

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



FEUP

**Optimização da Estratégia de Operação de Mini-
Hídricas Integrando Informação de Previsão de
Produção**

Fernando Miguel Carvalho da Costa

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

Orientador: Prof. Doutor Cláudio Monteiro

Julho de 2010

© Fernando Miguel Carvalho da Costa, 2010

Resumo

Os aproveitamentos hidráulicos desempenham em Portugal uma função relevante na produção de electricidade utilizando recursos próprios e renováveis. Neste contexto e dado que o nosso país é um dos países da União Europeia com maior potencial hídrico por explorar, a energia hídrica apresenta-se como uma alternativa na política energética nacional.

A figura do pequeno produtor de energia eléctrica tem sofrido alterações, motivadas sobretudo pelos choques petrolíferos que tiveram o mérito de evidenciar o carácter finito não só da fonte de energia como também a necessidade de diversificação.

Os pequenos aproveitamentos hidroeléctricos, vulgarmente designados por Mini-hídricas, representam apenas uma pequena percentagem do valor total da potência instalada.

Além da produção de energia eléctrica os aproveitamentos hidroeléctricos podem ter outras finalidades, designadamente o armazenamento de água para abastecimento doméstico e industrial, ou para rega, o controle de cheias, o controle de intrusão salina em estuários, a navegação e o lazer.

Apesar de serem essencialmente centrais de fio de água, em 80% do tempo as centrais mini-hídricas conseguem regularizar diariamente cerca de 20% da produção, podendo transferir parte da produção das horas de vazio para as horas de cheias e ponta. A existência de previsão a curto prazo proporciona a possibilidade de gerir da melhor forma a gestão da estratégia de gestão da produção.

Nesta dissertação apresenta-se um modelo de optimização da estratégia de operação, em centrais mini-hídricas.

Inicialmente, para o desenvolvimento de modelo de optimização consideraram-se aspectos relacionados com o pré-processamento e análise da informação disponível. Deste modo, foi realizado um estudo imprescindível para a caracterização da estratégia de operação das centrais e, conseqüente, construção do modelo. Após apresentar a descrição e explicação da formulação associada ao modelo de optimização desenvolvido será realizada uma análise aos resultados obtidos para um conjunto de quatro centrais. Os resultados foram positivos e pode-se confirmar a validade do modelo de optimização. Com este trabalho pretende-se desenvolver um serviço inovador na área do planeamento de operação de centrais Mini-hídricas.

Palavras-chave: Centrais Mini-hídricas, Previsão, Estratégia, Optimização, Operação, Gestão.

Abstract

The hydro plants in Portugal play an important role in the production of electricity using its own resources and renewables energies. In this context and given that our country is one of the EU countries with higher water potential untapped, hydropower presents itself as an alternative national energy policy.

The figure of the small producer of electricity has changed, driven mainly by oil price shocks that had the merit to highlight the finite nature of the source of not only energy but also the need for diversification.

Small hydroelectric power plants, commonly called mini-hydro, represent only a small percentage of the total installed power.

Besides the production of the hydroelectric power may have other purposes, including the storage of water for domestic and industrial, or irrigation, flood control, control of salinity intrusion in estuaries, navigation and recreation.

Though they are mainly central thread of water in 80% of the time the mini-hydro can regularize daily about 20% of production, may transfer part of the production of off-peak hours to flood and tip. The existence of short-term forecasting provides the ability to manage as best management strategy for managing production.

This dissertation presents a model for optimizing the operating strategy in small hydro plants.

Initially, the development of the optimization model considering aspects related to the pre-processing and analysis of available information. Accordingly, a study was conducted to characterize the essential strategy operation of power stations and, consequently, the model building. After presenting a description and explanation of the wording associated with the optimization model developed will be an analysis of the results obtained for a set of four plants. The results were positive and it can confirm the validity of the optimization model. This work aims to develop an innovative service in the area of planning of the operation of small scale hydro.

Keywords: *Small hydropower plants, Forecasting, Strategy, Optimization, Operation, Management.*

Agradecimentos

Aos meus pais, por todos os sacrifícios que permitiram a concretização deste sonho, e pelo afecto ao longo destes anos.

Aos meus grandes amigos Paulo e Ana, pelo incentivo e apoio ao longo do meu percurso académico.

A todos amigos e colegas pela amizade e camaradagem ao longo desta vida académica.

Ao meu orientador, Professor Doutor Cláudio Monteiro, uma palavra de amizade e agradecimento pelo seu apoio.

À minha namorada Sara Ribeiro por todo o carinho, paciência, compreensão e amor demonstrado nestes últimos anos.

A todos, um muito obrigado sincero...

“Quanto mais me elevo, menor eu pareço aos olhos de quem não sabe voar.”

Friedrich Nietzsche

Índice

Resumo	iii
Abstract	v
Agradecimentos	vii
Índice	xi
Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas	xv
Abreviaturas e Símbolos	xvii
Capítulo 1	1
Introdução	1
1.1 - Enquadramento	1
1.1.1 - Energias Renováveis versus. Centrais Mini-Hídricas	1
1.1.2- Remuneração da Produção em Regime Especial PRE.....	3
1.2 - Motivação	7
1.3 - Objectivos.....	7
1.4 - Estrutura	7
1.5 - Informação Usada na Dissertação	8
1.5.1. Dados de Produção	8
1.5.2. Dados Estáticos sobre as CMH.....	8
1.5.3. Dados de Pluviosidade.....	8
1.6 - Ferramentas Auxiliares e Técnicas Utilizadas.....	9
Capítulo 2	11
Estado da Arte	11
2.1- Introdução	11
2.2- Mini-Hídricas.....	11
2.2.1- Situação em Portugal.....	11
2.2.2- Classificação	12
2.2.2.1- Potência.....	12
2.2.2.2- Queda 13	
2.2.2.3- Caudal	14
2.2.2.4- Regime de Exploração	14
2.2.3- Constituição das CMH	14

2.2.3.1- Albufeira e Açude	15
2.2.3.2- Canal de Adução	16
2.2.3.3- Câmara de Carga	16
2.2.3.4- Conduta Forçada.....	16
2.2.3.5- Edifício da Central	17
2.2.3.6- Restituição.....	18
2.3- Optimização	19
2.3.1- Breve História	19
2.3.2- Algoritmo Simplex	20
2.3.3- Algoritmo do Gradiente Reduzido Generalizado.....	21
2.3.4- Optimização da Estratégia de Operação de um Reservatório	22
Capítulo 3	23
Modelo de Optimização.....	23
3.1- Introdução	23
3.2- Estratégia de Operação.....	23
3.3- Previsão de Produção	28
3.4- Característica da Produção	31
3.5- Formulação do Modelo de Optimização	32
3.6- Síntese Geral	34
Capítulo 4	37
Teste do Modelo	37
4.1- Introdução	37
4.2- Parametrização da Característica de Produção	37
4.3- Aplicação do Modelo e Resultados	40
4.3.1.- Central A	40
4.3.2.- Central B	42
4.3.3.- Central C	44
4.3.4.- Central D	46
4.3.5.- Resultados Ano 2008.....	48
4.4- Síntese.....	52
Capítulo 5	55
Conclusões.....	55
5.1- Conclusões	55
Referências	57

Lista de Figuras

Figura 1 - Evolução da energia produzida a partir de fontes renováveis (TWh) [1].....	2
Figura 2- Evolução histórica da potência total instalada em renováveis (MW) Portugal Continental [1].	3
Figura 3 - Principais elementos de uma central mini-hídrica [12].	15
Figura 4 - Circuito hidráulico.	17
Figura 5 - Central só com conduta forçada [12]	18
Figura 6 - Central encastrada na barragem [12].	18
Figura 7 - Central longe da barragem [12].....	18
Figura 8 - Produção e Pluviosidade anual de uma CMH com regularização	24
Figura 9 - Perfil de Produção (1ª semana de Abril de 2007) (central A).	25
Figura 10 - Estratégia de Operação 1.....	25
Figura 11 - Estratégia de Operação 2.....	26
Figura 12 - Produção e Pluviosidade anual de uma CMH típica de fio de água.	26
Figura 13 - Perfil de Produção (1ª semana de Fevereiro de 2007) central B.	27
Figura 14 - Diferença de Perfis de Produção.	27
Figura 15 - Produção e Pluviosidade anual da central C fio de água.	27
Figura 16 - Perfil de Produção (1ª semana de Abril de 2007) central C.....	28
Figura 17 - Modelo de Previsão.	29
Figura 18 - Resultado do modelo de previsão [17].	31
Figura 19 - Característica de produção de uma CMH.	32
Figura 20 - Limites superior e inferior da CP da central.	32

Figura 21 - Diagrama final do funcionamento do modelo de optimização.	35
Figura 22 - Característica Central A.	38
Figura 23 - Característica Central B.	38
Figura 24 - Característica Central C.	39
Figura 25 - Característica Central D.	39
Figura 26 - Resultado Optimização Central A, Abril.	40
Figura 27 - Resultado Optimização Central A, Julho.	41
Figura 28 - Resultado Optimização Central B, Abril.	43
Figura 29 - Resultado Optimização Central B, Julho.	44
Figura 30 - Resultado Optimização Central C, Abril.	45
Figura 31 - Resultado Optimização Central C, Julho.	46
Figura 32 - Resultado Optimização Central D, Abril.	47
Figura 33 - Resultado Optimização Central D, Julho.	48
Figura 34 - Optimização para o ano de 2008 Central A.	49
Figura 35 - Optimização para o ano de 2008 Central B.	50
Figura 36 - Optimização para o ano de 2008 Central C.	51
Figura 37 - Optimização para o ano de 2008 Central C.	52

Lista de Tabelas

Tabela 1- Classificação das centrais mini-hídricas quanto à potência.....	12
Tabela 2 - Classificação das centrais mini-hídricas quanto à altura de queda.	13
Tabela 3 - Aplicação do modelo Central A, Abril.	41
Tabela 4 - Resultados Semanal da Remuneração Central A, Abril.	41
Tabela 5 - Aplicação do modelo Central A, Julho.	42
Tabela 6 - Resultados Semanal da Remuneração Central A, Julho.	42
Tabela 7 - Aplicação do modelo Central B, Abril.	43
Tabela 8 - Resultados Semanal da Remuneração Central B, Abril.	43
Tabela 9 - Aplicação do modelo Central B, Julho.	44
Tabela 10 - Resultados da Remuneração Central B, Julho.	44
Tabela 11 - Aplicação do modelo Central C, Abril.	45
Tabela 12 - Resultados da Remuneração Central C, Abril.....	45
Tabela 13 - Aplicação do modelo Central C, Julho.....	46
Tabela 14 - Resultados Semanal da Remuneração Central C, Julho.....	46
Tabela 15 - Aplicação do modelo Central D, Abril.	47
Tabela 16 - Resultados Semanal da Remuneração Central D, Abril.....	47
Tabela 17 - Aplicação do modelo Central D, Julho.....	48
Tabela 18 - Resultados Semanal da Remuneração Central D, Julho.....	48
Tabela 19 - Remuneração Central A ano 2008.	49
Tabela 20 - Remuneração Central B ano 2008.	50

Tabela 21 - Remuneração Central C ano 2008.....	51
Tabela 22- Remuneração Central D ano 2008.....	52

Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas

CMH	Centrais Mini-hídricas
CP	Característica de Produção
ESE	Estratégia Nacional de Energia
EDP	Energias de Portugal
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
GRG	Gradiente Reduzido Generalizado
PA	Parcela Ambiental da Remuneração
PF	Parcela Fixa da Remuneração
PNBEPH	Plano Nacional de Barragens de Elevado Potencial Hidroelétrico
PRE	Produção em Regime Especial
PV	Parcela Variável da Remuneração
SENV	Sistema Elétrico Não Vinculado
SBA	Soluções Básicas Admissíveis
UE	União Europeia

Lista de símbolos

$P_{p,med}$	Produção média diária
$P_{opt;med}$	Produção média diária otimizada
P_{inst}	Potência instalada
$P_{med,c}$	Produção média nas horas de cheia
$P_{med,v}$	Produção média nas horas de vazio
E_{pc}	Energia diária Produzida nas horas de cheia
E_{pc}	Energia diária Produzida nas horas de cheia
W	Energia

%	Porcentagem
N_c	Nº de horas diária de cheia
N_v	Nº de horas diária de cheia
A	Área da Bacia Hidrográfica
GWh	<i>Gigawatts-hora</i>
H	Queda
H_b	Altura Queda Bruta
$H_{b\text{máx}}$	Altura Queda Bruta Máxima
$H_{\text{média}}$	Queda média
H_u	Altura Queda Útil
kW	<i>Kilowatt</i>
kWh	<i>Kilowatts-hora</i>
m/s^2	Metro por segundo ao quadrado
m^2	Metro Quadrado
m^3/s	Metro Cúbico por segundo
mm	Milímetro
MVA	<i>Mega Volt Ampere</i>
MW	<i>Megawatt</i>
Q	Caudal
s	Segundos
TWh	Terawatts-hora
η	Eficiência do sistema

Capítulo 1

Introdução

Esta dissertação de mestrado foi desenvolvida no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores, na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP).

Neste trabalho de dissertação é apresentado um trabalho inovador de desenvolvimento de modelos de optimização da estratégia da operação de Centrais Mini-Hídricas (CMH). O objectivo deste trabalho consiste em desenvolver modelos de optimização da estratégia de produção, para diferentes tipos de centrais mini-hídrica, admitindo que é conhecida informação de previsão a curto-prazo da hidrometria.

Este capítulo define quais os objectivos e motivação inerentes à sua realização, e expõe as ideias fundamentais que serão defendidas na dissertação. No final do capítulo apresenta-se uma breve explicação da organização estrutural da dissertação.

1.1 - Enquadramento

1.1.1 - Energias Renováveis versus. Centrais Mini-Hídricas

A energia hídrica é uma aposta que tem vindo a ser feita desde os anos 40, sendo que a capacidade instalada em Portugal ronda actualmente os 4900 MW. Em 2007 foi lançado o Plano Nacional de Barragens de Elevado Potencial Hidroeléctrico (PNBEPH) que tem como objectivo identificar e definir prioridades para os investimentos a realizar em aproveitamentos hidroeléctricos no horizonte 2007-2020. O PNBEPH irá permitir a Portugal aproveitar melhor o seu potencial hídrico e viabilizar o crescimento da energia eólica. Efectivamente, para que a intermitência associada ao perfil de produção eólica seja integrada no sistema eléctrico, é necessária a introdução de um elemento estabilizador, que será parcialmente garantido pelo aumento da potência hídrica associado ao PNBEPH, aos novos empreendimentos em curso (como por exemplo o aproveitamento de Fridão no Rio

2 Introdução

Tâmega) e aos reforços de potência à várias centrais previstos que permitirão atingir, em 2020, cerca de 8600 MW em conformidade com a Estratégia Nacional de Energia ENE 2020.

Na figura abaixo, pode-se verificar a importância dos aproveitamentos hidroeléctricos no panorama das energias renováveis.

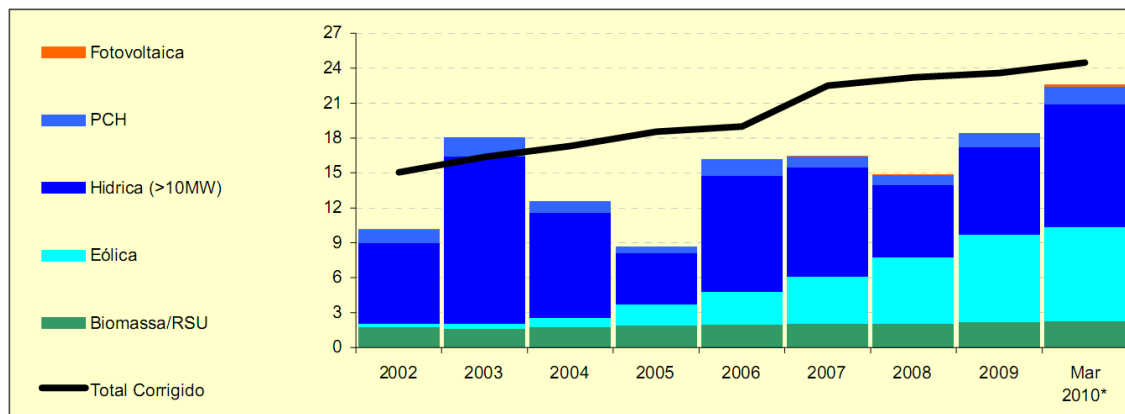


Figura 1 - Evolução da energia produzida a partir de fontes renováveis (TWh) [1].

A ENE 2020 tem como principais objectivos [23]:

- A redução da dependência energética do País face ao exterior para 74% em 2020, produzindo, nesta data, a partir de recursos endógenos, o equivalente a 31% da energia final.
- Cumprir os compromissos assumidos por Portugal no contexto das políticas europeias de combate às alterações climáticas, permitindo que em 2020, 60% da electricidade produzida tenha origem em fontes renováveis e o consumo de energia final seja reduzido em 20%.
- Reduzir em 25% o saldo importador energético com a energia produzida a partir de fontes endógenas.
- Promover o desenvolvimento sustentável criando condições para o cumprimento das metas da redução de emissões assumidas por Portugal no quadro europeu.

Em relação ao segundo ponto dos objectivos da ENE 2020, a aposta nas energias renováveis na área da hidroelectricidade visa a concretização do aumento da potência hídrica até 8600 MW, com referido anteriormente, e a instalação de maior capacidade reversível, integrada com o crescimento da energia eólica, tal facto pode ser observado no gráfico 1 acima referido [9].

No que se refere à mini-hídrica, o objectivo de pleno aproveitamento do potencial identificado de 250 MW será conseguido no quadro dum plano estratégico de análise e licenciamento de menor duração [8].

Contudo, pelo facto das melhores localizações para instalação de centrais hidroeléctricas de grandes empreendimentos já se encontrarem explorados e por induzirem maiores impactos ambientais, as CMH assumem uma importância relevante para a segurança de abastecimento e para o cumprimento dos compromissos assumidos com as energias

renováveis, metas ambiciosas, constituindo uma tecnologia que beneficia das características da produção dispersa de energia eléctrica, ou seja próximo do local de consumo, o que possibilita a redução de perdas nas linhas de transmissão [11].

Segundo [11] as CMH apresentam-se como um dos métodos mais económicos de produção de energia eléctrica, uma vez que apresentam elevada confiabilidade e flexibilidade de operação, devido à existência de mecanismos que lhe permitem dar uma resposta imediata a mudanças rápidas do sistema, tendo ainda a possibilidade se controladas remotamente, dispensando assim a presença humana no edifício da central.

Refira-se que, em termos estatísticos, dados confirmam que em Março de 2010 a potência total instalada em aproveitamentos hidroeléctricos até 10MW é de 324MW, com uma produção estimada de 686GWh [1].

	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	Mar 2010	TCMA
Hídrica Total	4.288	4.292	4.561	4.752	4.784	4.787	4.792	4.821	4.821	1,7%
Grande Hídrica (>30MW)	3.783	3.783	4.043	4.234	4.234	4.234	4.234	4.234	4.234	1,6%
PCH (>10 e <=30 MW)	251	251	251	232	263	263	263	263	263	0,7%
PCH (<= 10 MW)	254	258	267	286	287	290	295	324	324	3,5%
Eólica	175	253	537	1.047	1.681	2.446	3.012	3.566	3.725	53,8%
Biomassa (c/ cogeração)	372	352	357	357	357	357	357	359	359	-0,5%
Biomassa (s/ cogeração)	8	8	12	12	24	24	24	101	103	43,7%
Resíduos Sólidos Urbanos	88	88	88	88	88	88	88	88	88	0,0%
Biogás	1,0	1,0	7,0	8,2	8,2	12,4	12,4	20,0	21,0	53,4%
Fotovoltaica	1,5	2,1	2,7	2,9	3,4	14,5	58,5	103,7	108,7	83,2%
Ondas/Marés							4,2	4,2	4,2	
Total	4.934	4.996	5.565	6.267	6.946	7.729	8.348	9.062	9.229	9,1%

TCMA - Taxa de Crescimento Média Anual entre 2002 e 2009

Figura 2- Evolução histórica da potência total instalada em renováveis (MW) Portugal Continental [1].

Como se pode verificar na figura 1.2, a potência instalada das CMH tem vindo a aumentar ao longo dos anos e representa cerca de 4% da energia eléctrica produzida por fontes renováveis. Esse factor de crescimento levou as CMH a tornarem-se num ponto de interesse ao investimento por parte de promotores devido a grande eficiência a rondar os 90% destas centrais, como também a tarifa de remuneração PRE incentivada pelo Governo (Decreto-Lei n.º 225/2007, de 31 de Maio).

Daí surgir o interesse de otimizar a estratégia de operação das CMH por forma a maximizar a remuneração, bem como a exploração dos recursos hídricos.

1.1.2 - Remuneração da Produção em Regime Especial PRE

As instalações licenciadas ao abrigo dos Decretos-Leis n.os 189/88, de 27 de Maio, e 312/2001, de 10 de Dezembro [2] [3], designadas por centrais renováveis (entre as quais se encontram as centrais mini-hídricas), serão remuneradas pelo fornecimento da electricidade entregue à rede através da fórmula seguinte [4]:

$$VRD_m = \{KMHO_m \cdot [PF(VRD)_m + PV(VRD)_m] + PA(VRD)_m \cdot Z\} \cdot \frac{IPC_{m-1}}{IPC_{ref}} \cdot \frac{1}{(1-LEV)} \quad (1.1)$$

VRD_m - é a remuneração aplicável a centrais renováveis, no mês m;

KMHO_m - é um coeficiente que modula os valores de PF(VRD)_m, de PV(VRD)_m em função do posto horário em que a electricidade tenha sido fornecida;

4 Introdução

PF(VRD)m - é a parcela fixa da remuneração aplicável a centrais renováveis ;

PV(VRD)m - é a parcela variável da remuneração aplicável a centrais renováveis;

PA(VRD)m - é a parcela ambiental da remuneração aplicável a centrais renováveis;

IPCm-1 - é o índice de preços no consumidor, sem habitação, no continente;

IPCref - é o índice de preços no consumidor, sem habitação, no continente, referente ao mês anterior ao do início do fornecimento de electricidade à rede pela central renovável;

IPCm-1/IPCref - representa uma actualização relativamente ao início do fornecimento da central;

LEV representa as perdas, nas redes de transporte e distribuição, evitadas pela central renovável.

- 0,015 no caso de centrais com potência maior ou igual a 5 MW, $1/(1-LEV)=1,015..$
- 0,035 no caso de centrais com potência menor que 5 MW, $1/(1-LEV)=1,036..$

Z - é o coeficiente adimensional que traduz as características específicas do recurso endógeno e da tecnologia utilizada na instalação licenciada, toma o valor de $Z=4,5$ para uma central hídrica com potência declarada até 10MW;

1.1.2.1. Coeficiente de modulação $KMHO_m$

Relativamente à modulação tarifária traduzida pelo coeficiente $KMHO_m$, as centrais renováveis deverão decidir, no acto do licenciamento, se optam ou não por ela, com excepção das centrais hídricas para as quais esta é obrigatória.

Para as centrais renováveis que, no acto de licenciamento e nos termos do número anterior, tiverem optado pela modulação tarifária traduzida pelo coeficiente $KMHO$, este é definido pela formulação seguinte:

$$KMHO_m = \frac{KMHO_{pc} ECR_{pc,m} + KMHO_v ECR_{v,m}}{ECR_m} \quad (1.2)$$

$KMHO_{pc}$ - é um factor que representa a modulação correspondente a horas cheias e de ponta,

- toma o valor de 1,15 para as centrais hídricas
- e o valor de 1,25 para as restantes instalações de produção licenciadas ao abrigo do Decreto-Lei n.º 189/88, de 27 de Maio, e instalações de bombagem;

$ECR_{pc,m}$ - é a electricidade produzida pela central renovável nas horas cheias e de ponta do mês m, expressa em kWh;

KMHO_v - é um factor que representa a modulação correspondente a horas de vazio, o qual,

- toma o valor de 0,80 para as centrais hídricas
- e o valor de 0,65 para as restantes instalações de produção licenciadas ao abrigo do Decreto-Lei n.º 189/88, de 27 de Maio; e instalações de bombagem,

ECR_{vm} - é a electricidade produzida pela central renovável nas horas de vazio (kWh);

ECR_m - é a electricidade produzida pela central renovável (kWh).

Para as centrais renováveis que, no acto de licenciamento e nos termos do número anterior, não tiverem optado pela modulação tarifária traduzida pelo coeficiente KMHO, este tomará o valor $KMHO_m=1$;

Quanto ao posto horário, considera-se:

- No período de hora legal de Inverno, as horas de vazio ocorrem entre as 0 e as 8 e entre as 22 e as 24 horas, sendo as restantes horas do dia consideradas horas de cheia e de ponta;
- No período de hora legal de Verão, as horas de vazio ocorrem entre as 0 e as 9 e entre as 23 e as 24 horas, sendo as restantes horas do dia consideradas horas de cheia e de ponta.

1.1.2.2. Cálculo da parcela fixa PF(VRD)_m

$$PF(VRD)_m = PF(U)_{ref} \cdot COEF_{pot,m} \cdot POT_{med,m} \quad (1.3)$$

PF(U)_{ref} - é o valor unitário de referência, deve corresponder à mensualização do custo unitário de investimento nos novos meios de produção cuja construção é evitada por uma central renovável que assegure o mesmo nível de garantia de potência que seria proporcionado por esses novos meios de produção, corresponde a 5,44 €/mês (valor anual de 65,28 €/kW);

COEF_{pot,m} - é um coeficiente adimensional que traduz a contribuição da central renovável, no mês *m*, para a garantia de potência proporcionada pela rede pública;

$$COEF_{pot,m} = \frac{NHP_{ref,m}}{NHO_{ref,m}} = \frac{ECR_m/POT_{dec}}{0,80 \times 24 \times NDM_m} = \frac{ECR_m}{576 \times POT_{dec}} \quad (1.4)$$

- **NHP_{ref,m}** é o número de horas que a central renovável funcionou à potência de referência no mês *m*, o qual é avaliado pelo quociente ECR_m/POT_{dec} ;
- **NHO_{ref,m}** é o número de horas que servem de referência para o cálculo, no mês *m*, de COEF_{pot,m}, o qual é avaliado pelo produto $0,80 \times 24 \times NDM_m$;
- **POT_{dec}** é a potência da central, declarada pelo produtor no acto de licenciamento kW;
- **NDM_m** = dias do mês, assumindo 30.

$POT_{med,m}$ - é a potência média disponibilizada pela central renovável à rede pública no mês m (kW).

$$POT_{med,m} = \min \left(POT_{dec}; \frac{ECR_m}{24 \times NDM_m} \right) \quad (1.5)$$

1.1.2.3. Cálculo da parcela variável PV(VRD) $_m$

$$PV(VRD)_m = PV(U)_{ref} \cdot ECR_m \quad (1.6)$$

$PV(U)_{ref}$ - é o valor unitário de referência, Deve corresponder aos custos de operação e manutenção que seriam necessários à exploração dos novos meios de produção cuja construção é evitada pela central renovável, corresponde a 0,036 €/kWh;

ECR_m - é a electricidade produzida pela central renovável (kWh).

1.1.2.4. Cálculo da parcela ambiental PA(VRD) $_m$

$$PA(VRD)_m = ECE(U)_{ref} \cdot CCR_{ref} \cdot ECR_m \quad (1.7)$$

$ECE(U)_{ref}$ - é o valor unitário de referência para as emissões de CO₂ evitadas, deve corresponder aos custos de operação e manutenção corresponder a uma valorização unitária do dióxido de carbono que seria emitido pelos novos meios de produção cuja construção é evitada pela central renovável, 2×10^{-5} €/g;

CCR_{ref} - é o montante unitário das emissões de CO₂ da central de referência, o qual toma o valor de 370 g/kWh e será utilizado, em cada central, durante todo o período em que a remuneração definida por VRD seja aplicável.

$ECE(U)_{ref} \cdot CCE_{ref}$ corresponde a 0,0074 €/kWh.

Actualmente a remuneração tem valores médios que são apresentados seguidamente:

- Remuneração média nas horas de vazio 6c€/kWh;
- Remuneração média nas horas de cheia 8c€/kWh.

1.2 - Motivação

A energia hídrica é uma das prioridades contempladas pelas políticas energéticas nacionais (ENE 2020), portanto esta temática apresenta-se como uma das áreas de investigação e progresso científicos. Também é alvo de uma grande atenção na actualidade devido aos grandes empreendimentos hídricos previstos no PNBEPH.

A motivação inerente à realização desta dissertação reside na importância da execução de um trabalho pioneiro na área da optimização de estratégia de operação de CMH.

No entanto, no que diz respeito às CMH, esta tarefa é dificultada dado que existe escassez de informação, ou seja, não existe informação relativa às medidas das afluências. Um outro pormenor a ter em consideração é que a gestão deste tipo de centrais é dependente das estratégias de operação. Como se desconhecem os padrões de operação é viável que exista um comportamento de operação e padrão sistemáticos, que mereçam o respectivo estudo. Actualmente com o aparecimento de novas ferramentas de Previsão de Mini-hídrica surge uma oportunidade de prestar um serviço pioneiro para o planeamento de operação das CMH de forma a gerir de uma forma mais eficiente o recurso disponível.

1.3 - Objectivos

Este trabalho de dissertação tem como objectivo desenvolver modelos de optimização da estratégia da operação para diferentes tipos de Centrais Mini-Hídricas (CMH), admitindo que é conhecida informação de previsão a curto-prazo da hidrometria.

Numa primeira etapa, pretende-se processar a informação relativa à produção e estratégia de operação das CMH e identificar a sua respectiva característica interna de funcionamento que é essencial à elaboração do modelo.

Na segunda etapa, tem-se como objectivo desenvolver um modelo de optimização que maximiza a remuneração PRE, distribuindo a água das horas de vazio para as horas de cheias e de ponta.

1.4 - Estrutura

A presente dissertação está organizada em cinco capítulos, sendo a introdução o primeiro desses capítulos.

No capítulo 2 apresenta-se o estado da arte sobre as CMH onde são explicadas as características, tipo, e algumas estratégias de operação. Além disso, são abordados assuntos como a optimização matemática e as suas aplicações.

No terceiro capítulo são apresentados os contributos para o desenvolvimento do modelo de optimização assim como a formulação do referido modelo. Serão descritas as bases do modelo e também os pressupostos utilizados para o validar. Neste capítulo também são abordadas as estratégias de operação das CMH.

8 Introdução

No capítulo 4 serão apresentados os resultados obtidos para os testes efectuados ao modelo desenvolvido.

Por último, no capítulo 5, apresentar-se-ão todas as conclusões retiradas ao longo do trabalho desenvolvido e também algumas perspectivas de trabalhos futuros.

1.5 - Informação Usada na Dissertação

Para a realização da presente dissertação utilizaram-se dados e informação de diversas fontes, que se subdividem consoante a sua temática. Concretamente, os dados podem ser divididos em dados estáticos sobre as centrais, dados de produção e de pluviosidade.

1.5.1. Dados de Produção

Os dados de produção usados neste trabalho são dados fictícios criados a partir da descaracterização de produções reais de algumas centrais cedidos pelos seus promotores. Refira-se que esta descaracterização foi necessária para manter a confidencialidade exigida pelos promotores que gentilmente colaboraram com este trabalho, através da Smartwatt.

1.5.2. Dados Estáticos sobre as CMH

Os dados estáticos sobre as CMH correspondem a todo o tipo de informação acerca do aproveitamento hidroeléctrico e das suas características específicas, designadamente:

- Aproveitamento Hidroeléctrico
 - Nome;
 - Concessionária;
 - Localização;
 - Concelho e Distrito;
 - Afluente;
 - Rio ou Ribeira;
 - Data de Início de Exploração;
 - Potência Total Instalada;
 - Produção Média Anual;
 - Área da Bacia Hidrográfica;
 - Caudal
 - Queda Bruta;
 - Volume da Albufeira;
 - Tipo e Número de Turbinas.

1.5.3. Dados de Pluviosidade

Este trabalho utiliza previsões meteorológicas fornecidas pelo Centro de Geofísica da Universidade de Lisboa (CGUL) / Instituto de Ciência Aplicada e Tecnologia (ICAT), e pelo Professor Pedro Miranda.

1.6 - Ferramentas Auxiliares e Técnicas Utilizadas

No trabalho realizado nesta dissertação foram utilizados o *Microsoft Excel* e *Visual Basic* para criar a ferramenta de tratamento de dados e apoio ao modelo desenvolvido.

No que respeita ao modelo desenvolvido propriamente dito e ao processo de optimização da informação, foi utilizada a ferramenta *Solver*, um suplemento do *Excel* que resolve problemas matemáticos de difícil resolução manual.

Através da análise de hipóteses, o *Solver* efectua processos iterativos que consistem na alteração de determinadas células (variáveis de decisão) e na avaliação dessas alterações na função objectivo do problema.

A optimização numérica é baseada em algoritmos. O método *Simplex* é usado na resolução de problemas lineares enquanto o método do Gradiente Reduzido Generalizado é aplicado em problemas não-lineares [19].

Capítulo 2

Estado da Arte

2.1- Introdução

No presente capítulo pretende-se abordar assuntos relacionados com o tema desta dissertação. Assim, começa-se por descrever as CMH e os seus principais constituintes.

De seguida, um breve resumo dos algoritmos de optimização utilizados pelo Software Solver. Por fim, aborda-se o tema das estratégias de operação das CMH.

2.2- Mini-Hídricas

2.2.1 - Situação em Portugal

Desde a publicação do Decreto-Lei n.º189/88, a primeira legislação orientada para a promoção da produção de energia eléctrica a partir de recursos renováveis, combustíveis nacionais ou resíduos industriais, agrícolas ou urbanos, bem como da co-geração, abriu a actividade de produção independente de energia eléctrica a pessoas singulares ou colectivas públicas ou privadas, com o limite de 10 MW de potência instalada. Desde então, até 1994, existiu um despertar no interesse em instalações de CMH, devido às vantagens concedidas pela legislação e aos incentivos financeiros disponíveis, onde foram licenciados 120 empreendimentos de utilização de água para produção de energia. Destes 120 até a data apenas 44 estão em funcionamento, representando um total de 170 MW de potência instalada e uma produção de 550 GWh/ano. No final do ano de 2001, as últimas estatísticas nacionais para os seguintes valores em termos da potência total instalada em CMH, tendo em conta as antigas concessões, 34 mini-hídricas com uma potência total de 30 MW e 100 GWh/ano, e ainda 20 do SENV (Sistema Eléctrico Não Vinculado-Grupo EDP) com 56 MW e produtividade de 165 GWh/ano, o total de aproveitamento mini hídrico situa-se actualmente em 98 centrais que correspondem a 256 MW de potência instalada e uma produção 815 GWh/ano [5-7]. No entanto, nos últimos anos tem vindo a reduzir o número de candidaturas, isto devido a vários factores como: dificuldades nos processos de licenciamento, onde intervém uma série de

entidades diferentes sem coordenação entre elas; dificuldades na ligação à rede eléctrica por insuficiências da mesma; a falta de critérios objectivos para a emissão de pareceres das diversas entidades; restrições ambientais, o impacto ambiental ou a legislação podem inviabilizar estes projectos, e leva a que os processos se tornem morosos.

Em Março de 2010 existiam 324 MW de potência instalada em CMH e um total de 686 GWh de energia eléctrica produzida (sendo esta calculada desde Abril de 2009 a Março de 2010) [1].

Em termos futuro apesar de ser difícil estimar o potencial de exploração mini-hídrica existente é possível apontar para valores perto dos 1.000 MW, dos quais entre 500 e 600 MW são concretizáveis num futuro próximo, com uma produção média entre 1.500 e 1.800 GWh/ano [10].

2.2.2 - Classificação

O principal método para dimensionar e classificar uma CMH está associado a quatro características. Estas características designam-se por: potência, queda, caudal e regime de exploração.

2.2.2.1 - Potência

A designação CMH generalizou-se em Portugal para indicar os aproveitamentos hidroeléctricos de potência inferior a 10 MW. Este limite é geralmente usado internacionalmente como fronteira de separação entre as pequenas e as grandes centrais hidroeléctricas. As primeiras, devido ao seu impacto ambiental diminuto, são consideradas centrais renováveis; as segundas, embora usem um recurso renovável, produzem efeitos não desprezáveis sobre o ambiente, pelo que a sua classificação como centrais renováveis é problemática [7].

A classificação em função da potência instalada pode ser observada na Tabela 1.

Tabela 1- Classificação das centrais mini-hídricas quanto à potência.

Designação	P _{inst} (MW)
Pequena central hidroeléctrica	< 10
Mini central hidroeléctrica	< 2
Micro central hidroeléctrica	<0,5

A potência a instalar num aproveitamento hidroeléctrico obedece da informação de duas características físicas: altura de queda e fluxo de água presente no local de instalação da CMH. Assim sendo, a potência é expressa pela equação (2.1) que se apresenta de seguida [7-12]:

$$P = \eta \times g \times H_u \times Q_i \quad (2.1)$$

Onde:

P - Potência instalada (kW);

η - Eficiência do sistema (%);

g - Aceleração gravítica: $\approx 9,81$ (m/s²);

H - Queda útil (m);

Q - Caudal instalado (m³/s).

A eficiência do sistema tem valores entre 70% a 90%, e é resultado da eficiência de todos os componentes hidráulicos e eléctricos da CMH, como por exemplo a turbina, o gerador e a conduta forçada. Como acontece com qualquer conversação de energia existem sempre perdas adjacentes ao processo de transformação [12].

2.2.2.2 - Queda

A altura de queda é um dos factores fundamentais das CMH, pois é através desta característica que se consegue retirar a energia potencial presente na água, como também da energia cinética que advém da queda. Muitas classificações têm sido dadas a esta variável, mas a classificação habitual é a que se indica na Tabela 2 [7-13].

Tabela 2 - Classificação das centrais mini-hídricas quanto à altura de queda.

Designação	H_u (m)
Queda baixa	2 - 20
Queda média	20 - 150
Queda alta	> 150

Deve-se salientar que existem diversos conceitos associados à caracterização da altura de quedas, designadamente [12]:

- Altura de queda bruta H_b - diferença entre a altura na tomada de carga e a altura no ponto de restituição no rio para situações de caudal nominal (caudal médio);
- Altura de queda bruta máxima $H_{b\text{máx}}$ - diferença máxima entre a altura máxima na tomada de carga e a altura mínima no ponto de restituição no rio;
- Altura de queda útil H_u - é a diferença entre a altura de queda bruta e a altura equivalente a todas as perdas hidráulicas.

Normalmente, para fins de determinação da potência instalada numa CMH utiliza-se a altura de queda bruta, que indica o desnível existente entre montante e jusante.

2.2.2.3 - Caudal

Um conceito importante quando se analisa a dinâmica dos fluidos. O caudal ou fluxo é o volume de fluido que atravessa uma dada área por unidade de tempo.

O caudal é uma característica fundamental para o dimensionamento das CMH, pois este é o factor determinante e condicionante para a produção de energia eléctrica. Sem caudal não existe água e conseqüentemente não existe produção de electricidade. Mais ainda, no estudo para implementação de uma central deste tipo não basta caracterizar a variabilidade de ocorrência dos caudais no que respeita à sua magnitude, mas também o intervalo de tempo em que os mesmos ocorrem. Não esquecendo que apenas uma percentagem do caudal do rio é utilizada pela CMH.

É importante referir que existem diversos conceitos associados ao caudal das CMH, designadamente [12]:

- Caudal modular Q_{mod} (m^3/s) - é o caudal médio anual medido durante vários anos;
- Caudal ecológico Q_e (m^3/s) - é o caudal que não pode ser turbinável por razões ecológicas e ambientais;
- Caudal instalado Q_i (m^3/s) - também designado por caudal máximo turbinável, é o caudal garantido durante 20% ($Q_{20\%}$) a 30% ($Q_{30\%}$) do ano. Habitualmente superior ao caudal modular (que estará entre $Q_{15\%}$ a $Q_{20\%}$). É o caudal usado para dimensionar o equipamento (turbinas).

2.2.2.4 - Regime de Exploração

Outra classificação das CMH diz respeito à existência ou não de capacidade de armazenamento. Ou seja as CMH são classificadas, em relação ao seu regime de exploração, como: CMH a fio de água; CMH a albufeira.

As centrais a fio de água têm uma capacidade reduzida de regularizar o caudal que na grande maioria não passa de algumas horas, pelo que o caudal utilizável nestas CMH é o caudal instantâneo do rio. Ao contrário, as centrais com regularização possuem uma albufeira que lhes permite adaptar o caudal afluente. As CMH são, regra geral, centrais a fio de água [7].

2.2.3 - Constituição das CMH

Os principais elementos que constituem uma central mini-hídrica podem ser observados na Figura 3, com a seguinte legenda [7-15]:

- Albufeira (“intake”) e respectivo açude;

- Canal de adução (“feeder canal”);
- Câmara de carga (“fore bay”);
- Conduta forçada (“penstock”);
- Edifício da central (“power house”);
- Restituição (“tail race”);
- Caudal ecológico (“reserve flow”).

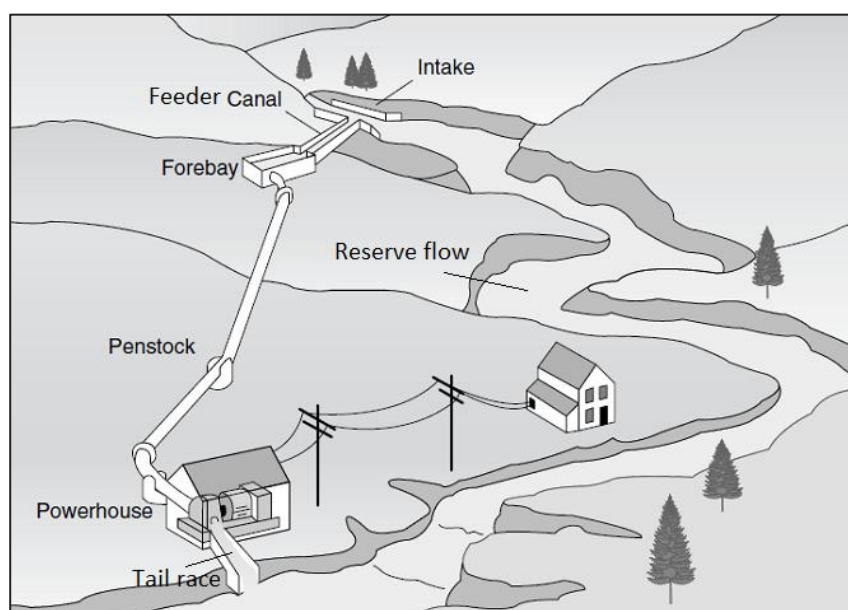


Figura 3 - Principais elementos de uma central mini-hídrica [12].

2.2.3.1 - Albufeira e Açude

Albufeira é a designação dada à quantidade de água formada por rios ou ribeiras(os) aquando da existência de uma estrutura que impede a sua passagem natural. Essa estrutura é construída por um açude, de pequenas dimensões, para centrais com exploração a fio-de-água e por barragens, de grandes dimensões, para aproveitamentos hidroeléctricos de exploração através de barragem.

A estrutura que permite a acumulação de água através do impedimento da passagem do curso natural da água dos rios ou ribeiros exige uma especial atenção. Concretamente, é necessário atender a aspectos construtivos, como o seu posicionamento e a sua altura, dado que estes irão afectar o volume do reservatório e a conseqüente inundação de algumas áreas próximas. Assim sendo, é imprescindível a realização de um estudo técnico-económico que envolve factores como aspectos ambientais, volume de regularização e localização da tomada de água [6].

2.2.3.2 - Canal de Adução

O canal de adução é o elemento responsável pela condução da água proveniente da albufeira, ou na ausência desta, desde o leito do rio até a câmara de carga. Ao longo do canal de adução o nível da água é praticamente o mesmo, existindo apenas uma pequena diferença de desnível, de forma a possibilitar a circulação da água.

Concretamente, o elemento em análise é maioritariamente realizado em circuito aberto, ou na impossibilidade desse facto, é realizado em túnel através de escavação na rocha. Este elemento poderá ter uma distância desde uma centena de metros até uma distância de três ou quatro quilómetros. Assim sendo, juntamente com a barragem e a conduta forçada, o canal de adução é uma das estruturas que possui um peso a nível monetário bastante considerável. A ausência de câmara de carga no projecto obriga a instalação de chaminés de equilíbrio para a protecção do circuito hidráulico contra as variações de pressão hidráulica motivadas pela entrada em funcionamento e pela paragem dos grupos turbina - alternador da central, são utilizados dispositivos hidráulicos, normalmente localizados entre a adução e a conduta forçada. No caso de apresentar um comprimento muito longo e de difícil construção pode inviabilizar o projecto de construção de uma CMH [30].

2.2.3.3 - Câmara de Carga

A câmara de carga é a estrutura existente entre o canal de adução e a conduta forçada em algumas CMH. Este elemento permite:

- Impulsionar a transição entre um escoamento livre existente no canal de adução, para um escoamento sob pressão da conduta forçada;
- Atenuar o choque hidráulico que acontece na conduta forçada quando se processa o fecho brusco do dispositivo de controlo do caudal na turbina;
- Fornecer água à conduta forçada quando existe a abertura severa do dispositivo de controlo do caudal, até que se estabeleça novamente no canal de adução o regime permanente de escoamento.

É importante referir que o dimensionamento deste elemento constituinte é dependente da altura de queda, visto que quanto maior a altura, maior é a quantidade de água necessária para encher a conduta forçada. Portanto, é necessário que a câmara de carga possua um volume de água suficiente para que exista um pleno funcionamento da turbina até que subsista um novo movimento de águas no canal de adução.

2.2.3.4 - Conduta Forçada

A conduta forçada é o elemento que conduz a água desde a câmara de carga até ao edifício da central onde se encontram os grupos turbina - alternador. Ao contrário do canal

de adução, a conduta forçada possui um determinado declive. Quanto maior for o declive da conduta melhor, tendo em conta a energia potencial da água, mas cada conduta é dimensionada de modo a respeitar as características da central. Este elemento possui uma superfície circular, sendo normalmente construída em aço, para suportar a pressão da água, e apresenta-se desenterrada de forma a ter fácil acesso em caso de ruptura. Contudo, na inviabilidade deste facto procede-se ao seu enterramento.

Analogamente ao canal de adução, a conduta forçada apresenta-se como uma das estruturas com custos bastante consideráveis e dependendo do seu comprimento pode inviabilizar o empreendimento das CMH [6]. Na figura 4 pode-se observar o circuito hidráulico de uma CMH.



Figura 4 - Circuito hidráulico.

2.2.3.5 - Edifício da Central

A central é um edifício que abriga os grupos turbina - alternador, que produzem energia eléctrica da energia hidráulica, os quadros de comando e, por vezes, os transformadores.

A central pode localizar-se junto do pé da barragem, aproveitando o desnível criado pela própria, ou localizar-se a jusante, por vezes a vários quilómetros, aproveitando também o desnível do rio. No primeiro caso o circuito hidráulico é curto, sendo constituído apenas por uma conduta forçada ou por várias condutas forçadas em paralelo (Figura 5).

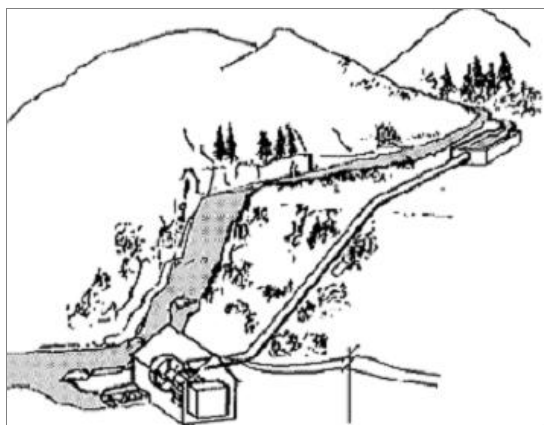


Figura 5 - Central só com conduta forçada [12]

Por vezes integradas na própria estrutura da barragem, ver Figura 6. No segundo caso a adução pode ser bastante extensa, tendo um traçado praticamente de nível, ao longo de uma das encostas do vale a jusante da barragem (Figura 7).

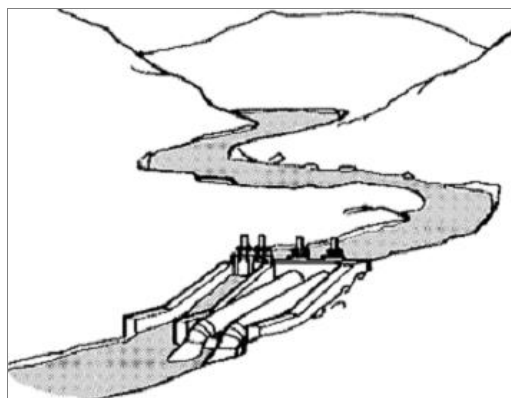


Figura 6 - Central encastrada na barragem [12].

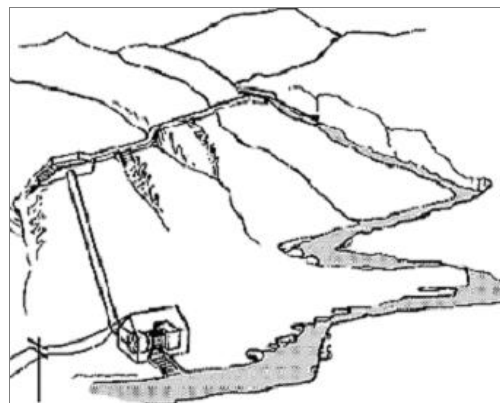


Figura 7 - Central longe da barragem [12].

O número, o tipo e as características da turbina que equipam as centrais são seleccionados em função da queda (diferença entre os níveis de água na albufeira e do eixo das turbinas) e do caudal [30].

2.2.3.6 - Restituição

A água depois de turbinada é recolhida num canal, sendo conduzida por meio deste de volta ao rio, ou a outra bacia artificial, junto à qual se encontram outras tomadas de água de uma eventual central situada a jusante.

2.3- Optimização

2.3.1 - Breve História

Assim como outros ramos da matemática, a optimização teve a sua origem nas aplicações. Embora, no seu caso, não seja preciso recuar muito tempo para identificar as aplicações que impulsionaram o seu desenvolvimento. De facto, segundo [22], a história dos principais resultados de optimização é surpreendente, porque a optimização aparenta ser uma questão tão natural num contexto real como num contexto abstracto, como é o da matemática. Ao longo de milhares de anos, matemáticos procuraram resolver sistemas de equações para ajustar observações astronómicas na Babilónia, para determinar preços no mercado de comida chinês, para calcular a posição e velocidade de objectos. A resposta para este tipo de questões contribuiu para o crescimento de algumas áreas da matemática, como é o caso da álgebra, da teoria de números e da matemática numérica.

Existem alguns, casos isolados, como o de Fourier (1768-1830) que introduziu inequações em mecânica e que relacionou equilíbrio mecânico com um tipo de multiplicadores introduzido por Lagrange (1736-1813) para equações. Fourier também descreveu um processo de eliminação de variáveis para a resolução de inequações que funciona de um modo semelhante, mas mais complicado, ao bem conhecido método de eliminação de Gauss (1777-1855). Entre outros, também Farkas (1847-1930) aplicou inequações à mecânica, e Minkowski (1864-1909) também as usou no seu Geometria de Números [22].

Mas, só no final da década de 30 e início da década de 40 do século XX é que apareceram os resultados que se podem considerar hoje como inspiradores do verdadeiro desenvolvimento deste ramo da matemática. Pode até perceber-se porque é que esses desenvolvimentos ocorreram por essa altura. Aparentemente, a situação de guerra e competição que se vivia, às quais se associou um forte desenvolvimento industrial, criou condições para que se procurasse desempenhar tarefas melhores e mais rápidas.

Os cientistas que se destacaram nessa altura, com contribuições decisivas, foram George Dantzig, em 1947, nos E.U.A. com o seu método Simplex para resolver problemas de transportes/distribuição no Pentágono e Leonid Kantorovich na extinta União Soviética com desenvolvimentos teóricos na resolução de problemas de equilíbrio económico.

No final da década de 50, este ramo da matemática – na altura, mais conhecido por programação matemática – era já uma disciplina sólida, começando a ser leccionada em universidades, quer em cursos de matemática, quer em cursos de ciências de gestão.

Do ponto de vista prático, o método Simplex possibilitou a resolução de problemas de optimização de grande dimensão (isto é, com um número elevado de variáveis e inequações) de diversos tipos e origens. As origens mais frequentes para esses problemas eram, então, as de planeamento de transportes, de planeamento de produção e distribuição, de afectação de recursos (matérias-primas, mão-de-obra ou disponibilidades temporais em máquinas) e de calendarização de tarefas.

Os computadores possibilitaram a execução do método Simplex em grandes problemas. Por outro lado, o método Simplex e outros métodos revelaram fragilidades numéricas na computação automática e suscitaram questões de complexidade computacional [22].

O crescimento da área conduziu a um inevitável aumento da especialização e da diversificação. Assim, observa-se as especializações em: optimização não linear, mais ligada à

matemática numérica, otimização discreta e otimização combinatória, algo distintas e mais ligadas à matemática finita, e mais recentemente a otimização estocástica, mais ligada às probabilidades. Observa-se diversificações no sentido da matemática, no sentido da investigação operacional e no sentido das ciências de computação. Observa-se também diversificações no sentido da teoria, no sentido da computação e no sentido da aplicação [22].

Na área investigação operacional é a ciência que envolve a análise de sistemas complexos, a construção de modelos que descrevam as relações entre as variáveis do sistema, e a sua resolução, que se traduz na procura das soluções mais eficientes. Os resultados fornecidos pelos modelos permitem compreender e prever o comportamento dos sistemas, e servem para apoiar os gestores no processo de tomada e execução de decisões. Por essa razão, é uma ciência que tem um papel fundamental na gestão racional de recursos usados em operações e processos e na melhoria da produtividade, tendo um campo privilegiado de aplicação em diversas áreas científicas, como a engenharia, a gestão, a economia, a matemática, e muitas outras.

Por isso, não é de espantar que o ensino e a investigação em otimização estejam tradicionalmente ligados à investigação operacional.

2.3.2 - Algoritmo Simplex

O método Simplex é um algoritmo que permite resolver problemas de Programação Linear.

A ideia básica do método Simplex consiste em resolver repetidas vezes um sistema de equações lineares para obter uma sucessão de SBA, cada uma "melhor" do que a anterior, até se chegar a uma SBA ótima.

O método Simplex começa com a solução básica admissível e vai, sucessivamente, localizando outras soluções básicas (sempre admissíveis) correspondentes a melhores valores de função objectivo, até que seja encontrada uma solução ótima.

Resumidamente, podemos dizer que o Método Simplex parte de uma solução básica admissível não ótima até encontrar uma solução básica admissível ótima [21].

Em teoria de otimização matemática, o algoritmo Simplex de George Dantzig é uma técnica popular de fornecer soluções numéricas aos problemas da programação linear. Um método sem relação, mas chamado de maneira similar é o método Nelder-Mead ou método Simplex de baixo custo devido a Nelder e Mead (1965) e é um método numérico para otimização de problemas livres multidimensionais, pertencentes à classe mais geral de algoritmos de busca [25].

Em ambos os casos, o método usa o conceito de um Simplex, que é um politopo (poliedro limitado) de $N + 1$ vértices em N dimensões: um segmento de linha sobre uma linha, um triângulo sobre um plano, um tetraedro num espaço de três dimensões e assim sucessivamente [24].

Estes procedimentos são válidos para problemas de maximização [25]:

- Introduzir as variáveis de folga, uma para cada desigualdade;

- Montar um quadro para os cálculos, colocando os coeficientes de todas as variáveis com os respectivos sinais e, na última linha, incluir os coeficientes da função objectivo transformada;
- Estabelecer uma solução básica inicial, usualmente atribuindo valor zero às variáveis originais e achando valores positivos para as variáveis de folga;
- Como próxima variável a entrar na base, escolher a variável não básica que oferece, na última linha, a maior contribuição para o aumento da função objectivo (ou seja, tem o maior valor negativo). Se todas as variáveis que estão fora da base tiverem coeficientes nulos ou positivos nesta linha, a solução actual é ótima. Se alguma dessas variáveis tiver coeficiente nulo, isto significa que pode ser introduzida na base sem aumentar o valor da função objectivo. Isso quer dizer que temos uma solução ótima, com o mesmo valor da função objectivo.
- Para escolher a variável que deve deixar a base, deve-se realizar o seguinte procedimento:
 - Dividir os elementos da última coluna pelos correspondentes elementos positivos da coluna da variável que vai entrar na base. Caso não haja elemento nenhum positivo nesta coluna, o processo deve parar, já que a solução seria ilimitada.
 - O menor quociente indica a equação cuja respectiva variável básica deverá ser anulada, tornando-se variável não básica.
 - Usando operações válidas com as linhas da matriz, transformar o quadro de cálculos de forma a encontrar a nova solução básica. A coluna da nova variável básica deverá se tornar um vector identidade, onde o elemento 1 aparece na linha correspondente à variável que está sendo anulada.
 - Retornar ao passo 4 para iniciar outra iteração.

2.3.3 - Algoritmo do Gradiente Reduzido Generalizado

Muitos problemas não lineares são formulados como um problema de optimização e avaliados pelo método do gradiente reduzido generalizado [26,27]. A abordagem mais directa para resolver um problema de programação não-linear seria linearizar o problema e, sucessivamente, aplicar técnicas de programação linear, ou seja, linearizar sucessivamente as restrições e a função objectivo do problema não linear onde a cada iteração encontra-se soluções básicas admissíveis (SBA) até atingir a solução ótima.

O método de optimização não linear designado Gradiente Reduzido Generalizado, com derivadas calculadas numericamente, tem-se revelado, na maioria dos casos, como uma ferramenta robusta, na prática é o melhor algoritmo actual que utiliza o processo de linearização iterativa [28]. Este método de optimização consiste essencialmente em calcular iterativamente o gradiente reduzido da função objectivo, ou seja consiste em determinar as derivadas desta função em ordem as variáveis de decisão.

O algoritmo GRG [29] pode ser resumido numa sequência de procedimentos.

Passo 1: Define-se X_L como o vector das variáveis independentes, e X_D o vector das variáveis dependentes. Na etapa k , linearizar as restrições do ponto inicial x_k e calcula-se o gradiente reduzido.

$$(g_R^k)^T = \left[\frac{\partial f^k}{\partial x_L^k} \right]^T - \left[\frac{\partial f^k}{\partial x_D^k} \right]^T \left[\frac{\partial h^k}{\partial x_D^k} \right]^{-1} \left[\frac{\partial h^k}{\partial x_L^k} \right] \quad (2.2)$$

Passo 2: Determinar os componentes de pesquisa para as variáveis independentes.

Passo 3: Determinar os componentes de pesquisa para as variáveis dependentes.

Passo 4: Melhorar o valor da função objectivo.

Passo 5: Usar o método de Newton, de forma a recuperar a admissibilidade das variáveis dependentes.

Passo 6: O processo termina após a quarta etapa onde se verifica $|\Delta_i^k| < \varepsilon_i, i = 1, \dots, n$, onde ε_i é um número pequeno, cuja magnitude depende da escala de x_i . Finalmente obtém-se a solução x^* dos vectores X_L e X_D .

2.3.4 - Optimização da Estratégia de Operação de um Reservatório

Segundo o autor [31] a simulação da operação do reservatório (albufeira) foi realizada com base em dois tipos de modelos para avaliar os benefícios da previsão. Um modelo de operação sem previsão e outro com previsão de vazão afluente. Regras de operação simples, na forma de curvas-guia lineares, foram utilizadas nos casos de operação com e sem previsão de vazões afluentes. As curvas-guia foram optimizadas através de uma técnica de parametrização, simulação e optimização utilizando um algoritmo evolutivo semelhante a um algoritmo genético.

Como base para as análises foram utilizados dados relativos ao reservatório de Três Marias, no Rio São Francisco, Brasil, Essas previsões reais de vazão foram calculadas através de um modelo hidrológico distribuído que utiliza como dados de entrada, previsões de chuva do modelo atmosférico regional ETA.

Para avaliar o potencial benefício das previsões de vazão na operação do reservatório, foram realizados testes considerando às vazões afluentes observadas como “previsões perfeitas de vazão”.

Os resultados com previsões perfeitas de vazão mostram que pode haver um benefício relativo se forem utilizadas previsões de vazão de longo prazo com dois meses de antecedência, e se a operação for planeada com essa mesma antecedência. A operação baseada em previsões de prazos ou horizontes mais curtos apresenta benefícios inferiores, mas ainda assim significativos.

Posteriormente, foram realizados testes utilizando as previsões reais de vazão. Os benefícios obtidos com as previsões reais de curto prazo são inferiores aos benefícios obtidos com as previsões perfeitas de curto prazo, como era esperado. Entretanto, com as previsões reais de vazão, foram obtidos benefícios superiores a 50% dos que seriam esperados com a previsão perfeita (vazões observadas).

Os resultados obtidos são promissores e mostram que há vantagens evidentes na utilização de previsões de chuva para se obter previsões de vazão na operação de reservatórios com usos múltiplos, quando também é associada à optimização sistémica de um aproveitamento hidroeléctrico.

Capítulo 3

Modelo de Optimização

3.1- Introdução

O objectivo da presente dissertação, como referido anteriormente, é desenvolver um modelo que optimize a estratégia de operação das CMH. Isto é, melhorar a exploração do recurso para a produção de energia. As CMH com regularização (que possuem uma albufeira) têm a capacidade de armazenamento de água que lhes permitem adaptar o caudal afluente. A estratégia deste tipo de centrais é a produção de energia eléctrica nas horas de cheia e ponta, armazenando água nas horas de vazio, conseguindo desta forma produzir nas horas de tarifa mais elevada (horas de cheia e de ponta).

3.2- Estratégia de Operação

É extremamente importante ter conhecimento do comportamento da produção das CMH, para que seja possível identificar o regime de exploração. Os aproveitamentos hidroeléctricos visam a produção de energia eléctrica, a partir da energia potencial da água dos rios que, em regime natural, se dissipa ao longo do leito. Os aproveitamentos hidroeléctricos podem funcionar como fios de água, isto é, aproveitar a energia dos caudais fluviais em regime natural, ou podem armazenar, na albufeira, os caudais que ocorrem em regime natural, para a utilização em condições mais vantajosas, isto é, durante as pontas de consumo, ou durante os períodos mais secos, alterando o regime natural de caudais afluentes ao aproveitamento. Quanto maior for a capacidade da albufeira relativamente aos caudais afluentes, maior é a eficiência com que o aproveitamento produz energia nas horas de cheia e ponta de consumo ou nos períodos secos, sendo, conseqüentemente, maior o valor da energia produzida. Tendo em consideração a informação da produção anual de uma CMH e do seu regime de exploração pode retirar-se a estratégia de operação aplicada aos aproveitamentos desta natureza.

Como se pode observar na Figura 8, a CMH (central A) apresenta uma produção praticamente constante em períodos de tempo ao longo do ano. Também é importante referir a relação da pluviosidade com a produção da CMH, neste caso consegue-se observar que em certos intervalos do ano (de Março a Junho) que o respectivo aumento e diminuição da

pluviosidade em pouco afecta a amplitude de produção da central, este facto deve-se a água proveniente da chuva ser armazenada numa albufeira para ser turbinada quando exigido pelos promotores. No período de verão, pode-se observar uma redução na frequência de produção, facto este resultante das condições meteorológicas e em grande parte pela gestão do reservatório da CMH, que provavelmente não garante os níveis mínimos para a produção de energia.

Este perfil de produção é típico de uma CMH com regularização, isto porque possui a capacidade de armazenar água e produzir energia eléctrica consoante a estratégia de operação da central.

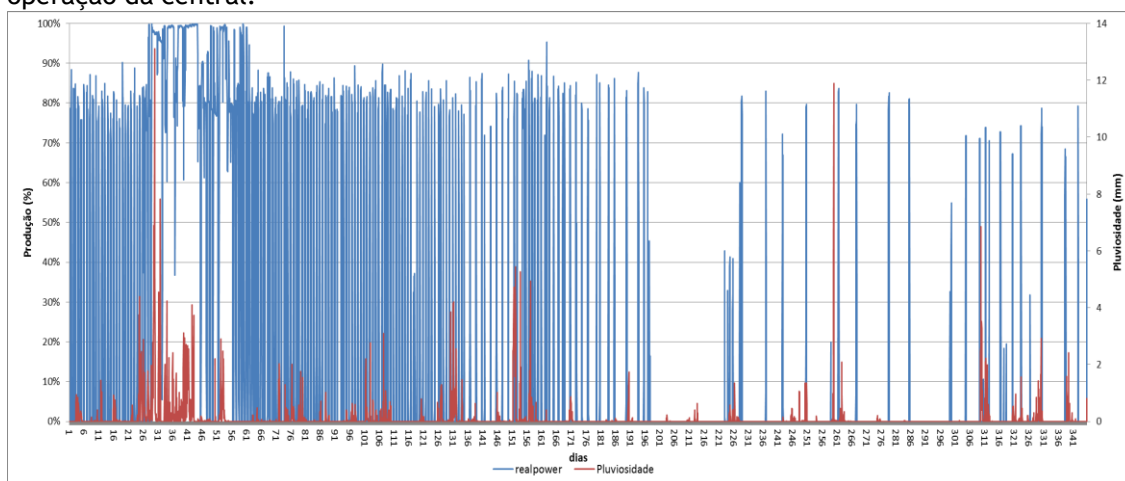


Figura 8 - Produção e Pluviosidade anual de uma CMH com regularização

A figura seguinte (Figura 9) apresenta o comportamento da produção da CMH representada na figura 8 para a primeira semana de Abril do ano de 2007. Como se pode observar existe, efectivamente, uma periodicidade ao longo de toda a semana. Ou seja, existe o arranque do grupo gerador da CMH às 8 horas e um término de produção por volta das 16 horas, que pertence ao período de horas de cheia e de ponta, das 8h às 22h no horário de inverno. Concretamente, é neste período que a remuneração pelo fornecimento de energia entregue à rede, é superior [16], o que indicia as possíveis razões para a produção de electricidade por parte dos promotores. Se produzirem apenas nas horas de cheia, conseguem maximizar o valor do factor KMHO (1.2) da remuneração para seu valor máximo.

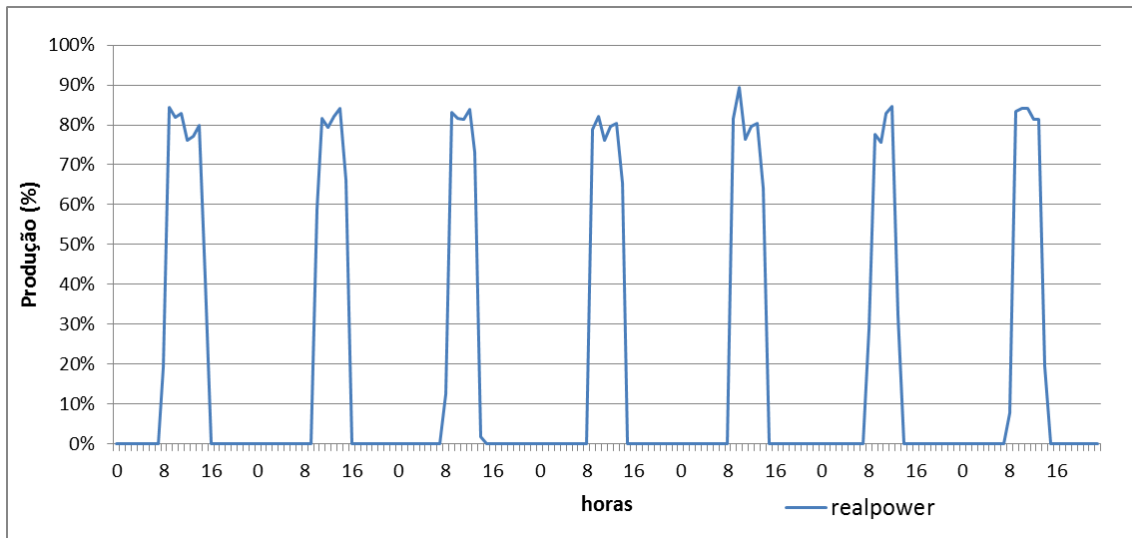


Figura 9 - Perfil de Produção (1ª semana de Abril de 2007) (central A).

Alguns produtores dão preferência a uma produção contínua de energia, mesmo que para tal seja necessário encurtar o número de horas de produção (Figura 10). Contrariamente, outros optam pela continuidade do intervalo de tempo, apesar de resultar numa diminuição da amplitude da produção (Figura 11).

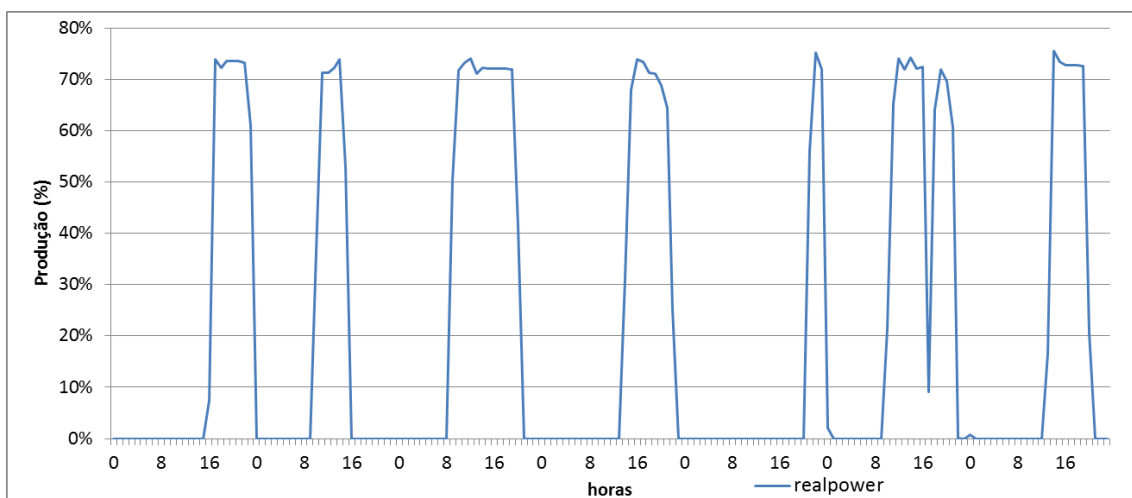


Figura 10 - Estratégia de Operação 1.

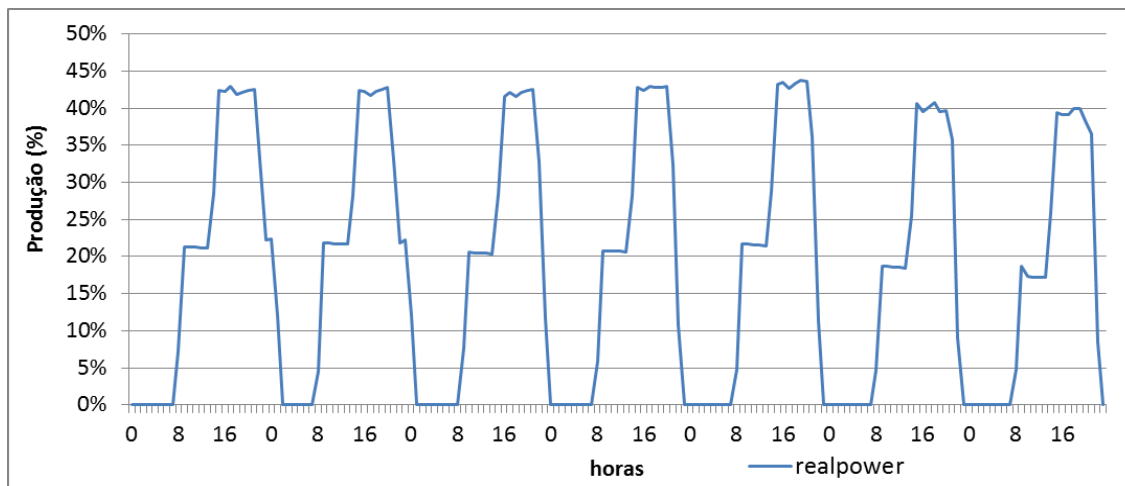


Figura 11 - Estratégia de Operação 2.

Observando agora o perfil de produção da CMH (central B) na Figura 12, consegue-se identificar uma forte dependência da produção face a pluviosidade, o que evidencia que a CMH possui um regime de exploração a fio-de-água com reduzida capacidade de regulação e portanto fortemente dependente da pluviosidade. Estas centrais apresentam uma produção contínua de energia, que é uma característica típica destas CMH, essa continuidade pode ser comprometida por motivos de manutenção da central ou pela ausência de caudal turbinável.

A estratégia desse tipo de centrais é a extracção da maior quantidade de energia do recurso disponível de forma a aumentar a parcelas da remuneração (PV, PF e PA) (1.1) que dependem essencialmente do valor energia produzida e não o período de tempo em que esta foi produzida, isto é, que não conseguem regular a produção de modo a modelizar o factor KMHO (1.2).

No entanto convém evidenciar um pormenor importante, a existência de pluviosidade no mês de Agosto e Setembro e a ausência de produção nesse mesmo período. Este facto é explicado pela temperatura elevada nessas alturas do ano, onde os solos se apresentam áridos e secos. Assim, a água que precipita é insuficiente para provocar um aumento do caudal dos rios e conseqüente produção, uma vez que a água irá infiltrar-se no solo não originando escoamento superficial.

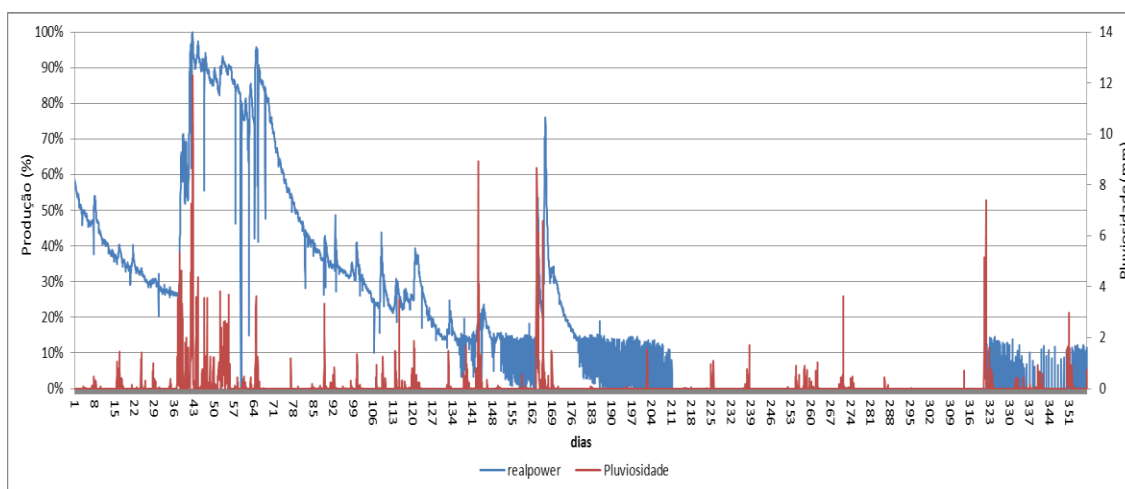


Figura 12 - Produção e Pluviosidade anual de uma CMH típica de fio de água.

As centrais a fio de água não conseguem regularizar o caudal, ou seja, não têm a capacidade de armazenar água, apenas usam o caudal instantâneo do rio. A figura 13 evidencia bem a incapacidade da regularização horária da CMH, não existe um comportamento periódico em degrau (ON-OFF) típico das centrais com albufeira, é esta particularidade que deferência as CMH a fio de água das CMH a albufeira (Figura 14).

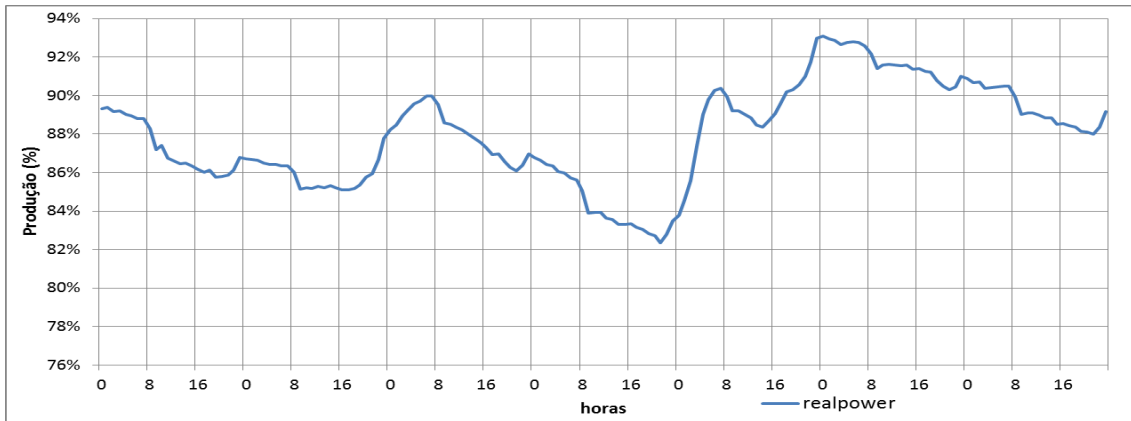


Figura 13 - Perfil de Produção (1ª semana de Fevereiro de 2007) central B.

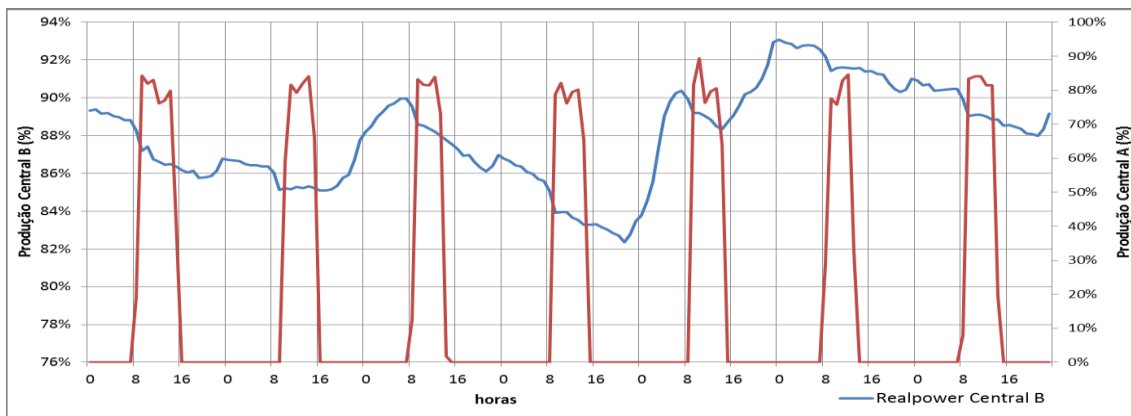


Figura 14 - Diferença de Perfis de Produção.

É importante referir o caso das centrais a fio de água que têm uma capacidade reduzida de regularizar o caudal que na grande maioria não passa de algumas horas, como por exemplo a central C apresentada na figura abaixo (Figura 15).

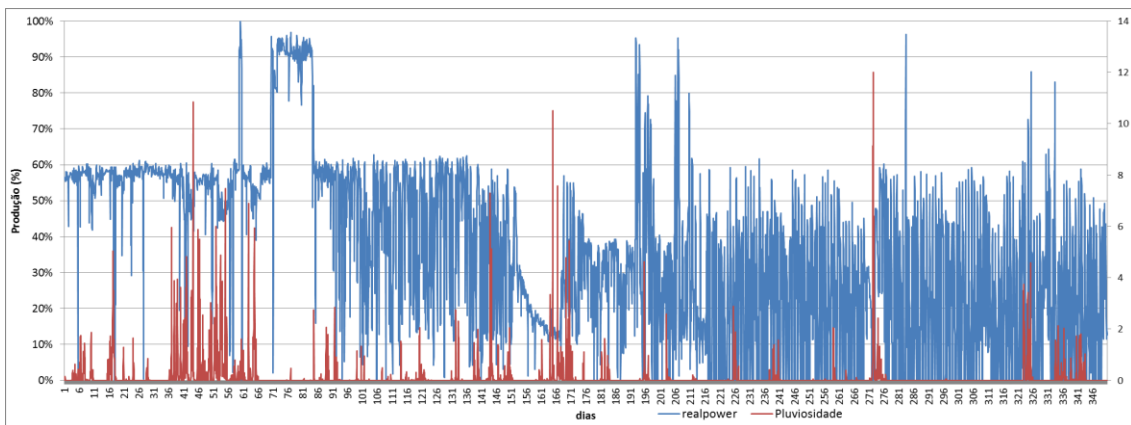


Figura 15 - Produção e Pluviosidade anual da central C fio de água.

Analisando a figura seguinte (Figura 12), pode-se observar que a estratégia de operação da central C consiste em diminuir parte da produção aas horas de vazio (das 22h às 8h) e aumentar a produção de energia ao longo das horas de cheia e ponta (tal facto pode ser expectável nas áreas assinaladas a vermelho na figura), da mesma forma que as CMH de albufeira (perfil em degrau). Mas estas centrais a fio de água não apresentam as mesmas competências de controlo, porque apenas conseguem regularizar a sua produção para breves intervalos de tempo.

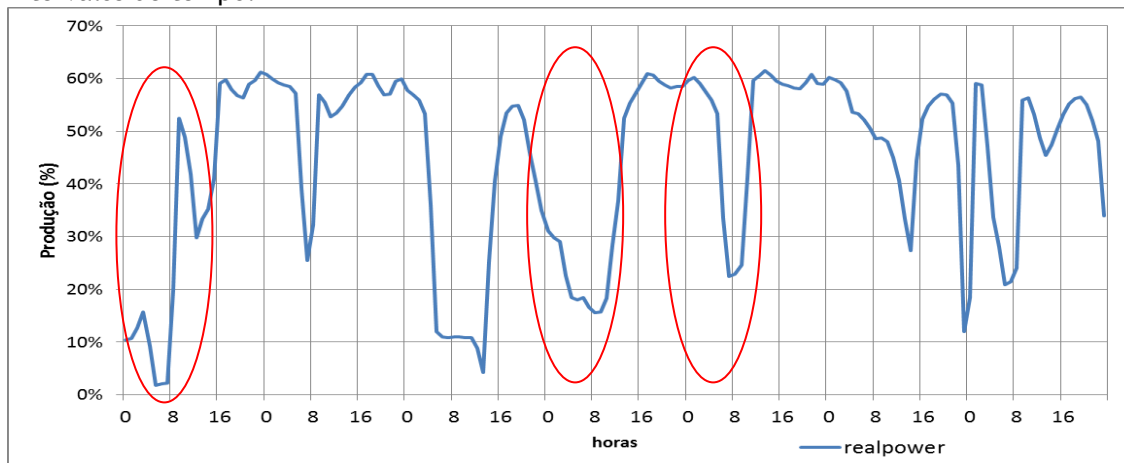


Figura 16 - Perfil de Produção (1  semana de Abril de 2007) central C.

Através da informa o retirada das estratégias de operação das várias centrais, conclui-se que apenas as CMH com regularização poderão entrar no processo de optimização (perfis das Centrais A e C), visto que o modelo proposto tem como principal objectivo transferir água das horas de vazio para as horas de cheia e ponta, sem ultrapassar a quantidade de água média diária turbinável da previsão de hidrometria. Este processo de optimização é conseguido com base nas informa es de previsão de produção e da característica de produção da CMH. Com esta optimização   possível obter um despacho diário da energia a produzir nas horas de cheia e de vazio.

A optimização das CMH puramente a fio de água levaria a invalidade do modelo visto que o despacho diário para este tipo de centrais iria solicitar uma característica importante, a capacidade de regularizar a sua produção. E na realidade estas centrais a fio de água devido ao seu perfil de produção, são fortemente dependente do caudal instantâneo do rio.

3.3- Previsão de Produção

A previsão de produção das CMH é obtida através de um modelo de previsão mini-hídrica pioneiro realizado num trabalho de disserta o por Elsa Ferraz no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores, na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) com o título de “ Optimização de Estruturas e Modelos de Previsão de Produção Mini-Hídrica” [17].

Este modelo de previsão utiliza dados de previsão meteorológica e características específicas das CMH (Figura 17).

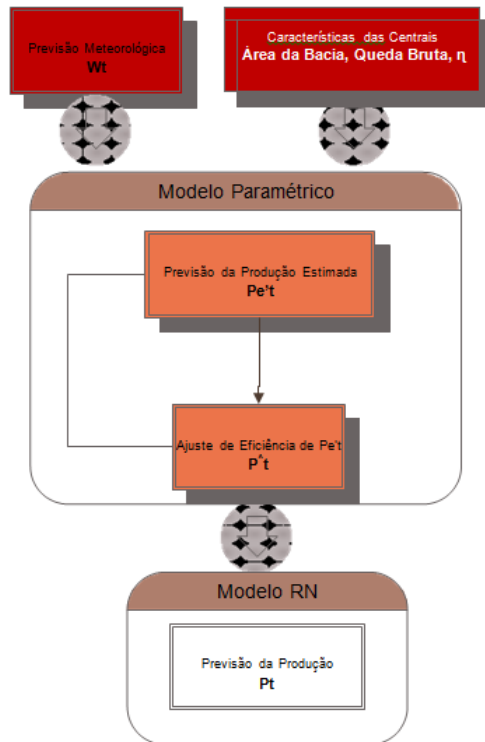


Figura 17 - Modelo de Previsão.

3.3.1. Cálculo Linearizado da Produção

$$Pe'_t = \left(Pe'_{t-1} + 9,81 \times \eta \times h_u \times \frac{W_t}{3600} \times A \times F \right) e^{-\theta_d} \quad (3.1)$$

Onde:

Pe'_t - (Variável) - Representa a produção estimada da central no instante t (kW);

Pe'_{t-1} - (Variável) - Representa a produção estimada da central no instante t-1 (KW);

η - (Constante) - Eficiência da central;

H_u - (constante) - Altura de queda útil (m);

W_t - (Variável) - Pluviosidade prevista para o ponto médio representativo da bacia hidrográfica (m/h);

A - (constante) - Área da Bacia Hidrográfica (m²);

F - (Parâmetro) - Factor que modeliza a produção em função da quantidade de pluviosidade;

θ_d - (Parâmetro) - Decaimento característicos da central.

Esse modelo paramétrico de previsão, é utilizado como forma de ter conhecimento da quantidade de água disponível, onde contempla aspectos como as afluências, quer positivas quer negativas, a que o recurso hídrico está sujeito. O componente $\frac{W_t}{3600} \times A \times F$ modeliza a percentagem de água que positivamente contribui para a produção, através da inclusão de

uma parcela que modeliza a quantidade de água que caiu na área da bacia hidrográfica. O factor F é um factor que modeliza a produção em função da quantidade de pluviosidade.

3.3.2. - Ajuste da Eficiência

Com o único propósito de ajustar a previsão segundo a característica de produção da central procede-se à realização de um modelo analítico, dado que se verificou que existia a necessidade de modelizar os valores máximos e mínimos. Assim sendo, o ajuste afinado da produção média diária (\hat{P}_t) para cada aproveitamento hidroeléctrico será realizado por recurso à (Eq. 3.2):

$$\hat{P}_t = \frac{P_{m\acute{a}x}}{1 + e^{\left(-8x \frac{Pe'_t - P'_{min} - \frac{P_{m\acute{a}x}}{2}}{P_{m\acute{a}x}} \right)}} + P_{min} \quad (3.2)$$

Onde:

$P_{m\acute{a}x}$ - (Constante) - Limite máximo de produção da central (kW);

P'_{min} - (Constante) - Limite mínimo de produção da central (kW);

Pe'_t - (Variável) - Previsão da produção estimada da central, no instante t (kW);

P'_{min} - (Constante) - Limite mínimo da previsão da produção da central (kW).

3.3.3. - Previsão da Produção Horária

$$P_t = NN(hora; \hat{P}_t) \quad (3.3)$$

Neste ponto serão introduzidas duas variáveis de entrada na Rede Neuronal (NN), as variáveis são as horas do dia, e a Previsão da produção ajustada \hat{P}_t .

As RN são uma vertente da inteligência computacional e apresentam-se, na actualidade, como uma ferramenta muito poderosa e frequentemente utilizada em aplicações que requerem inteligência artificial.

Na figura seguinte (Figura 18), pode-se observar um resultado de previsão face a produção real de uma central.

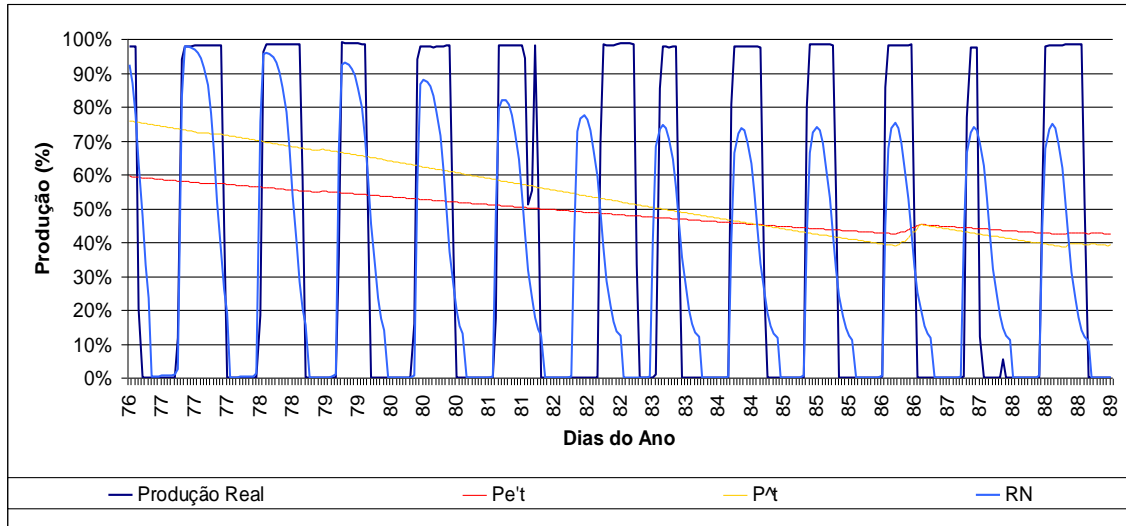


Figura 18 - Resultado do modelo de previsão [17].

O modelo apresenta uma boa previsão a curto prazo (dois a três dias), após esse intervalo de tempo verifica-se um decaimento resultante das características da central.

3.4- Característica da Produção

Um aproveitamento hidroeléctrico é caracterizado pelo seu valor de potência instalada, que indica a quantidade de energia cedida por uma fonte em cada unidade de tempo.

As CMH são caracterizadas por possuírem uma potência instalada inferior a 10MW. Em Portugal existem aproximadamente uma centena de CMH que variam a sua potência dentro desta gama.

A caracterização da produção das CMH tem uma grande importância na percepção do comportamento da central para várias gamas de potência, esta relaciona os vários pontos de funcionamento da central.

Para obter essa característica é essencial recorrer a uma análise gráfica da potência real instantânea horária " P_r " em função da média potência centrada para 24 horas " $P_{r,med}$ " ao longo do ano, mas para tal é necessário dispor da informação relativa aos dados históricos de produção da central.

A Figura 19 mostra um exemplo da característica de produção de uma CMH.

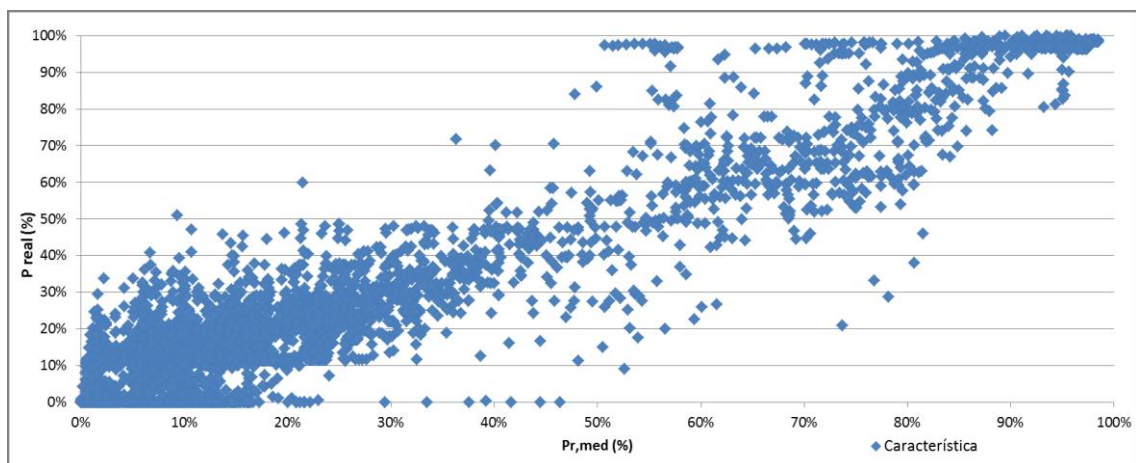


Figura 19 - Característica de produção de uma CMH.

Após a constru o gráfica, pretende-se parametrizar as curvas que vão delimitar inferiormente e superiormente a CP da central. Esta parametriza o permite obter uma área que define vários pontos de opera o da central, (ver Figura 20).

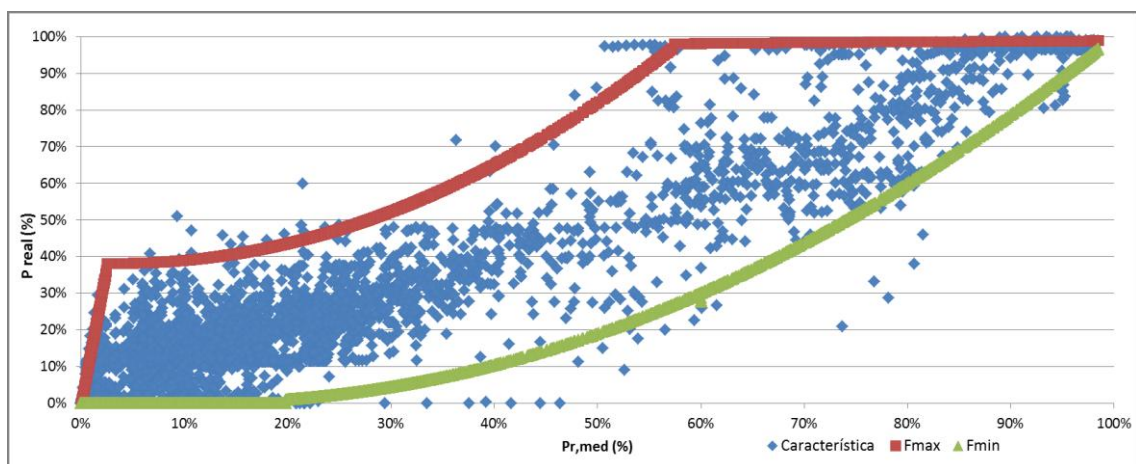


Figura 20 - Limites superior e inferior da CP da central.

As fun es das curvas F_{min} e F_{max} irão fornecer os limites de máximo e mínimo que irão limitar as variáveis de decisão do nosso modelo.

  também possível através da característica de produ o identificar a capacidade de regulariza o das CMH, isto é, para um dado valor de Produ o média consegue-se identificar vários valores de produ o instantânea, dessa forma a central consegue adaptar o caudal afluente   um intervalo de produ o consoante a estratégia.

Como se pretende efectuar uma optimiza o de todas estas informa es   necessário formular matematicamente o modelo

3.5- Formula o do Modelo de Optimiza o

O modelo de optimiza o pretende fornecer um despacho diário optimizado da quantidade de energia a produzir na CMH nas horas cheia e de vazio, com base na previsão de produ o. A variáveis de decisão do modelo serão a Produ o média nas horas de cheia $P_{med,c}$ e a Produ o média nas horas de vazio $P_{med,v}$ (8h-22h horário de inverno, 9h-23h horário de v o). Estas variáveis serão restritas por duas curvas parametrizadas que representam o

intervalo de funcionamento da central f_{min} e f_{max} (parâmetros calculados através das funções da CP da central) para uma dada potência, de maneira a que estas não adoptem pontos de funcionamento fora da característica da central.

$$F_{min}(P_{p,med}) = f_{min} \quad (3.4)$$

$$F_{max}(P_{p,med}) = f_{max} \quad (3.5)$$

Onde:

- F_{min} é a função que limita inferiormente a CP da central;
- F_{max} é a função que limita superiormente a CP da central;
- $P_{p,med}$ é a média diária da previsão de produção;

O objectivo deste modelo é uma optimização diária de todas as informações. A formulação da optimização deste modelo é a seguinte:

- **maximizar:**
$$KMHO = \frac{(1,15 \times E_{pc} + 0,8 \times E_{pv})}{(E_{pc} + E_{pv})} \quad (3.8)$$

- **Sujeito a:**
$$f_{min,c} \leq P_{med,c} \leq f_{max,c} \quad (3.9)$$

$$f_{min,v} \leq P_{med,v} \leq f_{max,v} \quad (3.10)$$

$$P_{p,med} = P_{opt,med} \quad (3.11)$$

- **Onde:**

- $$E_{pc} = P_{med,c} \times N_c \quad (3.12)$$

- $$E_{pv} = P_{med,v} \times N_v \quad (3.13)$$

- E_{pc} é a energia diária Produzida nas horas de cheia;
- $P_{med,c}$ é a Produção media diária nas horas de cheia;
- N_c é nº de horas do período de cheia, usualmente $N_c = 14$;
- E_{pv} é a energia diária Produzida nas horas de vazio;
- $P_{med,v}$ é a Produção media diária nas horas de vazio;
- N_v é nº de horas do período de vazio, usualmente $N_v = 14$;
- $P_{opt,med}$ é a Produção media diária optimizada;
- $P_{p,med}$ é a Previsão media diária da produção;

Os períodos de cheia são: horário de inverno das 8h as 22h; horário de verão das 9h as 23h.

Os períodos de vazio são: horário de inverno das 22h as 8h; horário de verão das 23h as 9h.

A função objectivo do problema é composta pela maximização do coeficiente KMHO (1.2), coeficiente que modula PV(VRD) e PF(VRD) em função do posto horário em que a electricidade tenha sido fornecida. Com intuito de aumentar a remuneração apenas com a optimização da exploração do recurso hídrico da central consoante os períodos de ponta e vazio. Esse coeficiente toma valores entre 0,8 e 1,15;

- 0,8 se apenas existir produção nas horas de vazio;
- 1,15 se apenas houver produção nos períodos de cheia;
- 1 se a produção for igual em ambos os períodos.

A condição de igualdade $P_{p,med} = P_{opt,med}$ surge de forma a impedir que a Produção média diária optimizada tenha valores superiores a Produção média diária da previsão, garantindo desse modo que a água turbinada seja a mesma para ambas. Sem esta condição o modelo poderia fornecer resultados de produção superiores, turbinando água indisponível na CMH.

Definida a formulação do modelo de optimização de todas as variáveis, importa referir a ferramenta auxiliar usada para a resolução do problema. Como foi explicado no Capítulo 1 deste trabalho, a ferramenta auxiliar utilizada foi o Solver, um aplicativo do *Microsoft Excel* de fácil manuseamento que permite a criação de diversas rotinas de cálculos e iterações matemáticas de difícil solução manual.

O *Solver* faz análises de hipóteses, isto é, efectua um processo de alteração dos valores das células variáveis para saber como essas alterações afectam a função objectivo do problema, de modo a atingir o resultado pretendido e mediante o cumprimento das restrições impostas.

A optimização numérica é baseada em algoritmos robustos de grande confiança. Para a resolução de problemas lineares utiliza-se o método *Simplex* e o método do Gradiente Reduzido Generalizado para problemas não-lineares. É este último que será usado para a resolução do modelo desenvolvido, visto tratar-se de um problema não-linear.

A inserção da formulação do modelo desenvolvido no *Solver* é simples: a célula de destino, ou seja, a função objectivo será aquela onde é calculado o coeficiente KMHO da remuneração, com o objectivo de maximizar esse valor. As células variáveis são $P_{med,c}$ e $P_{med,v}$ sendo que as restrições são aplicadas a este factor, mediante as condições estabelecidas para $f_{min,c}$, $f_{max,c}$, $f_{min,v}$, $f_{max,v}$, $P_{opt,med}$ e $P_{p,med}$.

Quando o *Solver* inicia a resolução do problema, são efectuadas várias iterações até encontrar o valor óptimo na função objectivo. Isto acontece quando o número máximo de iterações ou o tempo máximo definido foi atingido. Ocorre também quando numa sequência de 5 iterações o valor da função objectivo não varia num valor superior ao grau de convergência definido.

Com os resultados da optimização torna-se possível entregar então o despacho diário para a central.

3.6- Síntese Geral

Até este ponto foram mostradas as bases fundamentais para o funcionamento do modelo de optimização e as respectivas funcionalidades.

Importa, neste momento, mostrar e explicar todas as etapas do modelo e o encadeamento entre elas, como mostra no diagrama da Figura 21.

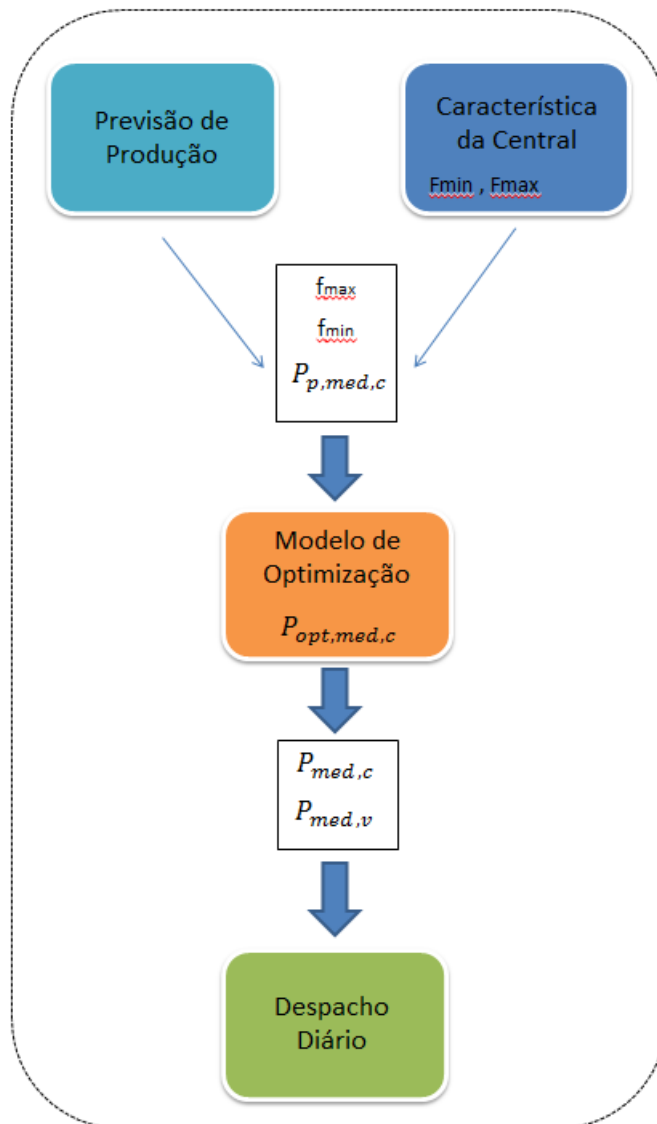


Figura 21 - Diagrama final do funcionamento do modelo de optimização.

Capítulo 4

Teste do Modelo

4.1- Introdução

Após desenvolver o modelo de optimização da estratégia de operação torna-se necessário efectuar o seu teste. Este é um passo importante, na medida em que permitirá validar o modelo desenvolvido.

Para efectuar o teste utilizaram-se dados relativos a quatro CMH, a central A, B, C, e D pela empresa *Smartwatt*. A central A e B são CMH com albufeira, enquanto as centrais C e D são centrais a fio de água com capacidade mínima de regularização.

A partir destes dados serão obtidos as CP's de cada central, e a previsão de produção para algumas semanas de produção dessas centrais.

4.2- Parametrização da Característica de Produção

Inicialmente é necessário obter a característica de produção de cada central, de forma a conseguir as respectivas funções limites que serão aplicadas no modelo de optimização. Nas figuras seguintes pode-se observar as várias características específicas de cada central, obtidas através da parametrização das curvas. Nomeadamente Central A (Figura 22).

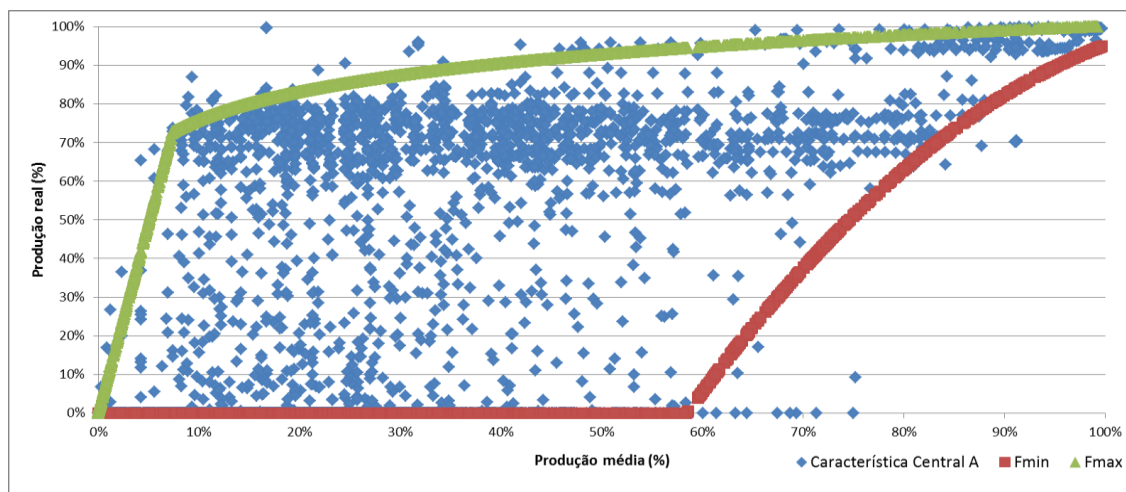


Figura 22 - Característica Central A.

Funções limites da Central A:

$$F_{min} = \begin{cases} 0, & 0 \leq P_{r,med} < 2642 \\ -7 \times 10^{-4} \times (P_{r,med})^2 + 7,31 \times P_{r,med} - 14435, & P_{r,med} \geq 2642 \end{cases} \quad (4.1)$$

$$F_{max} = \begin{cases} 9,8534 \times P_{r,med} , & 0 \leq P_{r,med} < 334,48 \\ 476,96 \times \ln(P_{r,med}) + 512,99 , & P_{r,med} \geq 334,48 \end{cases} \quad (4.2)$$

Característica de Produção da Central B, ver Figura 23.

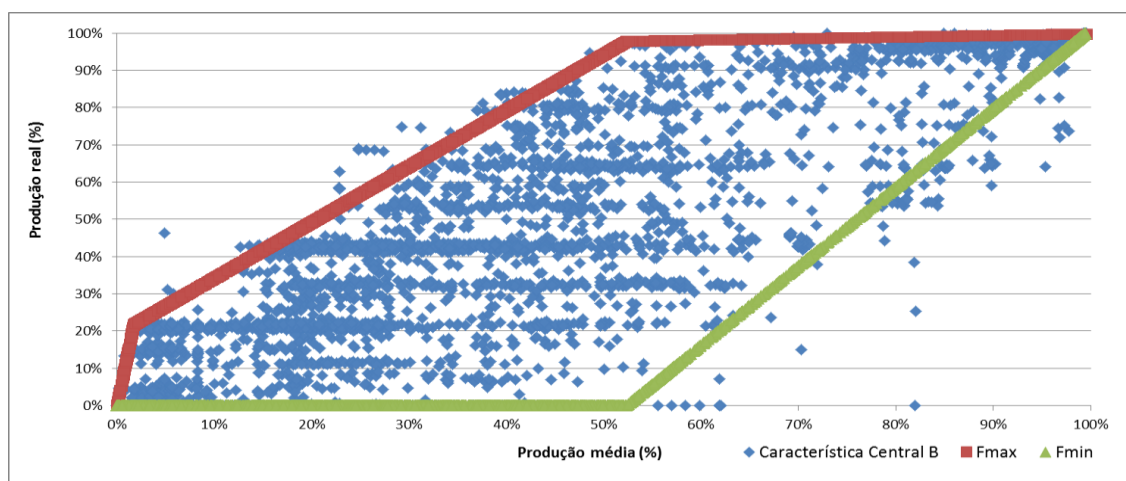


Figura 23 - Característica Central B.

Funções limites da Central B:

$$F_{min} = \begin{cases} 0, & 0 \leq P_{r,med} < 4855,05 \\ 2,1206 \times P_{r,med} - 10296, & P_{r,med} \geq 4855,05 \end{cases} \quad (4.3)$$

$$F_{max} = \begin{cases} 12,806 \times P_{r,med} , & 0 \leq P_{r,med} < 157,93 \\ 1,502 \times P_{r,med} + 1785,3 , & 157,93 \leq P_{r,med} < 4857,01 \\ 0,041 \times P_{r,med} + 8879,2 , & P_{r,med} \geq 4857,01 \end{cases} \quad (4.4)$$

Característica de Produção da Central C representada em seguida (Figura 24).

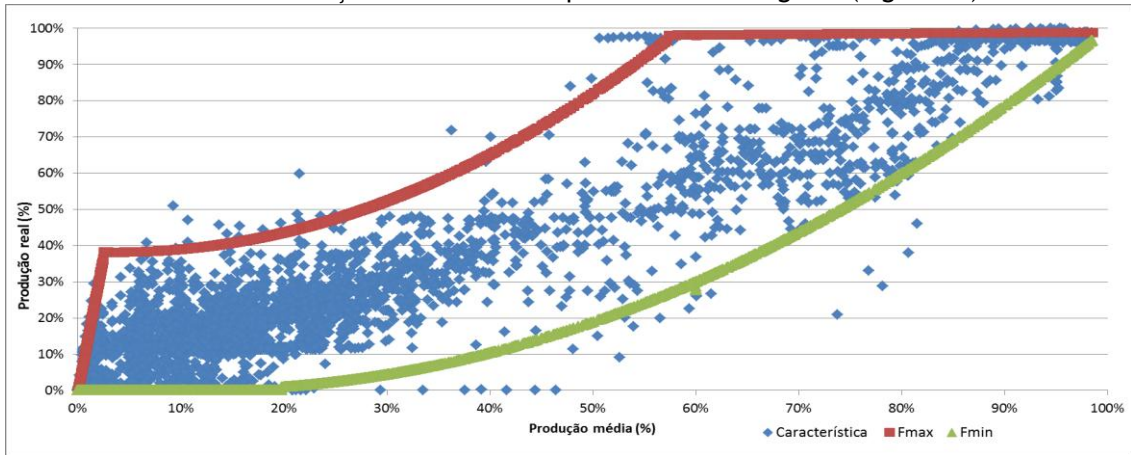


Figura 24 - Característica Central C.

Funções limites da Central B:

$$F_{min} = \begin{cases} 0 , & 0 \leq P_{r,med} < 2024,79 \\ 1,25 \times 10^{-4} \times (P_{r,med})^2 - 0,2969 \times P_{r,med} + 182,382 , & P_{r,med} \geq 2024,79 \end{cases} \quad (4.5)$$

$$F_{max} = \begin{cases} 15,014 \times P_{r,med} , & 0 \leq P_{r,med} < 251,77 \\ 2 \times 10^{-4} \times (P_{r,med})^2 - 0,151 \times P_{r,med} + 3939 , & 251,77 \leq P_{r,med} < 5867,67 \\ 8814,1 \times (P_{r,med})^{0,015} , & P_{r,med} \geq 5867,67 \end{cases} \quad (4.6)$$

Característica de Produção da Central D (Figura 25).

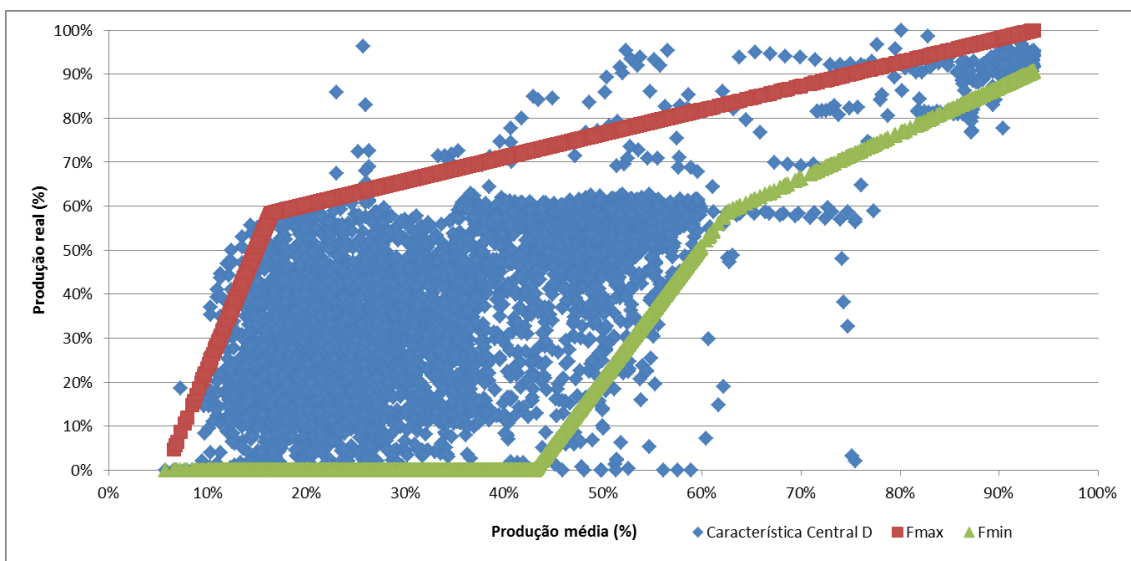


Figura 25 - Característica Central D.

Funções limites da Central D:

$$F_{min} = \begin{cases} 0, & 254,25 \leq P_{r,med} < 1920,98 \\ 12,806 \times P_{r,med}, & 1920,98 \leq P_{r,med} < 2789,99 \\ 3,02 \times P_{r,med} + 5801,8, & P_{r,med} \geq 2789,99 \end{cases} \quad (4.7)$$

$$F_{max} = \begin{cases} 5,465 \times P_{r,med} - 1389,5, & 254,25 \leq P_{r,med} < 730,70 \\ 0,539 \times P_{r,med} - 2209,8, & P_{r,med} \geq 730,70 \end{cases} \quad (4.8)$$

4.3- Aplicação do Modelo e Resultados

Numa primeira fase foi realizado o teste ao modelo com a previsão de produção para sete dias, o modelo será aplicado para cada uma das centrais à duas semanas do ano 2008, respectivamente à primeira semana de Abril (primavera, períodos de maior produção) e à primeira semana de Julho (verão, períodos de menor produção). Os resultados do modelo podem ser visualizados de seguida.

4.3.1. - Central A

Os resultados da Central A para a primeira semana de Abril de 2008 são os seguintes.

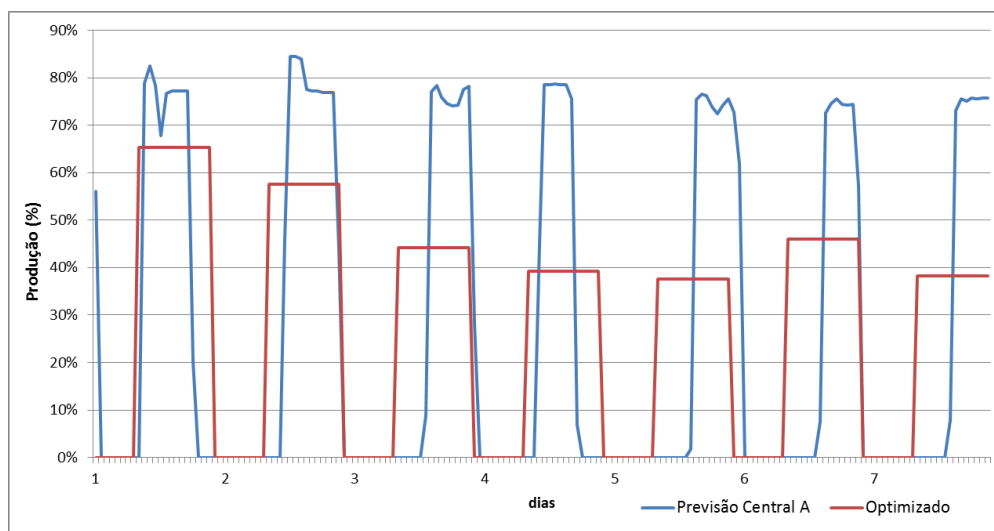


Figura 26 - Resultado Otimização Central A, Abril.

Tabela 3 - Aplicação do modelo Central A, Abril.

Dia		Potência Média		fmax	fmin		Med.P.real	Med.Pr.Opt		F.KMHO
1	h. vazio	0,000		4201,865	0,000					1,15
	h. cheia	2959,064		4118,759	0,000		1726,121	1726,121		
2	h. vazio	0,000		3998,231	0,000					1,15
	h. cheia	2604,111		4056,943	0,000		1519,065	1519,065		
3	h. vazio	0,000		4056,943	0,000					1,15
	h. cheia	2000,547		3929,390	0,000		1166,986	1166,986		
4	h. vazio	0,000		3951,097	0,000					1,15
	h. cheia	1773,706		3871,170	0,000		1034,662	1034,662		
5	h. vazio	0,000		3845,457	0,000					1,15
	h. cheia	1701,297		3851,006	0,000		992,423	992,423		
6	h. vazio	0,000		3961,177	0,000					1,15
	h. cheia	2085,224		3949,444	0,000		1216,381	1216,381		
7	h. vazio	0,000		3836,227	0,000					1,15
	h. cheia	1727,536		3858,410	0,000		1007,729	1007,729		

Tabela 4 - Resultados Semanal da Remuneração Central A, Abril.

	KMHO	PV(VRD)	PF(VRD)	VRD
Previsão	1,12	7485,15	490,92	16.303,34 €
Optimizado	1,15	7485,15	490,92	16.633,60 €

A otimização da previsão de produção da central A, para à primeira semana de Abril, apresenta resultados importantes. Como se pode verificar pela Figura 26, o traçado da produção otimizada apresenta-se uniforme, conseguindo passar parte da produção nas horas de vazio para as horas de ponta, produção entre as 9h e as 23h (horário de verão) aumentando o coeficiente KMHO (Tabela 4) e consequentemente à sua remuneração. Pela análise da Tabela 3 pode-se verificar que todas as restrições impostas pelo modelo foram cumpridas.

Resultados da primeira semana de Julho de 2008:

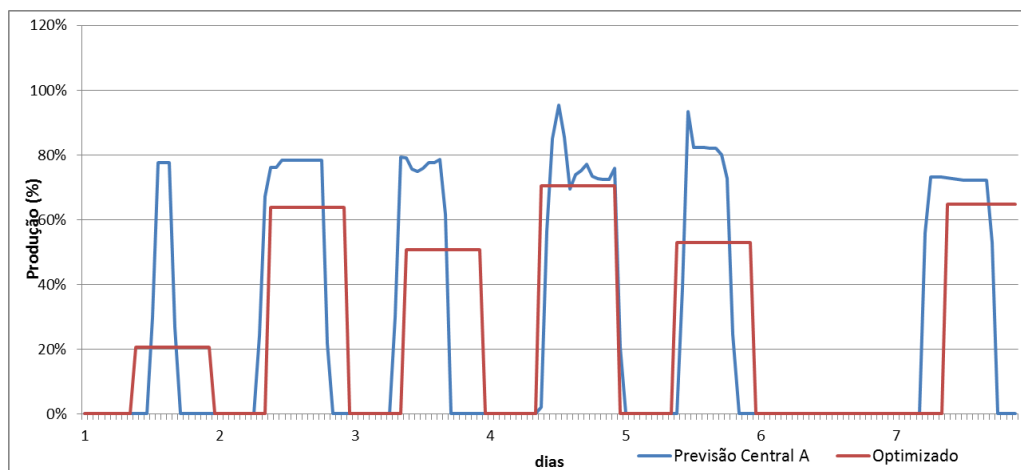


Figura 27 - Resultado Otimização Central A, Julho.

Tabela 5 - Aplicação do modelo Central A, Julho.

Dia		Potência Média		fmax	fmin		Med.P.real	Med.Pr.Opt		F.KMHO
1	h. vazio	0,000		4025,440	0,000					1,15
	h. cheia	935,019		3561,437	0,000		545,428	545,428		
2	h. vazio	0,000		3694,388	0,000					1,15
	h. cheia	2883,664		4106,272	0,000		1682,137	1682,137		
3	h. vazio	0,000		4115,810	0,000					1,15
	h. cheia	2295,288		3995,877	0,000		1338,918	1338,918		
4	h. vazio	0,000		3915,051	0,000					1,15
	h. cheia	3188,718		4154,918	0,000		1860,086	1860,086		
5	h. vazio	0,000		4164,879	0,000					1,15
	h. cheia	2395,305		4016,510	0,000		1397,261	1397,261		
6	h. vazio	0,000		4002,923	0,000					0
	h. cheia	0,000		0,000	0,000		0,000	0,000		
7	h. vazio	0,000		3537,731	0,000					1,15
	h. cheia	2932,074		4114,326	0,000		1710,376	1710,376		

Tabela 6 - Resultados Semanal da Remuneração Central A, Julho.

	KMHO	PV(VRD)	PF(VRD)	VRD
Previsão	1,11	7373,55	486,60	15.936,06 €
Optimizado	1,15	7373,55	486,60	16.385,60 €

Os resultados de optimização para semana em estudo, apresentam-se semelhantes a primeira semana de Abril, em amplitude de produção bem como em quantidade de energia produzida. Isto deve-se ao regime de exploração em albufeira da central, e à capacidade de regularizar o seu caudal, mantendo um produção praticamente constante ao longo do ano, excepto nos períodos climatéricos mais rigorosos (verão) onde o recurso não é tão abundante.

O objectivo de optimizar a produção nas horas de cheia foi conseguido, o traçado da previsão (Figura 27) revela o início de produção antes das 9h que foi totalmente transferida para os períodos de cheia. A remuneração é ligeiramente superior (Tabela 6), e todos os parâmetros da formulação matemática do modelo foram satisfeitos (5).

4.3.2. - Central B

A Central B também possui o mesmo regime de exploração da Central A, exploração com albufeira, só que esta apresenta um valor de potência instalada superior.

Os resultados seguintes mostram a aplicação do modelo aos dados da primeira semana de Abril de 2008.

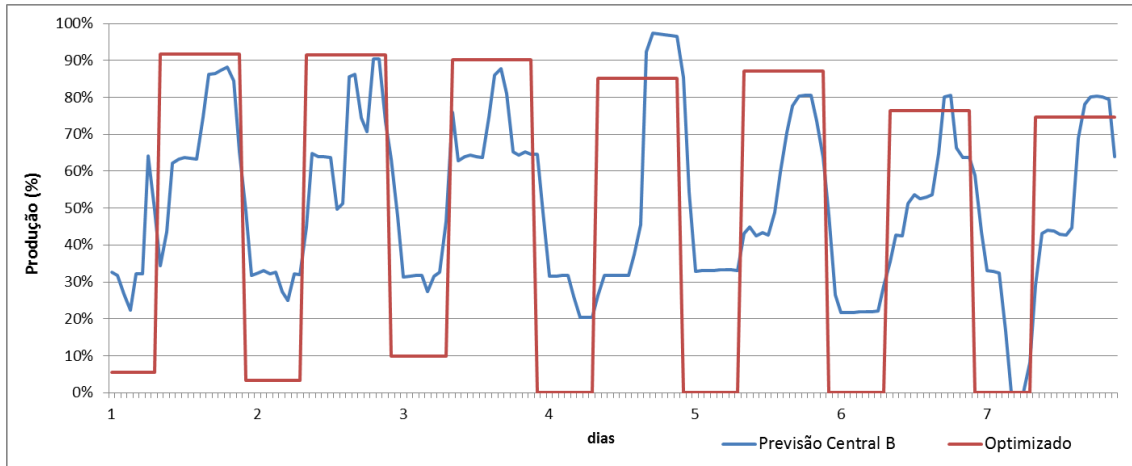


Figura 28 - Resultado Otimização Central B, Abril

Tabela 7 - Aplicação do modelo Central B, Abril.

Dia		Potência Média		fmax	fmin		Med.P.real	Med.Pr.Opt		F.KMHO
1	h. vazio	504,585		9091,551	504,585		5179,115	5179,115		1,135792
	h. cheia	8518,064		9093,097	583,248					
2	h. vazio	297,479		9087,479	297,479		5082,292	5082,292		1,141464
	h. cheia	8500,015		9089,099	379,862					
3	h. vazio	907,747		9099,477	907,747		5260,104	5260,104		1,124833
	h. cheia	8368,931		9096,442	753,375					
4	h. vazio	0,000		9080,578	0,000		4614,010	4614,010		1,15
	h. cheia	7909,732		8715,082	0,000					
5	h. vazio	0,000		9081,480	0,000		4714,271	4714,271		1,15
	h. cheia	8081,607		8865,663	0,000					
6	h. vazio	0,000		8177,058	0,000		4141,250	4141,250		1,15
	h. cheia	7099,286		8005,043	0,000					
7	h. vazio	0,000		7727,974	0,000		4044,844	4044,844		1,15
	h. cheia	6934,018		7860,251	0,000					

Tabela 8 - Resultados Semanal da Remuneração Central B, Abril.

	KMHO	PV(VRD)	PF(VRD)	VRD
Previsão	1,06	28543,01	1872,03	59.418,68 €
Optimizado	1,14	28543,01	1872,03	63.086,92 €

A análise aos resultados da primeira semana relativa ao mês de Abril permite observar (Figura 28) uma otimização onde a produção nas horas de vazio foi consideravelmente diminuída, aumentando assim o valor da remuneração da central (Tabela 8).

44 Teste do Modelo

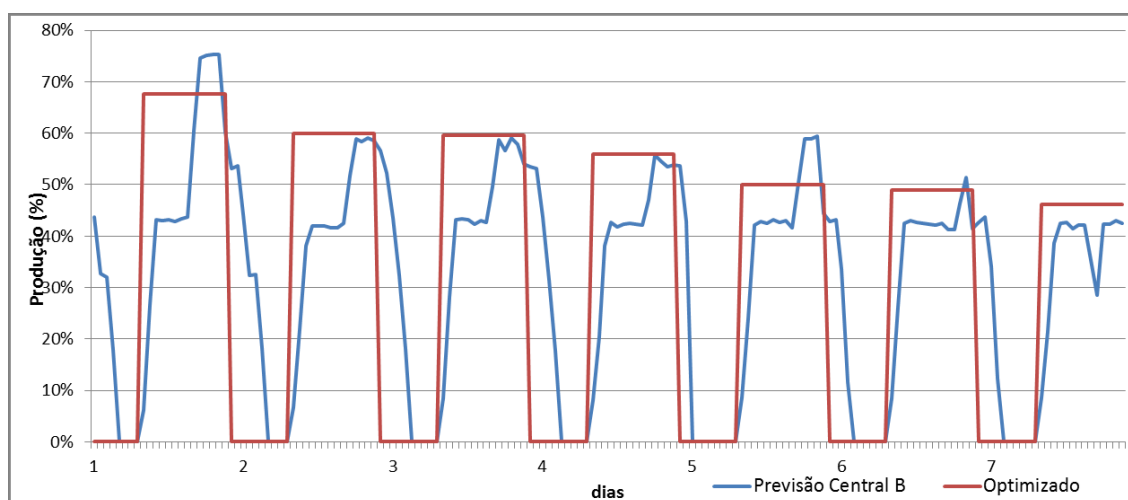


Figura 29 - Resultado Optimização Central B, Julho.

Tabela 9 - Aplicação do modelo Central B, Julho.

Dia		Potência Média	fmax	fmin	Med.P.real	Med.Pr.Opt	F.KMHO
1	h. vazio	0,000	7386,605	0,000			1,15
	h. cheia	6277,946	7285,461	0,000	3662,135	3662,135	
2	h. vazio	0,000	7288,512	0,000			1,15
	h. cheia	5564,464	6660,374	0,000	3245,938	3245,937	
3	h. vazio	0,000	6477,173	0,000			1,15
	h. cheia	5522,321	6623,452	0,000	3221,354	3221,354	
4	h. vazio	0,000	6603,896	0,000			1,15
	h. cheia	5197,232	6338,638	0,000	3031,719	3031,719	
5	h. vazio	0,000	5740,773	0,000			1,15
	h. cheia	4632,232	5843,637	0,000	2702,135	2702,135	
6	h. vazio	0,000	6044,438	0,000			1,15
	h. cheia	4543,304	5765,726	0,000	2650,260	2650,260	
7	h. vazio	0,000	5774,565	0,000			1,15
	h. cheia	4283,661	5538,251	0,000	2498,802	2498,802	

Tabela 10 - Resultados da Remuneração Central B, Julho.

	KMHO	PV(VRD)	PF(VRD)	VRD
Previsão	1,07	18154,66	1190,70	38.058,86 €
Optimizado	1,15	18154,66	1190,70	40.343,68 €

A semelhança dos resultados obtidos anteriormente, os valores referentes a semana de Julho sofreram uma melhoria ao nível da tarifação da central. Também foi possível trasladar parte da produção dos períodos de vazio para cheia e ponta (Tabela 10).

Em Ambas as centrais foram respeitadas as restrições impostas pelo modelo de optimização.

4.3.3. - Central C

A central C, ao contrário das duas centrais anteriores, é uma CMH a fio de água com alguma capacidade de regularização. Estas centrais apresentam perfis de produção contínuos com uma maior amplitude de produção nos períodos de maior hidrometria (Figura 30), e de produção escalonada de menor amplitude nos meses de verão (Figura 31).

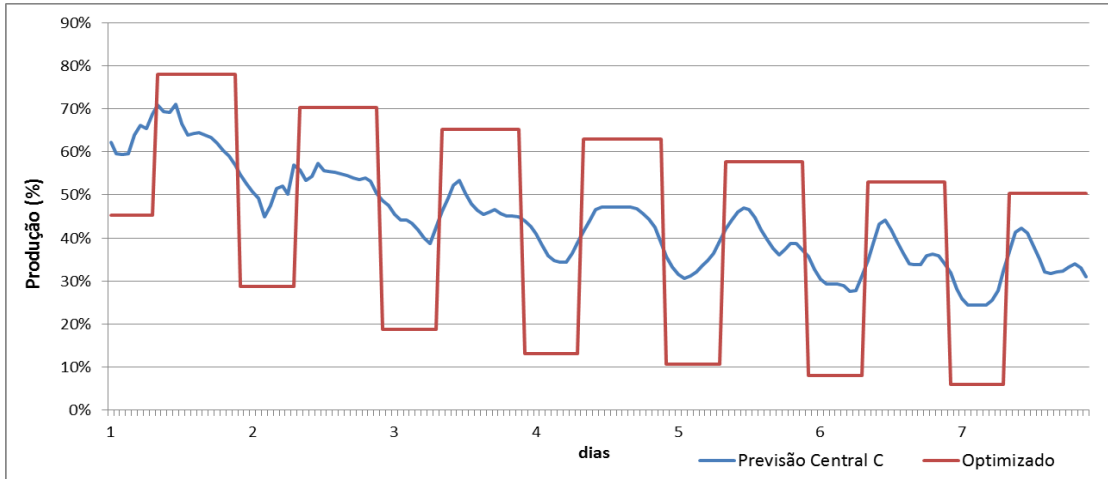


Figura 30 - Resultado Otimização Central C, Abril.

Tabela 11 - Aplicação do modelo Central C, Abril.

Dia		Potência Média	fmax	fmin	Med.P.real	Med.Pr.Opt	F.KMHO
1	h. vazio	4628,029	10071,624	4628,029	6578,854	6578,854	1,047411
	h. cheia	7972,301	10056,578	3639,285			
2	h. vazio	2939,698	10043,497	2939,698	5420,583	5420,583	1,070911
	h. cheia	7192,645	8998,663	2245,851			
3	h. vazio	1925,887	8384,877	1925,887	4693,479	4693,479	1,09016
	h. cheia	6670,331	7637,442	1542,481			
4	h. vazio	1341,013	7237,920	1341,013	4319,594	4319,594	1,104726
	h. cheia	6447,151	7019,815	1232,256			
5	h. vazio	1095,351	6742,379	1095,351	3903,615	3903,615	1,109079
	h. cheia	5909,517	6398,367	928,175			
6	h. vazio	826,559	6185,827	826,559	3511,531	3511,531	1,115673
	h. cheia	5429,368	5875,983	681,165			
7	h. vazio	601,385	5702,396	601,385	3255,677	3255,677	1,123062
	h. cheia	5151,600	5568,256	540,701			

Tabela 12 - Resultados da Remuneração Central C, Abril.

	KMHO	PV(VRD)	PF(VRD)	VRD
Previsão	1,01	27374,4	1795,39	54.948,36 €
Otimizado	1,09	27374,4	1795,39	58.816,40 €

A remuneração para os primeiros sete dias do mês de Abril, é superior a prevista, resultado da otimização do coeficiente KMHO (1.2) onde se produziu mais energia eléctrica nas horas de cheia que originou o aumento do seu valor. Em relação as restrições do problema, estas por sua vez também foram todas cumpridas (Tabela 11).

46 Teste do Modelo

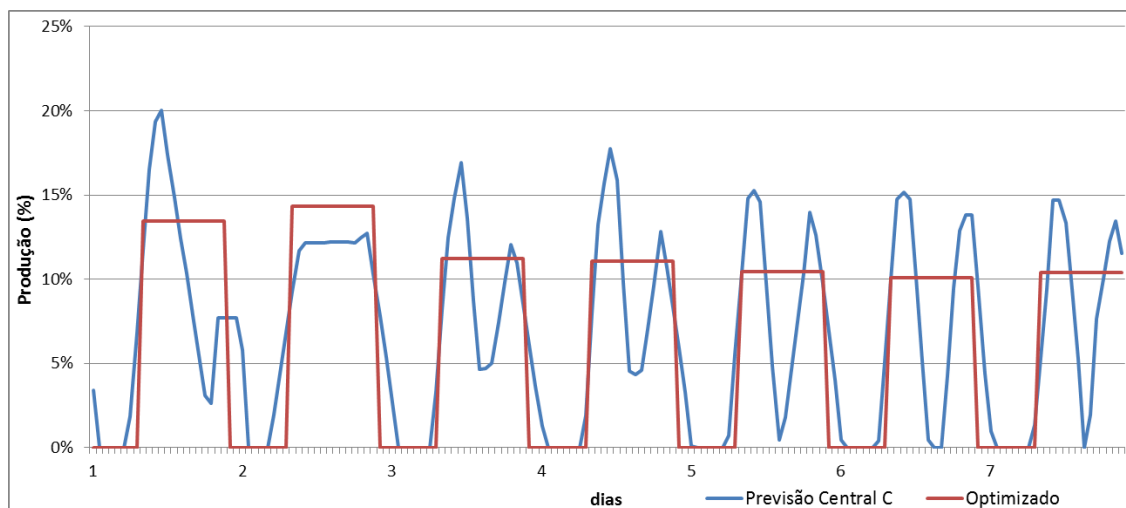


Figura 31 - Resultado Optimização Central C, Julho.

Tabela 13 - Aplicação do modelo Central C, Julho.

Dia	Potência Média	fmax	fmin	Med.P.real	Med.Pr.Opt	F.KMHO
1	h. vazio	0,000	3931,300	0,000		1,15
	h. cheia	1377,857	3947,078	0,000	803,750	
2	h. vazio	0,000	3949,257	0,000		1,15
	h. cheia	1464,018	3956,167	0,000	854,010	
3	h. vazio	0,000	3944,659	0,000		1,15
	h. cheia	1147,571	3927,743	0,000	669,417	
4	h. vazio	0,000	3924,768	0,000		1,15
	h. cheia	1134,518	3926,863	0,000	661,802	
5	h. vazio	0,000	3928,140	0,000		1,15
	h. cheia	1069,232	3922,811	0,000	623,719	
6	h. vazio	0,000	3923,402	0,000		1,15
	h. cheia	1034,304	3920,881	0,000	603,344	
7	h. vazio	0,000	3920,621	0,000		1,15
	h. cheia	1061,929	3922,393	0,000	619,458	

Tabela 14 - Resultados Semanal da Remuneração Central C, Julho.

	KMHO	PV(VRD)	PF(VRD)	VRD
Previsão	1,10	4177,87	1096,05	8.782,79 €
Optimizado	1,15	4177,87	1096,05	8.984,20 €

A figura 31 demonstra a diferença de amplitude de produção face a semana de Abril (Figura 30). Passando de 80% da potência máxima para 15%, devido às condições meteorológicas mais severas do mês de Julho. Conseguiu-se otimizar ligeiramente a remuneração e o respectivo coeficiente KMHO. Pode-se observar na Tabela 13 que os parâmetros da modelização do modelo foram respeitados, tanto os limites da CP como a igualdade de produção média.

4.3.4. - Central D

A central D, também apresenta uma exploração a fio de água com a particularidade de conseguir regularizar parte da sua produção, particularidade expectável na Figura 33.

Os resultados do processo de optimização são mostrados nas figuras e tabelas seguintes.

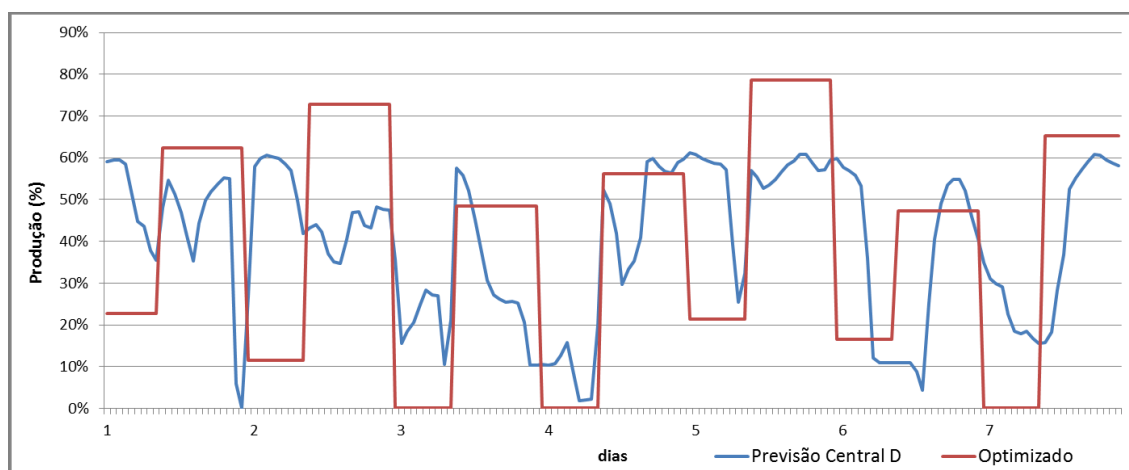


Figura 32 - Resultado Optimização Central D, Abril.

Tabela 15 - Aplicação do modelo Central D, Abril.

Dia	Potência Média	fmax	fmin	Med.P.real	Med.Pr.Opt	F.KMHO
1	h. vazio	1013,737	3426,812	1013,737	2044,708	1,077698
	h. cheia	2781,116	3312,511	373,628		
2	h. vazio	512,054	3337,229	512,054	2105,260	1,11453
	h. cheia	3243,265	3345,167	556,508		
3	h. vazio	0,000	3042,108	0,000	1261,885	1,15
	h. cheia	2163,232	2890,335	0,000		
4	h. vazio	0,000	2755,583	0,000	1460,276	1,15
	h. cheia	2503,330	2997,327	0,000		
5	h. vazio	949,716	3415,380	949,716	2440,724	1,093254
	h. cheia	3505,730	3526,082	1569,674		
6	h. vazio	739,261	3377,800	739,261	1535,484	1,079788
	h. cheia	2104,215	3037,887	0,000		
7	h. vazio	0,000	2907,876	0,000	1698,646	1,15
	h. cheia	2911,964	3125,880	0,000		

Tabela 16 - Resultados Semanal da Remuneração Central D, Abril.

	KMHO	PV(VRD)	PF(VRD)	VRD
Previsão	1,02	10840,59	710,99	21.882,24 €
Optimizado	1,11	10840,59	710,99	23.447,14 €

Após a aplicação do modelo de optimização para a primeira semana de Abril do ano de 2008, os resultados obtidos foram positivos. A tarifação foi melhorada (Tabela 16), bem como a exploração do recurso hídrico nas horas de cheia (Figura 32), contudo podemos verificar pela observação da Figura 32 a existência de produção de energia eléctrica nas horas de vazio mas em menor quantidade do que na previsão.

48 Teste do Modelo

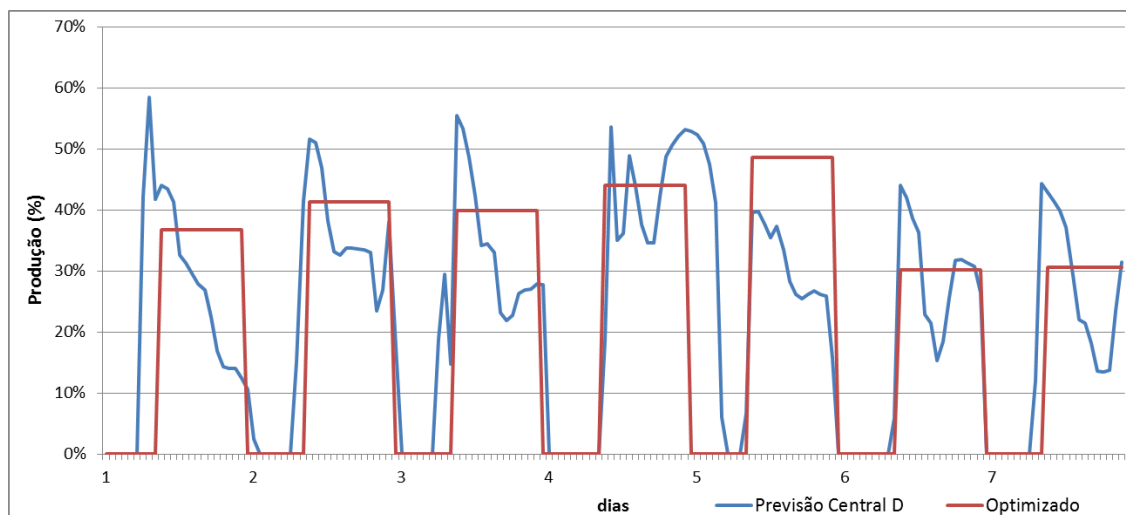


Figura 33 - Resultado Otimização Central D, Julho.

Tabela 17 - Aplicação do modelo Central D, Julho.

Dia	Potência Média	fmax	fmin	Med.P.real	Med.Pr.Opt	F.KMHO
1	h. vazio	0,000	2712,534	0,000		1,15
	h. cheia	1635,402	2724,284	0,000	953,984	
2	h. vazio	0,000	2651,327	0,000		1,15
	h. cheia	1843,964	2789,896	0,000	1075,646	
3	h. vazio	0,000	2800,996	0,000		1,15
	h. cheia	1776,429	2768,650	0,000	1036,250	
4	h. vazio	0,000	2715,630	0,000		1,15
	h. cheia	1965,830	2828,234	0,000	1146,734	
5	h. vazio	0,000	3058,096	0,000		1,15
	h. cheia	2168,375	2891,953	0,000	1264,885	
6	h. vazio	0,000	2640,161	0,000		1,15
	h. cheia	1344,920	2632,901	0,000	784,536	
7	h. vazio	0,000	2683,463	0,000		1,15
	h. cheia	1366,304	2639,628	0,000	797,010	

Tabela 18 - Resultados Semanal da Remuneração Central D, Julho.

	KMHO	PV(VRD)	PF(VRD)	VRD
Previsão	1,09	6099,02	400,05	12.982,76 €
Otimizado	1,15	6099,02	400,05	13.553,36 €

Os Resultados da Central D para os primeiros 7 dias do mês de Julho, apresentam um melhoramento da remuneração da CMH, uma otimização do coeficiente KMHO (atingiu o valor máximo - ver remuneração PRE) e todos parâmetros que restringem o modelo de otimização foram superados.

4.3.5. - Resultados Ano 2008

Neste ponto mostrar-se-á o teste ao modelo e os respectivos resultados da otimização aos valores reais da produção anual de cada central para o ano de 2008.

Apenas serão apresentados os resultados graficamente devido a grande quantidade de dados de produção horária ao longo de um ano. Também será exibida a remuneração anual bem como a remuneração otimizada das quatro CMH de forma a validar o modelo de otimização.

Como referido acima, procedeu-se à optimização da produção anual das quatro centrais. O resultado para a primeira Central (A), pode-se observar na figura seguinte (Figura 34).

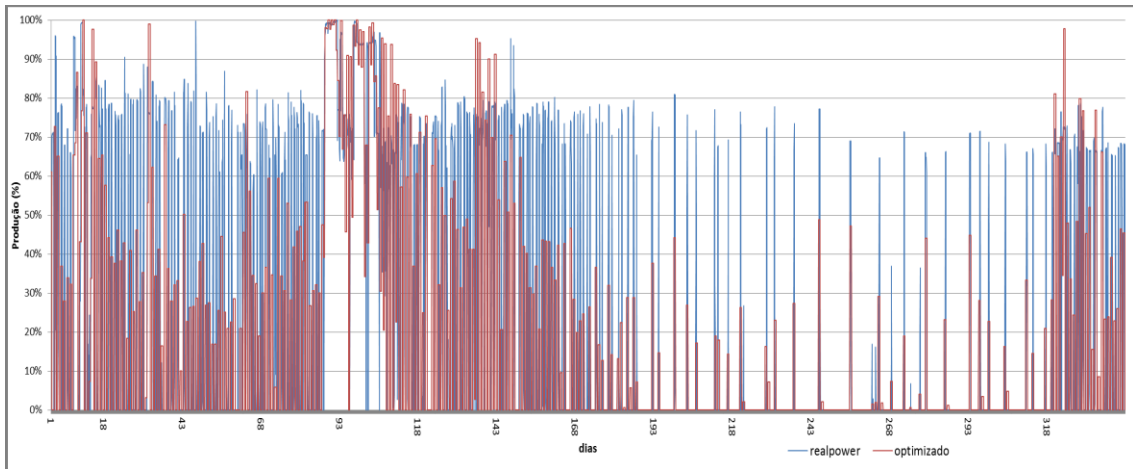


Figura 34 - Optimização para o ano de 2008 Central A.

Remuneração da Central A:

Tabela 19 - Remuneração Central A ano 2008.

	VRD real	VRD optimizado
Janeiro	80.621,27 €	82.240,98 €
Fevereiro	46.692,07 €	47.681,86 €
Março	54.611,98 €	55.895,01 €
Abril	168.163,34 €	171.197,19 €
Maio	96.574,24 €	99.427,45 €
Junho	60.510,77 €	61.542,34 €
Julho	18.608,54 €	18.745,74 €
Agosto	9.218,26 €	9.338,78 €
Setembro	7.037,96 €	7.059,47 €
Outubro	7.110,05 €	7.140,07 €
Novembro	9.127,00 €	9.211,26 €
Dezembro	62.568,85 €	65.022,82 €
Total:	€ 620.844,33	€ 634.502,97
Ganho:		€ 13.658,64

A remuneração optimizada associada à central A apresenta um ganho de 2,2% face a remuneração real do ano 2008.

O mesmo acontece para à central B, esta também revela um ganho na ordem dos 2%, como se pode verificar pela Tabela 20.

50 Teste do Modelo

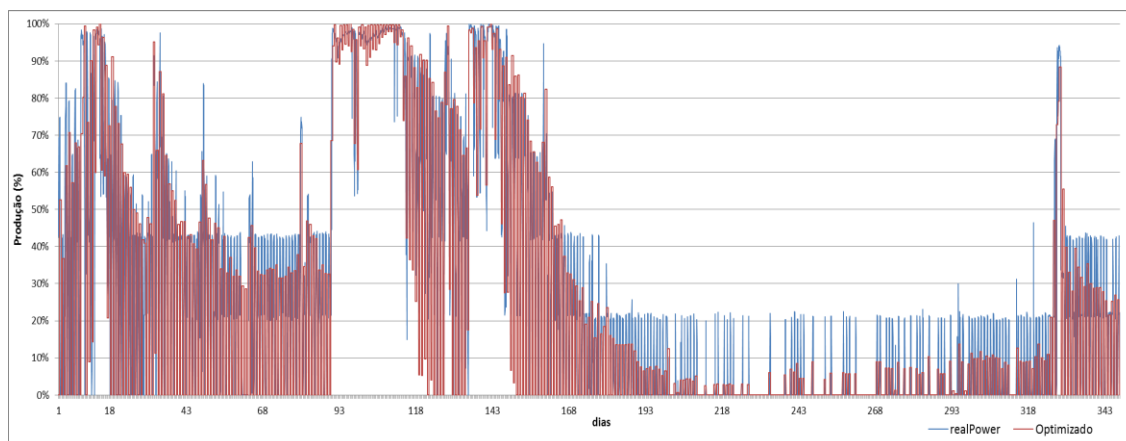


Figura 35 - Optimização para o ano de 2008 Central B.

Tabela 20 - Remuneração Central B ano 2008.

	VRD real	VRD optimizado
Janeiro	240.764,33 €	248.164,32 €
Fevereiro	141.882,27 €	147.026,06 €
Março	120.301,35 €	122.920,17 €
Abril	412.613,29 €	414.263,04 €
Maio	370.850,38 €	377.602,82 €
Junho	219.600,16 €	225.277,88 €
Julho	40.171,39 €	40.534,70 €
Agosto	5.919,10 €	5.942,10 €
Setembro	8.784,98 €	8.784,98 €
Outubro	13.540,43 €	13.540,43 €
Novembro	25.041,40 €	25.507,98 €
Dezembro	100.480,81 €	102.948,77 €
Total:	€ 1.699.949,89	€ 1.732.513,25
Ganho:		€ 32.563,36

Neste caso, o ganho referente a remuneração da Central C tem o valor de 2,7% (ver Tabela 21) que representam 32.563,36 €. É importante referir que esta central é do tipo fio de água com alguma capacidade de regularização e onde se conseguiu uma boa optimização.

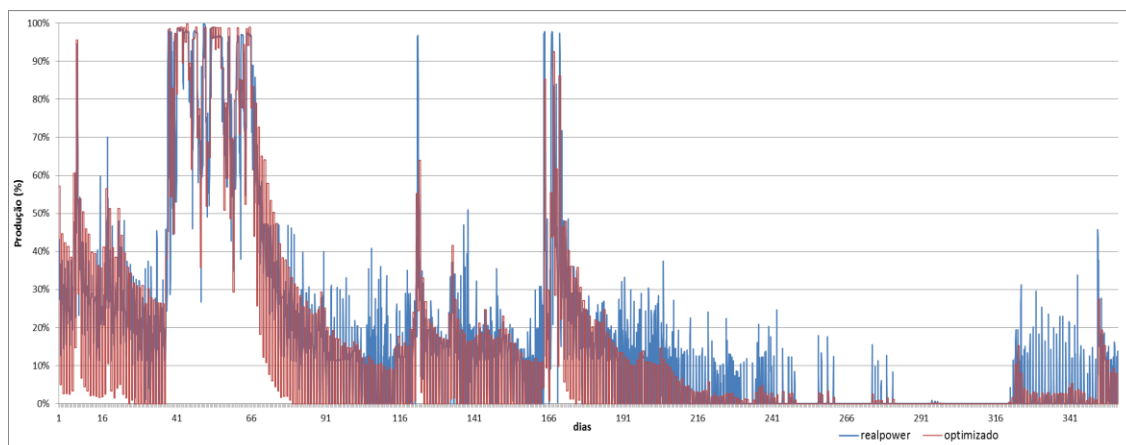


Figura 36 - Optimização para o ano de 2008 Central C.

Tabela 21 - Remuneração Central C ano 2008.

	VRD real	VRD optimizado
Janeiro	165.216,60 €	174.149,21 €
Fevereiro	372.795,64 €	377.923,63 €
Março	246.521,09 €	253.614,17 €
Abril	52.937,82 €	53.808,41 €
Maio	90.042,19 €	93.228,34 €
Junho	123.262,29 €	127.374,18 €
Julho	48.539,00 €	49.147,78 €
Agosto	9.391,05 €	9.462,91 €
Setembro	2.671,99 €	2.684,47 €
Outubro	961,42 €	962,91 €
Novembro	6.723,58 €	6.867,64 €
Dezembro	17.773,16 €	18.173,78 €
Total:	€ 1.136.835,84	€ 1.167.397,44
Ganho:		€ 30.561,59

A CMH D apresenta o maior valor de ganho 3,2% em relação à remuneração real, apesar destes resultados de optimização representarem valores baixos de ganho, pode-se afirmar que é possível optimizar a estratégia de operação. Concluindo-se então que o modelo proposto é válido.



Figura 37 - Optimização para o ano de 2008 Central C.

Tabela 22- Remuneração Central D ano 2008.

	VRD real	VRD optimizado
Janeiro	138.310,45 €	141.911,10 €
Fevereiro	125.763,20 €	130.260,99 €
Março	190.413,76 €	191.577,92 €
Abril	116.856,97 €	122.153,74 €
Mai	104.503,09 €	109.378,30 €
Junho	63.007,79 €	68.074,87 €
Julho	85.319,89 €	89.740,76 €
Agosto	53.393,04 €	53.651,07 €
Setembro	55.823,95 €	57.107,28 €
Outubro	62.110,06 €	63.878,45 €
Novembro	55.490,98 €	57.082,55 €
Dezembro	31.819,45 €	32.943,85 €
Total:	€ 1.082.812,64	€ 1.117.760,88
Ganho:		€ 34.948,24

4.4- Síntese

Primeiramente, no ponto 4.3, Aplicação do Modelo e Resultados, todos os resultados semanais apresentam valores de PV(VRD) e PF(VRD) iguais, esse facto deve-se a condição de igualdade presente na formulação do modelo (3.11), ou seja, o modelo de optimização não altera a quantidade de energia produzida prevista, apenas ajusta a produção das horas de vazio e cheia de forma a maximizar o factor KMHO (função objectivo de modelo matemático). Logo como as parcelas PV(VRD) e PF(VRD) dependem do valor de energia produzido (1.4)(1.6) o valor dessas parcelas terão os mesmos valores.

O teste ao modelo desenvolvido é extremamente importante na medida em que permite validar, ou não, esse mesmo modelo. Para isso, efectuou-se anteriormente o teste ao modelo desenvolvido, com o objectivo de verificar a sua validade.

A optimização foi concluída pelo *Solver* e convergiu para soluções em que as restrições foram todas respeitadas.

Os resultados obtidos são promissores e mostram que há vantagens evidentes na utilização deste modelo de optimização em CMH, desde que seja possível recolher as informações reais necessárias à sua aplicação.

Capítulo 5

Conclusões

5.1- Conclusões

Actualmente, o estudo das estratégias de operação de CMH ainda não mereceu destaque ao contrário de outras tecnologias como a eólica e a solar, talvez devido à sua reduzida fracção de produção de energia, e a ausência de informação.

No entanto, dado que a energia hídrica é uma das prioridades actuais contempladas pelas políticas energéticas nacionais, é de interesse proceder à caracterização da gestão de operação deste tipo de aproveitamento.

A optimização da estratégia de operação das CMH proposta por este trabalho de dissertação pode ser uma ferramenta útil para o melhoramento da exploração do recurso e na ajuda à decisão no que diz respeito à produção de energia eléctrica.

Para ser possível proceder a modelização do modelo de optimização realizou-se um estudo, ao nível dos dados de produção de várias centrais, de modo a retirar informação relativa a estratégia de operação das CMH.

Concretamente, com a realização deste trabalho concluiu-se que a produção hidroeléctrica é fortemente dependente da estratégia da CMH bem como da gestão de operação do reservatório (albufeira), condicionadas pelo recurso hídrico disponível e pelo tarifário. Isto é, verifica-se plenamente a existência de transacções para iniciar a produção, que ocorrem entre as 8 horas e as 20 horas, denominado por período de ponta ou de cheia, caracterizado por apresentar remunerações superiores. Desta forma o modelo de previsão empregue neste trabalho revela-se uma ajuda valiosa no planeamento da operação das centrais.

Nesta dissertação é apresentado um modelo de optimização para gestão de operação de CMH, que fornece o despacho diário, para um horizonte temporal de curto-prazo, 7 dias. Particularmente, o modelo consiste na regularização da produção, isto é, transferir parte da produção das horas de vazio para as horas de cheia e ponta, período que representa maior tarifação. Esta capacidade de regularização é importante, visto ser o factor determinante para o sucesso do modelo.

Através da aplicação do modelo as quatro centrais, verificou-se que objectivo para qual o modelo se propunha foi atingido, os resultados obtidos mostram que se conseguiu aumentar a remuneração das centrais elevando a produção nos períodos de cheia e diminuindo nos

períodos de vazio. Para esta avaliação foi realizada uma análise as parcelas principais da remuneração.

Com este trabalho conseguimos desenvolver um serviço pioneiro no apoio ao planeamento de operação das CMH. Com as novas ferramentas de Previsão Mini-hídrica e com a capacidade de regularização de algumas CMH é possível gerir de uma forma mais eficiente o recurso hídrico disponível de forma a conseguir um despacho diário da energia eléctrica a produzir.

Referências

- [1] Direcção Geral de Energia e Geologia, "Renováveis : Estatísticas Rápidas", Março de 2010.
- [2] "Decreto-Lei n.o 189/88, de 27 de Maio": DIÁRIO DA REPÚBLICA, 1988.
- [3] "Decreto-Lei n.o. 312/2001, de 10 de Dezembro": DIÁRIO DA REPÚBLICA, 2001.
- [4] "Decreto-Lei n.o. 225/2007, de 31 de Maio": DIÁRIO DA REPÚBLICA, 2007.
- [5] Energia Hidráulica e Mini-Hídricas, Causas Ambientais. Available: <http://www.zoomlab.net/web1/trabalhos/grupo16/EnRenov5.html> Último acesso em Junho de 2010.
- [6] Hélder José de Sousa Teixeira, "Caracterização da Produção de Centrais Mini-Hídricas", Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009.
- [7] Rui M. G. Castro, "Introdução à Energia Mini-Hídrica", Março de 2008.
- [8] Resolução que aprova a Estratégia Nacional para a Energia 2020. Available: http://www.portugal.gov.pt/pt/GC18/Governo/Ministerios/MEI/ProgramaseDossiers/Pages/20100415_MEID_Prog_ENE2020.aspx Último acesso em Junho de 2010.
- [9] Ministério da Economia, da Inovação e do Desenvolvimento, "Estratégia Nacional de Energia ENE 2020, Uma Inspiração para Portugal e uma Ideia para o Mundo, 2010.
- [10] Agência de Energia & Instituto Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial (ADENE & INETI) "Relatório Síntese", Lisboa, Novembro de 2001.
- [11] C. Dragu, T. Sels, and R. Belmans, "Small Hydro Power State of The Art and Applications."
- [12] C. D. Monteiro, "Mini-hídrica", Apontamentos PDIS, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2007."
- [13] ESHA, "Guide on How to Develop a Small Hydropower Plant ", 2004..
- [14] Ministério da Economia e Inovação - "Decreto-Lei n.º 319/2009, de 3 de Novembro 2009": DIÁRIO DA REPÚBLICA.
- [15] "Automação e Supervisão de uma Central Mini-hídrica.", IST/MEEC, 2003.
- [16] "Decreto - Lei n.º 168/99 de 18 de Maio": DIÁRIO DA REPÚBLICA - I SÉRIE - A N.º 115 - 18-5-1999.
- [17] Elsa Sofia da Silva Ferraz, " Optimização de Estruturas e Modelos de Previsão de Produção Mini-Hídrica", Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009.
- [18] CMFG. Energia e Ambiente. Available: <http://www.cmfg.pt/> Último acesso em Janeiro de 2010.
- [19] Microsoft. Suporte Microsoft. Available: <http://support.microsoft.com/kb/82890/pt> Último acesso em Janeiro de 2010.
- [20] Solver.com. Frontline Systems, developers of the Excel Solver. Available: <http://www.solver.com/index.html> Último acesso em Janeiro de 2010.
- [21] " Método Simplex", Instituto Politécnico de Castelo Branco, Escola Superior de Tecnologia, 2005 .

- [22] João Luís Soares, "Optimização Matemática", 2005.
- [23] APREN apoia Estratégia Nacional de Energia 2020. Available: <http://www.apren.pt/noticias/detalhes.php?id=24> Último acesso em Junho de 2010.
- [24] "Programação linear", Investigação Operacional - Universidade de Aveiro, 2000.
- [25] O que é o método Simplex?. Available: <http://www.webartigos.com/articles/2947/1/Metodo-Simplex/pagina1.html> Último acesso em Junho de 2010.
- [26] Edgar, T. F. and D. M. Himmelblau, "Optimization of Chemical Process", McGraw-Hill, New York, 1989.
- [27] Reklaitis, G. V.; A. Ravindran and K. M. Ragsdell, " Engineering Optmization Methods and Applications", John Wiley and Sons, New York, 1983.
- [28] Júlio F. Ferreira da Silva José M. P. Vieira, Naim Hiae, "Dimensionamento Optimizado de Sistemas Adutores Elevatórios de Água", Departamento de Engenharia Civil- Universidade do Minho, 2003.
- [29] Ching-Tzong SU, Guor-Rurng Lii, " Reliability Optimization Design of Distribution Systems via multi-level Hierarchical Procedures and Generalized Reduced Gradient Method", National Chung Cheng University, 1995.
", 3 de Novembro de 2009.
- [30] "Mini-hídrcas, Aproveitamentos Hidroelectricos", Available: <http://eduvisilva.com.sapo.pt/minihidrica.htm>.
- [31] Juan Martín Brava, "Otimização da Operação de um Reservatório para Controle de Cheias com Base na Previsão de Vazão" , 2006.