.2	Problema com quatro albufeiras em cascata	16
4	ELEMENTOS TEÓRICOS	19
4.1	Problema de controlo óptimo	19
4.2	O Método Simplex de Nelder e Mead	21
4.3	Método da função de penalização	23

5	MÉTODO DE RESOLUÇÃO DO PROBLEMA	27
5.1	Resolução do problema com duas albufeiras em cascata	28
5.1.1	Introdução de uma nova restrição	35
5.2	Resolução do problema com quatro albufeiras em cascata	39
6	SÍNTESE DO ESTUDO E CONCLUSÃO	53
	ANEXOS	57

Lista de Figuras

3.1	Duas albufeiras em cascata - Aproveitamento hidroelétrico equipado com turbinamento	10
3.2	Duas albufeiras em cascata - Aproveitamento hidroelétrico equipado com bombagem	10
3.3	Representação esquemática da cascata com duas albufeiras	15
3.4	Representação esquemática da cascata com quatro albufeiras	16
4.1	Movimento do algoritmo simplex com $n=2$	22
4.2	Método da função de penalização com $r_p = 1$	24
4.3	Método da função de penalização com $r_p = 10$ e $r_p = 100$	25
4.4	Fluxograma para o método da função de penalização	25
5.1	Gráfico dos custos unitários em cada período do horizonte temporal	28
5.2	Gráfico dos custos unitários em cada período do horizonte temporal e sua função aproximada	29
5.3	Caudal da central 1 obtido ao longo do horizonte temporal para o caso A1	30
5.4	Caudal da central 2 obtido ao longo do horizonte temporal para o caso A1	30
5.5	Volume da albufeira 1 obtido ao longo do horizonte temporal para o caso A1	31
5.6	Volume da albufeira 2 obtido ao longo do horizonte temporal para o caso A1	31
5.7	Lucro obtido para o caso A1	32
5.8	Gráfico dos custos unitários em cada período do horizonte temporal e sua função aproximada	33
5.9	Caudal da central 1 obtido ao longo do horizonte temporal para o caso B1	33

5.10	Caudal da central 2 obtido ao longo do horizonte temporal para o caso B1	33
5.11	Volume da albufeira 1 obtido ao longo do horizonte temporal para o caso B1	34
5.12	Volume da albufeira 2 obtido ao longo do horizonte temporal para o caso B1	34
5.13	Lucro obtido para o caso B1	34
5.14	Caudal da central 1 obtido ao longo do horizonte temporal para o caso A1 com restrição adicional	35
5.15	Caudal da central 2 obtido ao longo do horizonte temporal para o caso A1 com restrição adicional	35
5.16	Volume da albufeira 1 obtido ao longo do horizonte temporal para o caso A1 com restrição adicional	36
5.17	Volume da albufeira 2 obtido ao longo do horizonte temporal para o caso A1 com restrição adicional	36
5.18	Lucro obtido para o caso A1 com restrição adicional	36
5.19	Caudal da central 1 obtido ao longo do horizonte temporal para o caso B_1 com restrição adicional	37
5.20	Caudal da central 2 obtido ao longo do horizonte temporal para o caso B1 com restrição adicional	37
5.21	Volume da albufeira 1 obtido ao longo do horizonte temporal para o caso B1 com restrição adicional	38
5.22	Volume da albufeira 2 obtido ao longo do horizonte temporal para o caso B1 com restrição adicional	38
5.23	Lucro obtido para o caso B1 com restrição adicional	38
5.24	Representação esquemática da cascata com quatro albufeiras	39
5.25	Caudal da central 1 obtido ao longo do horizonte temporal para o caso A1	40
5.26	Caudal da central 2 obtido ao longo do horizonte temporal para o caso A1	40
5.27	Caudal da central 3 obtido ao longo do horizonte temporal para o caso A1	40
5.28	Caudal da central 4 obtido ao longo do horizonte temporal para o caso A1	40
5.29	Volume da albufeira 1 obtido ao longo do horizonte temporal para o caso A1	41
5.30	Volume da albufeira 2 obtido ao longo do horizonte temporal para o caso A1	41

5.31	Volume da albufeira 3 obtido ao longo do horizonte temporal para o caso A1	41
5.32	Volume da albufeira 4 obtido ao longo do horizonte temporal para o caso A1	41
5.33	Lucro obtido para o caso A1	42
5.34	Gráfico dos custos unitários em cada período do horizonte temporal e sua função aproximada	43
5.35	Caudal da central 1 obtido ao longo do horizonte temporal para o caso A2	44
5.36	Caudal da central 2 obtido ao longo do horizonte temporal para o caso A2	44
5.37	Caudal da central 3 obtido ao longo do horizonte temporal para o caso A2	44
5.38	Caudal da central 4 obtido ao longo do horizonte temporal para o caso A2	44
5.39	Volume da albufeira 1 obtido ao longo do horizonte temporal para o caso A2	45
5.40	Volume da albufeira 2 obtido ao longo do horizonte temporal para o caso A2	45
5.41	Volume da albufeira 3 obtido ao longo do horizonte temporal para o caso A2	45
5.42	Volume da albufeira 4 obtido ao longo do horizonte temporal para o caso A2	45
5.43	Lucro obtido para o caso A2	45
5.44	Caudal da central 1 obtido ao longo do horizonte temporal para o caso B1	46
5.45	Caudal da central 2 obtido ao longo do horizonte temporal para o caso B1	46
5.46	Caudal da central 3 obtido ao longo do horizonte temporal para o caso B1	46
5.47	Caudal da central 4 obtido ao longo do horizonte temporal para o caso B1	46
5.48	Volume da albufeira 1 obtido ao longo do horizonte temporal para o caso B1	47
5.49	Volume da albufeira 2 obtido ao longo do horizonte temporal para o caso B1	47
5.50	Volume da albufeira 3 obtido ao longo do horizonte temporal para o caso B1	48
5.51	Volume da albufeira 4 obtido ao longo do horizonte temporal para o caso B1	48
5.52	Lucro obtido pelo sistema para o caso B1	48
5.53	Volume de água descarregada pelas albufeiras para o caso B1	48
5.54	Gráfico dos custos unitários em cada período do horizonte temporal e sua função aproximada	49
5.55	Caudal da central 1 obtido ao longo do horizonte temporal para o caso B2	50

5.56	Caudal da central 2 obtido ao longo do horizonte temporal para o caso B2	50
5.57	Caudal da central 3 obtido ao longo do horizonte temporal para o caso B2	50
5.58	Caudal da central 4 obtido ao longo do horizonte temporal para o caso B2	50
5.59	Volume da albufeira 1 obtido ao longo do horizonte temporal para o caso B2	51
5.60	Volume da albufeira 2 obtido ao longo do horizonte temporal para o caso B2	51
5.61	Volume da albufeira 3 obtido ao longo do horizonte temporal para o caso B2	51
5.62	Volume da albufeira 4 obtido ao longo do horizonte temporal para o caso B2	51
5.63	Lucro obtido pelo sistema para o caso B2	51
5.64	Volume de água descarregada pelas albufeiras para o caso B2	51

Lista de Tabelas

5.1	Análise de volumes para o caso A_1	31
5.2	Análise de volumes para o caso B_1	34
5.3	Análise de volumes para o caso A_1 com restrição adicional	37
5.4	Análise de volumes para o caso B1 com restrição adicional	38
5.5	Análise de volumes para o caso A1 com 4 albufeiras	42
5.6	Análise de volumes para o caso A2 com 4 albufeiras	46
5.7	Análise de volumes para o caso B1 com 4 albufeiras	48
5.8	Análise de volumes para o caso B2 com 4 albufeiras	52