

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



FEUP

Caracterização da Produção de Centrais Mini - Hídricas

Hélder José de Sousa Teixeira

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

Orientador: Prof. Doutor Cláudio Monteiro

Julho de 2009

© Helder José de Sousa Teixeira, 2009

Resumo

As Centrais Mini-Hídricas (CMH) estão entre os recursos renováveis que ainda podem ser aproveitados em Portugal.

De todos os recursos renováveis as CMH são das mais difíceis de compreender, devido às características particulares de cada central, tanto na vertente técnica como na vertente da envolvente e do próprio recurso.

Este trabalho estudará as características técnicas dos componentes das CMH e das envolventes típicas onde estas se encontram instaladas, pretendendo contribuir para um levantamento da tipificação das centrais instaladas em Portugal.

Do estudo das características de produção das CMH será possível retirar conclusões sobre procedimentos de optimização, sobre o perfil de produção e estratégias de operação.

Por último, o trabalho permitirá caracterizar geograficamente o recurso energético, fornecendo bases para o desenvolvimento de modelos de avaliação do potencial para a instalação de CMH.

Palavras-chave: Avaliação do Recurso Energético, Caracterização de Produção, Centrais Mini-Hídricas.

Abstract

The small hydropower plants are among the renewable resources that can still be further develop in Portugal.

Of all the renewable resources, the small hydropower plants are some of the most difficult to understand, due to the particular characteristics of each hydropower plant, in a technical as well as environment and resource point of view.

This study will investigate the technical characteristics of the small hydropower plants components and the typical environments where they are implemented. The goal of this analysis is to describe the standardization of small hydropower plants installed in Portugal.

After this investigation of the production characteristics of the small hydropower plant, it will be possible to reach conclusions about optimization processes, production profiles and operation strategies.

Finally, this dissertation will allow to describe geographically this power resource, establishing basis for the development of models in order to evaluate the potential small hydropower plants implementation.

Keywords: *Small Hydropower Plants, Power Resource Evaluation, Production Characterization.*

Agradecimentos

Serve o presente momento para homenagear e agradecer a todas as pessoas e instituições que contribuíram, directa ou indirectamente, para a elaboração e sucesso desta dissertação, evidenciando as seguintes:

Ao meu orientador, Professor Doutor Cláudio Monteiro, uma palavra de amizade e de profundo agradecimento pelo seu apoio constante e incansável, críticas e sugestões relevantes que contribuíram de forma benigna para o desenrolar desta dissertação.

À empresa *Smartwatt* e seus colaboradores pela disponibilidade de recursos, colaboração e apoio prestados no desenvolvimento desta dissertação.

Ao Engenheiro João Sousa pela sua amizade, apoio e disponibilidade manifestada na revisão deste presente documento.

A todos os colegas e amigos, especialmente ao Carlos Oliveira, Elsa Ferraz e Tiago Santos, pelo apoio e amizade nas longas e difíceis batalhas ao longo destes últimos cinco anos. Sere-mos para sempre o “Quarteto Maravilha”.

Um agradecimento muito sentido para os meus pais, pelo estímulo infatigável e apoio incondicional prestados desde o primeiro dia. Pela paciência, amizade e disponibilidade com que sempre me ajudaram. Não basta um muito obrigado para agradecer tudo o que sou, que é devido à educação que sempre se esforçaram em me proporcionar.

A minha irmã, Engenheira Lídia Teixeira que se tornou num exemplo a seguir pela sua força, coragem e determinação, bem como pelos seus preciosos conselhos e dedicação prestada ao longo da minha vida.

A todos os restantes familiares pela simpatia e preocupação que sempre demonstraram, não esquecendo os que partiram, mas que me deixaram bem presente a sua marca.

A minha namorada Elsa pela sua enorme paciência e compreensão, pelo imenso carinho, ternura, força e coragem transmitida ao longo deste percurso, que só assim tornou possível esta concretização. Por todos estes aspectos e por muitos outros que não tem fim, um autêntico muito obrigado.

Índice

Resumo	iii
Abstract	v
Agradecimentos	vii
Índice	viii
Lista de figuras	xi
Lista de tabelas	xv
Abreviaturas e Símbolos	xvi
Capítulo 1	1
Introdução	1
1.1- Enquadramento	1
1.1.1- O Recurso Hídrico no Contexto Ambiental	1
1.1.2- Aproveitamentos Hidroelétricos.....	4
1.1.3- Necessidade da Caracterização das CMH.....	6
1.2- Motivação	7
1.3- Objectivos	8
1.4- Estrutura da Dissertação	8
1.5- Informação Usada na Dissertação.....	9
Capítulo 2	11
Estado da Arte	11
2.1- Mini-Hídricas	11
2.1.1- Um Interesse Recuperado	11
2.1.2- Situação em Portugal.....	12
2.1.3- Estatuto na EU-25.....	13
2.1.4- Motivação	14
2.1.5- Dimensionamento e Classificação	15
2.1.5.1- Potência.....	16
2.1.5.2- Queda	17
2.1.5.3- Caudal	18
2.1.6- Regime de Exploração.....	18
2.1.7- Constituição.....	19
2.1.7.1- Albufeira	20
2.1.7.2- Canal de Adução	21
2.1.7.3- Câmara de Carga	22

2.1.7.4- Conduta Forçada	23
2.1.7.5- Edifício da Central	24
2.1.7.5.1- Equipamentos Mecânicos	25
2.1.7.5.2- Equipamentos Eléctricos	27
2.1.8- Configurações	28
2.1.8.1- Central com Canal de Adução e Conduta Forçada	28
2.1.8.2- Central só com Conduta Forçada	29
2.1.8.3- Central Encastrada na Barragem	30
2.1.8.4- Central só com Canal de Adução	31
2.1.8.5- Casos Específicos	31
2.1.9- Avaliação do Recurso das CMH	33
Capítulo 3	35
Caracterização Hidrológica	35
3.1- Introdução	35
3.2- Distribuição Geográfica da Pluviosidade	35
3.3- Caracterização Temporal e Geográfica da Pluviosidade	38
3.3.1- Caracterização da Pluviosidade Horária	38
3.3.2- Caracterização da Pluviosidade Diária	40
3.3.3- Caracterização do Número de Dias com Chuva	42
3.3.4- Caracterização do Número de Dias sem Chuva	44
3.4- Correlação Geográfica da Pluviosidade	46
3.4.1- Correlação Geográfica da Pluviosidade Horária	47
3.4.2- Correlação Geográfica da Pluviosidade Diária	48
Capítulo 4	49
Caracterização das Centrais	49
4.1- Introdução	49
4.2- Características Principais	49
4.2.1- Potência	49
4.2.2- Queda	52
4.2.3- Caudal	54
4.2.4- Eficiência Teórica	57
4.2.5- CMH versus Número e Tipo de Turbinas	58
4.2.6- Eficiência versus Número e Tipo de Turbina	61
4.2.7- Queda versus Caudal	62
4.2.8- Área da Bacia	64
4.2.9- Eficiência Real	67
4.2.10- Factor de Dimensionamento	68
4.2.11- Factor de Utilização da Capacidade Instalada	69
4.2.12- Factor de Utilização do Caudal do Rio	71
Capítulo 5	75
Caracterização da Produção	75
5.1- Introdução	75
5.2- Estudo da Produção em CMH	76
5.2.1- Comportamentos Típicos	76
5.2.2- Decaimentos	80
5.2.3- Análise dos Máximos	82
5.2.4- Influência da Pluviosidade	84
5.2.5- Definição de Perfis Típicos	88
5.2.6- Avaliação do Potencial Regional	89
Capítulo 6	97
Conclusões	97
6.1- Conclusões Gerais	97
6.2- Trabalhos Futuros	100

Referências	101
-------------------	-----

Lista de figuras

Figura 1 - Emissões de Dióxido de Carbono no Mundo 2003-2030 [1].....	2
Figura 2 - Quantidade de Emissões de CO ₂ no Mundo por Sector.	2
Figura 3 - Percentagem de Produção de Cada Tipo de Energia a Nível Mundial [2].	3
Figura 4 - Potencial Hídrico não Aproveitado vs. Dependência Energética Externa [8].	4
Figura 5 - Evolução da Energia Produzida a Partir de Fontes Renováveis (TWh) [10].	5
Figura 6 - Perspectiva de Evolução da Capacidade Instalada Hídrica em Portugal [8].	5
Figura 7 - CMH em Operação na EU-25 e CC, em 2004 [24].....	13
Figura 8 - Capacidade Instalada nas CMH nos Países Membros da União Europeia [26].	14
Figura 9 - Central de Fio-de-Água.....	19
Figura 10 - Central de Albufeira.....	20
Figura 11 - Albufeira Típica de um Aproveitamento a Fio-de-água.....	21
Figura 12 - Albufeira Típica de um Aproveitamento com Capacidade de Regulação.	21
Figura 13 - Delimitação do Canal de Adução.	22
Figura 14 - Delimitação da Câmara de Carga.	23
Figura 15 - Delimitação da Conduta Forçada.....	24
Figura 16 - Turbina <i>Pelton</i> [40].....	25
Figura 17 -Turbina <i>Kaplan</i> [40].	26
Figura 18 - Turbina <i>Francis</i> [40].	26
Figura 19 - Tipo de Turbina em Função da Queda e Caudal [41].	26
Figura 20 - Eficiência em Função da Percentagem do Caudal Nominal [41].	27
Figura 21 - Central com Canal de Adução e Conduta Forçada.....	29
Figura 22 - Central só com Conduta Forçada.....	30

Figura 23 - Central Encastrada na Barragem.	30
Figura 24 - Central só com Canal de Adução.	31
Figura 25 - Central Construída para Fornecimento de Energia à Indústria.	32
Figura 26 - Central para Fim de Regadio.	32
Figura 27 - <i>Softwares</i> e Metodologias Usadas para Avaliação de Locais Disponíveis para a Instalação de CMH [49].....	34
Figura 28 - Mapa da Quantidade de Precipitação Anual por Distrito.	37
Figura 29 - Precipitação Total Anual do Território Nacional [51].....	37
Figura 30 - Caracterização da Pluviosidade Horária para a Região Norte.	39
Figura 31 - Caracterização da Pluviosidade Horária para a Região Centro.....	39
Figura 32 - Caracterização da Pluviosidade Horária para a Região Sul.	39
Figura 33 - Caracterização da Pluviosidade Diária para a Região Norte.	41
Figura 34 - Caracterização da Pluviosidade Diária para a Região Centro.....	41
Figura 35 - Caracterização da Pluviosidade Diária para a Região Sul.	41
Figura 36 - Série da Pluviosidade Diária do Ano 2007 para Cada Região.	43
Figura 37 - Caracterização do Número de Dias Sucessivos Com Chuva para a Região Norte. ..	43
Figura 38 - Caracterização do Número de Dias Sucessivos com Chuva para a Região Centro. .	44
Figura 39 - Caracterização do Número de dias Sucessivos com Chuva para a Região Sul.	44
Figura 40 - Caracterização do Número de Dias Sucessivos sem Chuva para a Região Norte....	45
Figura 41 - Caracterização do Número de Dias Sucessivos sem Chuva para a Região Centro. .	45
Figura 42 - Caracterização do Número de Dias Sucessivos sem Chuva para a Região Sul.	46
Figura 43 - Correlação da Pluviosidade Real e Prevista Horária.	47
Figura 44 - Correlação da Pluviosidade Real e Prevista Diária.	48
Figura 45 - Histograma da Potência Instalada nas CMH.	50
Figura 46 - Mapa da Distribuição da Potência das CMH em Portugal.	51
Figura 47 - Histograma da Distribuição da Queda nas CMH.	52
Figura 48 - Mapa da Distribuição das Quedas nas CMH em Portugal.	53
Figura 49 - Histograma da Distribuição do Caudal nas CMH.	54
Figura 50 - Histograma da Distribuição do Caudal entre 0 e 20m ³ /s.	55
Figura 51 - Mapa da Distribuição do Caudal nas CMH em Portugal.	56

Figura 52 - Histograma da Frequência de Eficiência nas CMH.	57
Figura 53 - Histograma do Número de Turbinas Aplicadas nas CMH.	58
Figura 54 - Histograma do Tipo de Turbinas Aplicadas nas CMH.	59
Figura 55 - Mapa da Distribuição das Turbinas nas CMH em Portugal.	60
Figura 56 - Histograma da Eficiência em Função do Número de Turbinas.	61
Figura 57 - Histograma da Eficiência em Função do Tipo de Turbina.	62
Figura 58 - Identificação do Tipo de Turbina através da Característica Queda vs Caudal.	63
Figura 59 - Eficiência dos Diferentes Tipos de Turbina em Função da Característica Queda versus Caudal.	64
Figura 60 - Histograma da Frequência versus a Área da Bacia.	65
Figura 61 - Mapa da Distribuição das Áreas da Bacia nas CMH em Portugal.	66
Figura 62 - Recta Característica da Eficiência Real.	67
Figura 63 - Gráfico do Factor de Dimensionamento.	68
Figura 64 - Histograma do Factor de Utilização da Capacidade Instalada.	70
Figura 65 - Factor de Utilização da Capacidade Instalada em Função da Potência.	70
Figura 66 - Histograma do Factor de Utilização do Caudal do Rio.	72
Figura 67 - Factor de Utilização do Caudal do Rio em Função da Área da Bacia.	73
Figura 68 - Factor de Utilização do Caudal do Rio vs Factor de Utilização da Capacidade Instalada.	74
Figura 69 - Característica de Produção de uma CMH em Função do Tempo.	76
Figura 70 - Estratégia de Operação 1.	77
Figura 71 - Estratégia de Operação 2.	77
Figura 72 - Produção da Central A.	78
Figura 73 - Produção da Central B.	78
Figura 74 - Produção da Central C.	78
Figura 75 - Produção da Central D.	78
Figura 76 - Relação entre a Produção e a Pluviosidade para a Central A.	79
Figura 77 - Decaimentos Característicos para a Central A.	80
Figura 78 - Decaimento A para a Central A.	81
Figura 79 - Decaimento B para a Central A.	81
Figura 80 - Decaimento vs Queda/Caudal.	82

Figura 81 - Máximos de Produção da CMH.	83
Figura 82 - Factor de Utilização do Caudal do Rio vs Rácio de Máximos de Produção.	83
Figura 83 - Correlação Cruzada entre Produção e Pluviosidade.	86
Figura 84 - Atraso vs. Queda/Caudal.	87
Figura 85 - Atraso vs. Área da Bacia.	87
Figura 86 - Curvas dos Perfis Anuais de Produção.	88
Figura 87 - Rede Hidrográfica do Território Português [51].	91
Figura 88 - Altimetria do Território Português [51].	91
Figura 89 - Declives Médios ao Longo do Perfil do Percurso dos Rios e Ribeiras(os) por Concelho ao longo do Território Nacional.	92
Figura 90 - Potencial Disponível por Concelho.	94
Figura 91 - Percentagem do Potencial Mini-Hídrico Explorado por Distrito.	96

Lista de tabelas

Tabela 1 - Classificação das CMH quanto à Potência.	16
Tabela 2 - Classificação das CMH quanto à Altura da Queda.	17
Tabela 3 - Número de Dias por Ano com Precipitação para as Diferentes Regiões.....	42
Tabela 4 - Avaliação do Potencial por Distrito para a Instalação de CMH.	95

Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas

<i>apren</i>	associação de energias renováveis
ASCE	<i>American Society of Civil Engineers</i>
CC	<i>Candidate Countries</i>
CCF	<i>Cross Correlation Function</i>
CEE	Comunidade Económica Europeia
CGUL	Centro de Geofísica da Universidade de Lisboa
CMH	Centrais Mini-Hídricas
EDP	Energias de Portugal
ESHA	<i>European Small Hydro Association</i>
EU	<i>European Union</i>
FEDER	Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
GEE	Gases de Efeito de Estufa
GFS	<i>Global Forecast System</i>
HES	<i>HydroPower Evaluation Software</i>
ICAT	Instituto de Ciência Aplicada e Tecnologia
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IMP	<i>Integrated Method for Power Analysis</i>
MATLAB	<i>MATrix LABoratory</i>
MM5	<i>Fifth Generation Penn State / NCAR Mesoscale Model MM5</i>
PNBEPH	Programa Nacional de Barragens com Elevado Potencial Hidroelétrico
PRE	Produção em Regime Especial
SENV	Sistema Elétrico Não Vinculado
SPSS	<i>Statistical Package for the Social Science</i>
UNIPED	<i>Union Internationale des Producteurs et Distributeurs D’Energie Eléctrique</i>

Lista de símbolos

%	Porcentagem
A	Área da Bacia Hidrográfica
Alti	Altimetria
Alti _{máxima,i}	Altimetria máxima do rio ou ribeira(o) i
Alti _{mínima,i}	Altimetria mínima do rio ou ribeira(o) i
CO ₂	Dióxido de Carbono
declive _i	Declive do rio ou ribeira(o)
f _D	Factor de dimensionamento
f _u	Factor de Utilização do Caudal do Rio
g	Aceleração da gravidade
GWh	<i>Gigawatt-hora</i>
H	Queda
H _b	Altura Queda Bruta
H _{bmáx}	Altura Queda Bruta Máxima
H _{média}	Queda média
H _u	Altura Queda Útil
kg/m ³	Quilograma por metro cúbico
km	Quilómetro
km ²	Quilómetro Quadrado
kW	<i>Quilowatt</i>
kWh	<i>Quilowatt-hora</i>
L	Comprimento
l	Litro
m	Metro
m/s ²	Metro por segundo quadrado
m ²	Metro Quadrado
m ³ /s	Metro Cúbico por segundo
mm	Milímetro
MVA	<i>Megavolt Ampere</i>
MW	<i>Megawatt</i>
n.º	Número
P	Potência Instalada
Pluv	Pluviosidade
P _{máxima}	Potência Máxima
P _{média}	Potência média
Potencial	Potencial disponível numa região
Q	Caudal
s	Segundo

TWh	<i>Terawatt-hora</i>
U_p	Factor de Utilização da Capacidade Instalada
x_t	Valor de Pluviosidade da central no instante t
x_{t-1}	Valor de Pluviosidade central no instante t-1
y_t	Valor de Produção da central no instante t
y_{t-1}	Valor de Produção da central no instante t-1
η	Eficiência do sistema
θ	Decaimento
σ^2	Variância
ρ	Densidade da água

Capítulo 1

Introdução

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

Neste trabalho de dissertação será realizado um trabalho abrangente sobre a tipificação de características das Centrais Mini-Hídricas (CMH) em Portugal. Este trabalho envolve três componentes:

- Estudo e tipificação das características técnicas das centrais e das características da envolvente;
- Tipificação das produções das CMH, caracterizando o perfil de produção e as estratégias de operação;
- Caracterização do recurso hidrológico identificando indicadores de recurso e desenvolvendo metodologias de avaliação regional do potencial energético para instalação de CMH;

Este capítulo apresenta uma visão da temática e define quais os objectivos e motivação inerentes à sua realização. No final do capítulo apresenta-se uma breve explicação da organização estrutural da dissertação.

1.1- Enquadramento

1.1.1- O Recurso Hídrico no Contexto Ambiental

Actualmente as preocupações mundiais incidem maioritariamente nas questões dos impactos ambientais, especificamente na quantidade de Dióxido de Carbono (CO₂) emitido

para a atmosfera. Deste modo, urge a necessidade de implementar políticas ambientais com a finalidade de travar a progressão de emissões de gases.

Como se pode observar pela Figura 1, a quantidade de CO₂ tem vindo a aumentar constantemente, prevendo-se que esse aumento seja progressivo até 2030.

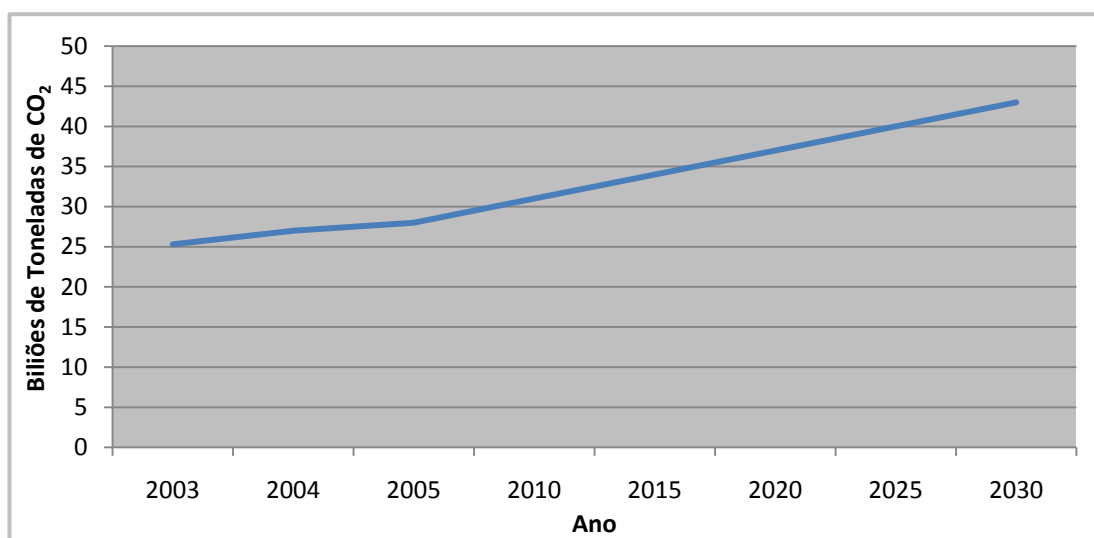


Figura 1 - Emissões de Dióxido de Carbono no Mundo 2003-2030 [1].

Numa primeira abordagem, uma forma simples de resolver esta questão é identificar os sectores que emitem maiores quantidades de CO₂ em proveito das suas funções, de forma a ser possível identificar os focos do problema. Concretamente, pela observação da Figura 2, constata-se que o sector a nível mundial que liberta uma maior quantidade de emissões de CO₂ é o sector ligado à produção de electricidade e calor. Assim sendo, torna-se imprescindível pensar em formas de combater este problema.

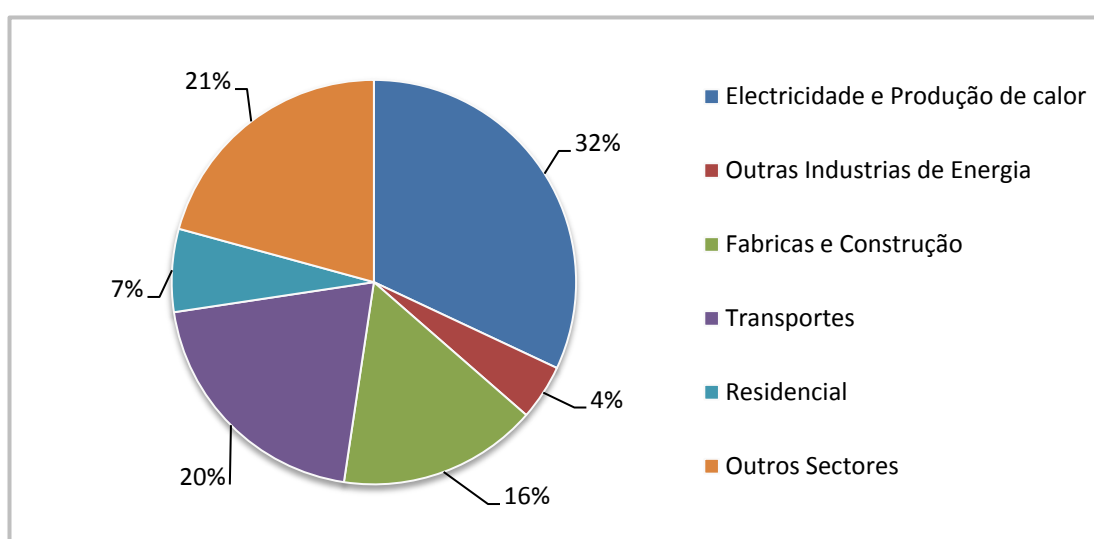


Figura 2 - Quantidade de Emissões de CO₂ no Mundo por Sector.

Após identificar o sector que induz maior emissão de gases existe a preocupação de identificar as razões e os possíveis pontos de actuação para minimizar estes efeitos. A Figura 3 evidencia que aproximadamente 85% da produção de electricidade e calor provém de combustíveis fósseis. Porém, além dos combustíveis fósseis terem uma duração limitada aquando da sua queima para a produção de electricidade existe a libertação de gases de efeito de estufa (GEE) como é o caso do CO₂. Por estas razões tem surgido um crescente interesse nas energias renováveis, pois para além de possuir um carácter infinito, dado que são provenientes de fontes de energia inesgotáveis, aquando do seu funcionamento não existe, praticamente, nenhuma libertação de CO₂ para a atmosfera. Deste modo permite a minimização dos impactes ambientais.

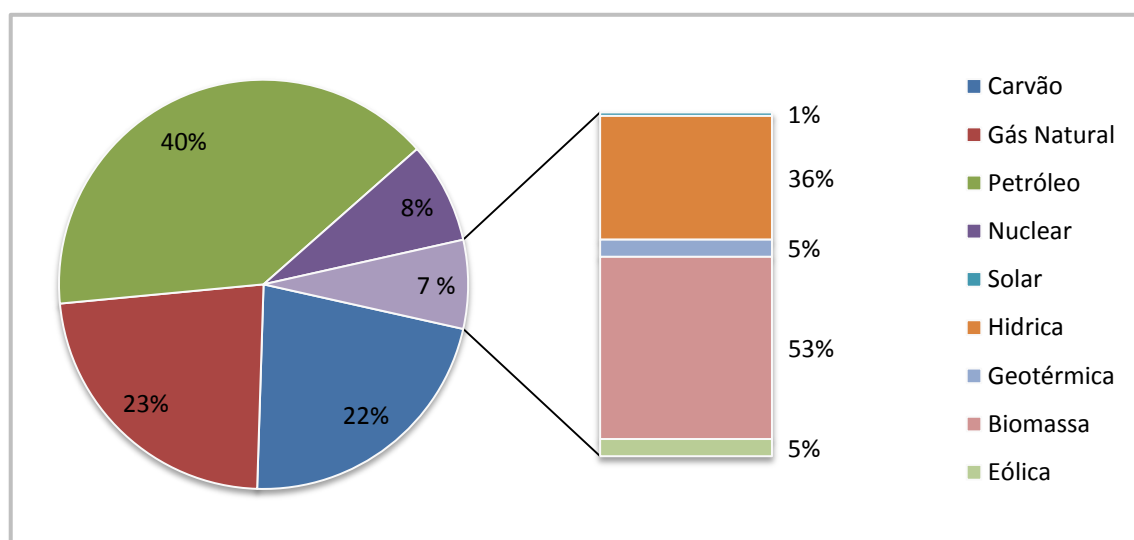


Figura 3 - Percentagem de Produção de Cada Tipo de Energia a Nível Mundial [2].

A implementação de energias renováveis assumiu relevância e interesse após a criação do Protocolo de *Kyoto* [3]. Este protocolo consistiu num compromisso de limitar o aumento de emissões de CO₂ para os países aderentes. É de salientar que este protocolo foi proposto a nível mundial, havendo contudo recusas de alguns países em aceitar este acordo. Portugal é um dos países aderentes e tem como meta limitar em 27% o aumento das emissões de GEE no período de 2008 a 2012, relativamente ao valor de 1990 [4].

Analogamente, a Comunidade Europeia criou uma directiva comunitária 2001/77/CE [5] que visa estabelecer o limite a atingir por cada país na percentagem de energia fornecida aos consumidores, originária das energias renováveis. Portugal assumiu o compromisso de em 2010 39% da energia total fornecida aos consumidores seja proveniente de fontes de carácter renovável. No entanto esse objectivo foi aumentado para 45%, até 2010 [6].

Tomando em consideração as imposições legais torna-se essencial aumentar e reforçar a energia proveniente de recursos endógenos. Segundo [7] o aumento de produção de electricidade proveniente de fontes renováveis só poderá ser realidade através do recurso a centrais hidroeléctricas ou eólicas. Este facto é justificável, uma vez que as restantes fontes de energia renovável ainda apresentam um estado de desenvolvimento tecnológico que a curto e a médio prazo não lhes permitirá atingir a quota desejada, além de actualmente ainda apresentarem falta de competitividade.

Em Portugal, a primeira fonte de energia renovável que assumiu peculiaridade e interesse para colmatar as necessidades da sociedade, foi a energia proveniente da água através das centrais hidroeléctricas. Contudo após um período inicial de exploração ocorreu uma estagnação na exploração e desenvolvimento de aproveitamentos hidroeléctricos.

Como se pode observar pela Figura 4, Portugal é um dos países a nível europeu que apresenta uma maior percentagem de potencial hídrico não explorado face às dependências energéticas externas. Assim, a energia hídrica através do aumento do potencial hidroeléctrico nacional é uma das soluções com vista ao cumprimento dos objectivos delineados.

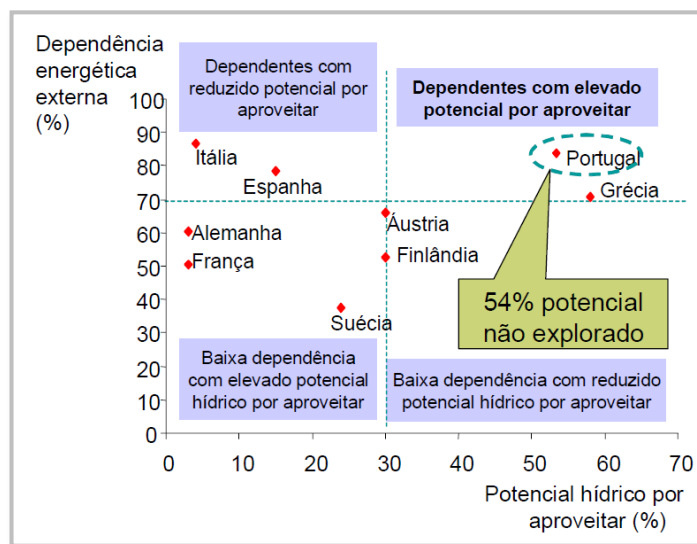


Figura 4 - Potencial Hídrico não Aproveitado vs. Dependência Energética Externa [8].

Concretamente, foi criado o Programa Nacional de Barragens com Elevado Potencial Hidroeléctrico (PNBEPH), que tem como objectivo identificar e definir prioridades para os investimentos a realizar em aproveitamentos hidroeléctricos no horizonte de 2007 a 2020 [9].

1.1.2- Aproveitamentos Hidroeléctricos

No panorama das energias renováveis, os aproveitamentos hidroeléctricos apresentam um elevado contributo em termos energéticos (ver Figura 5), estes possuem capacidade de arma-

zenamento, que lhes permite indirectamente armazenar energia. Além disso, estes aproveitamentos são caracterizados pela sua elevada eficiência, disponibilidade e acima de tudo pela elevada capacidade de flexibilidade de produção [7].

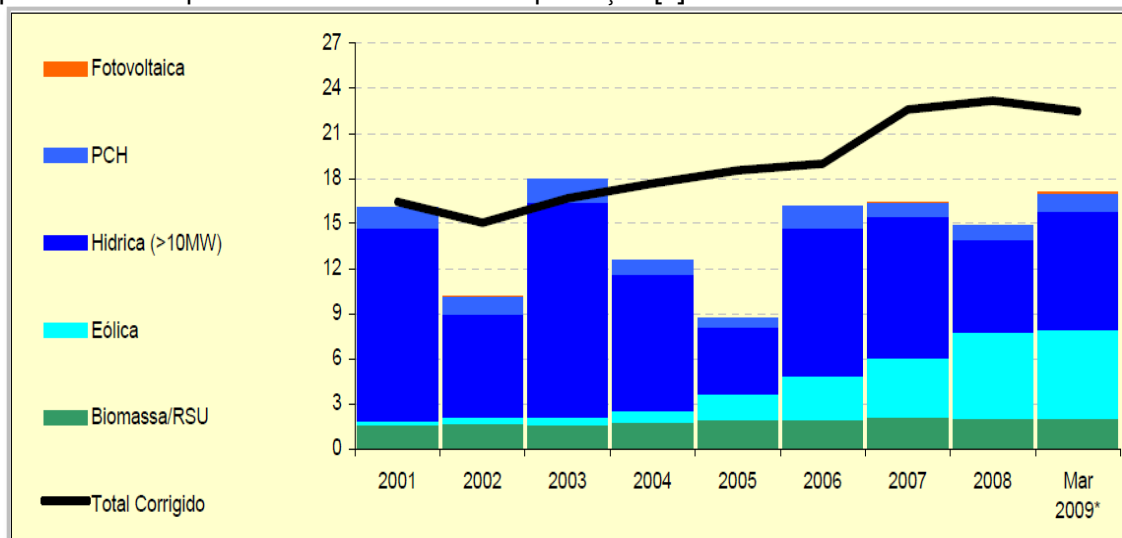


Figura 5 - Evolução da Energia Produzida a Partir de Fontes Renováveis (TWh) [10].

No que diz respeito ao potencial hidroelétrico nacional, segundo dados de Março de 2009, existem cerca de 4814MW instalados, sendo 299MW produzidos a partir de CMH, com capacidade até 10MW [10].

Porém, com o PNBEPH perspectiva-se uma evolução de capacidade hídrica instalada, para 2020, de 7000MW (ver Figura 6).

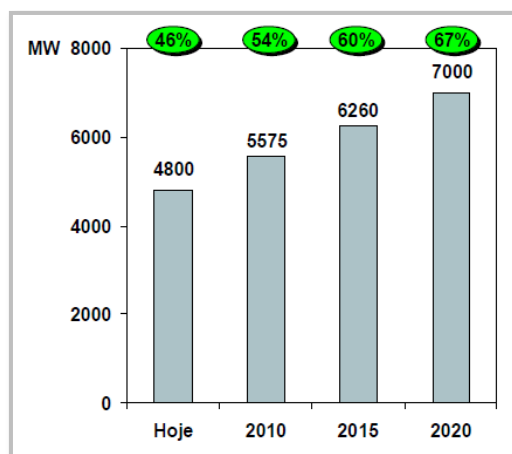


Figura 6 - Perspectiva de Evolução da Capacidade Instalada Hídrica em Portugal [8].

Contudo, pelo facto de os melhores locais de instalação de centrais hidroelétricas de grande porte já se encontrarem explorados e por induzirem maiores impactos ambientais, as CMH assumem uma particular importância para a segurança de abastecimento e para o cum-

primento dos compromissos assumidos com as energias renováveis, constituindo uma tecnologia que beneficia das características da produção de energia eléctrica descentralizada.

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.

Este tipo de centrais ostenta tempos de vida útil elevados, que em alguns casos pode atingir valores superiores a 50 anos, sendo o período de construção relativamente curto (um a dois anos).

Portanto, as CMH são totalmente independentes das variações do custo do petróleo e permitem a produção descentralizada próxima dos locais de consumo o que possibilita a redução de perdas nas linhas de transmissão. Este tipo de centrais pode ser controlado à distância, dispensando portanto a presença humana no edifício da central.

Refira-se que, em termos estatísticos, dados confirmam que em Março de 2009 a potência total instalada em aproveitamentos hidroeléctricos até 10MW é de 299MW, com uma produção estimada de 562GWh [10]. Em perspectivas futuras, as previsões apontam para uma potência instalada de cerca de 400MW e uma produção estimada anual de 1600GWh [12].

1.1.3- Necessidade da Caracterização das CMH

Actualmente uma quantidade significativa de energia eléctrica é gerada a partir de fontes de energia renováveis, especificamente as CMH são uma dessas fontes de energia. Contudo, até ao momento ainda não foi dado destaque à forma de produção das CMH, isto é, não foram estudados e caracterizados os perfis de produção deste tipo de aproveitamentos hidroeléctricos.

A produção nas CMH depende, essencialmente, das características físicas do terreno, especificamente da altura de queda e do caudal, que de forma directa permitem determinar a potência a instalar neste tipo de aproveitamentos. Porém, não se podem desprezar factores como a sua localização geográfica, o tipo e quantidade de turbinas que são utilizadas na central, nem o modo de exploração. Isto é, se é uma central com capacidade de armazenamento é designada por central de albufeira, senão é uma central a fio-de-água. Assim sendo, a associação das características enumeradas anteriormente pode auxiliar na caracterização do tipo de produção típica de uma central.

Particularmente, a caracterização de produção das CMH poderá apresentar-se como uma mais-valia para os produtores aquando da construção de novos projectos hidroeléctricos. Uma vez que, permitirá identificar e caracterizar o perfil típico de produção, assim como obter uma perspectiva acerca da quantidade de energia eléctrica anual que o aproveitamento pode produzir e consequentemente uma estimativa da remuneração.

Para além disso, a caracterização da produção de CMH através da identificação de variáveis e factores que a afectam poderá revelar-se uma ajuda imprescindível para o desenvolvimento de modelos de previsão de produção eléctrica.

Um outro pormenor que se reveste de importância é caracterizar o recurso hidrológico através da identificação de indicadores de recurso e do desenvolvimento de metodologias para a avaliação do potencial energético aquando da instalação de CMH. Concretamente, este estudo permitirá identificar zonas que reúnem condições favoráveis para a exploração de novos aproveitamentos hidroeléctricos.

Em suma, por todas as razões enumeradas anteriormente, a essência da realização desta dissertação é justificável, na medida em que se prevê que irá existir uma elevada aposta na energia proveniente de CMH. Portanto, é de bastante interesse que para a instalação de CMH existam estudos de tipificação das características técnicas das centrais e das características envolventes, tipificação das produções das CMH através da caracterização do perfil de produção e das estratégias de operação e avaliação do potencial energético.

1.2- Motivação

A energia hídrica é uma das prioridades contempladas pelas políticas energéticas nacionais, portanto esta temática apresenta-se como uma das áreas de investigação e progresso científicos.

Concretamente, a caracterização de produção é uma temática que já mereceu lugar de destaque para outras fontes de energia renovável, designadamente na energia eólica e solar. No caso particular da energia eólica existem diversos mapas [13-15] que caracterizam o potencial eólico em Portugal. A finalidade adjacente à sua criação é ilustrar as características, a intensidade do vento e a estimativa de produção eólica não só na avaliação prévia do potencial energético do vento, mas também como instrumento auxiliar de decisão de futuros investimentos.

De forma análoga, também para a energia solar existem mapas de radiação solar [16, 17]. No entanto, a avaliação do potencial energético para a instalação de CMH ainda não mereceu estudo, talvez devido à reduzida fracção de produção de energia.

A motivação inerente a este trabalho é proceder à caracterização do recurso hidrológico, ao estudo e tipificação das propriedades técnicas das CMH e suas características envolventes, bem como, a caracterização dos perfis típicos de produção e das estratégias de operação.

No entanto, no que se refere à caracterização de CMH esta tarefa é dificultada, dado que não existe informação relativa às suas características e praticamente nenhum registo das suas produções anuais. Deste modo, um dos objectivos referentes à caracterização das CMH é

analisar as propriedades base, de forma a identificar os locais de elevado potencial hídrico para avaliar as possibilidades de desenvolvimento de novos aproveitamentos hidroeléctricos.

Para além disso, um outro aspecto a ter em consideração que se diferencia das centrais eólicas e fotovoltaicas é a gestão das CMH ser fortemente dependente das estratégias de operação. Portanto, é provável que existam comportamentos de produção típicos, pretendendo identificar esse padrão e proceder à sua modelização.

Em conclusão, definir a caracterização de produção de CMH é um valor acrescentado para melhor conhecer como são, como produzem e onde se encontra o potencial das CMH.

1.3- Objectivos

No âmbito geral, a presente dissertação pretende ser um desenvolvimento na área da investigação e progressos científicos através da caracterização de CMH.

Particularmente, os objectivos propostos para este trabalho baseiam-se nas seguintes temáticas:

- Estudo e tipificação das características técnicas das CMH:
 - Caudal;
 - Queda;
 - Área de bacia hidrográfica;
 - Eficiência;
 - Tipo de turbinas;
 - Factores de utilização do caudal do rio;
 - Factores de utilização da capacidade instalada;
- Caracterização de produção em CMH:
 - Estudo típico dos comportamentos de produção;
 - Modelização da produção;
 - Tipificação de produção;
- Caracterização do recurso hidrológico:
 - Estudo dos declives médios dos rios;
 - Avaliação do potencial energético para a instalação de CMH por concelho;

1.4- Estrutura da Dissertação

Esta dissertação é composta por seis capítulos, sendo este o capítulo introdutório.

No capítulo 2 é efectuada uma breve abordagem ao estado da arte referente às CMH. O objectivo é realizar uma abordagem da situação actual das CMH a nível nacional e internacional. Além disso, pretende-se efectuar uma caracterização das CMH, incidindo principalmente

sobre os seus aspectos construtivos, potência disponível, equipamentos eléctricos, configurações adoptadas e estudos de avaliação de potencial.

No capítulo 3 é efectuado um estudo breve da caracterização hidrológica, tendo como principal objectivo identificar pontos de elevado potencial hidrológico, isto é, determinar a repartição da pluviosidade pelas diferentes regiões do país. Na parte final é efectuado um estudo de correlação entre a pluviosidade prevista e a pluviosidade real, com o propósito de identificar divergências.

A caracterização das centrais é apresentada no capítulo 4. Este capítulo apresenta uma análise das características específicas das CMH, assim como a sua localização ao longo do território nacional.

O capítulo 5 contempla uma análise da produção e da avaliação do potencial hídrico, ou seja, expõe um estudo acerca de parâmetros que podem influenciar a produção e apresenta uma avaliação e identificação de zonas propícias à instalação de CMH.

Por fim, o capítulo 6 apresenta as conclusões mais relevantes e pertinentes do trabalho desenvolvido e expõe algumas perspectivas para trabalhos futuros, com base nos problemas encontrados.

1.5- Informação Usada na Dissertação

Para a realização da presente dissertação utilizaram-se dados e informação de diversas fontes. Concretamente, os dados podem ser divididos em:

➤ Dados Estáticos sobre Centrais - Fornecem informação sobre o aproveitamento hidroeléctrico e das suas características, tais como:

- 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 Turbinado;
- Queda Bruta;
- Volume da Albufeira;
- Tipo e Número de Turbinas.

Para obter os dados estáticos Utilizaram-se como fontes de informação:

- Dados de Publicações
 - Associação de Energias Renováveis (APREN) [18]
 - Anuário Pequenas Centrais Hídricas 2007;
 - Anuário Pequenas Centrais Hídricas 2006;
 - Anuário Pequenas Centrais Hídricas 2005.
- Dados Web
 - Museu da Electricidade [19]
 - Contém informação relativa às centrais eléctricas, em funcionamento ou em projecto de construção, por distrito.
- Dados Medidos em Suportes de Informação Espacial
 - *Software Google Earth*
 - Permite visualizar imagens de satélite de qualquer parte da terra explorando o seu conteúdo geográfico;
 - É usado para localizar as CMH e seus componentes;
 - Possibilita obter uma estimativa das áreas das bacias hidrográficas e pendentes;
 - Faculta a oportunidade de uma estimativa das quedas.

⚡ Dados Meteorológicos - Fornecem informação horária da pluviosidade e temperatura. As previsões meteorológicas são fornecidas pelo Centro de Geofísica da Universidade de Lisboa (CGUL) / Instituto de Ciência Aplicada e Tecnologia (ICAT), pela pessoa do Professor Pedro Miranda. Estas são adquiridas através de um modelo de meso-escala bem estabelecido, o modelo *Fifth Generation Penn State / NCAR Mesoscale Model MM5* (MM5), forçado por condições fronteira obtidas numa previsão global pelo modelo *Global Forecast System* (GFS).

⚡ 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 *Smarwatt*.

Capítulo 2

Estado da Arte

2.1- Mini-Hídricas

2.1.1- Um Interesse Recuperado

No início da década de 80, devido à existência antecedente dos choques petrolíferos de 1973, assistiu-se à recuperação do interesse pelas CMH. Este facto, traduziu-se em projectos de recuperação e de remodelação das CMH abandonadas ou em funcionamento com níveis de potências bastante inferiores aos admissíveis pelas potencialidades naturais disponíveis. Para além disso, também se procedeu à criação de novas centrais, em diversos locais, cujo potencial hídrico oferecia boas condições de rentabilidade a este tipo de empreendimento.

Deste modo, o desenvolvimento das CMH foi impulsionado pela necessidade emergente de aumento de produção e pelo facto de os melhores locais de instalação de centrais hidroeléctricas de grande porte já se encontrar tomado. Do leque de fontes de energia eléctrica descentralizada as CMH reuniam todas as condições para um progresso rápido isto devido à experiência e conhecimentos adquiridos na área dos recursos hidroenergéticos e ao potencial hidrológico português [7, 12, 20].

No entanto, somente no final da década de 80 com a publicação do Decreto-Lei n.º 189/88 [21], se estabeleceram normas relativas à actividade de produção de energia eléctrica por pessoas singulares ou colectivas de direito público ou privado, que estavam unicamente sujeitas ao cumprimento das normas técnicas e de segurança previstas. Tudo isto promoveu a produção de electricidade a partir das CMH com potência aparente instalada até 10MVA.

Contudo, só com a criação do programa comunitário VALOREN¹ [22] e que as CMH passaram a ser suficientemente atractivas para um novo tipo de entidades, nomeadamente para as

¹ O programa VALOREN apresentou-se como um programa comunitário do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional - FEDER - sujeito às disposições gerais que regem aquele fundo.

autarquias que passaram a ter uma visão diferente dos “seus” rios. Pois, face ao critério exposto só podiam beneficiar directamente dos fundos os poderes públicos ou instituições equiparadas.

Este programa foi de extrema importância na medida em que efectuou um reforço da base económica regional, criado pela Comunidade Económica Europeia (CEE), e pôs ao dispor de Portugal uma quantia de aproximadamente 50 milhões de euros. O objectivo inerente a este investimento, em traços gerais, tinha como finalidades:

- Contribuir para a exploração dos recursos energéticos locais;
- Possibilitar uma utilização mais racional da energia;
- Promover e difundir novas tecnologias energéticas;

Concretamente as regiões abrangidas proporcionaram um desenvolvimento regional, de forma a:

- Melhorar as condições de abastecimento local de energia;
- Criar postos de trabalho;
- Enriquecer as regiões tecnologicamente;

Assim sendo surgiram as primeiras empresas vocacionadas exclusivamente para a produção de energia hidroeléctrica e com elas o estabelecimento definitivo das CMH, como um tipo de projecto de elevadíssimo valor.

2.1.2- Situação em Portugal

Desde a criação do Decreto-Lei nº189/88 que existiu um despertar no interesse em instalações de CMH, devido às vantagens concedidas pela legislação e aos incentivos financeiros disponíveis. Contudo, a legislação que tem sido publicada continua a dinamizar o seu desenvolvimento. Concretamente, até 1994 foram licenciados 120 empreendimentos de utilização de água para produção de energia, sendo que, em 2001 apenas 44 estavam em funcionamento, representando um total de 170MW de potência instalada e uma produção anual de 550GWh. No que diz respeito às antigas concessões, dados indicam a existência de 54 CMH, das quais 20 pertencem ao Sistema Eléctrico Não Vinculado (SENV)² - Grupo EDP com 56MW de potência instalada e produtividade de 165GWh/ano. As restantes 34 perfazem uma potência total de 30MW e 100GWh/ano. Assim sendo, no final de 2001, existiam 98 CMH com

² O SENV funciona segundo uma lógica de mercado, podendo cada cliente não vinculado escolher o seu comercializador de electricidade. No SENV, é livre o acesso às actividades de produção e de distribuição em Média Tensão e Alta Tensão.

256MW de potência instalada e uma produção 815 GWh/ano [12, 23], sendo 78 (200MW) centrais de Produção em Regime Especial (PRE)³ e 20 (56MW) centrais do SENV.

Em Março de 2009 existiam 299MW de potência instalada em CMH e um total de 562GWh de energia eléctrica produzida (sendo esta calculada desde Abril de 2008 a Março de 2009) [10].

Em termos de perspectivas futuras, apesar de ser difícil estimar o potencial de exploração de CMH, aponta-se para valores entre 500 e 600MW de potência total instalada num prazo não muito longo, com uma produção média entre 1500 e 1800GWh/ano [12].

2.1.3- Estatuto na EU-25

Segundo [24, 25] a quantidade de CMH em operação na antiga EU-15⁴ é de cerca de 14000, com potência média instalada de 0,7MW. Em contrapartida, na EU-10⁵ e nos países candidatos (CC⁶) é de, respectivamente, 2800 e 400 aproveitamentos hidroeléctricos mini-hídricos, com 0,3MW e 1,6MW, conforme se comprova pela visualização da Figura 7.

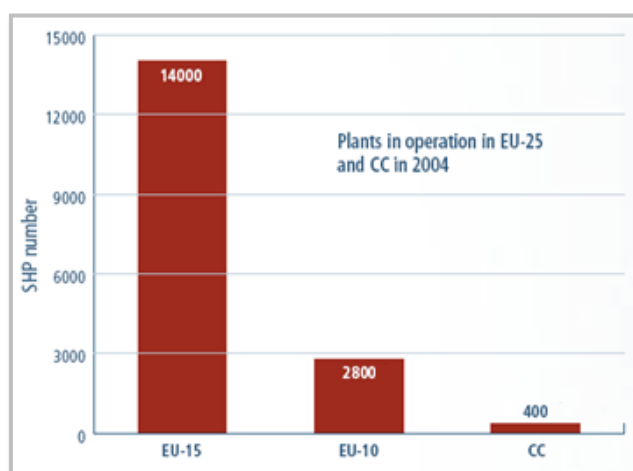


Figura 7 - CMH em Operação na EU-25 e CC, em 2004 [24].

³ A Produção em Regime Especial (PRE) inclui parques eólicos, mini-hídricas (até 10MW), autoprodutores, cogeneradores e outros produtores que gerem electricidade a partir de fontes de energia renováveis.

⁴ UE-15 é constituída pelos seguintes países: Áustria, Bélgica, Dinamarca, Finlândia, França, Alemanha, Grécia, Irlanda, Itália, Luxemburgo, Holanda, Portugal, Espanha, Suécia e Reino Unido.

⁵ UE-10 é constituída pelos seguintes países: República Checa, Hungria, Polónia, Eslováquia, Eslovénia, Letónia, Lituânia, Estónia, Chipre e Malta.

⁶ Os países candidatos (CC) são: Roménia, Bulgária e Turquia.

A capacidade total instalada nas CMH nos novos estados-membros (EU-10) e países candidatos (CC) é cerca de 10 vezes inferior face à antiga EU-15, sendo 1430MW nos EU-10 e 10828MW nos CC. A produção de electricidade por recurso a este tipo de instalações na antiga EU-15 face à EU-10 e CC é significativamente superior, sendo 15 vezes superior em relação à EU-10 e 30 vezes nos CC. Estes dados evidenciam o verdadeiro valor económico das CMH para cada grupo de países.

Segundo [24] em 2004, a Itália representava cerca de 21% do total de capacidade instalada de CMH na EU-25, seguida pela França (17%) e Espanha (16%) como se pode observar pela Figura 8.

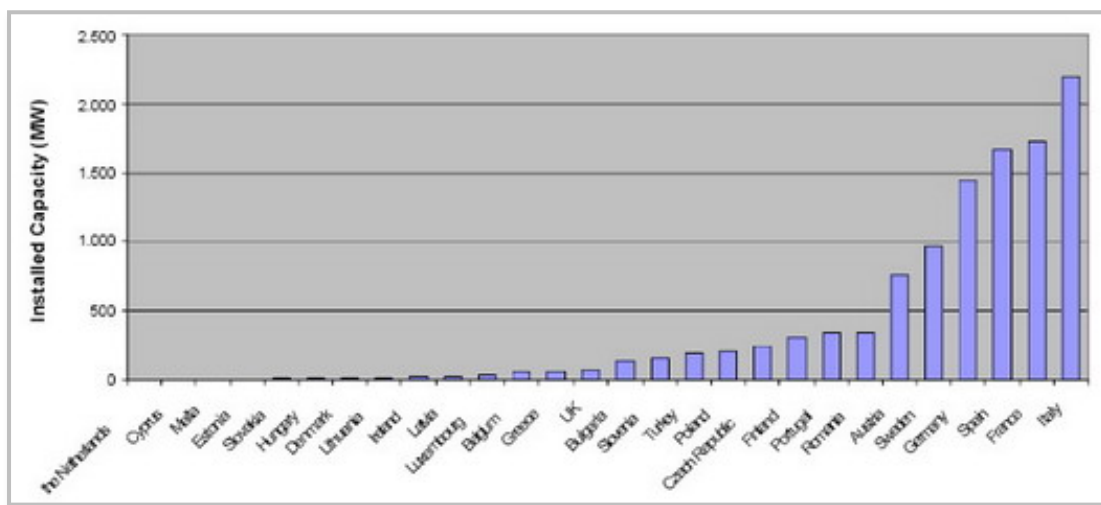


Figura 8 - Capacidade Instalada nas CMH nos Países Membros da União Europeia [26].

A Polónia e a República Checa, ambas com 2% do total da capacidade de CMH da EU-25, são as comandantes dos novos estados-membros da EU. A Roménia e a Turquia representam 25% e 15% respectivamente do total da capacidade instalada de CMH em 2002 na EU-10 + CC. Actualmente, em quase todos os países, a produção hidroeléctrica é uma fonte dominante de produção de energia dentro das energias renováveis. Concretamente nos estados-membros da EU e CC, as CMH representam aproximadamente 4,6% da produção total de energia através do recurso hídrico.

É contudo de realçar que a partir de 1 de Janeiro de 2007 a EU é composta por 27 estados-membros, juntando-se aos 25 a Roménia e a Bulgária, sendo actualmente candidatos a estados-membros a Turquia, Croácia e Macedónia.

2.1.4- Motivação

Diversas fontes [11, 24, 27-30] promulgam que as CMH reúnem um conjunto de razões favoráveis ao seu desenvolvimento, designadamente:

- Apresentam-se como um recurso eficiente (70% a 90%) de rendimento, seguro, limpo e renovável;
- Esta tecnologia possui um longo ciclo de vida, normalmente entre 50 a 75 anos;
- Contribuem para o desenvolvimento sustentável, ou seja, são economicamente viáveis e permitem a produção descentralizada para o desenvolvimento de populações dispersas;
- Respeitam o meio ambiente evitando a emissão de GEE;
- A sua construção permite criar um sistema de electricidade diversificado, sendo uma alternativa para garantir a fiabilidade do sistema eléctrico aquando da ocorrência de perturbações na rede;
- É uma fonte de energia descentralizada e localizada próximo dos consumidores, minimizando as perdas de transmissão de energia;
- Mobilizam recursos financeiros e contribuem para o desenvolvimento económico e social das populações e apresentam-se como uma garantia de energia autónoma e fiável a longo prazo.

Em conclusão, as CMH assumem um papel importante no desenvolvimento das energias renováveis na Europa, assim como, nos países em desenvolvimento. Com a crescente procura de electricidade, os acordos internacionais que visam minimizar as emissões de GEE, a degradação ambiental causada pela utilização de combustíveis fósseis, bem como, o facto de em muitos países as grandes centrais hidroeléctricas já esgotaram os locais para a sua exploração, há um interesse crescente no desenvolvimento de CMH. Na verdade, as CMH ainda com um grande potencial inexplorado, apresentam-se como capazes de contribuir, significativamente, para as necessidades energéticas futuras, oferecendo uma excelente alternativa às fontes convencionais de energia eléctrica, não só na Europa, como também nos países em desenvolvimento.

2.1.5- Dimensionamento e Classificação

A designação de CMH generalizou-se em Portugal para classificar os aproveitamentos hidroeléctricos de potência inferior a 10MW⁷. Sendo este o limite considerado internacionalmente para diferenciar as pequenas das grandes centrais hídricas. As formas de dimensionar e classificar uma CMH estão associadas a três características. Estas características designam-se por: potência, queda e caudal.

⁷ O limite superior de potência varia de país para país, entre 1,5 a 12 MW. Os 10 MW está a tornar-se o limite máximo normalmente aceite para as CMH, tendo sido adoptado pela Comissão Europeia e pela *European Small Hydropower Association* (ESHA)

2.1.5.1- Potência

A potência é a característica que permite diferenciar as pequenas centrais hidroeléctricas das grandes centrais hidroeléctricas. Essa divisão é realizada usando como fronteira o valor de 10MW de potência. As centrais cuja potência seja de valor igual ou inferior são classificadas como CMH.

As CMH podem ser divididas em função da potência instalada, sendo que a *Union Internationale des Producteurs et Distributeurs D'énergie Électrique* (UNIPED) recomenda a classificação apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação das CMH quanto à Potência.

<i>Designação</i>	<i>P_{inst} (MW)</i>
Pequena Central Hidroeléctrica	<10
Mini Central Hidroeléctrica	<2
Micro Central Hidroeléctrica	<0,5

A potência a instalar num aproveitamento hidroeléctrico depende da informação de duas características físicas: altura de queda e fluxo de água presente no local de instalação da CMH. A grande parte das CMH retira partido da energia potencial da água que se consegue formar através da altura de queda. Assim sendo, a potência é expressa pela (Eq. 1) que se apresenta de seguida [27, 29, 31-33]:

$$P = \rho \times g \times H \times Q \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde:

P - Potência instalada (kW);

ρ - Densidade da água (kg/m³);

g - Aceleração da gravidade: 9,81 (m/s²);

H - Queda (m) ;

Q - Caudal (m³/s).

Como acontece com qualquer conversão energética existem perdas intrínsecas ao processo. Por esta razão, a (Eq. 1) deve ser modificada para se ter em conta as perdas dos equipamentos (ver (Eq. 2)):

$$P = \eta \times \rho \times g \times H \times Q \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde:

η - Rendimento do sistema (%);

A eficiência do sistema incorpora todos os componentes que fazem parte da parte hidráulica da central e que possuem influência na geração de energia eléctrica. Alguns desses componentes são a turbina, o gerador e a conduta forçada. A potência de saída destes sistemas é normalmente expressa em kW ou MW.

A literatura existente considera que muitas das vezes as constantes de gravidade e densidade são combinadas de modo a se assumirem valores fixos de eficiência [34-36] ou por vezes é totalmente desprezada a eficiência do sistema [37]. Como regra geral, a *European Small Hydro Association* (ESHA) utiliza a seguinte equação para aproximar a potência disponível em kW numa CMH [35, 36]:

$$P = 7 \times H \times Q \quad (\text{Eq. 3})$$

Isto equivale a um sistema fixo de 70% de eficiência de operação. Contudo num trabalho realizado pela *Sigma Engineering* no ano de 2000 esse valor foi aumentado para os 80%, utilizando um multiplicador de 7,83 [34] na (Eq. 3). Porém, na fixação dos valores de eficiência do sistema pode-se subestimar a energia fornecida à rede eléctrica a partir de uma CMH [38].

É notório referir que as expressões anteriores incluem termos específicos cuja interpretação física é essencial para a determinação da potência a instalar em projectos de aproveitamentos hidroeléctricos. Particularmente, apresenta-se de seguida o significado das variáveis queda e caudal.

2.1.5.2- Queda

A altura é um dos factores chave para as CMH, pois é através desta característica que se consegue usufruir da energia potencial presente na água, como também da energia cinética que é dependente da queda. Esta altura de queda pode ser dividida e classificada em três escalões. Muitas classificações têm sido dadas a esta variável, de seguida apresenta-se uma das possíveis designações [30].

Tabela 2 - Classificação das CMH quanto à Altura da Queda.

Designação	H_u (m)
Queda Baixa	2-30

Queda Média	30-100
Queda Alta	>100

É importante referir que existem diversos conceitos associados à caracterização da altura de quedas, designadamente:

- Altura de queda bruta H_b - É a 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 $H_{bm\acute{a}x}$ - É a 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.

2.1.5.3- Caudal

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 consequentemente não existe produção de electricidade.

Ao contrário da potência e da altura de queda para o caudal não existe uma classificação unânime quanto a possíveis escalões de caudal. Contudo, este é muito importante para a escolha da turbina a utilizar num aproveitamento hidroeléctrico.

2.1.6- Regime de Exploração

Quanto ao tipo de exploração das CMH é possível classificá-las relativamente à sua capacidade de armazenamento de água: albufeira ou fio-de-água. É comum associar às CMH o regime de exploração a fio-de-água devido à sua reduzida capacidade de regularização do caudal afluente. Na maior parte dos casos esta capacidade não excede algumas horas, pelo que o caudal utilizado é geralmente o caudal instantâneo do rio. Esta regularização depende do caudal do rio, isto é, se as afluências forem elevadas as CMH produzem continuamente de forma a não desperdiçar o recurso, contudo se as afluências forem pequenas permitem às centrais realizar uma regulação (estratégias de operação), produzindo nas horas de tarifa mais elevada (horas de ponta).

Contrariamente, as centrais de albufeira são compostas por uma barragem que permite reter o caudal afluyente, sendo assim possível realizar uma regulação de produção.

2.1.7- Constituição

Os principais elementos que constituem uma CMH, segundo [20, 27] são os seguintes:

- Albufeira;
- Canal de adução;
- Câmara de carga;
- Conduta forçada;
- Edifício da central.

É contudo notório referir que estes elementos são para centrais com regime de exploração a fio-de-água como se apresenta na Figura 9. Porém em Portugal nem todas as CMH possuem regime de exploração a fio-de-água. Concretamente, existem CMH com regime de exploração de albufeira sendo caracterizadas por possuírem unicamente a barragem, no qual está incorporada a central e a respectiva albufeira para armazenamento de água, tal como se mostra na Figura 10.



Figura 9 - Central de Fio-de-Água.



Figura 10 - Central de Albufeira.

2.1.7.1- Albufeira

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.

É importante salientar que a estrutura que permite a acumulação de água através do impedimento da passagem do percurso natural da água dos rios ou ribeiros exige uma especial atenção. Concretamente, é necessário atender a aspectos como o seu posicionamento e a sua altura, dado que estes irão afectar o volume do reservatório e a consequente inundação de algumas propriedades próximas do mesmo. 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.

Com o intuito de realçar as diferenças do nível do volume de albufeira, para os regimes de exploração a fio-de-água ou albufeira, apresentam-se respectivamente a Figura 11 e a Figura 12.



Figura 11 - Albufeira Típica de um Aproveitamento a Fio-de-água.



Figura 12 - Albufeira Típica de um Aproveitamento com Capacidade de Regulação.

2.1.7.2- 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 nível, 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. No caso de apresentar um comprimento muito longo e de difícil construção pode inviabilizar o projecto de construção de uma CMH.

Esta estrutura é uma característica específica dos aproveitamentos a fio-de-água. Deste modo, com o intuito de explicar com mais detalhe esta estrutura, considerou-se como base a Figura 9 e procedeu-se à demarcação da zona do canal de adução através do traçado de uma linha azul, de modo a proporcionar uma melhor percepção, conforme se pode observar na Figura 13.

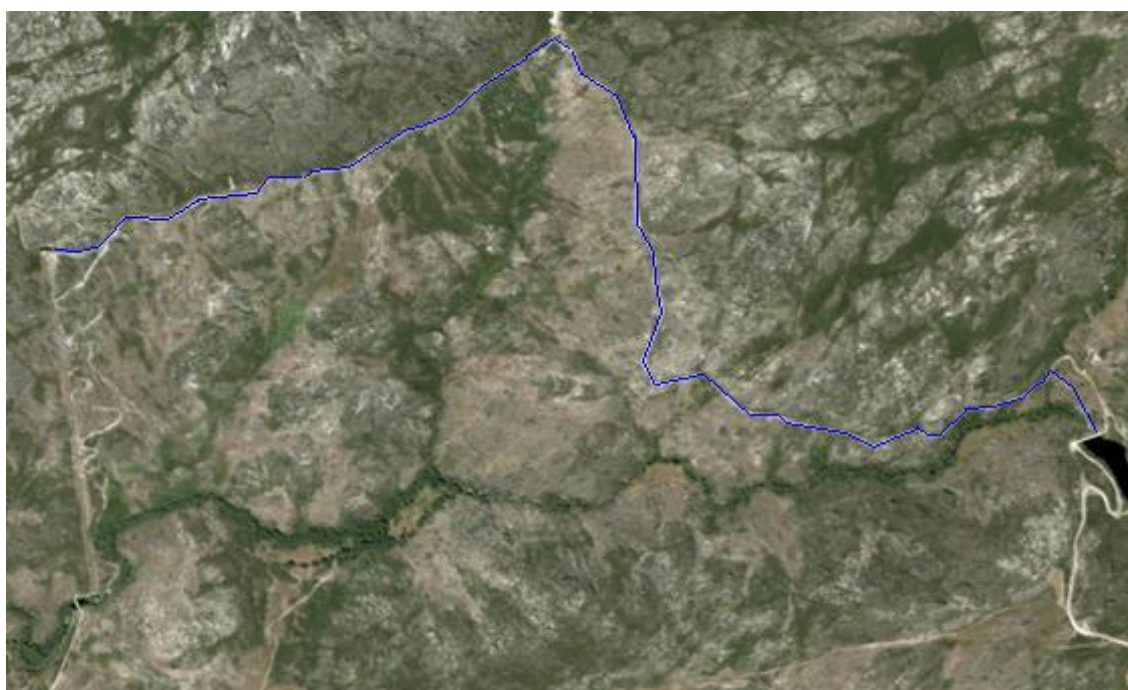


Figura 13 - Delimitação do Canal de Adução.

2.1.7.3- Câmara de Carga

A câmara de carga é a estrutura existente entre o canal de adução e a conduta forçada. 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 de salientar que o dimensionamento deste elemento é dependente da altura de queda, uma vez 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.

De forma idêntica ao realizado anteriormente, na Figura 14 apresenta-se uma imagem com mais detalhe da câmara de carga.



Figura 14 - Delimitação da Câmara de Carga.

2.1.7.4- Conduta Forçada

A conduta forçada é o elemento ao qual está incumbida a missão de conduzir a água desde a câmara de carga até ao edifício da central onde se encontram as turbinas. Ao contrário do que acontece no canal de adução, a conduta forçada possui um determinado desnivelamento. Quanto maior for o desnível da conduta forçada melhor, uma vez que se torna possível usufruir da pressão da água originada por este desnível.

Este elemento possui uma superfície circular, sendo normalmente construída em aço e apresenta-se desenterrada. 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 desenvolvimento das CMH.

A Figura 15 apresenta a conduta forçada que, com o intuito de dar mais ênfase a este elemento, procedeu-se à sua coloração em tom azul.

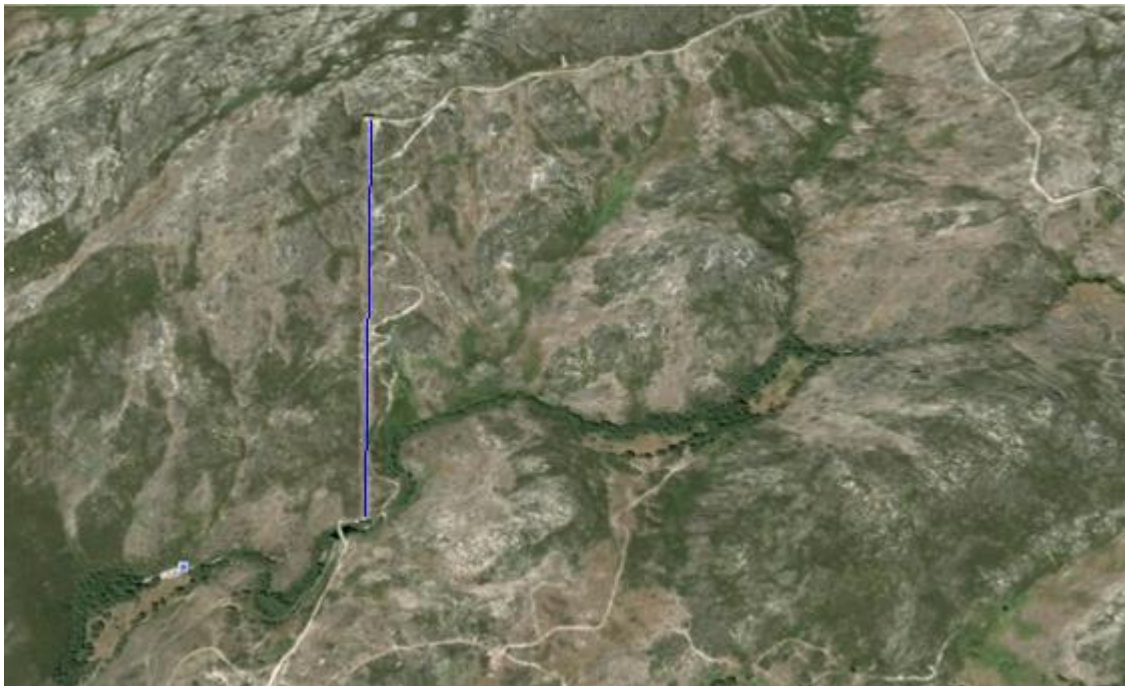


Figura 15 - Delimitação da Conduta Forçada.

2.1.7.5- Edifício da Central

O edifício da central é composto por equipamentos mecânicos e eléctricos que irão permitir a produção de energia eléctrica, através da conversão de energia potencial gravítica em energia cinética e energia mecânica de rotação em energia eléctrica, respectivamente.

Em termos de localização, este edifício situa-se no final de toda a estrutura, isto é, só depois de a água ser retida na albufeira, transportada pelo canal de adução, armazenada na câmara de carga e conduzida pela conduta forçada é que chega ao edifício, para situações de regime de exploração a fio-de-água. No caso de uma central de albufeira existe apenas um pequeno canal que transporta a água desde a barragem até à casa das máquinas que, frequentemente, se situa no seu interior.

2.1.7.5.1- Equipamentos Mecânicos

Segundo [20, 27, 39, 40] o principal equipamento mecânico é a turbina. A turbina realiza a conversão da energia cinética associada ao movimento da água em energia de rotação. É importante salientar que para aumentar a velocidade da água são criados desníveis, de forma a usufruir da energia potencial gravítica.

A turbina hidráulica representa uma parcela elevadíssima do custo total de uma CMH, podendo chegar quase aos 50%, sendo que a sua selecção deve respeitar uma escolha criteriosa e selectiva. Particularmente, os factores a considerar no acto da sua selecção são a altura de queda e o fluxo de água disponível. No mercado existem vários tipos de turbinas de forma a lidar com os diferentes níveis de altura e de caudal. Contudo, existem duas grandes categorias sendo:

- Turbinas de impulso (também denominadas de acção);
- Turbinas de reacção.

As turbinas de impulso realizam a conversão da energia cinética contida num jacto de água em energia mecânica. Estas turbinas são geralmente utilizadas em aplicações com elevadas quedas e caudais baixos, possuindo eficiências entre os 70% e 90%.

É comum a aplicação deste tipo de turbinas através das turbinas *Pelton* (ver Figura 16), que se caracterizam por possuir um fluxo de água praticamente constante que através de um ou mais injectores atingem de forma tangencial as conchas da turbina, permitindo a conversão da energia cinética contida no jacto de água em energia mecânica.



Figura 16 - Turbina *Pelton* [40].

As turbinas de reacção são caracterizadas por funcionarem imersas em água. O seu movimento é originado pelo perfil adequado das pás do rotor que usufrui da diferença de pressão provocada pela água entre o interior e o exterior da turbina. Estas turbinas são normalmente aplicadas para médias e baixas quedas e apresentam eficiências ligeiramente inferiores às turbinas de impulso.

Nas turbinas de reacção existem dois tipos que merecem maior destaque: turbinas *Kaplan* e turbinas *Francis*. As turbinas do tipo Kaplan são turbinas axiais (ver Figura 17), normalmen-

te utilizadas para funcionamentos de baixa queda e elevado caudal. As turbinas radiais, do tipo *Francis* (ver Figura 18) são apropriadas para funcionamentos com condições intermédias de queda e caudal.

É conveniente referir que existe uma vasta gama de turbinas, no entanto, as características são similares às referidas anteriormente.



Figura 17 - Turbina *Kaplan* [40].



Figura 18 - Turbina *Francis* [40].

Com o objectivo de evidenciar o que foi referido anteriormente, na Figura 19 apresenta-se um gráfico que demonstra a disposição das diferentes turbinas em função da altura de queda e do caudal.

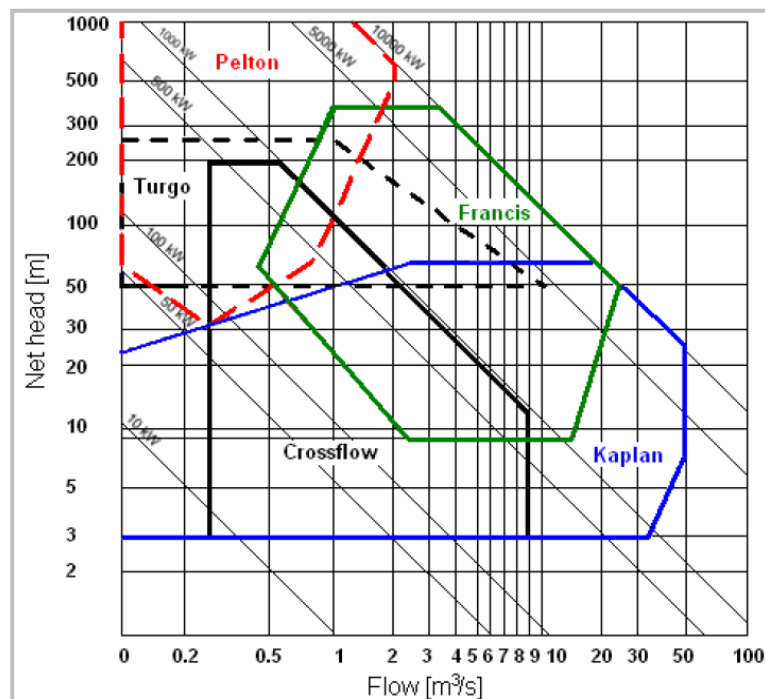


Figura 19 - Tipo de Turbina em Função da Queda e Caudal [41].

Como se pode observar pela figura anterior as turbinas *Kaplan* são as que possuem melhores características em baixas quedas e elevados caudais. As turbinas *Pelton* funcionam em situações inversas, isto é, em condições de altas quedas e baixos caudais. No que se refere às turbinas *Francis*, estas funcionam para situações intermédias de caudal e de quedas.

Na Figura 20 apresenta-se um gráfico com a eficiência dos diversos tipos de turbinas em função da percentagem de caudal nominal.

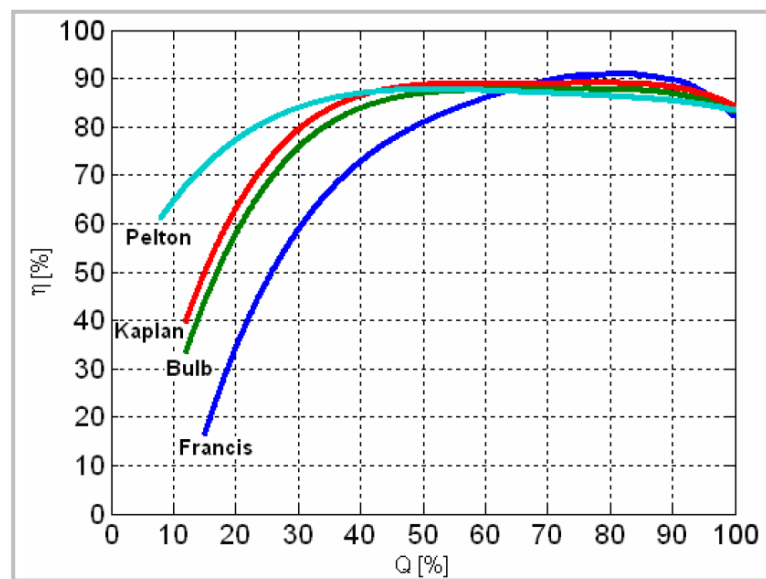


Figura 20 - Eficiência em Função da Percentagem do Caudal Nominal [41].

Como se pode constatar pela figura anterior à medida que o caudal se aproxima do caudal nominal existe um aumento da eficiência das turbinas. Porém, as turbinas Pelton e as turbinas Kaplan a partir de 40% do caudal nominal da turbina já se encontram na sua eficiência máxima. Este facto demonstra a flexibilidade destas e o seu bom funcionamento para as diferentes gamas de caudal. Em suma, estas turbinas apresentam rendimentos a rondar os 90%.

2.1.7.5.2- Equipamentos Eléctricos

O edifício da central é composto por vários equipamentos eléctricos, contudo o elemento principal é o gerador eléctrico. O gerador é o elemento que está acoplado à turbina, que realiza a conversão de energia mecânica em energia eléctrica.

A especificação do gerador é dependente das características da turbina seleccionada, designadamente, do valor da velocidade nominal e de embalamento, constante de inércia, rendimento e tipo de regulação.

Concretamente, nas CMH podem ser utilizados dois tipos de geradores: geradores síncronos e geradores assíncronos (também designados de geradores de indução). Os geradores síncronos possuem a vantagem de poderem ser operados de forma autónoma, portanto, são vulgarmente utilizados para aplicações fora da rede. Os geradores de indução apresentam um custo inferior ao gerador síncrono, sendo os mais adequados para aplicações ligadas à rede devido às suas características de robustez e fiabilidade [27, 40].

É conveniente referir que associado ao gerador de indução existe um sistema composto por baterias (sistema económico), que permite realizar o armazenamento do excesso de energia quando a procura for reduzida e auxilia no cumprimento da carga quando existe um excesso de procura [27]. Deste modo, assegura-se que o sistema seja mais eficaz e robusto.

2.1.8- Configurações

Ao longo do território nacional existe uma vasta diversidade de situações que determinam a estrutura da CMH a implementar. Concretamente, existem zonas caracterizadas por ostentarem quedas elevadas e opostamente, zonas totalmente planas. Existem rios de elevados caudais e zonas que apresentam caudal reduzido. Efectivamente, existe um conjunto de factores que de forma directa condicionam a configuração de uma CMH.

De seguida apresentam-se as configurações mais usuais existentes ao longo de Portugal.

2.1.8.1- Central com Canal de Adução e Conduta Forçada

Este tipo de configuração contempla o conjunto de elementos associados às CMH com uma exploração a fio-de-água. Faz uso do canal de adução, câmara de carga e da conduta forçada, para além do edifício da central e da albufeira que são elementos frequentes em todos os aproveitamentos desta natureza.

Em termos de aplicação, esta configuração é usada para criar condições de alturas de quedas elevadas, ou seja, em situações em que não exista um desnível significativo do rio ou ribeira(o) é necessário criar desníveis artificiais de modo a usufruir de maior potencial gravítico.

A Figura 21 apresenta um central com este tipo de configuração. Especificamente, é apresentado o canal de adução com um traçado azul, a conduta forçada a cinzento, a câmara de carga a laranja, a vermelho a albufeira e a verde o edifício da central. Como forma de

evidenciar a altura de queda criada pela conduta forçada é apresentada a cota da câmara de carga e a cota do edifício da central.



Figura 21 - Central com Canal de Adução e Conduta Forçada.

2.1.8.2- Central só com Conduta Forçada

Neste caso existe unicamente a presença de uma conduta forçada. A conduta forçada é a única estrutura que faz a ligação entre a barragem e o edifício da central.

Este tipo de configuração é utilizada sempre que o edifício da central se encontra perto da barragem e apresenta valores elevados de queda. Na Figura 22 apresenta-se um exemplo de uma configuração deste género. A linha a azul está sobreposta sobre a conduta forçada dando a percepção do seu trajecto rectilíneo. O círculo a vermelho indica o local da albufeira que, no exemplo em questão, se encontra totalmente vazia, enquanto o círculo a verde indica a localização do edifício da central.

Com o intuito de realçar que esta configuração é sobretudo caracterizada por elevadas quedas, apresenta-se simbolizado através de uma seta o valor da cota correspondente ao local da barragem e do edifício da central.



Figura 22 - Central só com Conduta Forçada.

2.1.8.3- Central Encastrada na Barragem

Uma outra configuração existente em Portugal é a apresentada na Figura 23. Esta configuração caracteriza-se por ostentar uma baixa queda e possuir a central na própria barragem.

Este tipo de configuração é aplicável em situações em que os rios ou ribeiras(os) apresentem um desnível baixo e um caudal considerável, que lhes permita usufruir da pressão existente na água.

Na Figura 23 o círculo a vermelho indica a localização da central e como se pode observar esta encontra-se totalmente encastrada na barragem.



Figura 23 - Central Encastrada na Barragem.

2.1.8.4- Central só com Canal de Adução

Na impossibilidade da construção do edifício da central na própria barragem torna-se necessário criar um canal de adução que faça a condução da água contida na albufeira até ao edifício da central onde se encontra a turbina. Pode-se caracterizar este tipo de centrais por apresentarem o edifício da central afastado da barragem e por possuírem alturas de queda baixas.

Na Figura 24 apresenta-se um exemplo deste tipo de exploração, tendo-se sinalizado com uma linha azul o canal de adução, o círculo vermelho a albufeira e o círculo verde o edifício da central.

Com o intuito de sustentar a afirmação de que este tipo de configuração é caracterizado por ostentar baixas quedas, pode-se dizer que a diferença de cota entre a albufeira e o edifício da central é de 1 a 2 metros.



Figura 24 - Central só com Canal de Adução.

2.1.8.5- Casos Específicos

Após a análise das configurações existentes ao nível da exploração das CMH, em seguida apresentam-se ideias das aplicações deste tipo de configurações. Particularmente, são apresentados casos que demonstram a versatilidade das CMH consoante as necessidades existentes e as condições geográficas dos locais a implementar.

Segundo [7] a utilização da água como forma de produção de energia eléctrica surgiu em Portugal na última década do século XIX, com um desenvolvimento natural até por volta de 1930. Este crescimento foi ditado pela necessidade de abastecer consumos locais, nomeadamente pequenas instalações de iluminação pública e pequenas indústrias.

Estas indústrias surgiram localizadas perto das margens de rios ou ribeiras(os) de forma a aproveitarem a força motriz da água, para gerarem energia eléctrica e abastecer as suas fábricas. Na Figura 25 apresenta-se um caso particular, em que se pode reparar o pequeno desvio realizado à água do rio de forma a conduzi-la para a instalação da fábrica.



Figura 25 - Central Construída para Fornecimento de Energia à Indústria.

Com o passar do tempo começou-se a perceber que podia ser possível realizar a produção de energia eléctrica e ao mesmo tempo realizar uma política de armazenamento de água para fins agrícolas. Este tipo de políticas visa promover áreas que se encontrem normalmente desfavorecidas devido à constante falta de água, consideradas áreas com agricultura frágil mas que apresentam produtos de qualidade (aveia, cevada, girassol, trigo, entre outros).

Na Figura 26 apresenta-se uma imagem de uma central desta natureza. Estas centrais a nível nacional encontram-se maioritariamente na região sul, apresentando desníveis de apenas alguns metros devido à sua geografia plana.

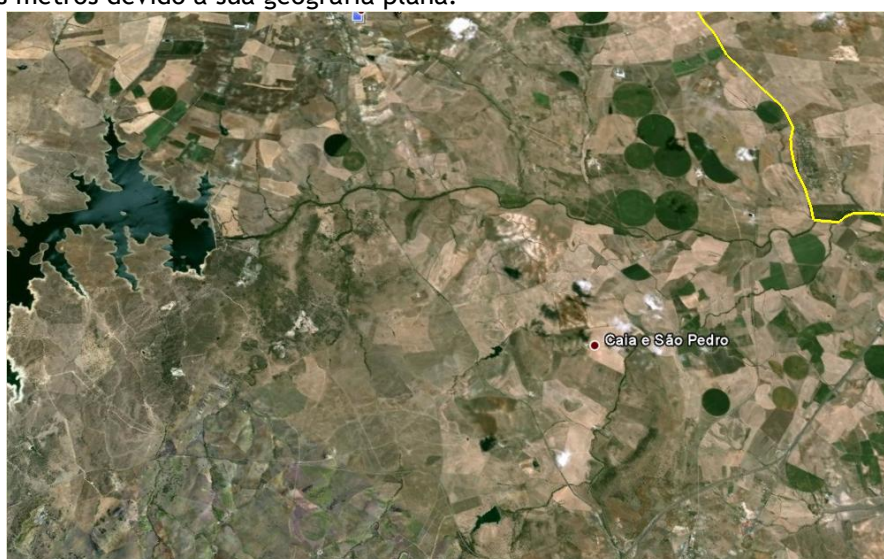


Figura 26 - Central para Fim de Regadio.

2.1.9- Avaliação do Recurso das CMH

O estudo de avaliação do potencial hídrico é indispensável para identificar zonas com potencial para o desenvolvimento de novos aproveitamentos hidroelétricos.

A maior parte dos países a nível mundial realizam estudos sobre a avaliação do recurso de CMH, como por exemplo [37, 42, 43]. Particularmente uma pequena síntese do desenvolvimento do potencial das CMH para muitos países encontra-se disponível no *International Small Hydro Atlas* [44].

Os construtores de CMH podem basear-se nos estudos realizados e nos *softwares* disponíveis, de forma a obterem uma melhor perspectiva das nuances dos locais onde estas serão implementadas. Esta avaliação pode ser realizada em duas vertentes, isto é, pode ser realizado um estudo da avaliação de potencial a nível nacional e regional ou a nível local.

Para quantificar o potencial do recurso hídrico a nível nacional e regional são realizadas numerosas simplificações e suposições. Concretamente, assume-se que a eficiência do sistema nunca será 100% [37, 45]. Portanto este parâmetro ostentará valores compreendidos entre os 70% [46] e os 80% [34] como se pode observar na (Eq. 4).

$$P = (0,7 \text{ a } 0,8) \times \rho \times g \times H \times Q \quad (\text{Eq. 4})$$

Para além disso, vários estudos apoiam a utilização média do fluxo de aflúências [46]. A *Sigma Engineering* recomenda que para o dimensionamento de CMH a média anual de fluxo seja entre 80% a 120%. No entanto, estes valores podem ser enganadores para CMH com regime de exploração a fio-de-água, dado que não têm capacidade para fornecer esse nível de geração contínua. Os resultados das avaliações são normalmente apresentados em termos da capacidade total (MW), mais do que o total de energia que a CMH possa vir a produzir [37, 44, 47]. É notório referir que num ponto posterior será apresentada a gama de valores típicos para o território nacional.

No que concerne à avaliação de potencial a nível local já existem diversos *softwares* desenvolvidos com o objectivo de ajudar os futuros produtores na avaliação do potencial extraível de um determinado local. *Wilson* [48] efectuou uma revisão aprofundada de todos os *softwares* para a *International Energy Agency* (IEA), que pode ser vista sumariamente no seu *website* [49].

Contudo a grande maioria destes *softwares* foram desenvolvidos para avaliar locais individuais, não sendo propícios para a realização de avaliações nacionais e regionais. Além de que, muitos dos programas são desenvolvidos especificamente para o país que solicitar o estudo [44, 45, 48]. Um dos *softwares* que permite analisar estas avaliações é o IMP (*Integra-*

ted Method for Power Analysis), que se baseia nas condições meteorológicas e em modelos topográficos de forma a determinar os fluxos horários ou diários [50], determinando o potencial a extrair de uma CMH.

Na Figura 27 apresenta-se uma lista de *softwares* utilizados nas últimas duas décadas para realizar a avaliação de locais com condições favoráveis à instalação de CMH.

Assessment Tool		Features				
Product	Applicable Countries	Hydrology	Power & Energy	Costing	Economic Evaluation	Preliminary Design
ASCE Small Hydro	USA	✓				
HES	USA	✓				
Hydra	Europe	✓	✓			
IMP	International	✓	✓			
PEACH	France	✓		✓		✓
PROPHETE	France	✓	✓		✓	
Remote Small Hydro	Canada	✓	✓		✓	
RETScreen®	International	✓	✓	✓	✓	

Figura 27 - *Softwares* e Metodologias Usadas para Avaliação de Locais Disponíveis para a Instalação de CMH [49].

Como se pode constatar pela figura anterior a maior parte dos *softwares* são desenvolvidos para estudos de um determinado país. Contudo, ainda não existem *softwares* para realizar um planeamento regional do potencial de CMH. Particularmente, num ponto posterior é apresentado um estudo do potencial regional para a instalação de CMH, ao longo de Portugal.

Capítulo 3

Caracterização Hidrológica

3.1- Introdução

O objectivo deste trabalho de dissertação visa realizar a caracterização da produção de CMH, a temática de caracterização hidrológica merece algum destaque, pois antes de explorar e abordar a produção é fundamental classificar o recurso hídrico.

Efectivamente, a água é o recurso necessário para a produção de energia eléctrica através de aproveitamentos hidroeléctricos. Esta é uma fonte de energia primária que usufruindo da sua energia potencial gravítica e cinética permite gerar energia eléctrica através da conversão de energia mecânica em energia eléctrica.

Com o intuito de efectuar uma caracterização do recurso hídrico dividiu-se este capítulo em três grandes blocos. O primeiro bloco faz referência à distribuição geográfica da pluviosidade a nível nacional, isto é, apresenta uma perspectiva da distribuição da precipitação por região. O segundo faz uma abordagem temporal da pluviosidade transmitindo uma ideia da pluviosidade horária e diária que abaterá o território nacional, bem como, o número de dias seguidos em que existirá ou não precipitação.

Por fim será realizado um estudo sobre os valores de correlação existente entre dois pontos de pluviosidade, em função da sua distância de forma a analisar eventuais diferenças entre o modelo de previsão de pluviosidade e o seu valor real.

3.2- Distribuição Geográfica da Pluviosidade

Para o bom funcionamento de uma CMH, para além da pluviosidade que é utilizada como fonte de energia primária, também é necessário que na sua envolvente exista um conjunto de condições naturais favoráveis. Particularmente características específicas do terreno como

altura de queda, caudal e área da bacia hidrográfica que serão alvo de estudo no próximo capítulo deste presente trabalho.

A pluviosidade é uma característica meteorológica que descreve a quantidade de chuva que precipita numa determinada área ou região, sendo normalmente medida em milímetros (mm), onde um mm de chuva equivale a um litro (l) de água por metro quadrado (m^2). A sua distribuição a nível nacional não é constante ao longo de todo o território continental, denotando-se por vezes uma discrepância elevada entre pontos geográficos. Deste modo, optou-se por efectuar uma divisão do território nacional por distritos.

É importante referir que os valores de pluviosidade utilizados são provenientes de previsões meteorológicas obtidas a partir de previsões de modelos atmosféricos locais, especificamente, dos modelos MM5. Estas previsões foram realizadas para o ponto médio da bacia hidrográfica de cada CMH, portanto existe mais que um ponto de medição para cada distrito dado que em diversas situações existem várias CMH por distrito. Assim sendo, procedeu-se à respectiva média de dados de pluviosidade por distrito para o ano de 2007, de forma a obter um único valor.

Com o objectivo de avaliar os distritos pela quantidade de pluviosidade anual procedeu-se à criação, através de um sistema de informação geográfica de um mapa (ver Figura 28) que retrata a gama de pluviosidade ocorrida por distrito.

No entanto, convém salientar que a pluviosidade não possui um valor constante, sendo muito variável de ano para ano, e dado que foram utilizados valores previstos de pluviosidade estes podem conter algum erro.

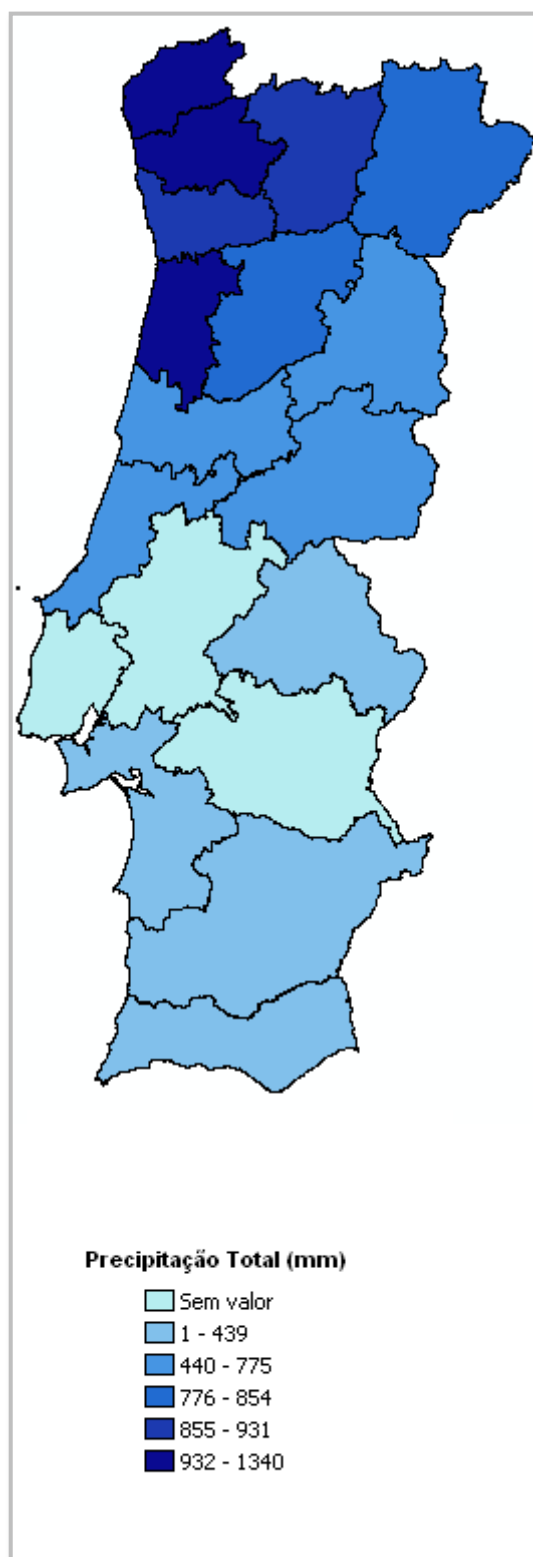


Figura 28 - Mapa da Quantidade de Precipitação Anual por Distrito.

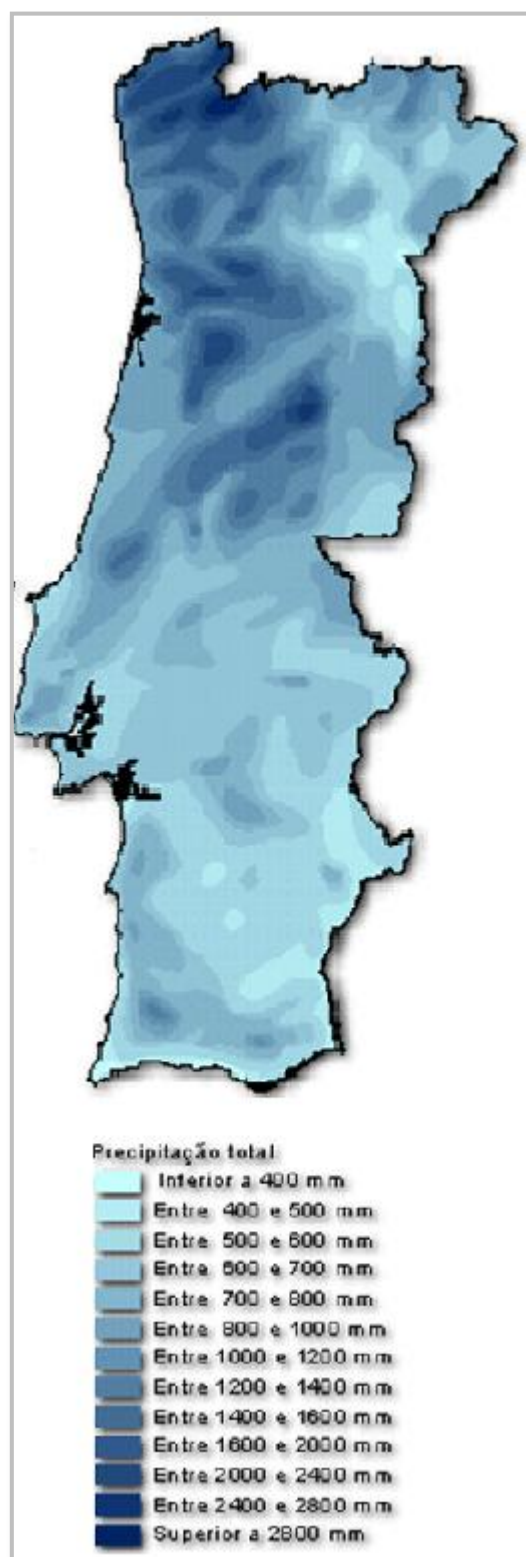


Figura 29 - Precipitação Total Anual do Território Nacional [51].

Pela análise da Figura 28 conclui-se que a região norte de Portugal ostenta valores superiores de pluviosidade face ao restante país. Refira-se que para os distritos com preenchimento a tom azul mais claro não existe qualquer tipo de informação relativa a pluviosidade prevista para 2007 devido ao facto de nesta zona não existirem CMH.

Como forma de estabelecer comparação, na Figura 29 apresenta-se um mapa que demonstra os valores médios reais típicos para o território nacional. Após análise verifica-se que o mapa obtido para valores previstos é bastante idêntico ao real, apresentando ambos pontos de pluviosidade mais elevada na zona norte do país, bem como, em algumas zonas dos distritos de Aveiro e Viseu. A diferença mais relevante encontra-se na gama de valores que parece estar afectada de um factor de escala. Uma das possíveis explicações reside no facto de o ano 2007 ter sido um ano extremamente seco, sendo mesmo o segundo mais seco desde 1931 [52].

Em conclusão, existirá potencialmente um maior desenvolvimento de instalações de CMH nas zonas situadas a norte de Portugal, originado pela existência de maiores quantidades de recurso hídrico (caudal) para assegurar o seu funcionamento.

3.3- Caracterização Temporal e Geográfica da Pluviosidade

Apesar de Portugal não possuir uma grande dimensão, com 92 mil km², optou-se pela divisão geográfica do país em 3 regiões com o intuito de assegurar uma melhor caracterização temporal de pluviosidade.

A região norte é composta pelos distritos de Braga, Bragança, Porto, Viana do Castelo e Vila Real, a região centro pelos distritos de Aveiro, Castelo Branco, Coimbra, Guarda, Leiria e Viseu e por último a região sul é composta pelos distritos de Beja, Évora, Faro, Lisboa, Portalegre, Santarém e Setúbal.

3.3.1- Caracterização da Pluviosidade Horária

A análise da caracterização geográfica apresentada anteriormente demonstrou unicamente o estudo da pluviosidade anual que atingiu um determinado distrito no ano de 2007. Porém, como forma de avaliar a intensidade da pluviosidade que pode ocorrer numa determinada zona, de seguida apresenta-se um estudo relativo a caracterização da pluviosidade horária que atinge o território nacional.

Tendo por base o conjunto de informação relativa a dados de pluviosidade prevista para o ano 2007 em diversas zonas de Portugal, procede-se à elaboração de uma matriz que contempla a junção de pontos agrupados por região. O objectivo adjacente é caracterizar a frequência de ocorrência de determinados valores de pluviosidade horária por região.

Seguidamente procedeu-se ao cálculo da probabilidade de ocorrência de diversos intervalos de pluviosidade para cada região. Da Figura 30 à Figura 32 apresentam-se os resultados obtidos.

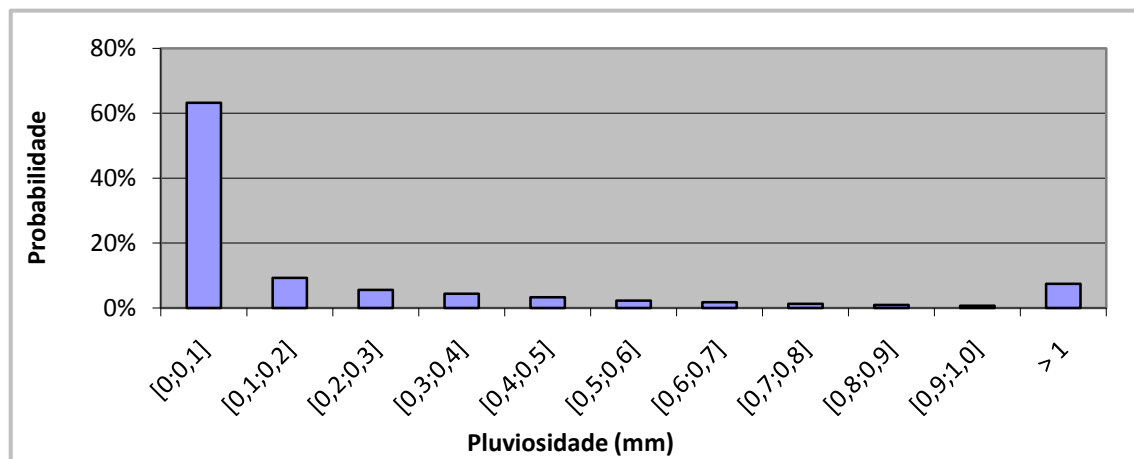


Figura 30 - Caracterização da Pluviosidade Horária para a Região Norte.

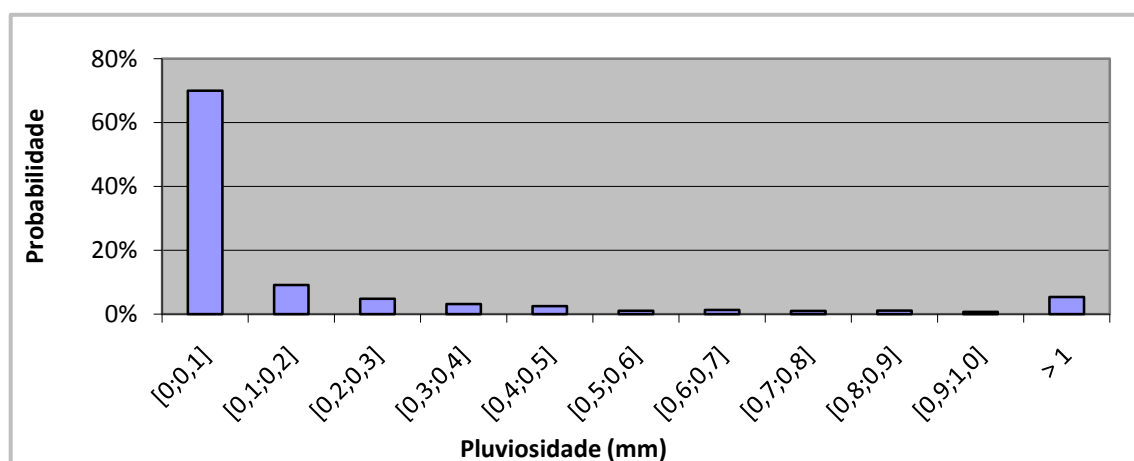


Figura 31 - Caracterização da Pluviosidade Horária para a Região Centro.

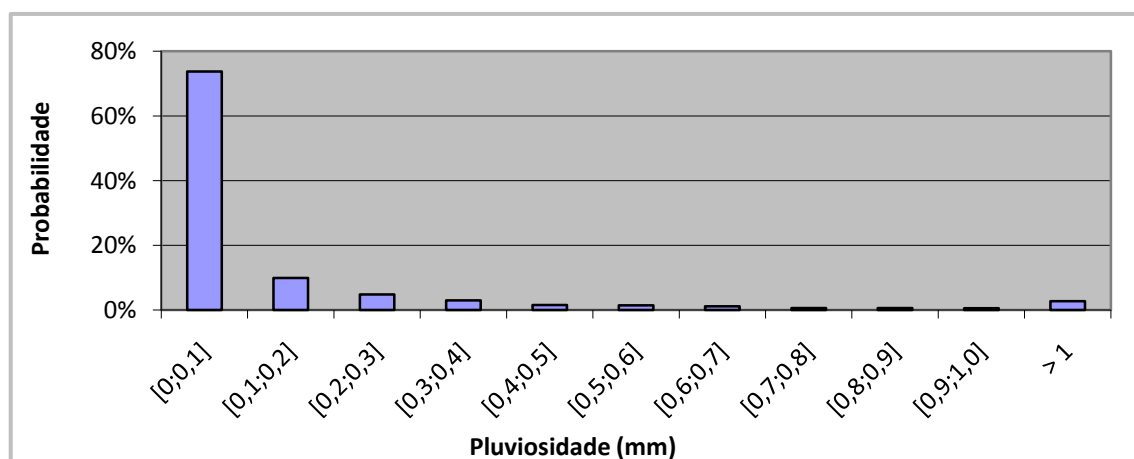


Figura 32 - Caracterização da Pluviosidade Horária para a Região Sul.

Pela análise das figuras anteriores constata-se que a gama típica de valores de precipitação horária para qualquer região de Portugal é entre os 0 e 0,1mm.

Observando de forma mais detalhada e minuciosa a caracterização da pluviosidade horária por região, constatam-se algumas diferenças. Concretamente, essas diferenças não se verificam na gama de valores com maior ocorrência, mas na sua probabilidade em acontecer nas diferentes regiões.

À medida que se percorre o território de norte para sul existe um aumento da probabilidade da precipitação se englobar no intervalo de 0 a 0,1 mm e uma consequente diminuição da probabilidade nos restantes intervalos. Assim sendo, mediante os dados de 2007 verificou-se que quando existe precipitação a região sul tem uma maior probabilidade de ser atingida com uma precipitação menos intensa que a região norte. Este facto pode ser confirmado pela probabilidade que existe de as regiões serem atingidas com uma pluviosidade superior a 1 mm, onde a região norte apresenta a maior probabilidade de ocorrência.

Em conclusão, a região norte é caracterizada por ostentar pluviosidades mais elevadas face às regiões centro e sul. Contudo é de referir que o facto de apresentar valores de pluviosidades mais elevada, não quer dizer que o máximo de pluviosidade sentida na região norte seja superior às regiões centro e sul, quer sim dizer que tem pluviosidades superiores a 1 mm durante mais tempo que as regiões centro e sul.

3.3.2- Caracterização da Pluviosidade Diária

Uma análise diária confere uma maior certeza do que uma análise horária, isto é, prever um valor próximo do real é mais difícil para uma hora do que para um dia (24 valores), dado que se possui uma maior margem de manobra.

Assim sendo, tendo por base a informação respeitante à pluviosidade horária não é difícil realizar um estudo sobre a pluviosidade diária. É apenas necessário considerar o valor das 24 horas de cada dia, para obter uma matriz com valores de pluviosidade diária.

Após realizar o pré-processamento da informação, reuniu-se o conjunto de condições favoráveis para se proceder ao cálculo da probabilidade de ocorrência de um determinado valor de pluviosidade diária, tal como realizado para a pluviosidade horária.

Da Figura 33 à Figura 35 apresentam-se respectivamente a caracterização da pluviosidade diária para as regiões norte, centro e sul.

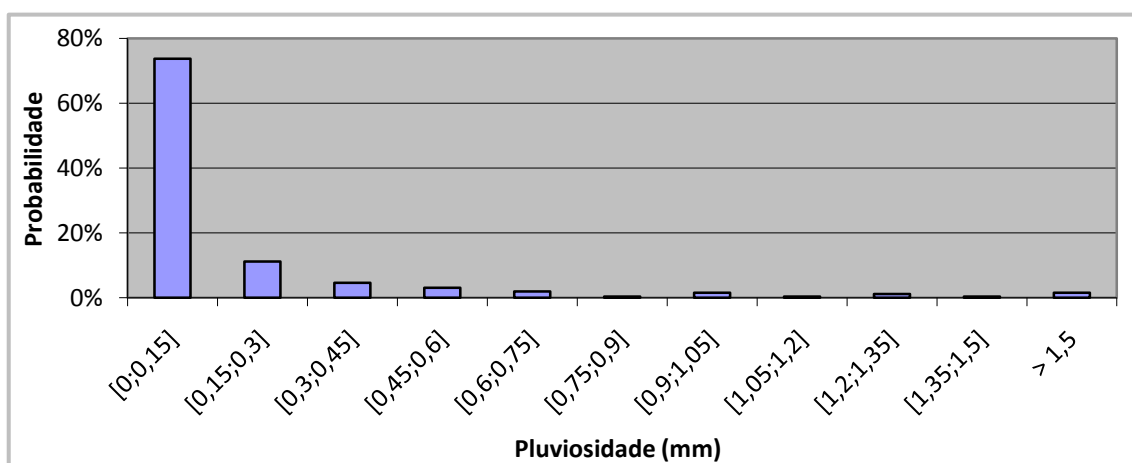


Figura 33 - Caracterização da Pluviosidade Diária para a Região Norte.

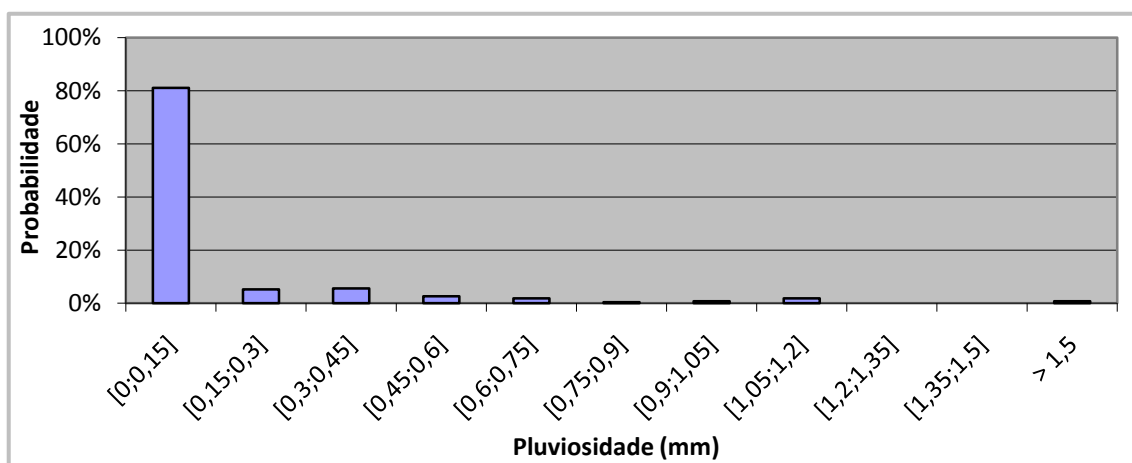


Figura 34 - Caracterização da Pluviosidade Diária para a Região Centro.

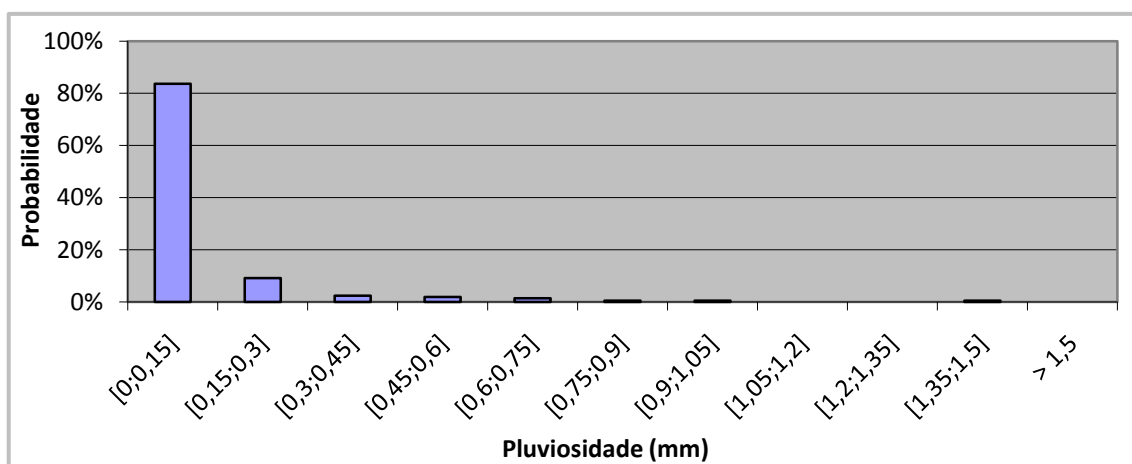


Figura 35 - Caracterização da Pluviosidade Diária para a Região Sul.

Segundo as figuras apresentadas anteriormente pode-se facilmente observar que o intervalo de precipitação predominante ao longo de todo o território é o intervalo de 0 a 0,15 mm, contudo a frequência de ocorrência não se distribui igualmente pelas três regiões.

O intervalo de precipitação entre 0 a 0,15 mm apresenta uma maior probabilidade de ocorrência à medida que nos deslocamos da região norte do país para a região sul. Assim, é mais provável encontrar dias nesta gama de valores na região sul que na região norte.

A análise dos resultados apresentados anteriormente permite o conhecimento da repartição de pluviosidade, ou seja, verifica-se que pode chover consideravelmente durante um dia e os restantes não chover. Como forma de avaliar a contabilização da repartição da pluviosidade por número de dias com ocorrência de precipitação durante um ano, para uma determinada região procedeu-se à elaboração da Tabela 3.

Tabela 3 - Número de Dias por Ano com Precipitação para as Diferentes Regiões.

<i>Norte</i>	<i>Centro</i>	<i>Sul</i>
70	63	52

Constata-se que a frequência de maior número de dias com chuva ocorre para a região norte, não invalidando portanto todas as conclusões enunciadas até ao momento.

3.3.3- Caracterização do Número de Dias com Chuva

Segundo [53], as CMH possuem na sua generalidade uma exploração a fio-de-água, ficando com uma capacidade de regulação de caudal muito reduzida. Contudo, muitos dos aproveitamentos hidroeléctricos possuem pequenas câmaras de carga e pequenas albufeiras que lhes permite realizar uma pequena retenção do caudal.

Como forma de contribuir para o melhoramento da gestão do recurso hídrico através do auxílio à sua possível regularização, procedeu-se à caracterização da quantidade de dias consecutivos com precipitação.

Para possibilitar a consciencialização do progresso das séries de pluviosidade para cada região ao longo do ano, elaborou-se a Figura 36 que apresenta uma percepção do valor de pluviosidade diária no decorrer do ano 2007.

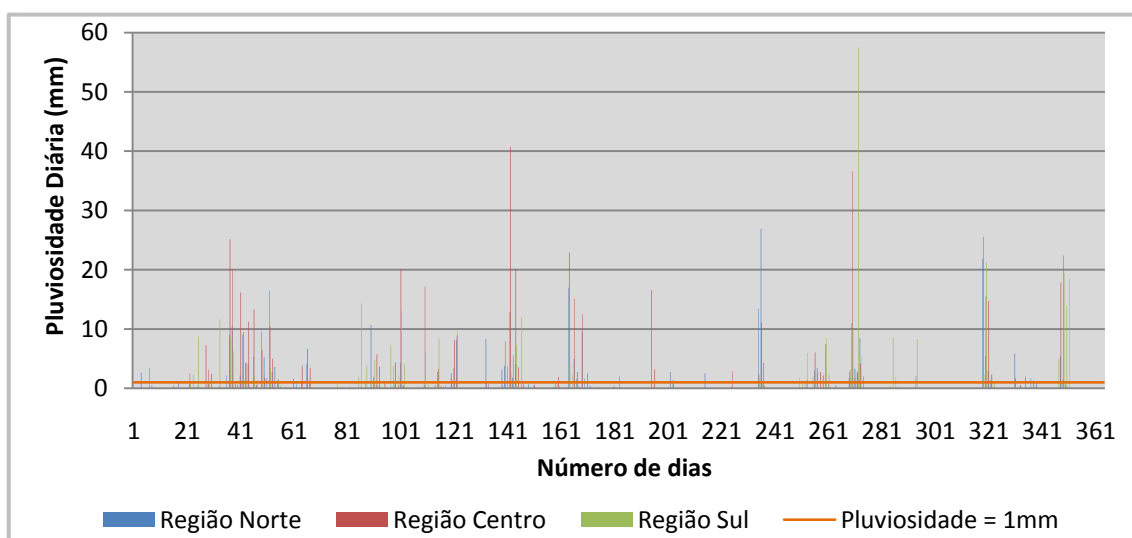


Figura 36 - Série da Pluviosidade Diária do Ano 2007 para Cada Região.

Como se pode observar pelas séries de pluviosidade representadas na Figura 36, existem dias com pluviosidades consideravelmente baixas, o que poderá ter sido originado por pequeníssimas chuvas que terão caído em determinadas zonas. Contudo, em nada fará alterar o caudal do rio ou ribeiras(os) pois será totalmente absorvida pelos solos não originando escoamentos superficiais para os rios e ribeiras(os).

Assim sendo, optou-se por definir um valor de pluviosidade mínimo (1 mm) abaixo do qual se considera a pluviosidade diária igual a zero, ou seja, desprezável.

Posteriormente, procedeu-se ao cálculo do número consecutivo de dias com pluviosidade, para cada região, conforme se apresenta da Figura 37 à Figura 39.

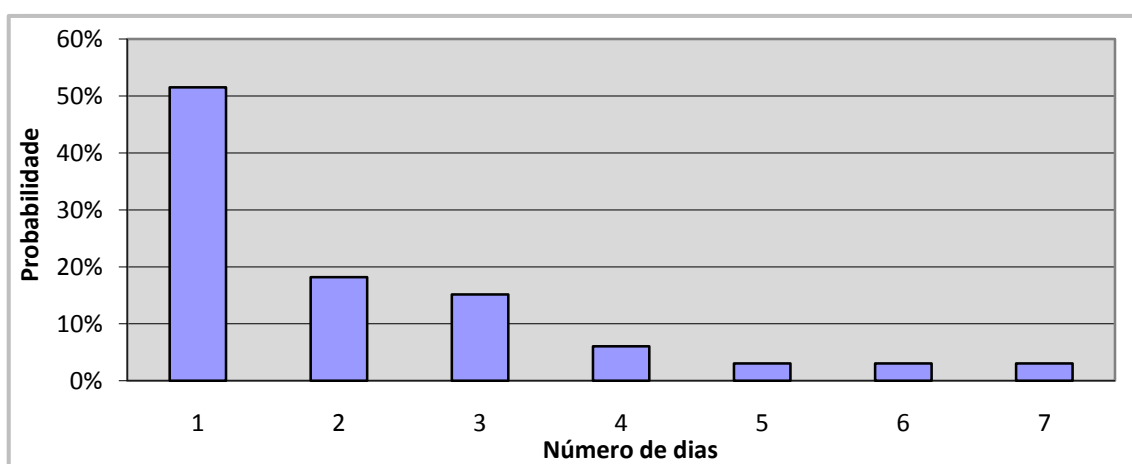


Figura 37 - Caracterização do Número de Dias Sucessivos Com Chuva para a Região Norte.

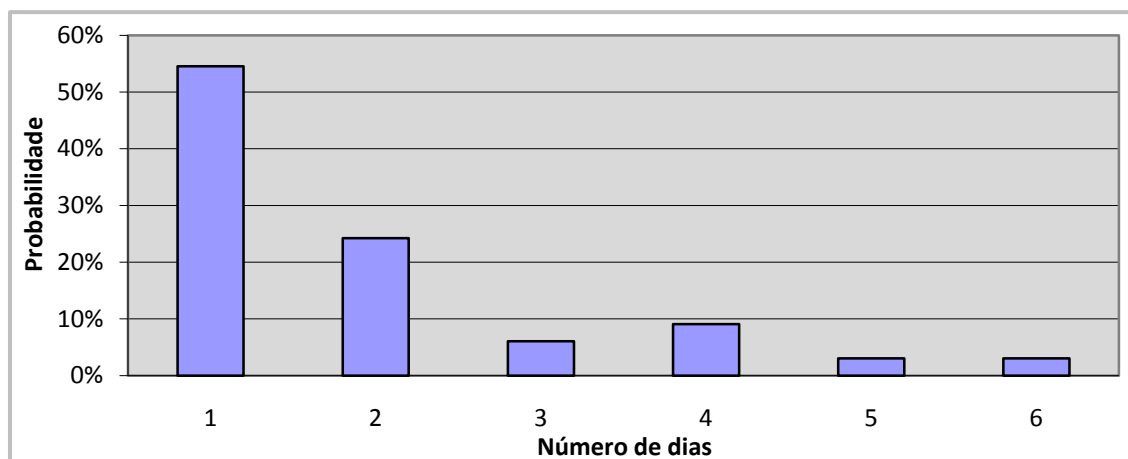


Figura 38 - Caracterização do Número de Dias Sucessivos com Chuva para a Região Centro.

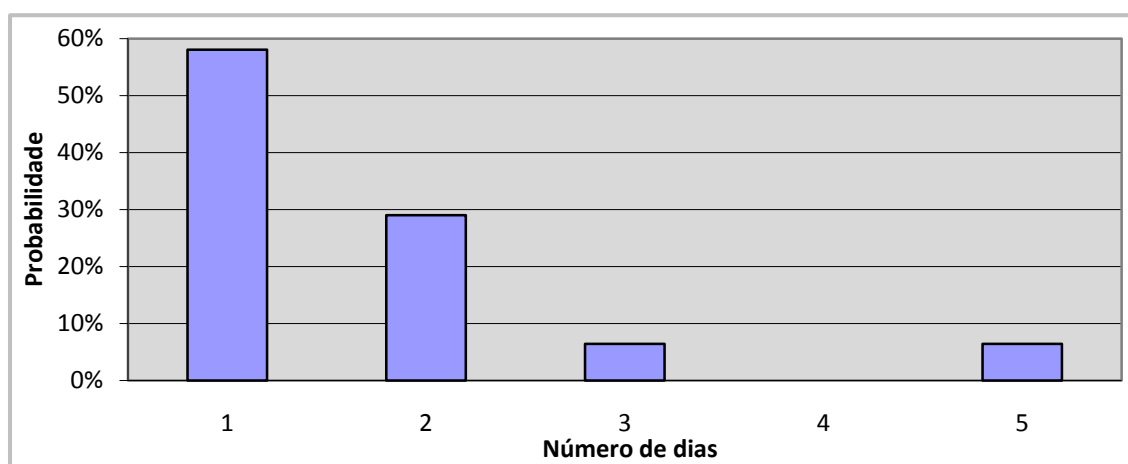


Figura 39 - Caracterização do Número de dias Sucessivos com Chuva para a Região Sul.

As figuras apresentadas anteriormente evidenciam que a região sul é aquela que apresenta um menor número de dias seguidos com precipitação, apresentando como 5 dias o valor máximo de dias consecutivos, sendo a região que possui uma maior probabilidade de ter unicamente um dia com precipitação.

Após todo o estudo realizado até ao momento, este facto é provável dado que se conclui que existe um decréscimo de pluviosidade à medida que se realiza uma deslocação de norte para sul, salientando a ideia de existirem menores períodos de precipitação nas regiões centro e sul face à região norte e na região sul face à região centro.

3.3.4- Caracterização do Número de Dias sem Chuva

De forma análoga, para realizar a caracterização do número de dias consecutivos sem chuva, teve-se em consideração o mesmo pressuposto do ponto 3.3.3, no que se refere ao

filtro realizado. O filtro considera valores de pluviosidade menores que 1 mm igual a zero, isto é, despreza-se a ocorrência de precipitação.

Atendendo a esses pressupostos foram obtidas a Figura 40, Figura 41 e a Figura 42 que demonstram a caracterização do número de dias consecutivos sem chuva para as regiões norte, centro e sul, respectivamente.

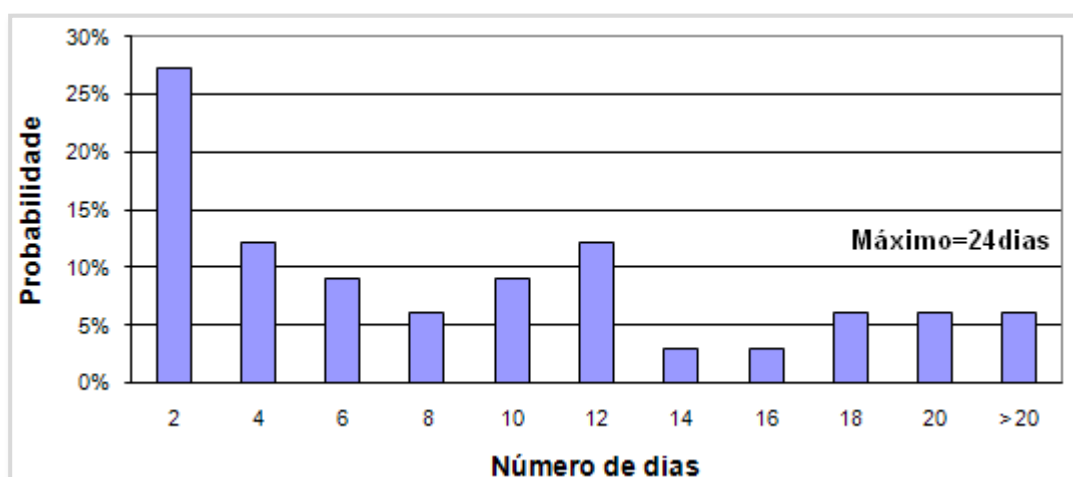


Figura 40 - Caracterização do Número de Dias Sucessivos sem Chuva para a Região Norte.

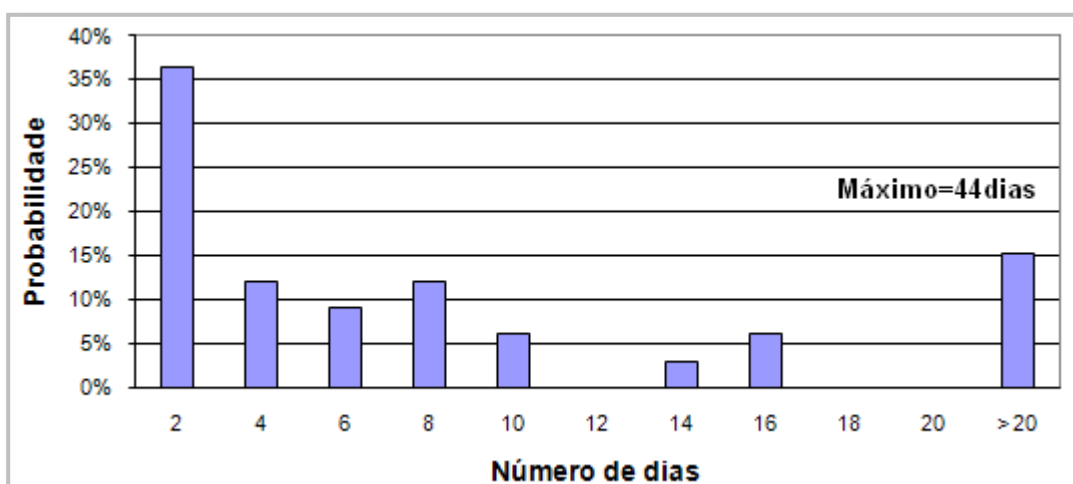


Figura 41 - Caracterização do Número de Dias Sucessivos sem Chuva para a Região Centro.

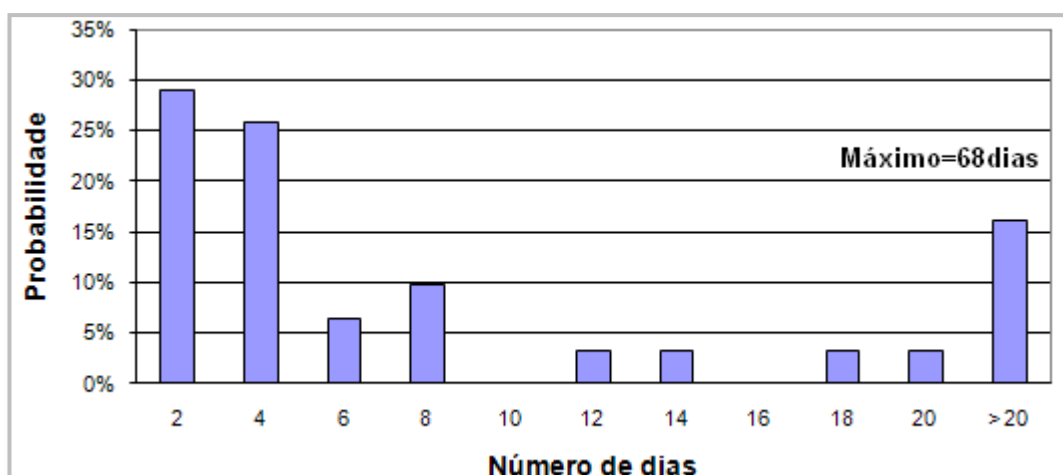


Figura 42 - Caracterização do Número de Dias Sucessivos sem Chuva para a Região Sul.

Atendendo aos resultados apresentados anteriormente é pertinente fazer uma análise crítica, uma vez que talvez fosse de esperar um decaimento na probabilidade de ocorrência do número de dias consecutivos sem chuva à medida que cresce o número de dias. No entanto, o facto de tal não se ter verificado pode ser justificado pelo intervalo de tempo ser bastante curto (1 ano).

Contudo, consegue-se perceber que existe um fenómeno inverso ao acontecido no ponto 3.3.3, isto é, a região que apresenta maior número de dias seguidos com precipitação exhibe agora um menor número de dias seguidos sem precipitação. Considerando a Figura 41 e a Figura 42 averigua-se que a região sul ostenta (mesmo que pouco significativa) uma maior probabilidade de ocorrência do número de dias sem pluviosidade ser superior a 20 dias, além disso pela indicação apresentada nas figuras pode-se verificar que a região sul tem um intervalo de número de dias sem chuva consecutivos muito mais elevado que as outras regiões.

3.4- Correlação Geográfica da Pluviosidade

Como referido em [54] a correlação indica a força e a direcção do relacionamento linear entre dois vectores de variáveis aleatórias. No uso estatístico geral, correlação refere-se à medida da relação existente entre duas variáveis.

Neste caso a correlação foi utilizada para se estudar a relação existente entre dois vectores que continham séries de pluviosidade prevista e séries de pluviosidade real. As séries de pluviosidade prevista foram obtidas através do modelo de previsão MM5, enquanto as séries de pluviosidade real resultam de medições em estações meteorológicas.

3.4.1- Correlação Geográfica da Pluviosidade Horária

Tendo por base que a pluviosidade tem uma distribuição variável ao longo do território nacional, o objectivo inerente a este estudo é avaliar a possibilidade de determinar uma forma de relacionar a pluviosidade entre dois pontos situados em locais distintos do território nacional.

O processo utilizado para encontrar estas possíveis ligações visou a determinação da correlação entre duas séries de pluviosidade ocorridas em pontos diferentes, através da tentativa de relação mútua baseado nas suas distâncias.

Considerando informação das séries de pluviosidade horária prevista e das séries da pluviosidade horária real procedeu-se à elaboração da Figura 43, com o objectivo de estudar possíveis diferenças entre as correlações reais e as correlações dadas pelos métodos de previsão.

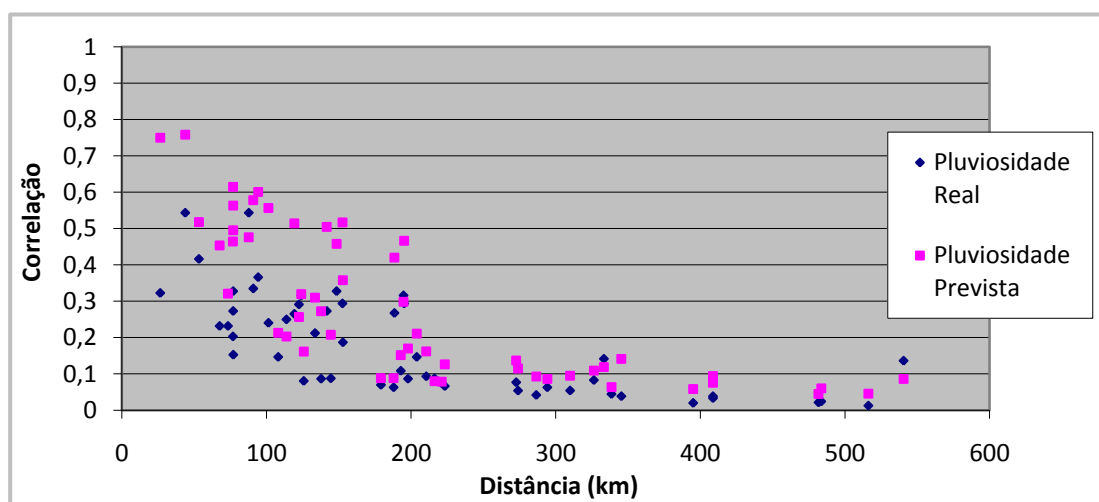


Figura 43 - Correlação da Pluviosidade Real e Prevista Horária.

Antes de iniciar a análise de resultados é conveniente referir que a determinação da correlação, quer para a pluviosidade real quer para a pluviosidade prevista horária foi realizada considerando o mesmo conjunto de pontos.

Em análise à figura anterior pode-se começar por dizer que, tal como se esperava, existe uma correlação que é decrescente à medida que aumenta a distância entre os pontos, podendo ser descrita por uma função que aproxime esses pontos. Contudo, verifica-se que a correlação da pluviosidade real face à correlação da pluviosidade prevista possui valores menores, isto é, os modelos de previsão dão mais importância à correlação em função da distância do que realmente acontece.

Porém a realização de uma correlação de pluviosidade horária talvez não seja a mais indicada para analisar esta questão. Uma vez que se a previsão falhar numa hora (apenas uma

hora) já se está a desfazar a série e a comparar valores diferentes, introduzindo neste processo bastante instabilidade. Como forma de solucionar essa questão, no ponto seguinte, será realizada uma correlação de pluviosidade usando valores diários, pensando que assim se obterá valores que apresentem um grau de confiança mais elevado.

3.4.2- Correlação Geográfica da Pluviosidade Diária

À semelhança do realizado anteriormente este processo é em tudo idêntico, residindo a única diferença no facto de em vez de se utilizarem séries de pluviosidade horária se recorrer a séries de pluviosidade diária.

Atendendo à informação das séries horárias procedeu-se à obtenção das séries diárias, conforme se apresenta na Figura 44. O objectivo é analisar possíveis diferenças entre a série de pontos da correlação real e prevista.

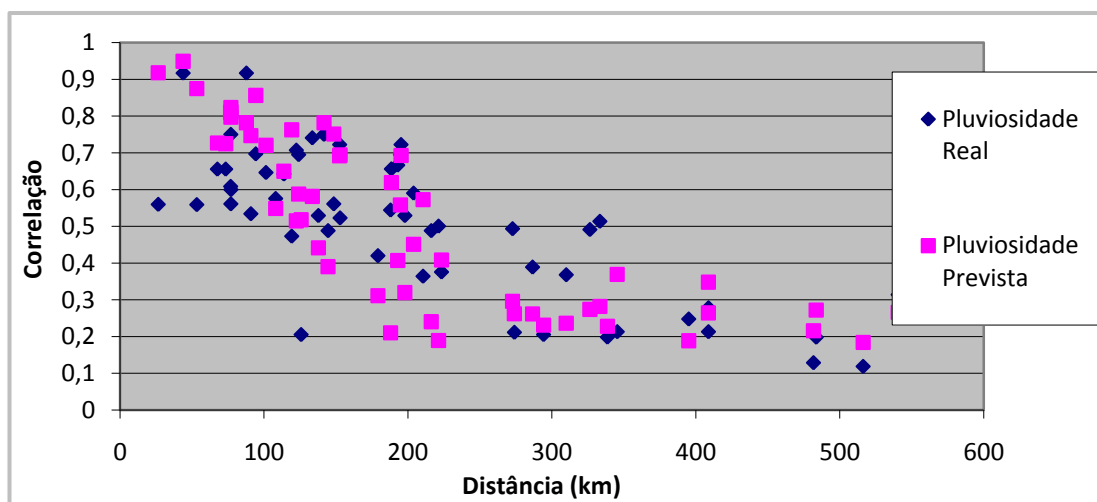


Figura 44 - Correlação da Pluviosidade Real e Prevista Diária.

Pela análise da figura anterior verifica-se que a diferença entre a pluviosidade real e prevista já não é tão acentuada como no caso anterior da correlação horária. Particularmente, verifica-se que os pontos não são totalmente coincidentes mas apresentam a mesma ordem de grandeza e desempenhos idênticos.

➤ Em conclusão, é possível comentar que se obtêm melhores resultados quando se usa uma correlação diária, em vez de uma correlação horária. Isto deve-se sobretudo ao número de pontos que cada um utiliza, isto é, na correlação horária estabelece-se comparação de valor a valor enquanto na correlação diária agrupa-se informação, neste caso das 24 horas diárias, anulando e suavizando possíveis erros que possam surgir para determinadas horas.

Capítulo 4

Caracterização das Centrais

4.1- Introdução

Cada aproveitamento hidroeléctrico possui características técnicas, específicas e diferentes de todos os outros aproveitamentos. Estas características dependem do local de instalação da CMH, pois a localização condiciona a altura de queda, especifica a área da bacia e estabelece o curso de água. Todos estes factores vão caracterizar o desempenho do aproveitamento hidroeléctrico, o tipo de configuração a usar e os equipamentos a aplicar.

De seguida irá ser realizada uma análise de todos os aspectos que tipificam e caracterizam as CMH. É de realçar que algum dos dados poderá possuir algum erro, pois o estudo é baseado na informação disponibilizada.

4.2- Características Principais

4.2.1- Potência

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. Com o objectivo de verificar a quantidade de CMH que existem num determinado intervalo de potência realizou-se o histograma que se apresenta na Figura 45.

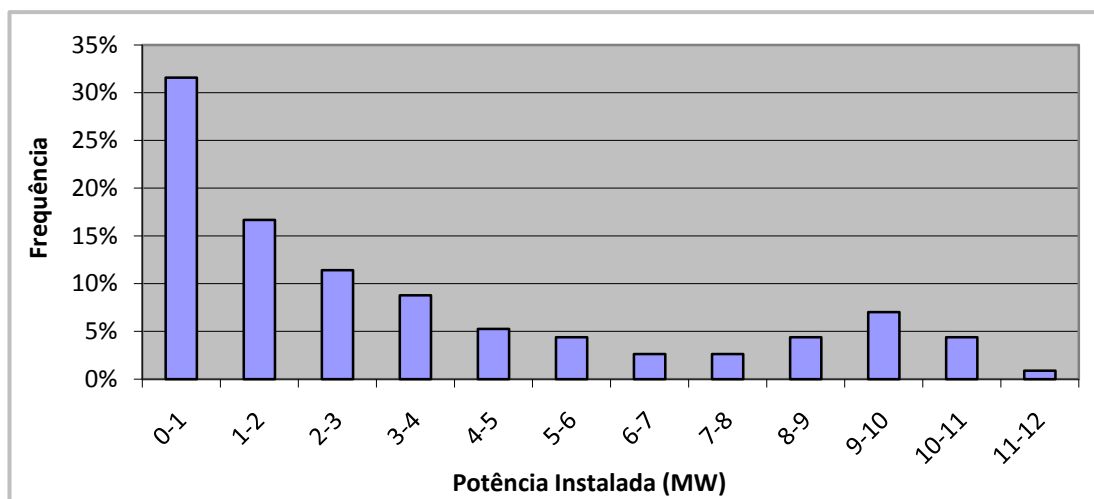


Figura 45 - Histograma da Potência Instalada nas CMH.

Analisando a Figura 45, verifica-se que em Portugal o intervalo de potência das CMH que mais prevalece é o intervalo de potência de 0 a 1MW. Existe uma diminuição do número de CMH à medida que o valor de potência aumenta para o seu valor máximo admitido. Para valores entre 8 a 11MW o número de CMH aumenta novamente atingindo um pico para potências inseridas no intervalo de 9 a 10MW.

O pico correspondente ao intervalo de 9 a 10MW deve-se sobretudo ao facto de os aproveitamentos hidroelétricos que possuem características suficientes para instalarem mais uns MW de potência, não quererem beneficiar desse aumento de potência. Pois as regalias que esta gama de potência lhes traz, nomeadamente em relação à remuneração, são mais elevadas.

A potência instalada nas CMH não é determinada pelo produtor, mas sim conforme as características específicas existentes no local. As características que determinam a potência instalada são abordadas nos pontos seguintes.

Existem zonas do território nacional que são logo à partida locais que apresentam características a ter em consideração e a observar detalhadamente. Na Figura 46 apresenta-se um mapa criado com toda a informação disponibilizada sobre as potências instaladas nas CMH ao longo de todo o território nacional.

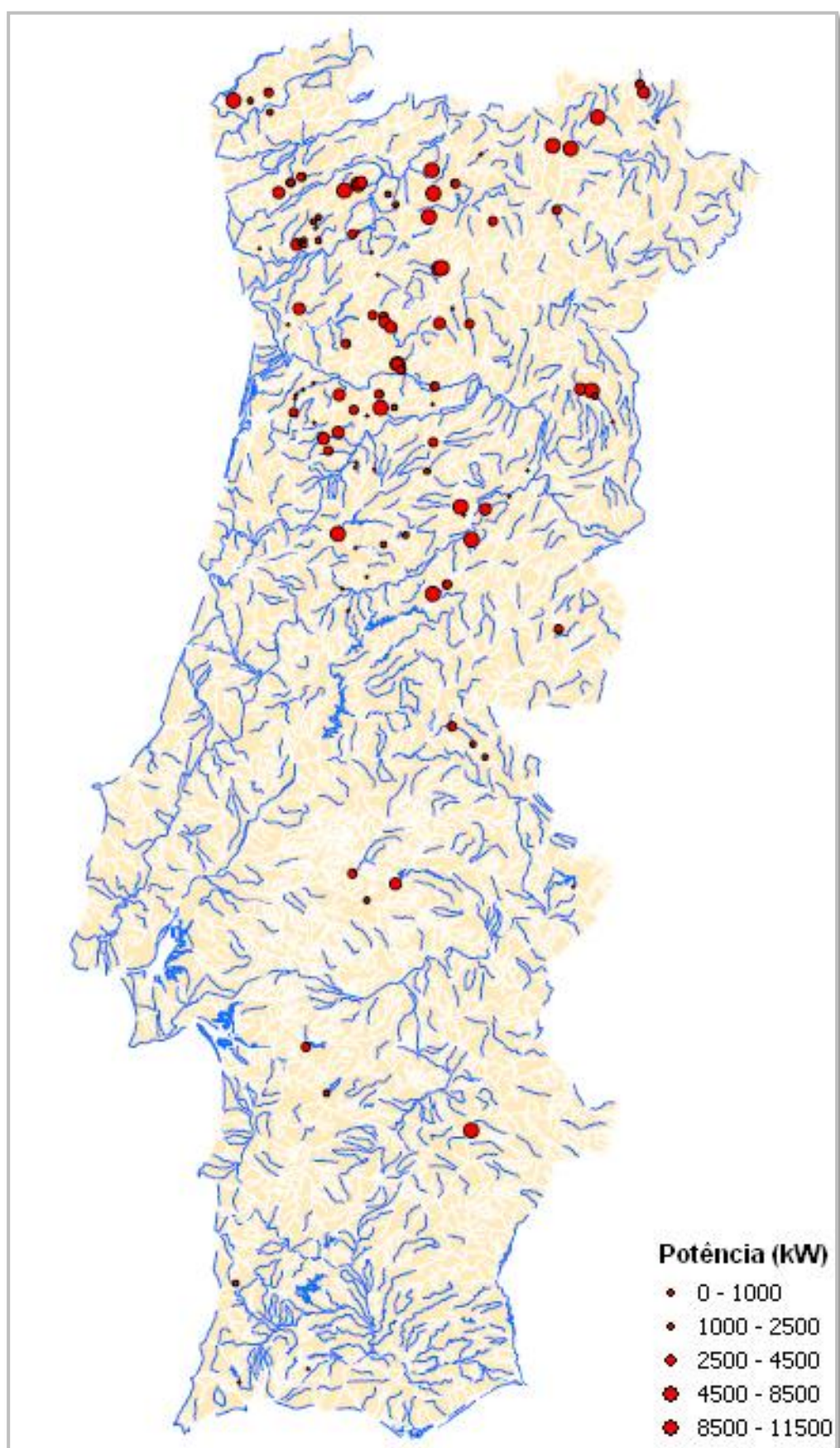


Figura 46 - Mapa da Distribuição da Potência das CMH em Portugal.

4.2.2- Queda

A altura de queda é uma das características que influencia a determinação da potência a instalar numa CMH. A queda é um factor fundamental sobretudo quando existe um caudal reduzido. É através desta que se consegue criar energia potencial que depois se transformará em energia mecânica aquando da sua passagem nas turbinas hidráulicas.

De forma análoga ao realizado para a potência, é feita uma análise com o objectivo de identificar quais os valores típicos de quedas existentes em Portugal (ver Figura 47).

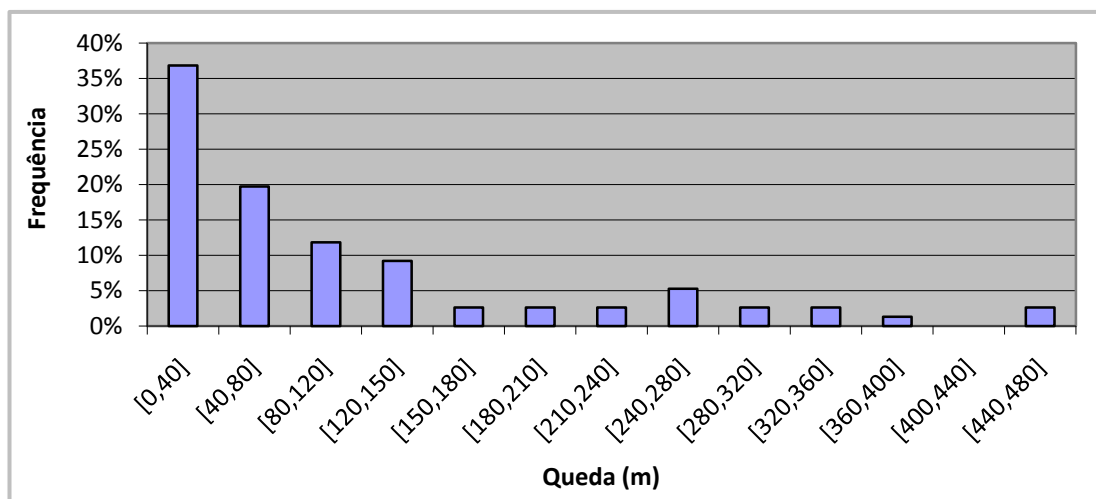


Figura 47 - Histograma da Distribuição da Queda nas CMH.

Na figura anterior denota-se uma predominância de quedas no intervalo de 0 a 40m, aproximadamente 37% das CMH a funcionar em Portugal apresentam quedas neste intervalo.

Actualmente a queda mais elevada existente em Portugal para CMH é de 475m. No mapa da Figura 48 apresenta-se a localização geográfica das CMH e os seus valores de queda ao longo do território nacional.

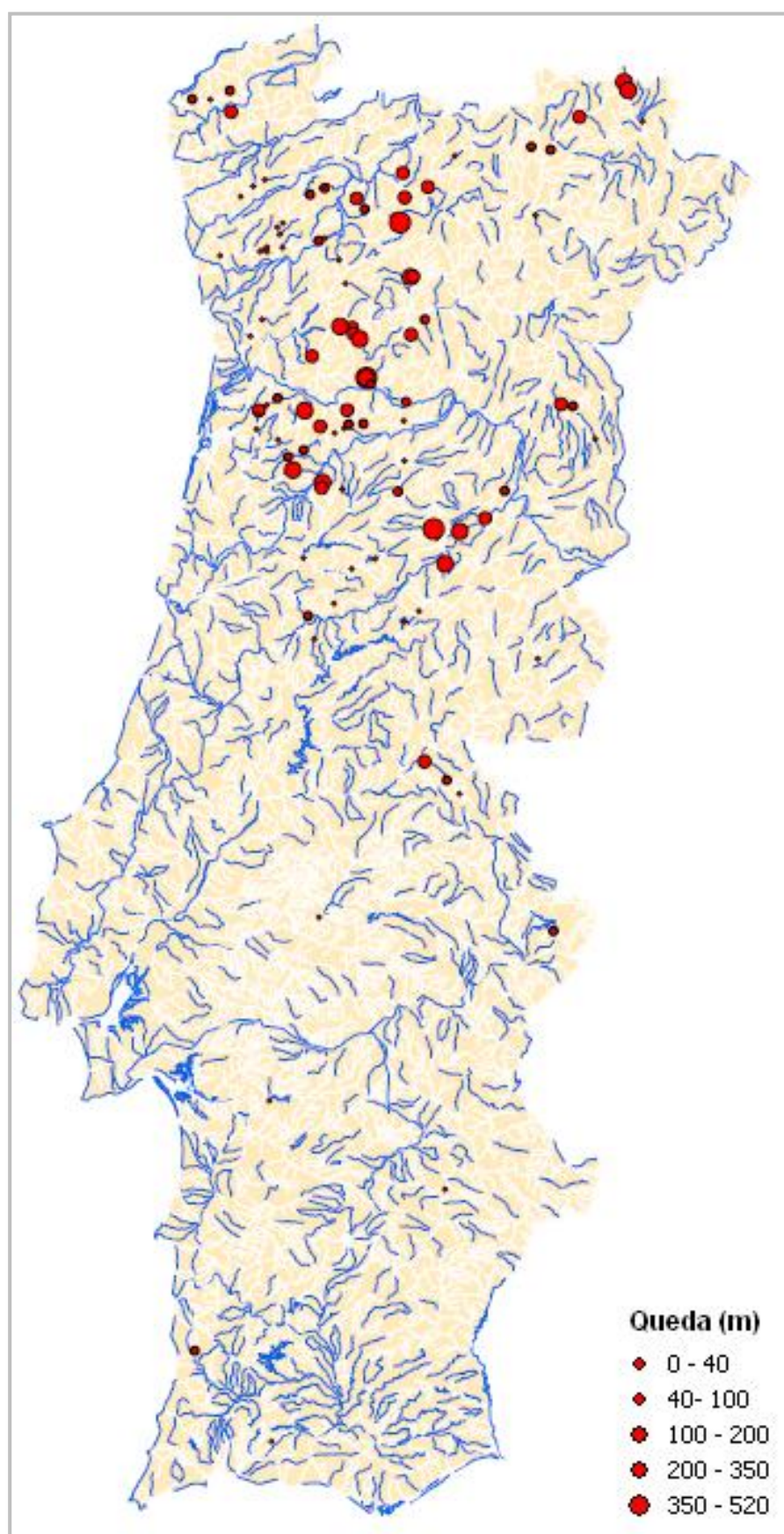


Figura 48 - Mapa da Distribuição das Quedas nas CMH em Portugal.

4.2.3- Caudal

De forma similar à queda, o caudal é uma das características que influencia a determinação da potência a instalar numa CMH. Quanto maior o caudal maior a potência que se pode extrair de uma CMH uma vez que estes são directamente dependentes. O fluxo de água possui energia cinética que é convertida em energia mecânica aquando da passagem pelas pás da turbina, que associada a um gerador produz energia eléctrica.

As CMH instaladas em Portugal encontram-se em zonas diversas, nomeadamente em rios e ribeiras(os) diferentes. De forma a verificar os valores típicos de caudais que fluem nas CMH instaladas em Portugal elaborou-se o histograma que se apresenta na Figura 49.

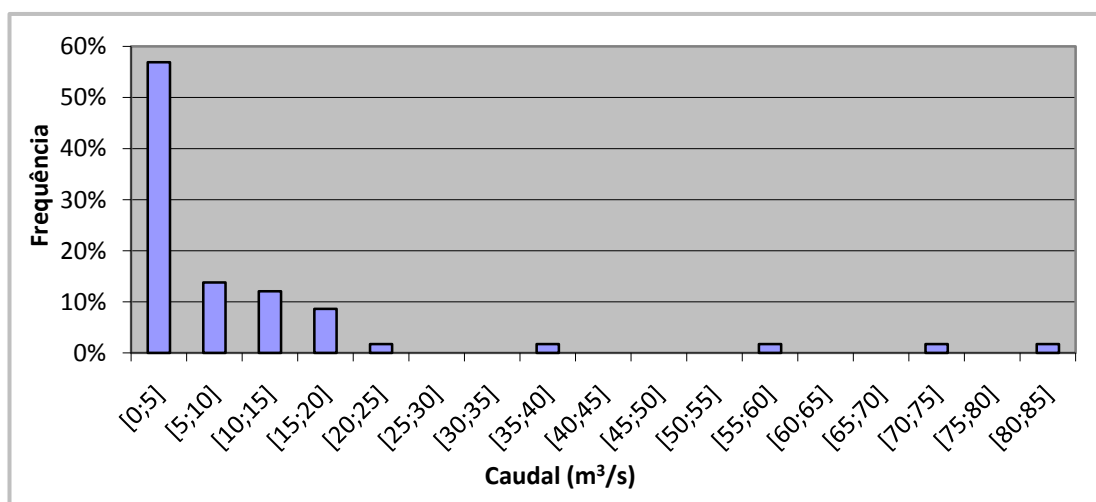


Figura 49 - Histograma da Distribuição do Caudal nas CMH.

Observando o histograma anterior, conclui-se que existe uma predominância do intervalo de caudal de 0 a 5m³/s, mais de 55% dos caudais que passam por todo o circuito hidráulico da CMH não possui mais de 5m³/s. O caudal máximo fluente numa central é de 85m³/s.

Um intervalo de valores de 5 em 5m³/s não permite uma análise muito conclusiva. Como a maior parte dos caudais se situa entre 0 e 20m³/s, apresentam-se na Figura 50 os resultados num intervalo menor para esta gama de valores.

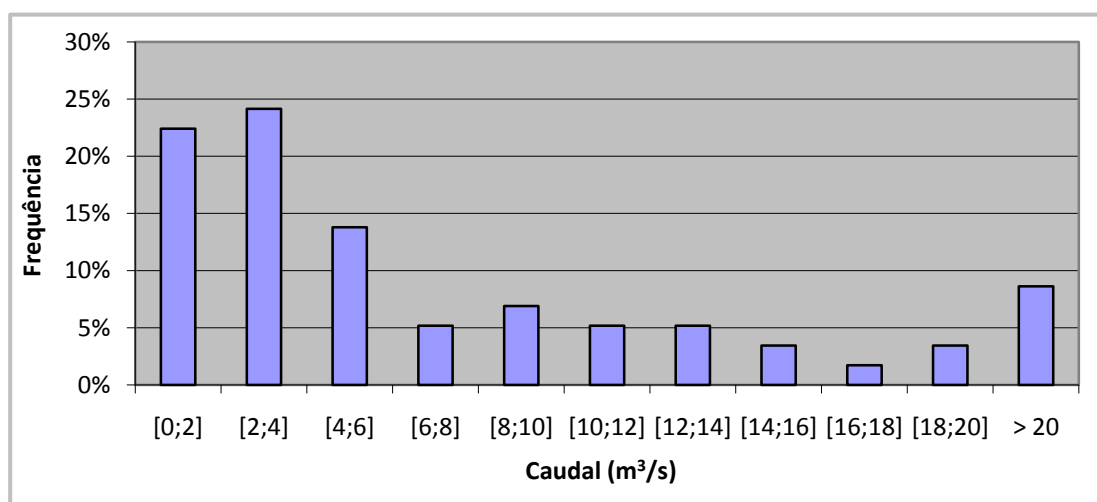


Figura 50 - Histograma da Distribuição do Caudal entre 0 e 20m³/s.

Através deste histograma é possível ter uma visão mais clara dos caudais que realmente fluem nas CMH. Observa-se um ligeiro destaque no intervalo de caudal entre 2 e 4m³/s mas nada de relevante quando comparado com o intervalo de 0 a 2m³/s. Só estes dois intervalos perfazem quase um total de 50%, podendo concluir-se que as CMH estão instaladas em zonas de pequeno caudal. Nos restantes intervalos existe uma diminuição do número de CMH à medida que aumenta o valor do caudal.

Realizado o levantamento dos caudais que fluem em Portugal nas CMH, localizam-se esses caudais no mapa de Portugal de maneira a identificar as zonas que apresentam caudais mais elevados e caudais mais reduzidos. O mapa que demonstra esta distribuição apresenta-se na Figura 51.

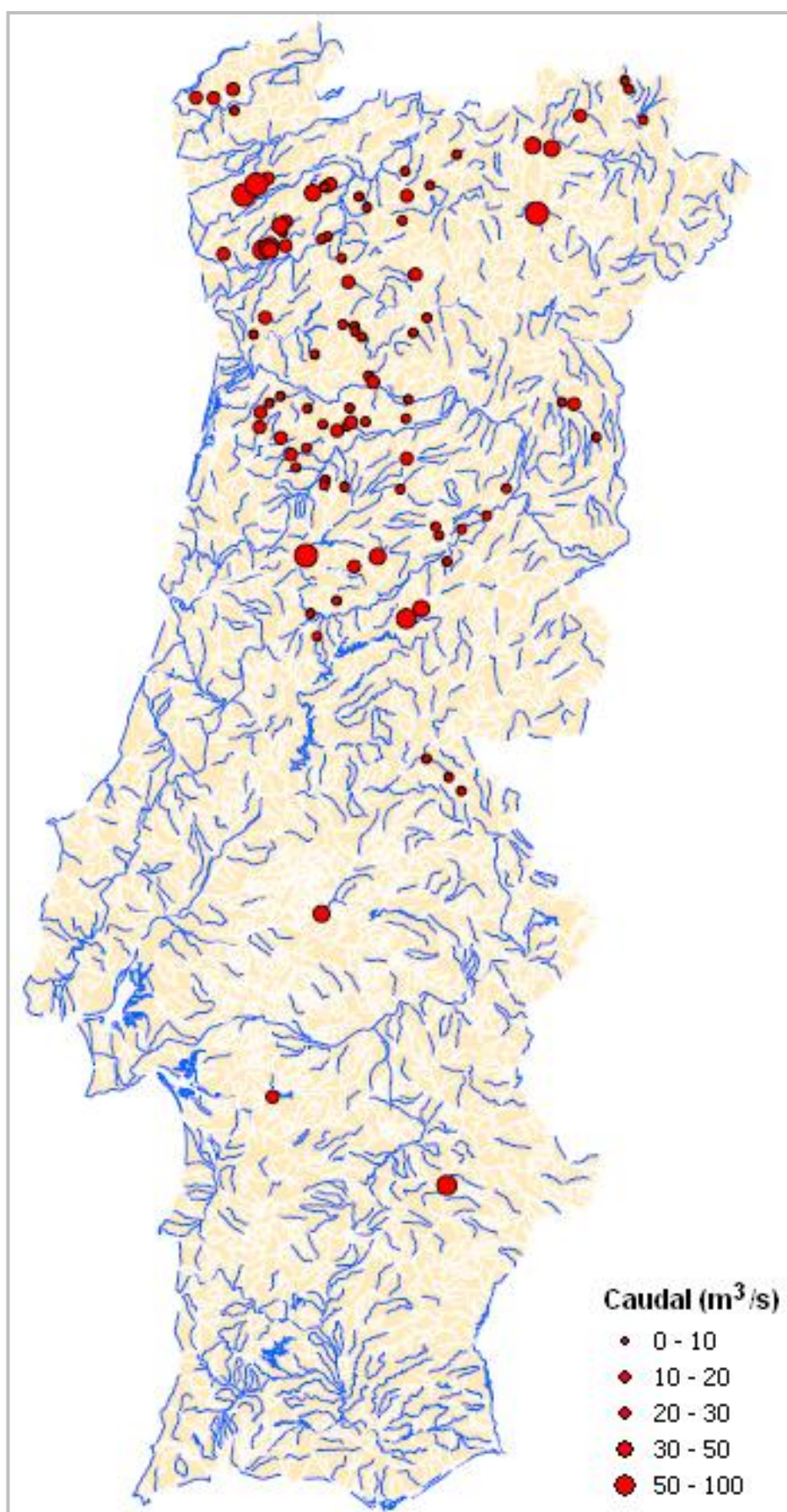


Figura 51 - Mapa da Distribuição do Caudal nas CMH em Portugal.

4.2.4- Eficiência Teórica

A eficiência é outro parâmetro a ter em consideração no momento do cálculo da potência a instalar numa CMH (ver (Eq. 5)). Esta representa o rendimento global associado a todo o aproveitamento hidroeléctrico, desde perdas hidráulicas a perdas associadas ao grupo turbina - alternador.

$$P = \eta \times \rho \times g \times H \times Q \quad (\text{Eq. 5})$$

Nas CMH a eficiência representa a percentagem de energia eléctrica útil que se consegue retirar da energia total do sistema, neste caso da energia primária do recurso hídrico.

Usando a (Eq. 5) calculou-se o valor das eficiências típicas consideradas para determinar as potências a instalar nos aproveitamentos hidroeléctricos com potência inferior a 10MW. Como se possui informação da potência instalada, do caudal e da altura de queda para quase todos os aproveitamentos hidroeléctricos é possível determinar o valor do rendimento para cada CMH.

Na Figura 52 apresenta-se um histograma que indica as eficiências típicas nas CMH instaladas em Portugal.

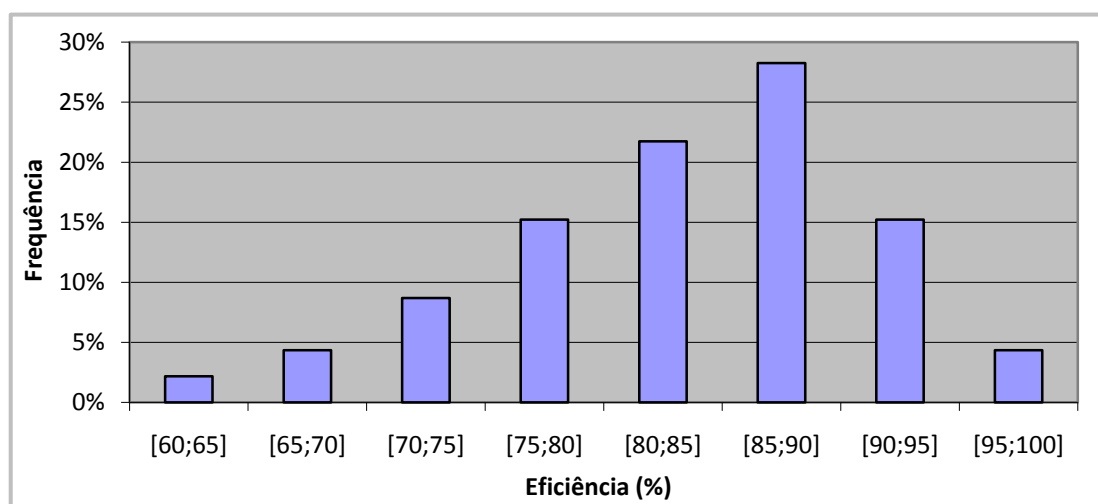


Figura 52 - Histograma da Frequência de Eficiência nas CMH.

Conclui-se a partir do histograma anterior que a maior parte dos aproveitamentos hidroeléctricos são dimensionados para eficiências entre 75% a 95%. Esta gama de valores é bastante aceitável uma vez que a tecnologia associada ao grupo turbina - alternador possui rendimentos na ordem dos 70% a 90%. Existe um domínio das eficiências entre 85% a 90% face aos outros intervalos de rendimento.

4.2.5- CMH versus Número e Tipo de Turbinas

Uma CMH é caracterizada pela sua potência instalada, essa potência instalada pode estar repartida por uma, duas ou três turbinas. Como se possui informação sobre o número de turbinas instaladas em 65% das CMH estudou-se qual o número típico de turbinas instaladas nas CMH ao longo de todo o território nacional.

Na Figura 53 apresenta-se um histograma que indica a percentagem de CMH em função do número de turbinas instaladas.

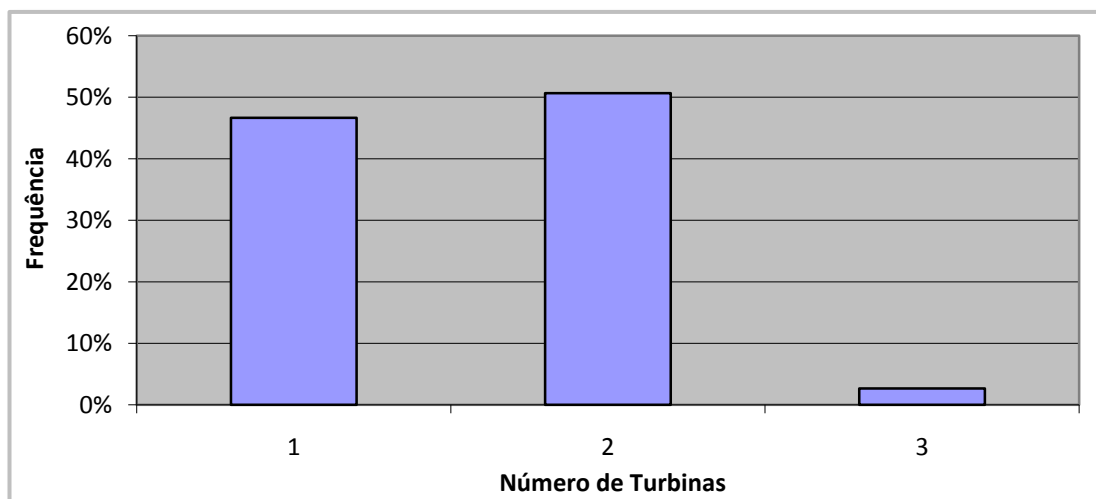


Figura 53 - Histograma do Número de Turbinas Aplicadas nas CMH.

Como se pode observar pela figura anterior existem cerca de 48% de CMH equipadas com uma turbina e cerca de 50% de CMH equipadas com duas turbinas.

Não é de desprezar o facto de existirem CMH com três turbinas, em Portugal existem dois casos. As três turbinas aplicadas na mesma central não têm de possuir as mesmas características, podem ser turbinas *Francis* mas combinadas de eixo vertical ou de eixo Horizontal. O mesmo acontece em aproveitamentos com duas turbinas sendo que ambas são do mesmo tipo mas podem possuir características diferentes.

Além de se estudar o número de turbinas instaladas por CMH estudou-se também o tipo de turbina instalada. Na Figura 54 apresenta-se um histograma que indica qual o tipo de turbina mais aplicada nas CMH.

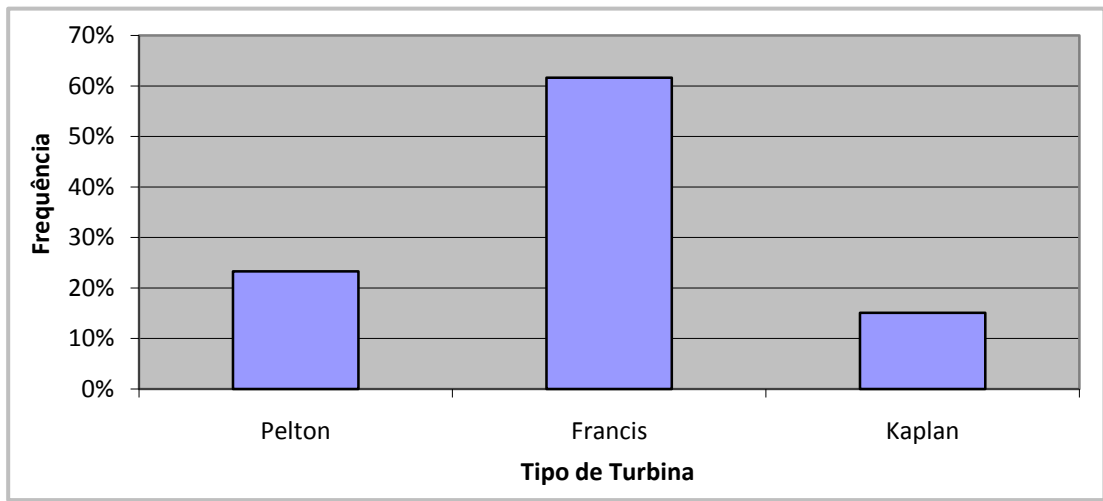


Figura 54 - Histograma do Tipo de Turbinas Aplicadas nas CMH.

Pela Figura 54 observa-se que existe uma maioria de turbinas do tipo *Francis* empregues nas CMH nacionais. Podendo concluir-se que a maior parte das CMH são caracterizadas por quedas e caudais médios.

Apesar de usadas em menor número as turbinas *Pelton* e *Kaplan* não deixam de ter importância, pois conseguem operar em condições diferentes. Esta análise será aprofundada posteriormente onde se descreverá em que condições cada uma delas é aplicada.

De forma semelhante ao realizado em pontos anteriores, neste ponto foi realizado um mapeamento do tipo de turbinas existentes nas CMH que se encontram distribuídas ao longo do território nacional (ver Figura 55).

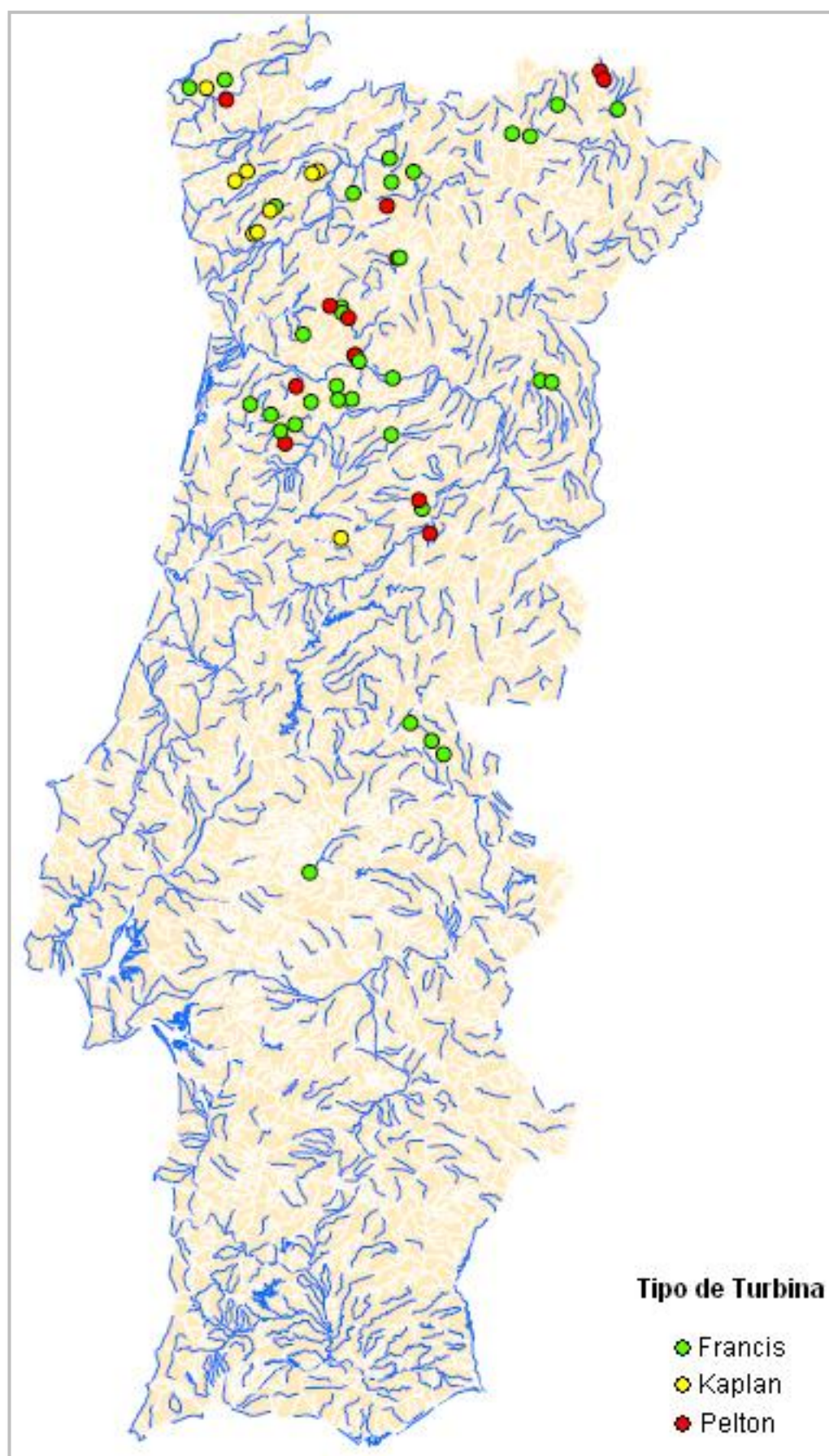


Figura 55 - Mapa da Distribuição das Turbinas nas CMH em Portugal.

4.2.6- Eficiência versus Número e Tipo de Turbina

Este ponto tem como objectivo estudar a eficiência das CMH quando são utilizadas uma, duas ou três turbinas, bem como estudar qual o tipo de turbina com maior eficiência. Este estudo é realizado com base na informação disponibilizada da potência instalada, do caudal e da altura de queda.

Primeiramente, foi analisada qual a eficiência típica aquando da utilização de uma, duas ou três turbinas. Na Figura 56 apresenta-se um histograma que mostra a eficiência ponderada em função do número de turbinas empregue.

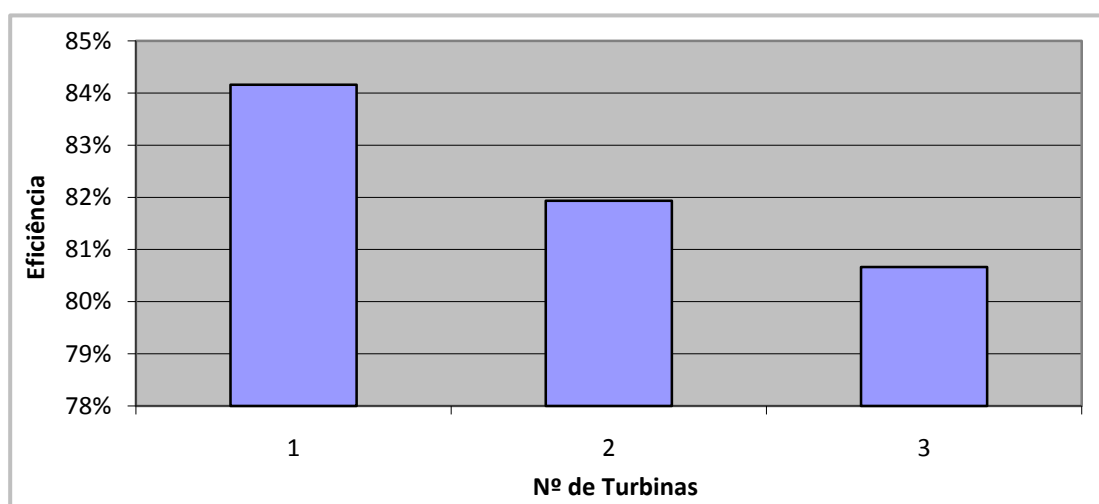


Figura 56 - Histograma da Eficiência em Função do Número de Turbinas.

Através da observação do histograma anterior conclui-se que a utilização de uma única turbina é mais eficaz que a utilização de duas ou três turbinas. Esta análise parece um pouco contraditória, porque no ponto anterior verificou-se que existiam tantas CMH com duas turbinas como com uma turbina. Contudo, a maior parte das vezes em que se aplicam duas turbinas é com o objectivo de tirar o máximo de partido do caudal existente.

Quanto à eficiência adoptada para cada tipo de turbina, apresenta-se na Figura 57 um histograma que demonstra qual a eficiência para cada modelo de turbina.

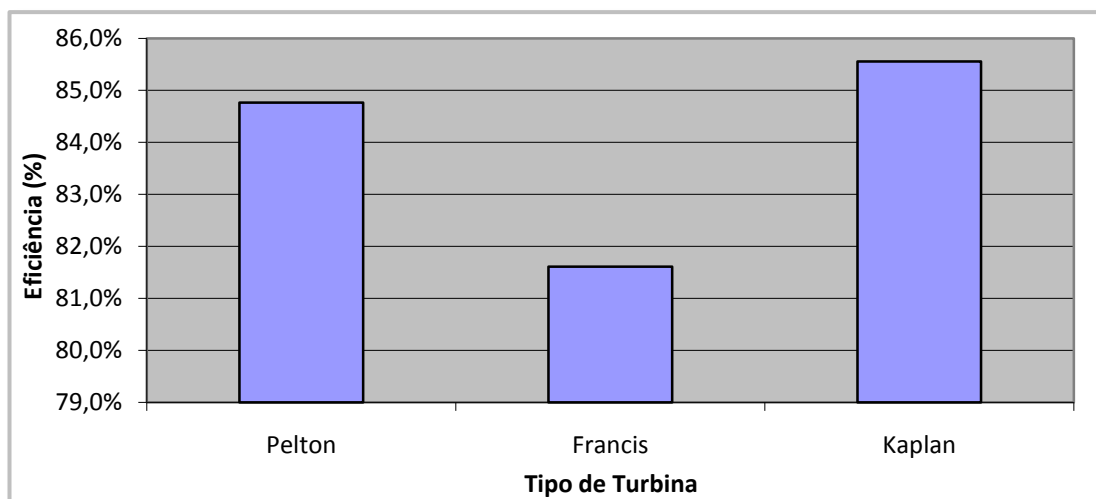


Figura 57 - Histograma da Eficiência em Função do Tipo de Turbina.

Como se pode observar pela figura anterior a turbina que apresenta índices de eficiência maior é a turbina *Kaplan*. A diferença entre a turbina *Kaplan* e *Pelton* não é elevada e verifica-se que a turbina com pior rendimento é a turbina *Francis*. A gama de eficiências é elevada reforçando a ideia de que as CMH possuem valores de eficiência alta, cerca de 80%.

4.2.7- Queda versus Caudal

Neste ponto o intuito é perceber como se relacionam a queda e o caudal, duas características tão importantes na quantidade de potência a extrair da CMH.

Outro dos objectivos é determinar o comportamento dos tipos de turbina na correlação queda/caudal. De forma a analisar esta relação procedeu-se ao traçado do gráfico que se apresenta na Figura 58.

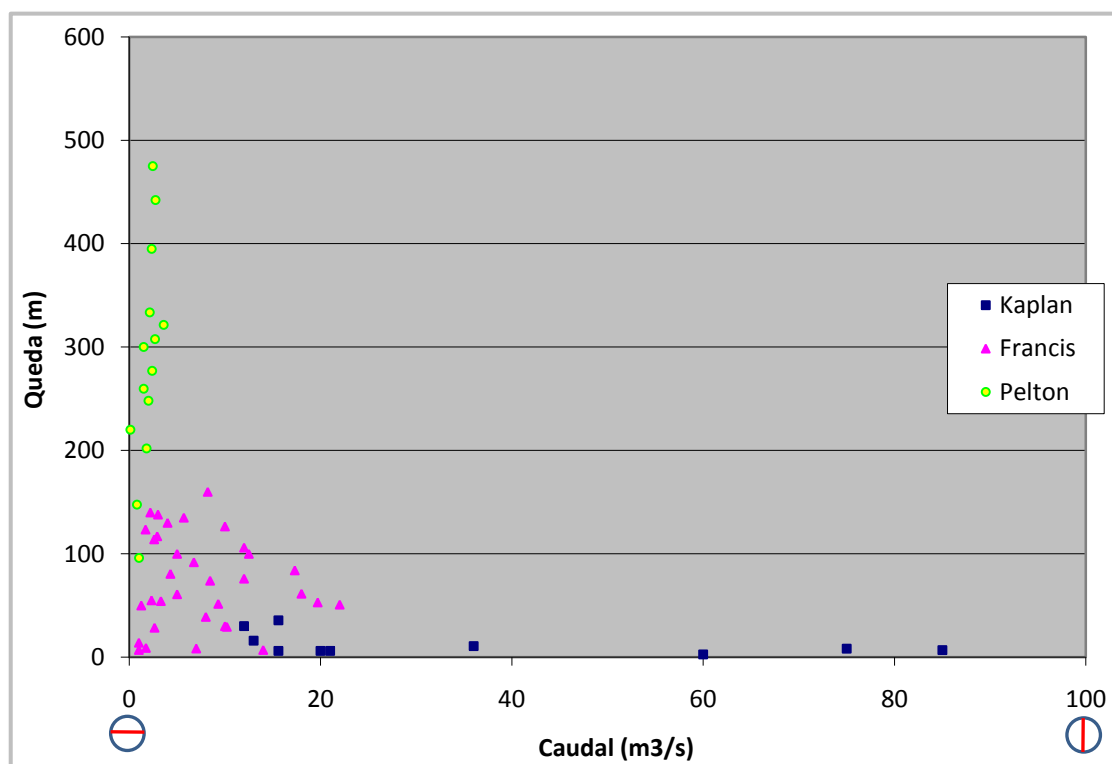


Figura 58 - Identificação do Tipo de Turbina através da Característica Queda vs Caudal.

Através de uma observação do gráfico anterior conclui-se que quando existem quedas elevadas o caudal é muito reduzido e quando existem caudais elevados não existe quase nenhuma queda. Contudo, na parte intermédia podem existir várias configurações que justifiquem a diversidade das CMH.

Na Figura 58 é bem visível a divisão e os agrupamentos dos diferentes tipos de turbinas que alternam consoante as características. Pode-se observar que para quedas elevadas e caudais reduzidos existe a aplicação de turbinas do tipo *Pelton*. As turbinas do tipo *Kaplan* têm aplicação para caudais mais elevados e quedas baixas. As turbinas *Francis* apresentam-se como turbinas mais versáteis uma vez que se adaptam a qualquer situação que apresente valores baixos ou intermédios de caudal e queda.

Analisada esta característica pode-se proceder ao traçado de um gráfico (Figura 59) que apresenta a eficiência das turbinas em função da característica queda versus caudal. Este gráfico é um complemento à análise da Figura 58 e do ponto 4.2.6- .

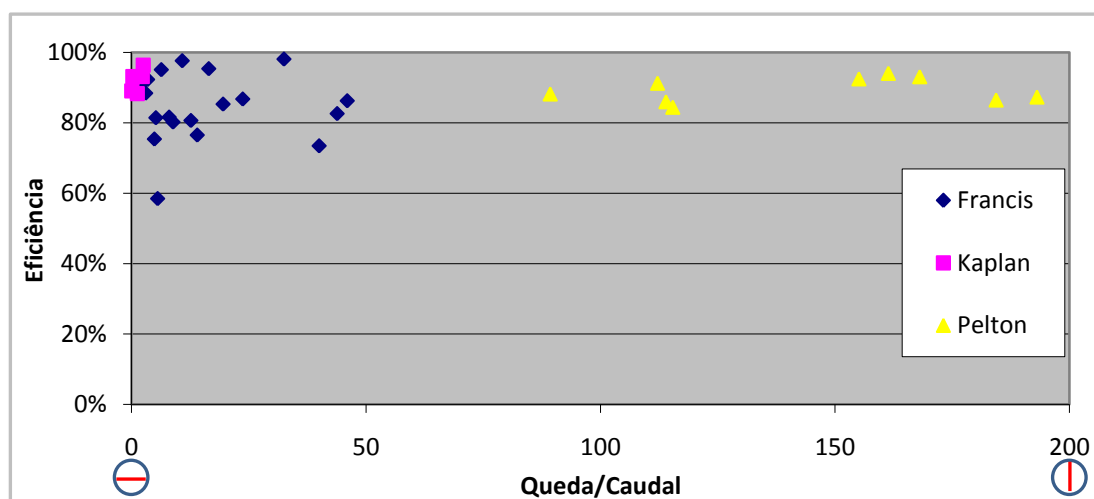


Figura 59 - Eficiência dos Diferentes Tipos de Turbina em Função da Característica Queda versus Caudal.

Este gráfico evidencia novamente em que circunstâncias se aplicam os diferentes tipos de turbinas. Para valores da razão queda sobre caudal baixos aplicam-se turbinas *Kaplan*, para valores elevados as turbinas *Pelton* e valores intermédios aplicam-se as turbinas *Francis*. Outra análise da Figura 59 é a eficiência de cada tipo de turbina. Em termos médios pode-se dizer que as *Kaplan* na altura do dimensionamento de uma CMH são consideradas as turbinas com uma eficiência mais elevada face aos outros dois tipos de turbinas. Esta análise demonstra o que já se tinha verificado na Figura 57.

4.2.8- Área da Bacia

As CMH têm o seu princípio de funcionamento na água, parte dessa água provém da pluviosidade que atinge a área correspondente à CMH. A pluviosidade que atinge uma determinada região pode sofrer alguns fenómenos, como por exemplo intercepção pela vegetação, evaporação e infiltração na crosta terrestre. Depois de ocorridos todos estes fenómenos e a capacidade de infiltração do solo estar esgotada, dá-se um fenómeno chamado de escoamento superficial que vai conduzir esta água até aos leitos dos rios ou ribeiras(os) [32, 55]. Pode-se considerar que esta área é um factor que afecta as CMH, contudo é um factor indirecto que está interligado com o valor do caudal.

A área da bacia depende da geografia do terreno e difere muito para cada aproveitamento hidroeléctrico. Possuindo informação das áreas que estão associadas às CMH nacionais procedeu-se ao traçado do histograma que se apresenta na Figura 60, com o intuito de perceber que valores de área existem no território nacional.

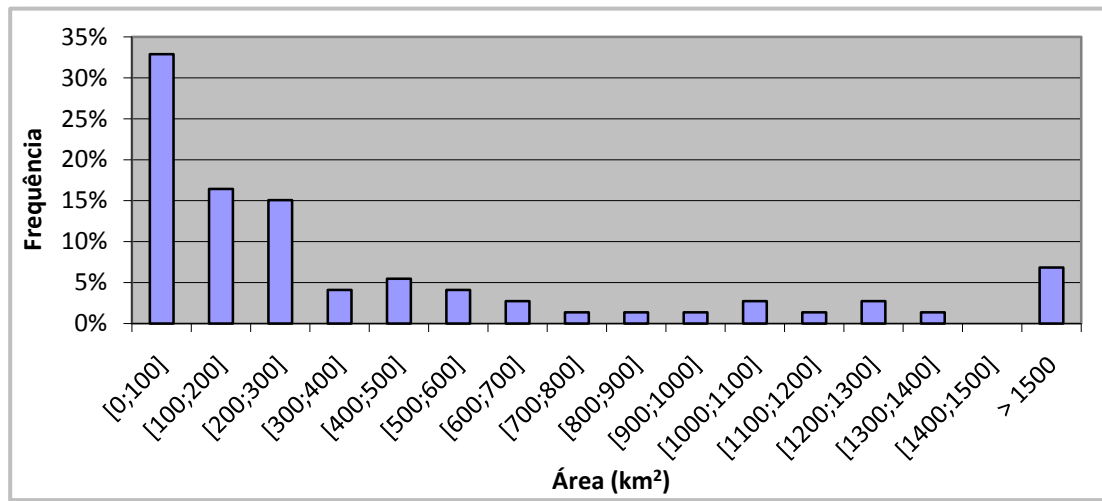


Figura 60 - Histograma da Frequência versus a Área da Bacia.

No histograma anterior observa-se um leque bastante variado de áreas de bacias. Contudo existe maior predominância em áreas menores que 100km², decaindo o número de CMH à medida que vai aumentando a área.

Mais uma vez pelo histograma anterior fica reforçada a percepção que Portugal é um país que possui uma geografia diversa ao longo de todo o território. Neste caso existem áreas de bacias que vão desde alguns km² até mais de um milhão de km².

Para se verificar de que forma estas áreas se distribuem ao longo de todo o território nacional procedeu-se ao traçado do mapa que se apresenta na Figura 61.

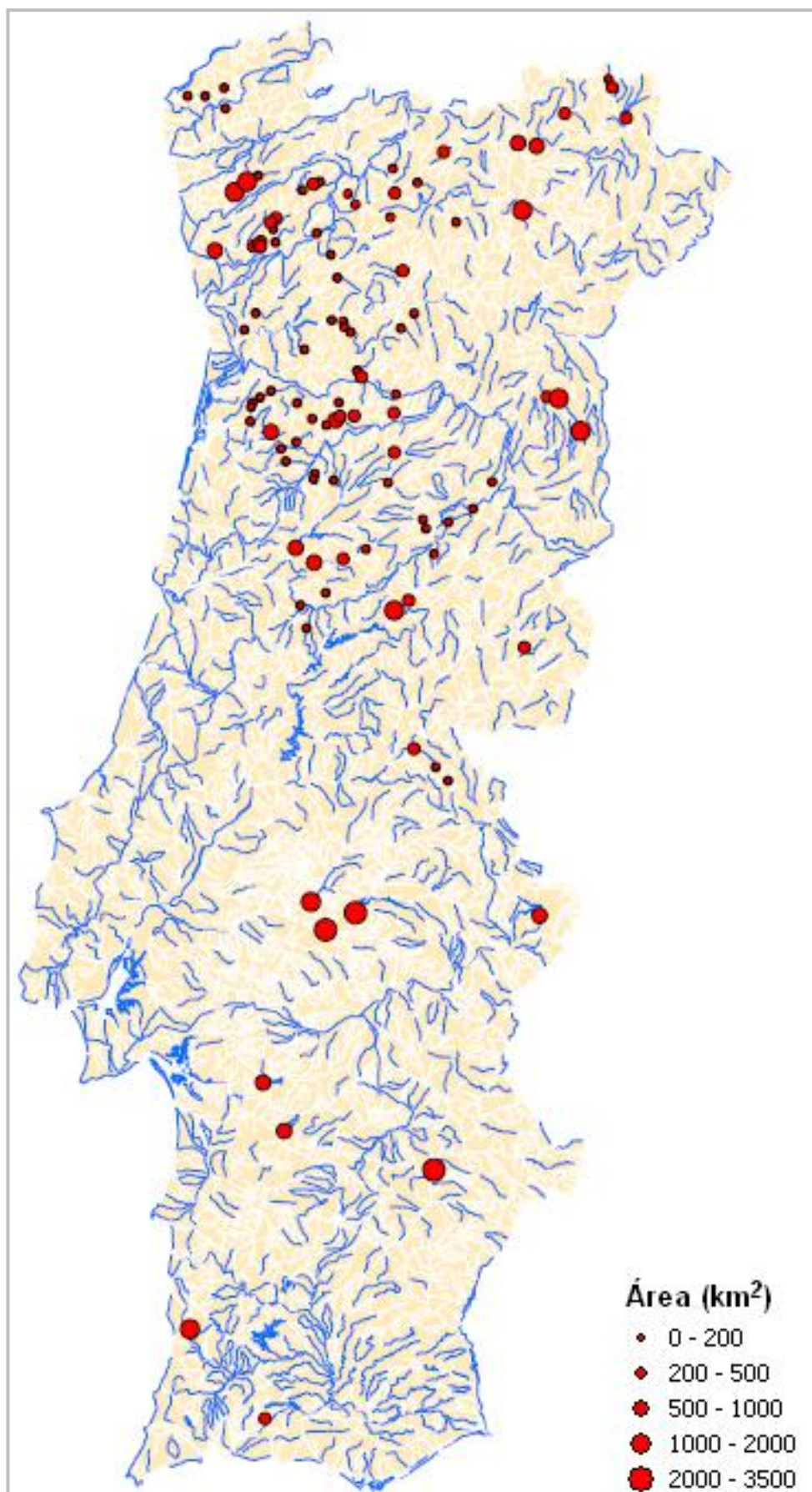


Figura 61 - Mapa da Distribuição das Áreas da Bacia nas CMH em Portugal.

4.2.9- Eficiência Real

No ponto 4.2.4- estudou-se a eficiência teoricamente utilizada para calcular a potência a instalar nas CMH.

Neste ponto será efectuado um estudo sobre a eficiência real, isto é, a eficiência efectivamente obtida quando os equipamentos estão em funcionamento. Para se proceder a este estudo é necessário ter informação da potência máxima atingida pela CMH, que substituirá a potência da (Eq. 2). Permitindo assim obter o rendimento realmente obtido pela totalidade da CMH que engloba as perdas hidráulicas e as perdas do grupo turbina - alternador.

Como se possui informação da produção das CMH para o ano de 2007, é possível retirar o valor máximo de produção e calcular o rendimento das CMH através da (Eq. 6).

$$\eta = \frac{P_{m\acute{a}xima}}{9,81 \times H \times Q} \quad (\text{Eq. 6})$$

Apresenta-se na Figura 62 um gráfico que mostra a potência máxima em função da potência que teoricamente pode ser obtida a partir das características da CMH.

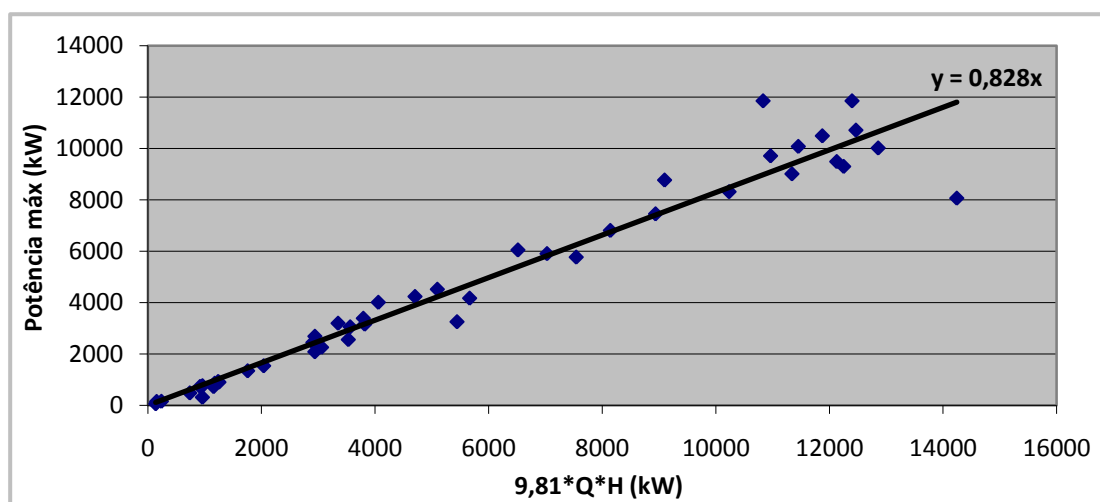


Figura 62 - Recta Característica da Eficiência Real.

Como se pode observar pelo gráfico anterior a relação da potência máxima obtida nas CMH e a potência que se retira dos parâmetros característicos é uma relação linear. De forma a obter a eficiência que melhor se encaixa neste conjunto de dados, aproximaram-se os pontos através de uma linha de tendência que indica que o rendimento real das CMH andarรก muito próximo dos 83%.

Comparando este valor com os valores considerados para o dimensionamento no ponto 4.2.4- há uma ligeira diferença, no entanto encaixa-se na mesma gama de valores. É de esperar que o rendimento real seja ligeiramente inferior ao teórico considerado.

Estas eficiências são muito dependentes da percentagem de caudal que chega ao edifício da central face ao seu valor nominal, o que indica que dependendo do recurso em cada CMH pode existir uma ligeira alteração nestes valores de eficiência.

4.2.10- Factor de Dimensionamento

De forma a complementar o estudado no ponto anterior, neste ponto analisa-se a existência de CMH sobredimensionadas e subdimensionadas. Se a potência instalada é superior à potência máxima que pode ser extraída das características que a CMH apresenta, então a CMH está sobredimensionada. Se a potência instalada é inferior à potência máxima que pode ser extraída da CMH, esta está subdimensionada.

Para realizar esse estudo utilizou-se a (Eq. 7) que fornece o rácio entre a potência máxima obtida e a potência instalada na CMH. É de relembrar que este estudo é realizado com dados de produção do ano 2007.

$$f_D = \frac{P_{m\acute{a}xima}}{P} \quad (\text{Eq. 7})$$

Onde:

f_D - Factor de dimensionamento;

Este factor terá valores superiores a uma unidade sempre que a potência máxima for superior à potência instalada, que indica CMH subdimensionadas. Um valor inferior a uma unidade indica CMH sobredimensionadas. Na Figura 63 apresenta-se um gráfico onde é possível ver as CMH sobre e subdimensionadas.

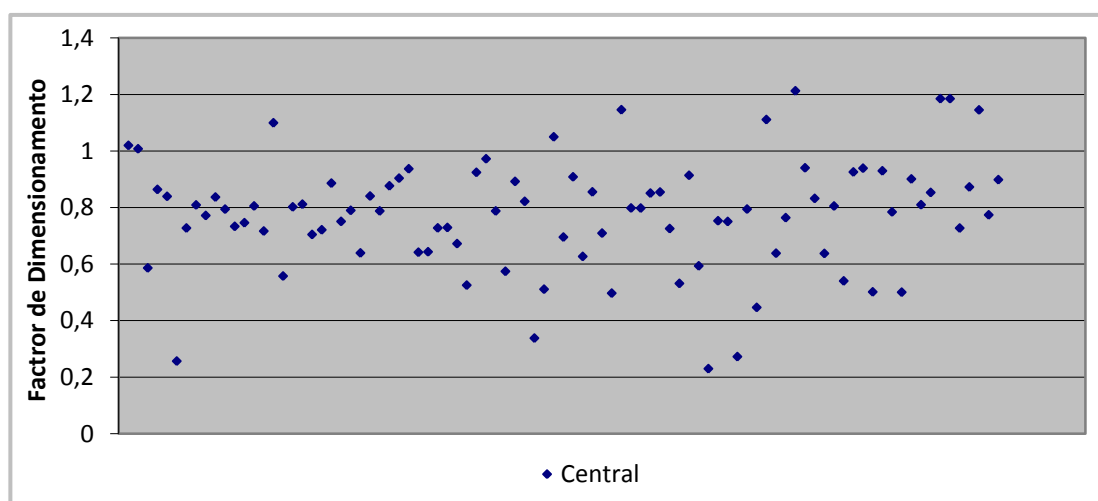


Figura 63 - Gráfico do Factor de Dimensionamento.

Realizando uma análise ao gráfico anterior verifica-se que a maioria das CMH possui um valor do factor de dimensionamento inferior à unidade, o que indica que na sua maioria as CMH estão sobredimensionadas. O mais preocupante em termos energéticos é existirem CMH que podem fornecer mais energia e não o estão a realizar (CMH subdimensionadas), que se identificam no gráfico pelos valores do factor de dimensionamento superior a uma unidade. Observando quais as CMH que se encontram nesse patamar é fácil perceber porque se encontram subdimensionadas.

Como foi dito no ponto 4.2.1- existem algumas centrais que possuem características favoráveis à instalação de uma potência superior e que optam por não o fazer. Pois deixariam de pertencer à classe das CMH e consequente redução na tarifa paga pelo valor do kilowatts-hora (kWh). A maior parte das centrais subdimensionadas estão exactamente na fronteira dos 10MW.

Além disso 2007 foi um ano extremamente seco [52], o que inviabilizou o fluxo de água e não deixou as CMH produzirem os seus máximos. Daí também se justificar o número de CMH com um valor de potência máxima inferior à instalada.

4.2.11- Factor de Utilização da Capacidade Instalada

Como se verificou em pontos anteriores as CMH podem atingir valores de produção muito próximos dos seus valores de potência instalada, contudo isso são acontecimentos de duração reduzida quando comparado com um ano de produção.

Com o objectivo de determinar no final de um ano de produção quais os valores típicos de utilização da capacidade instalada nas CMH, aplicou-se a (Eq. 8), que determina para cada aproveitamento qual o factor de utilização da capacidade instalada.

$$U_p = \frac{P_{média}}{P} \quad (\text{Eq. 8})$$

Onde:

U_p - Factor de utilização da capacidade instalada;

$P_{média}$ - Potência média de um ano de produção (kW);

P - Potência Instalada (kW);

Este factor indica a quantidade de tempo que as CMH, se funcionassem à sua potência máxima, necessitariam para produzir o que se produz num determinado ano.

No histograma apresentado na Figura 64 apresentam-se os valores típicos obtidos para este factor.

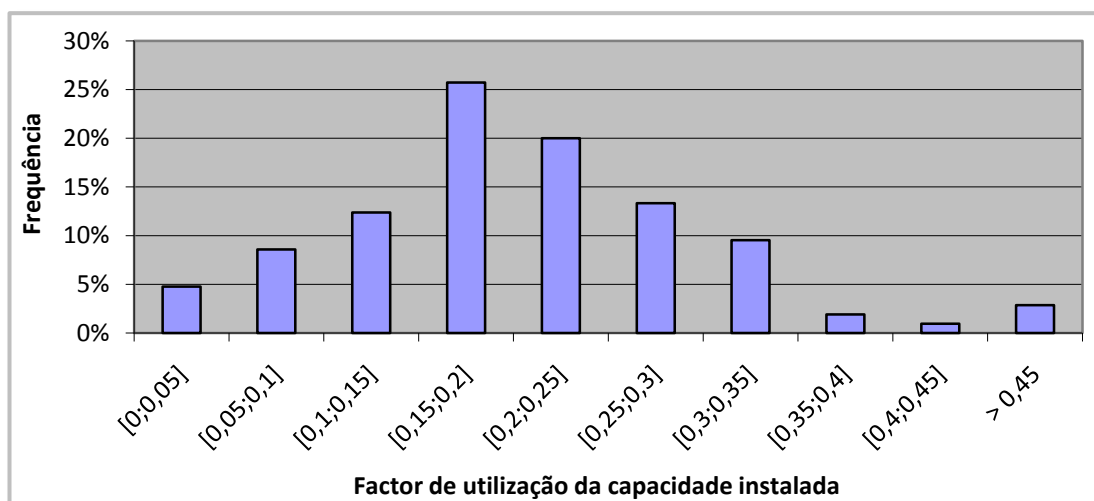


Figura 64 - Histograma do Factor de Utilização da Capacidade Instalada.

Através do histograma anterior pode-se dizer que existe um maior número de CMH que possuem um factor de utilização da capacidade instalada no intervalo entre 0,15 e 0,2. Contudo, existe uma elevada percentagem de centrais nos dois intervalos seguintes e existem algumas excepções com elevado factor de utilização da capacidade instalada.

O importante a reter deste estudo é que se as CMH trabalhassem sempre à sua potência nominal precisariam apenas de entre 10% a 30% do ano para produzirem o que produzem num ano. Isto deve-se à disponibilidade do recurso que não é controlável pelas estratégias de operação.

O factor de utilização pode ser dependente da potência e do tipo de exploração da CMH. Com o objectivo de se verificar esta dependência na Figura 65 apresenta-se um gráfico que demonstra essas relações.

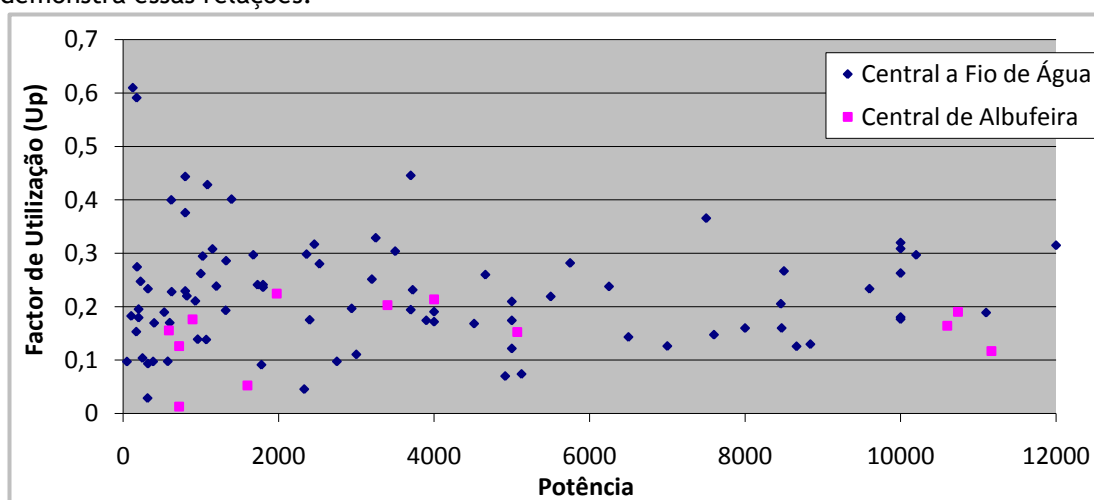


Figura 65 - Factor de Utilização da Capacidade Instalada em Função da Potência.

Realizando uma análise da figura anterior conclui-se que em termos médios as centrais a fio-de-água possuem um factor de utilização da capacidade instalada mais elevado em relação às centrais de albufeira. Em relação ao valor do factor de utilização da capacidade instalada em função da potência nada se pode concluir em concreto.

4.2.12- Factor de Utilização do Caudal do Rio

A maioria das CMH implementadas em Portugal possuem uma exploração designada de exploração a fio-de-água. Como foi referido este tipo de aproveitamentos é caracterizado por não possuir quase nenhuma capacidade de regulação do caudal, isto é, estas centrais produzem unicamente quando existe recurso (fluxo de água).

Porém, nem todo o fluxo de água que flui num determinado rio ou ribeira(o) é utilizado para gerar energia eléctrica, apenas uma parte dessa quantidade de água é que se torna fonte de energia primária para se produzir energia.

Assim sendo, é de extremo interesse e utilidade determinar uma gama de valores que identifique qual a percentagem do caudal do rio que é utilizado nas CMH. O problema existente na determinação deste factor é não se possuir informação do valor total de caudal dos rios ou ribeiras(os) que alimentam as CMH.

Por isso aplicou-se a (Eq. 9) que pretende de uma forma elaborada determinar o caudal fluente em cada rio onde se encontra uma CMH.

$$Q = Pluv \times \frac{A}{31536000} \quad (m^3/s) \quad (\text{Eq. 9})$$

Onde:

Pluv- Pluviosidade que atinge uma determinada região durante um ano (m/ano);

A - Área da bacia da CMH (m²);

Possuindo informação do caudal afluente em cada CMH é possível calcular o factor de utilização do caudal do rio através da aplicação da (Eq. 10).

$$f_u = \frac{P_{m\acute{a}xima}}{9,81 \times \eta \times Pluv \times \frac{A}{31536000} \times H} \quad (\text{Eq. 10})$$

Onde:

f_u - Factor de utilização do caudal do rio;

Desfrutando de todos os dados necessários para determinar o factor de utilização do caudal do rio, apresenta-se na Figura 66 um histograma que indica os valores típicos para as CMH.

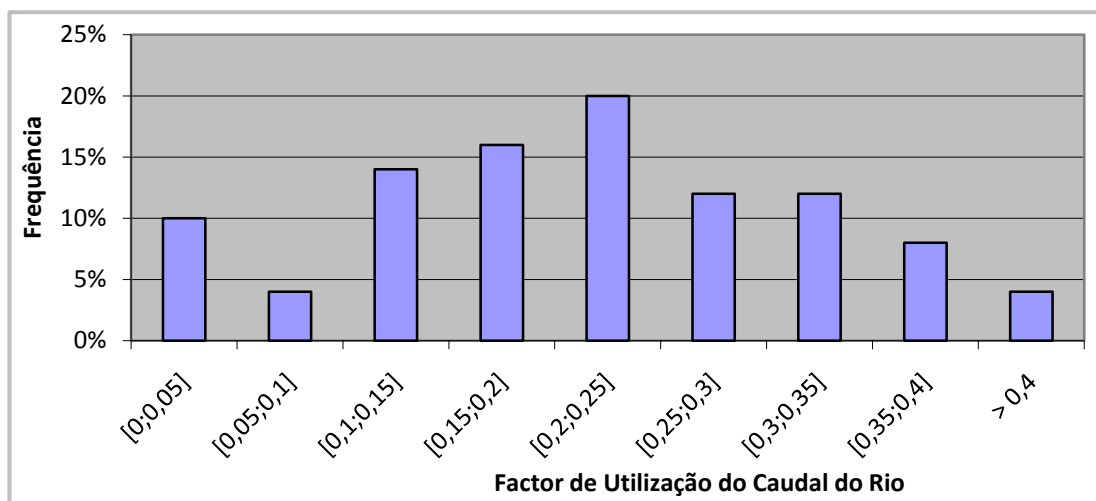


Figura 66 - Histograma do Factor de Utilização do Caudal do Rio.

Pela Figura 66 constata-se que existe maior probabilidade de encontrar uma CMH que apresente um factor de utilização do caudal do rio entre os 0,2 e os 0,25. Esta gama de valores é a que aparece num maior número de CMH no território nacional, mas há que considerar os valores vizinhos pois apresentam também um peso bastante significativo. Tornando assim a gama entre 0,15 e 0,4 uma gama de valores a considerar, no que toca à utilização do caudal do rio pelas CMH.

A área da bacia é uma característica preponderante na determinação do factor de utilização do rio, de forma a verificar a relação entre estas duas características procedeu-se ao traçado do gráfico que se apresenta na Figura 67.

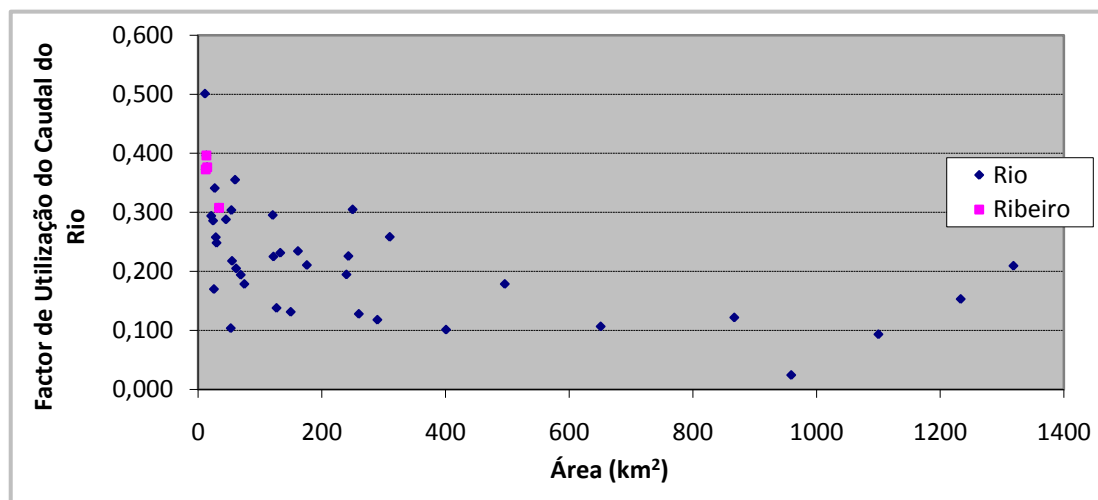


Figura 67 - Factor de Utilização do Caudal do Rio em Função da Área da Bacia.

Através do gráfico anterior, conclui-se que para áreas de dimensões mais pequenas o factor de utilização do caudal do rio é mais elevado. À medida que as dimensões da área vão aumentando existe uma diminuição do factor de utilização do caudal do rio. Contudo nos valores de áreas elevadas existe uma viragem da tendência, tendendo para valores mais elevados do factor de utilização.

O factor de utilização do caudal do rio, como já foi dito, exprime a quantidade de água que se retira do curso de água para o aproveitamento hidroeléctrico de forma a gerar energia. Porém esta quantidade de água que se retira do fluxo total do rio pode estar relacionada com o factor de utilização da capacidade instalada. Se uma CMH possuir uma exploração pura a fio-de-água com capacidade de armazenamento nula tem que aproveitar toda a quantidade de água que flui, se quiser tirar o máximo de partido do aproveitamento vai ter de o dimensionar para períodos de maior pluviosidade.

Esta medida faz com que a CMH possua uma potência instalada que só será atingida em períodos de grande afluência de água, tornando o factor de utilização da capacidade instalada num valor reduzido. Este factor indicaria qual o período de tempo necessário para produzir a energia anual se o aproveitamento funciona-se à potência instalada.

De forma inversa ao referido anteriormente espera-se que aproveitamentos que possuam uma capacidade de regularização maior não utilizem tanto caudal do rio e que consigam ter um factor de utilização da capacidade instalada mais elevado. Uma vez que possuem capacidade de armazenar o recurso que lhes permitirá produzir de forma muito mais regular.

Com o objectivo de verificar as conclusões anteriores procedeu-se ao traçado do gráfico que se apresenta na Figura 68 e que apresenta o factor de utilização do caudal do rio em função do caudal de utilização da capacidade instalada.

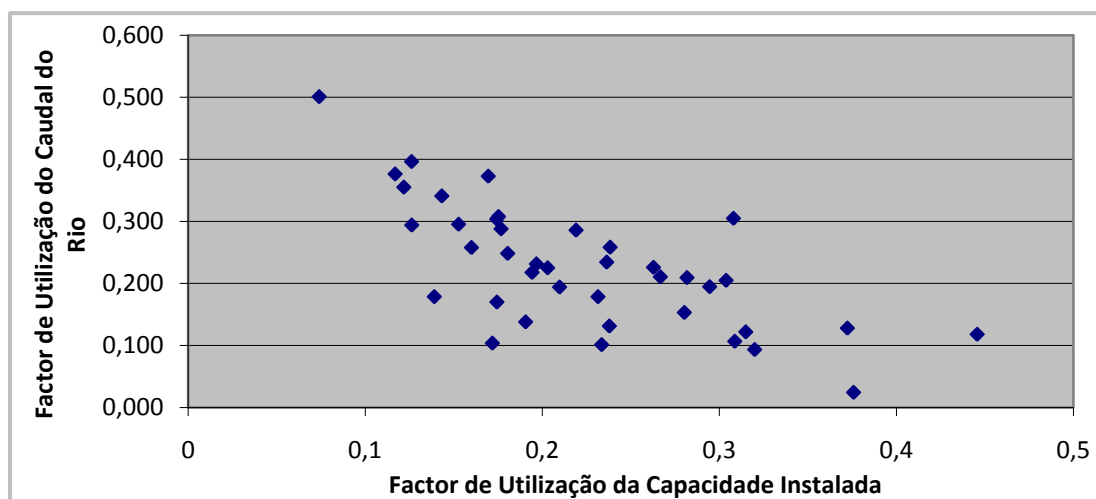


Figura 68 - Factor de Utilização do Caudal do Rio vs Factor de Utilização da Capacidade Instalada.

Através da análise do gráfico anterior comprova-se que para valores de utilização do caudal mais elevados obtêm-se valores de utilização da capacidade instalada mais baixos e vice-versa.

Em conclusão pode-se dizer que existe uma diminuição quase que constante no factor de utilização do caudal do rio à medida que se vai subindo no valor do factor de utilização da capacidade instalada.

Capítulo 5

Caracterização da Produção

5.1- Introdução

Actualmente, a produção de electricidade a partir de CMH surge como uma das formas de combater os indesejados GEE e promover a implementação e desenvolvimento de fontes de energia renovável. Portugal é um país que apresenta um recurso hídrico considerável mas apresenta aproximadamente 50% do potencial hídrico por explorar. Portanto as CMH poderão apresentar-se como hipótese para o desenvolvimento do potencial hidroeléctrico nacional.

Uma análise dos tipos de produção é uma mais-valia para um futuro que se perspectiva ser caracterizado pelo aumento das energias provenientes da água, nomeadamente das CMH.

Este capítulo numa primeira fase contempla uma análise de algumas características que poderão ser imprescindíveis para a caracterização da produção. Além disso, contempla também parâmetros a serem considerados, como importantes para a realização de modelos de previsão de produção deste tipo de aproveitamentos hidroeléctricos.

É apresentado um estudo acerca dos perfis típicos de produção em Portugal com base nos dados de produção para um conjunto de CMH. Sendo o objectivo tipificar as características técnicas em função do perfil de produção.

Em conclusão, este capítulo revela-se de grande importância, dado que, o objectivo essencial é mediante as características específicas de cada CMH, identificar qual o seu perfil típico de produção. Assim sendo, este estudo assume-se preponderante aquando de um projecto futuro de concepção de um aproveitamento hidroeléctrico, pois à priori é possível reconhecer o padrão típico de produção.

5.2- Estudo da Produção em CMH

5.2.1- Comportamentos Típicos

É extremamente importante ter conhecimento do comportamento da produção ao longo do ano, para que seja possível extrair ilações e identificar factores ou variáveis que possam ser considerados para caracterizar a forma de produção. Tendo em consideração a informação da produção anual de uma CMH depara-se logo um factor. Esse factor é a estratégia de operação aplicada nos aproveitamentos desta natureza, como se pode observar pela Figura 69.

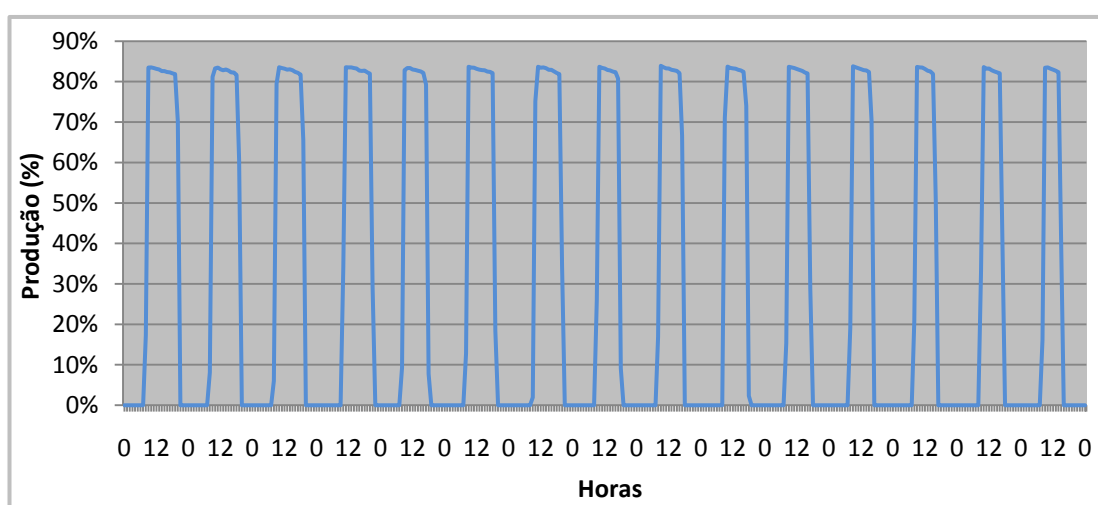


Figura 69 - Característica de Produção de uma CMH em Função do Tempo.

A figura anterior apresenta o comportamento da produção para a primeira quinzena de Janeiro do ano de 2007. Como se pode observar existe, efectivamente, uma periodicidade ao longo de toda a quinzena. Ou seja, existe a ligação da CMH às 8 horas e um término de produção por volta das 20 horas, que é considerado o período de horas de cheia e de ponta. Concretamente, é neste período que a remuneração pelo fornecimento de energia entregue à rede, é superior [56], o que indicia as possíveis razões para a produção de electricidade por parte dos promotores.

Contudo, verificam-se diversas situações em que a estratégia de operação variava no intervalo de horas de produção e na amplitude de produção, ver Figura 70 e Figura 71 respectivamente.

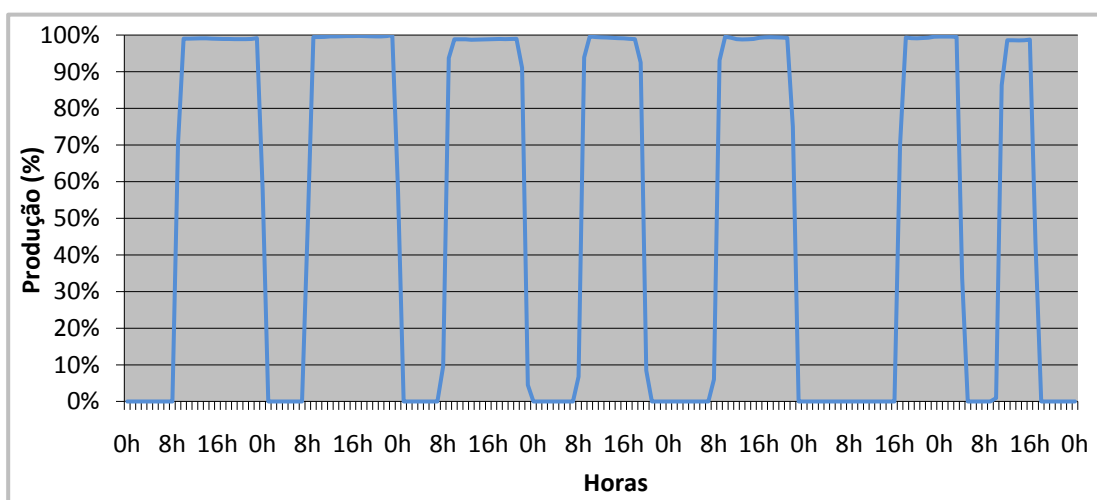


Figura 70 - Estratégia de Operação 1.

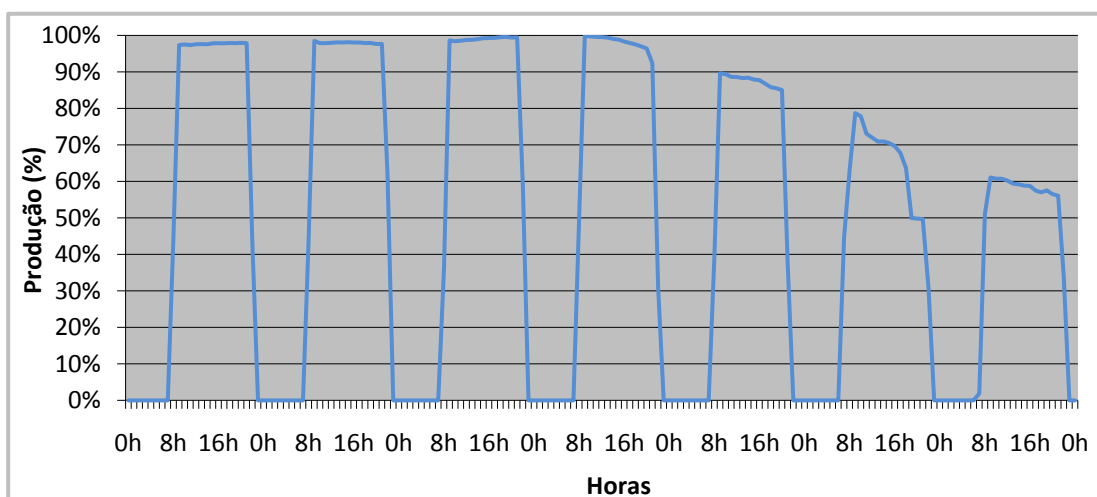


Figura 71 - Estratégia de Operação 2.

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

Este são fenómenos frequentes em diversos aproveitamentos hidroelétricos, no entanto, dado que se verificou que não existia uma variabilidade horária no perfil de produção realizou-se uma suavização.

Após aplicada a suavização ao conjunto de vectores de produção, deparou-se com algumas situações de comportamentos de produção das CMH. Da Figura 72 à Figura 75 apresentam-se alguns desses comportamentos.

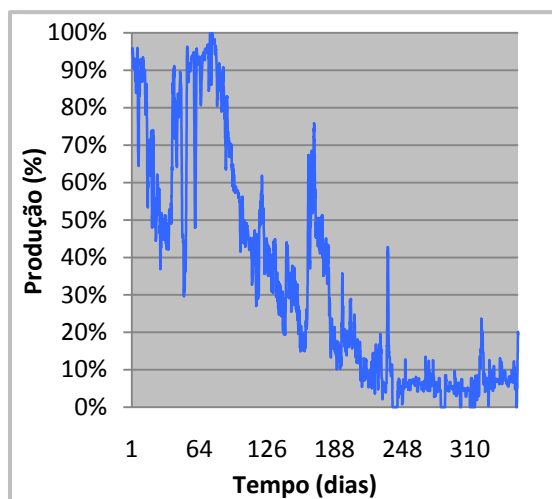


Figura 72 - Produção da Central A.

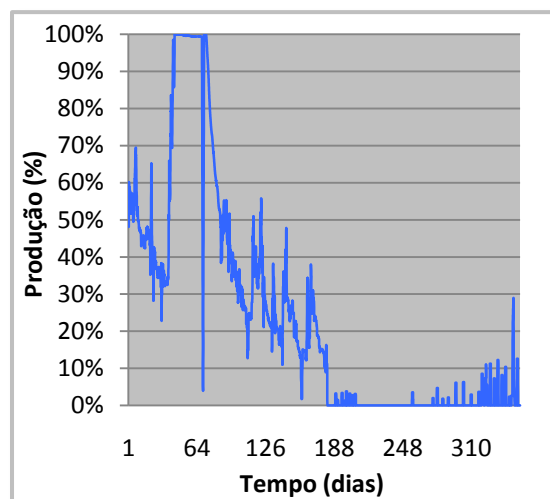


Figura 73 - Produção da Central B.

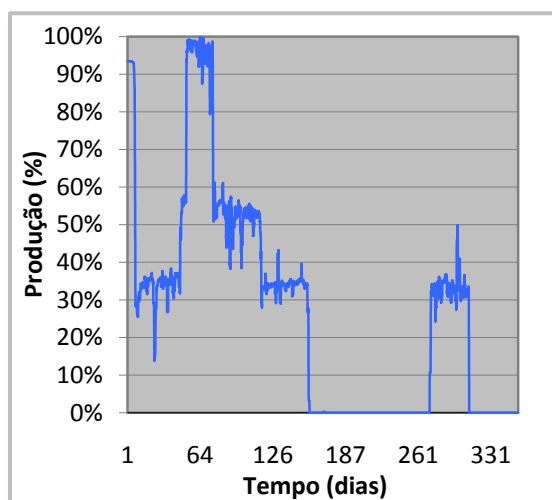


Figura 74 - Produção da Central C.

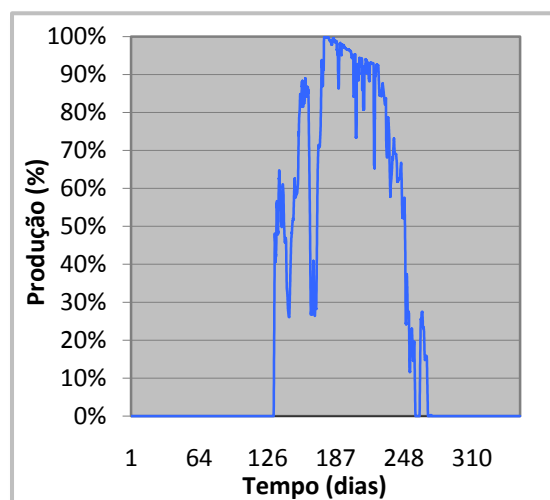


Figura 75 - Produção da Central D.

Após observação das figuras apresentadas anteriormente detecta-se a existência de diferentes comportamentos de produção, sendo caracterizados pelas subidas rápidas e decaimentos lentos.

As centrais A e B apresentam um comportamento idêntico, talvez justificável pela existência de pluviosidade. Como forma de avaliar essa dependência apresenta-se a Figura 76.

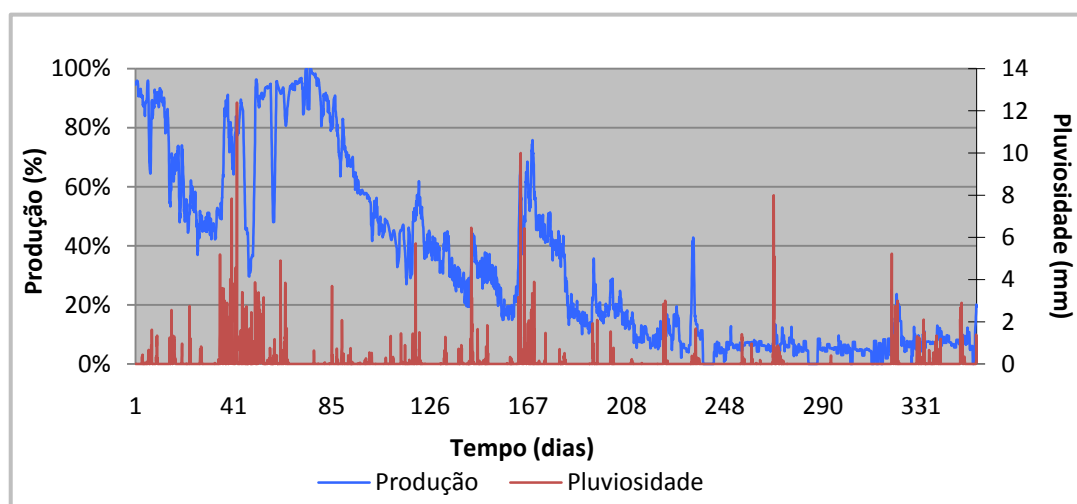


Figura 76 - Relação entre a Produção e a Pluviosidade para a Central A.

A figura anterior evidencia que as CMH possuem um regime de exploração a fio-de-água, com reduzida capacidade de regulação e portanto fortemente dependente da pluviosidade. No entanto convém salientar um pormenor importante que é a existência de um pico de pluviosidade elevado no mês de Agosto e não existe produção. Este facto é justificado por nessas alturas do ano os solos apresentarem-se áridos e secos devido às temperaturas elevadas. Assim, a água que precipita não é suficiente para provocar um aumento dos rios e consequente produção, uma vez que a água irá infiltrar-se no solo não originando escoamento superficial.

No que se refere à central C esta ostenta um comportamento periódico, definido por escalões de operação. Para além disso verifica-se que nos meses de Junho a Agosto não existe produção de energia, que pode ser originado por estratégias de operação, falta de recurso ou por realização de acções de manutenção.

A central D apresenta um perfil de produção diferente das centrais A, B e C, que poderá ser por explicável por razões de localização, uma vez que as centrais A, B e C se localizam mais a norte e a central D mais a sul. Contudo sabe-se que as centrais que possuem este tipo de perfil são centrais que têm dupla funcionalidade, isto é, para além de realizarem produção de energia eléctrica, possuem capacidades de armazenamento que lhes permite regular e armazenar a água de forma a turbinar em alturas de maior temperatura e de menor pluviosidade. Assim, asseguram o abastecimento às plantações em períodos de escassez de água, sendo a sua função uma função hidroagrícola. Posto isto pode-se concluir que as centrais que possuam uma exploração idêntica à central D têm uma regulação que não depende de características naturais, mas sim de estratégias de operação. A necessidade de água em plantações é quem comanda a sua entrada em funcionamento. Assim sendo exclui-se este tipo de cen-

trais devido à dificuldade de analisar factores que dependem de estratégias de operação e não de características naturais.

5.2.2- Decaimentos

No ponto 5.2.1- observam-se alguns comportamentos típicos de produção designadamente decaimentos lentos. Após análise verifica-se que o comportamento de produção para 90% das CMH apresenta dois decaimentos, que designar-se-á de “Decaimento A” e “Decaimento B”, conforme se apresenta na Figura 77.

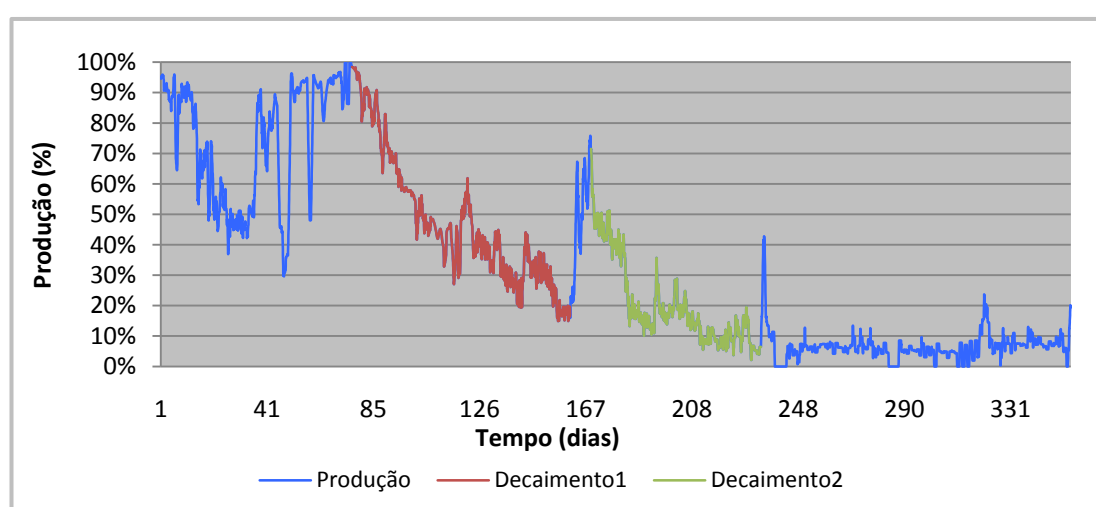


Figura 77 - Decaimentos Característicos para a Central A.

Estes decaimentos podem modelizar as perdas de água na bacia hidrográfica das respectivas CMH. Podem ser descritos através de uma função exponencial $y = ae^{-\theta}$, onde o parâmetro θ representa o decaimento. Na Figura 78 e na Figura 79 apresenta-se a determinação dos decaimentos A e B para a Central A.

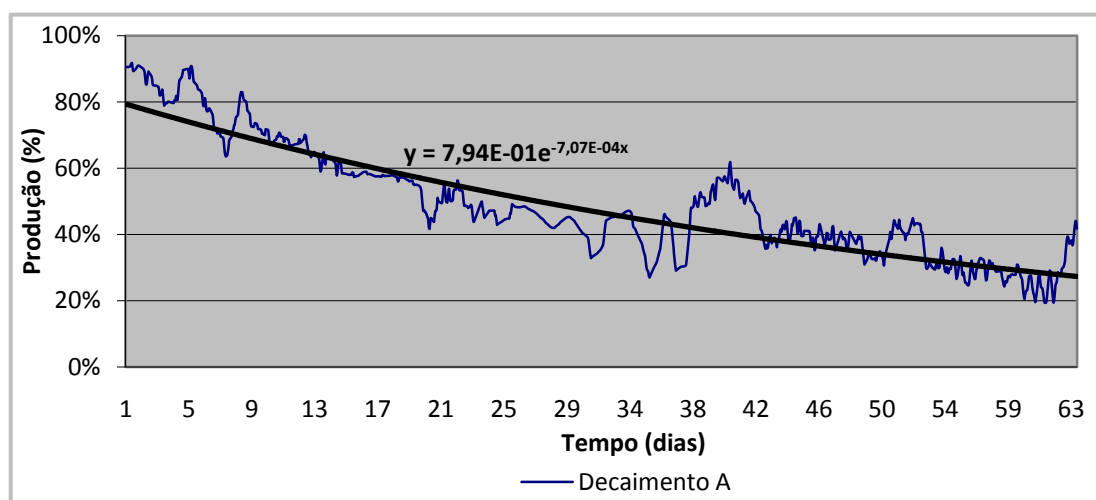


Figura 78 - Decaimento A para a Central A.

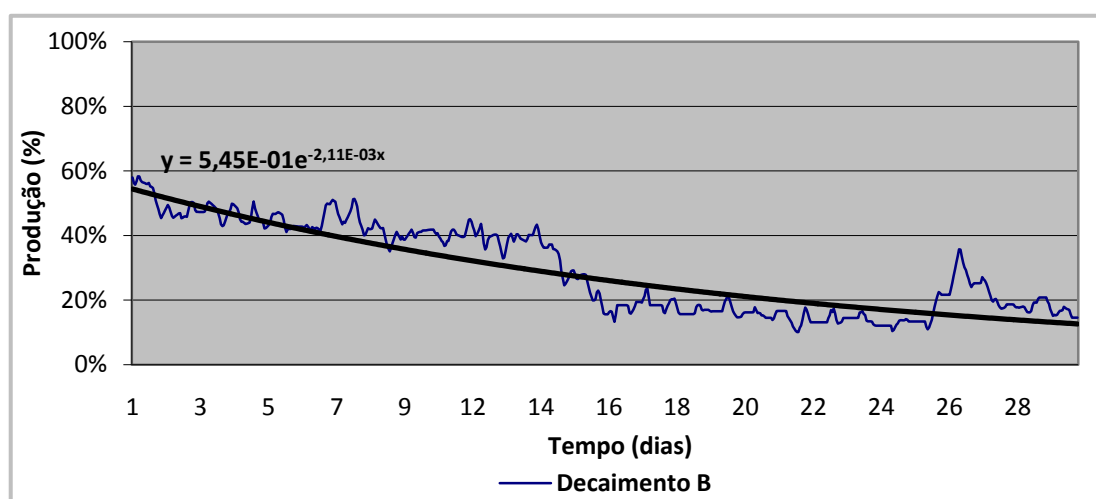


Figura 79 - Decaimento B para a Central A.

Refira-se que esta é uma característica típica de cada aproveitamento e pode ser dependente da relação entre a queda e o caudal, na medida em que o decaimento traduz a quantidade de água que se vai perdendo. Portanto a relação entre queda e caudal simboliza a perda de água que pode ser de uma forma mais rápida ou mais lenta.

Como forma de evidenciar se existe relação, na Figura 80 apresenta-se um gráfico que mostra o decaimento em função do rácio entre a queda e o caudal para o Decaimento A e Decaimento B.

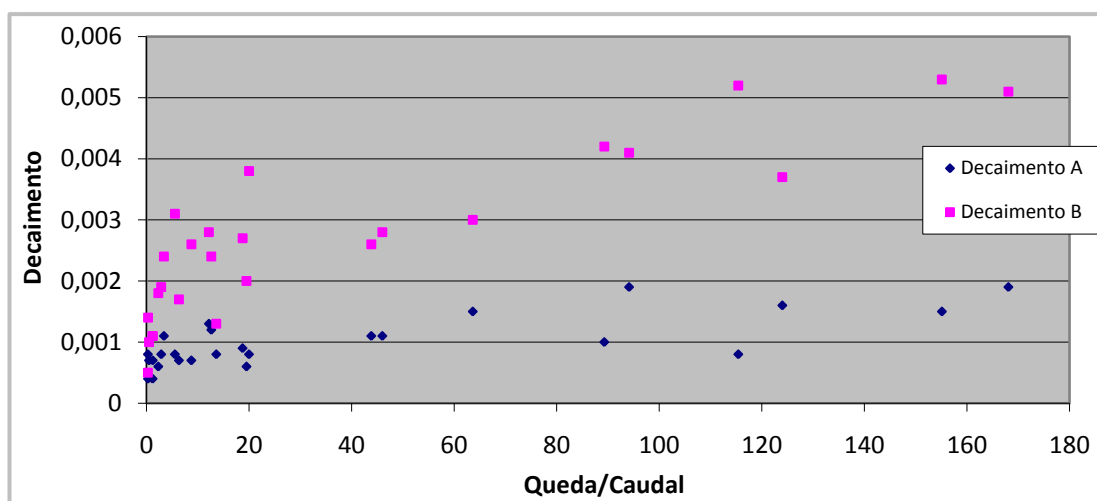


Figura 80 - Decaimento vs Queda/Caudal.

Atendendo aos resultados apresentados na figura anterior observa-se que existe uma relação entre o decaimento e o rácio entre a queda e o caudal. Esta relação apresenta-se com um crescimento mais rápido para valores de queda sobre caudal pequenos e tende com um crescimento praticamente constante até um valor máximo.

Os dois decaimentos apresentam um comportamento idêntico, sendo que parece existir um factor de escala entre os dois decaimentos. A diferença é justificável, porque o período do ano no qual estes decaimentos se situam é diferente. O período do segundo decaimento é um período onde a temperatura média é superior e a quantidade de água que precipita é menor, dando origem a decaimentos mais rápidos. Isto é, a quantidade de água que se perde num período de menor pluviosidade e de temperaturas mais elevadas é mais rápida que num período de elevada pluviosidade e temperaturas mais reduzidas.

5.2.3- Análise dos Máximos

Um outro pormenor que se verifica pela análise dos comportamentos da produção para o ano de 2007 é a existência de dois picos de produção, que ocorrem em épocas diferentes (ver Figura 81) do ano. Concretamente designar-se-á o primeiro pico de “Máximo A” e o segundo pico de “Máximo B”.

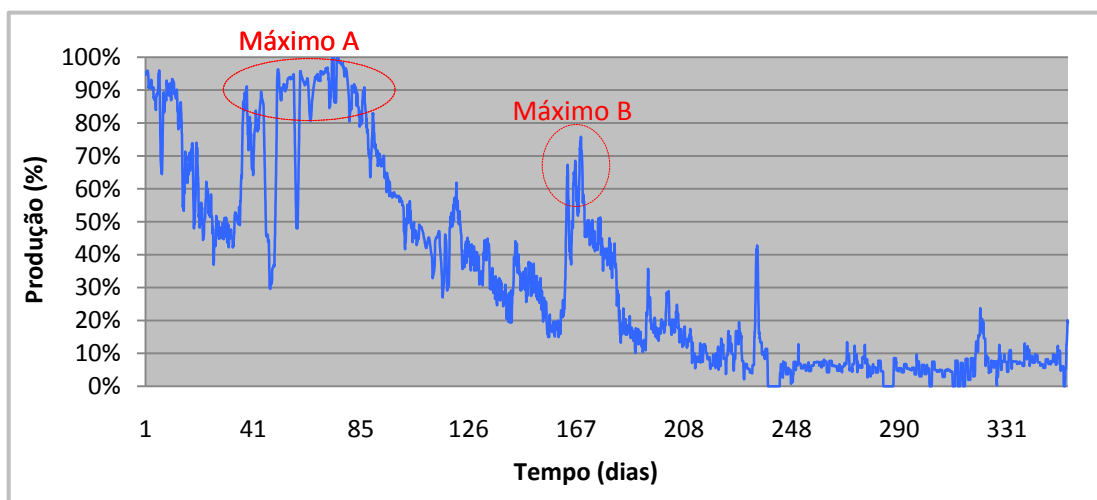


Figura 81 - Máximos de Produção da CMH.

Pela análise dos máximos A e B suspeita-se que poderá existir uma ligação do rácio dos máximos com o factor de utilização do caudal do rio. Como já foi referido anteriormente no ponto 4.2.12- , o factor de utilização do caudal do rio exprime a quantidade de água que se utiliza do curso de água para o aproveitamento hidroeléctrico de forma a gerar energia. Nas centrais que possuem um maior valor deste factor, ou seja, uma exploração puramente a fio-de-água sem qualquer capacidade de armazenamento, espera-se que o rácio entre o máximo B e o máximo A seja menor. Contrariamente as centrais que apresentem regulação de caudal, isto é, que possuem um factor de utilização do caudal do rio menor, apresentam um rácio entre os máximos B e A maior. Uma vez que possuem regulação de água podem atingir os máximos nas duas situações.

Com o objectivo de verificar se este pensamento é válido ou não apresenta-se na Figura 82 um gráfico que apresenta o factor de utilização do caudal do rio em função dos rácios entre o máximo B e A.

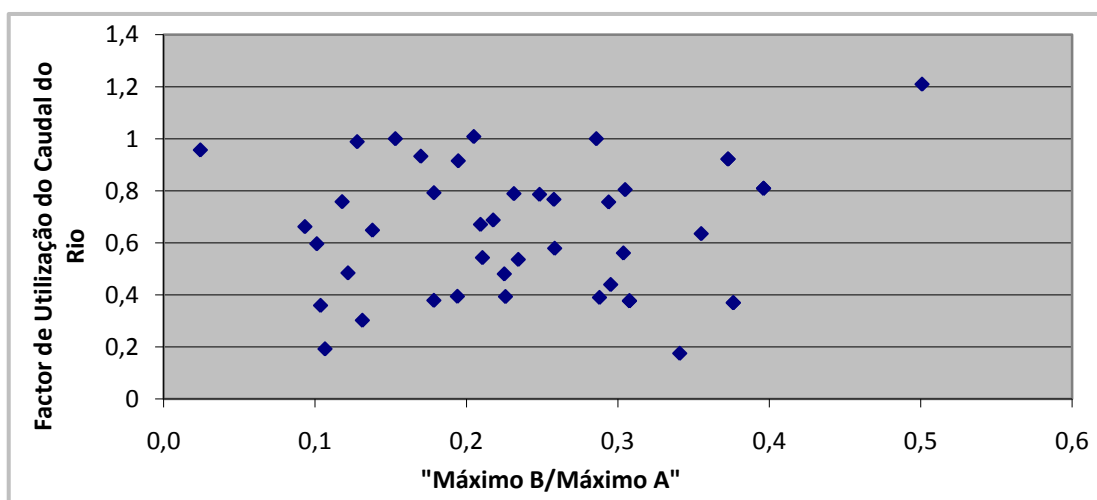


Figura 82 - Factor de Utilização do Caudal do Rio vs Rácio de Máximos de Produção.

Após uma observação do gráfico que se apresenta na figura anterior, denota-se que não existe uma relação como à partida seria de esperar, inviabilizando assim esta hipótese. Este facto pode ser justificável por o ano 2007 ter sido controverso ou por simplesmente não existir relação entre estas duas variáveis.

5.2.4- Influência da Pluviosidade

A água é a fonte de energia primária para a produção de energia eléctrica em aproveitamentos hidroeléctricos. Tendo por base o ciclo da água, a presença de recurso hídrico é dependente da ocorrência de precipitação.

Assim sendo a expectativa é que existe uma forte relação e dependência entre a pluviosidade e a produção. Portanto, é fundamental o conhecimento de dados relativos à pluviosidade de forma a numa primeira abordagem se proceder ao estudo de possíveis interdependências através do desenvolvimento de um modelo de correlação cruzada.

Como se possui informação a esse nível torna-se fácil esta análise. Sendo apenas de referir que para cada central a previsão da pluviosidade é realizada para o ponto médio representativo da bacia hidrográfica.

É importante referir que este estudo não visa unicamente analisar a relação entre a pluviosidade e a produção, mas sim a relação entre elas e algumas características fundamentais das CMH, como por exemplo, a área ou a relação entre a queda e o caudal.

Contudo, antes de se proceder à determinação da relação entre as séries de produção e pluviosidade e de modo a desenvolver um modelo de correlação cruzada eficiente é necessário atender à seguinte metodologia:

1. Avaliar a Variabilidade da Produção e Pluviosidade

Para ser possível avaliar a variabilidade da série de produção e de pluviosidade é necessário recorrer-se às (Eq. 11) e (Eq. 12), respectivamente.

$$\frac{\sigma^2(\Delta y)}{\sigma^2(y)} \quad (\text{Eq. 11})$$

$$\frac{\sigma^2(\Delta x)}{\sigma^2(x)} \quad (\text{Eq. 12})$$

Sendo,

σ^2 (variância) - É uma medida de dispersão que mede o distanciamento da distribuição em torno da média. Sendo calculada primeiro pela soma dos desvios quadrados da média e dividindo-a pelo número de observações;

$\Delta y = y_t - y_{t-1}$, Onde y_t representa o valor de produção da central no instante t e y_{t-1} representa o instante t-1;

$\Delta x = x_t - x_{t-1}$, Onde x_t representa o valor de pluviosidade no instante t e x_{t-1} representa o instante t-1.

2. Suavização com Média Móvel

Caso,

$$\frac{\sigma^2(\Delta x)}{\sigma^2(x)} > \frac{\sigma^2(\Delta y)}{\sigma^2(y)} \quad (\text{Eq. 13})$$

Então, é necessário suavizar a série de pluviosidade com média móvel até obter valores de variabilidade entre séries similares. Assim, é necessário recorrer à (Eq. 14):

$$x_{t_s} = \frac{\sum_{n=1}^{s-1} [n(x_{t-(s-n)} + x_{t+(s-n)})] + sx_t}{\sum_{n=1}^{s-1} 2[s-n] + s} \quad (\text{Eq. 14})$$

3. Construção de Gráficos de Correlação Cruzada (CCF)

Após transformar as séries de dados com variabilidade semelhantes é possível determinar a relação padronizada entre duas variáveis (produção e pluviosidade). Para tal é fundamental o recurso a um *software* de tratamento estatístico de dados - *Statistical Package for the Social Sciences* (SPSS) - para construção de gráficos de correlação cruzada. Com esta ferramenta é possível avaliar a existência de atrasos entre variáveis.

Tendo por base a metodologia, em seguida apresentar-se-á a análise para o perfil típico de produção:

Com base nos dados de produção e de pluviosidade para a “Central X”, no cálculo da variabilidade das séries obtiveram-se os seguintes resultados, respectivamente (ver (Eq. 15) e (Eq. 16)):

$$\frac{\sigma^2(\Delta y)}{\sigma^2(y)} = 0,05 \quad (\text{Eq. 15})$$

$$\frac{\sigma^2(\Delta x)}{\sigma^2(x)} = 0,28 \quad (\text{Eq. 16})$$

Dado que existem variabilidades díspares entre séries realizou-se uma suavização da pluviosidade de 5 horas, onde se aplicou a (Eq. 17) e se conseguiu uma variabilidade de 0,04%.

$$x_{t7} = \frac{\sum_{n=1}^6 [n(x_{t-(7-n)} + x_{t+(7-n)})] + 7x_t}{\sum_{n=1}^6 2[7-n] + 7} \quad (\text{Eq. 17})$$

De seguida, procedeu-se à elaboração de um gráfico de correlação cruzada que se apresenta na Figura 83.

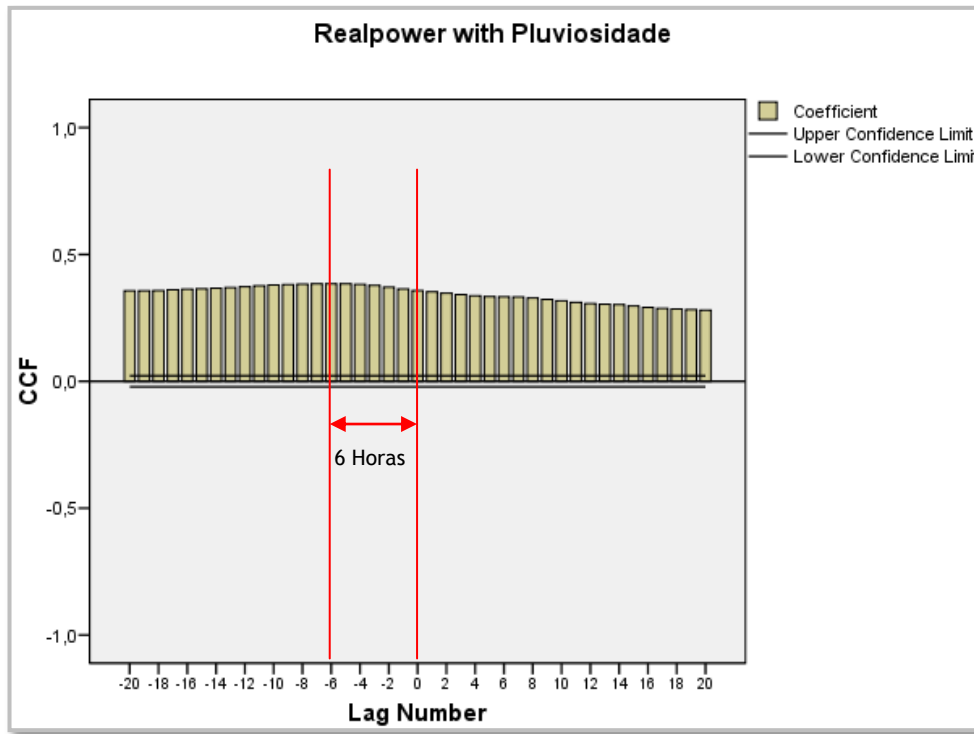


Figura 83 - Correlação Cruzada entre Produção e Pluviosidade.

Com o traçado do gráfico de correlação cruzada verificou-se que para esta central em análise existe um atraso de 6 horas da produção em relação à pluviosidade. Com o objectivo de verificar se os atrasos estão associados com alguma característica específica das CMH, teve-se em consideração a metodologia adoptada anteriormente e procedeu-se à determinação dos atrasos para um conjunto de centrais com um perfil de produção idêntico ao da Central A.

Na Figura 84 e na Figura 85 apresentam-se dois gráficos que têm como objectivo verificar se os atrasos determinados através dos gráficos de correlação cruzada têm ligação com a relação queda sobre caudal e com a área da bacia.

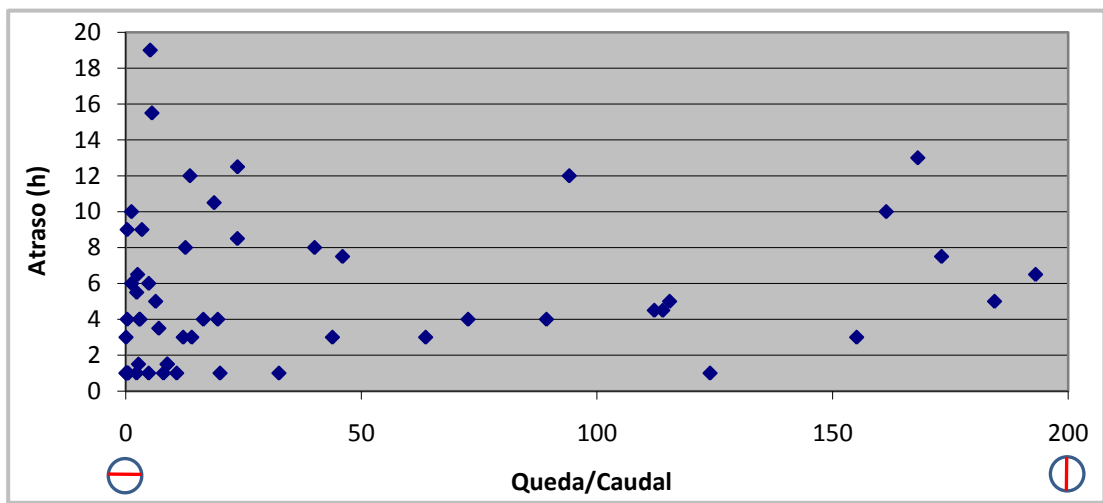


Figura 84 - Atraso vs. Queda/Caudal.

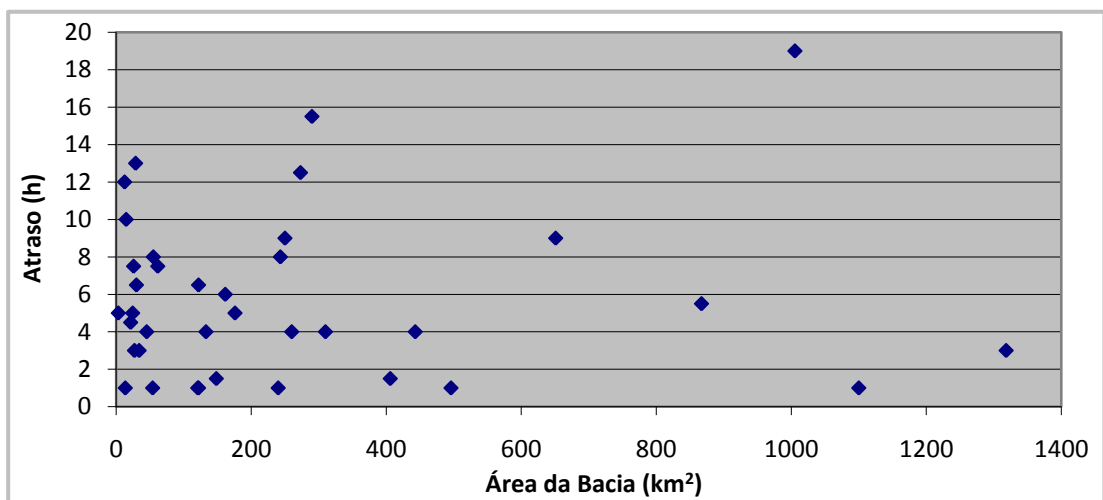


Figura 85 - Atraso vs. Área da Bacia.

Após a análise dos gráficos anteriores pouco há a concluir a não ser que contrariamente ao esperado não existe uma ligação entre os atrasos da produção face à pluviosidade em relação ao rácio da queda sobre caudal e da área da bacia.

Uma justificação para esta falta de relação entre as características pode ser a capacidade de armazenamento das CMH, mesmo que por pequena que seja pode realizar uma retenção de água durante umas horas o que afecta logo o atraso da produção face à pluviosidade. Outra questão pode ser a composição dos solos, uma vez que um solo rochoso é bastante diferente de um solo arenoso, influenciando o tipo de solo na velocidade de escoamento da pluviosidade para o leito do rio ou ribeira(o).

5.2.5- Definição de Perfis Típicos

Conforme apresentado no ponto 5.2.1- a forma da produção anual pode possuir diferentes comportamentos. Contudo, existem centrais que possuem formas de produção análogas. Assim sendo, o objectivo deste ponto é encontrar grupos de centrais com perfis de produção similares.

Para se proceder a esta determinação recorreu-se a um *software* de cálculo numérico de designação, *MATrix LABORatory (Matlab)*. Antes de iniciar o processo de agrupamento procedeu-se à criação de uma matriz com informação de produção das diversas CMH. Contudo, é notório referir que para cada central consideraram-se 24 pontos, obtidos através de uma normalização para cada 15 dias. Após a construção da matriz procedeu-se à simulação dos diferentes perfis de produção, considerando que quatro perfis de produção é o mais indicado, dado que abrange o leque de todos os tipos de comportamentos da produção das CMH.

Os quatro tipos de perfil obtidos para caracterizar a produção anual das CMH em Portugal apresentam-se na Figura 86.

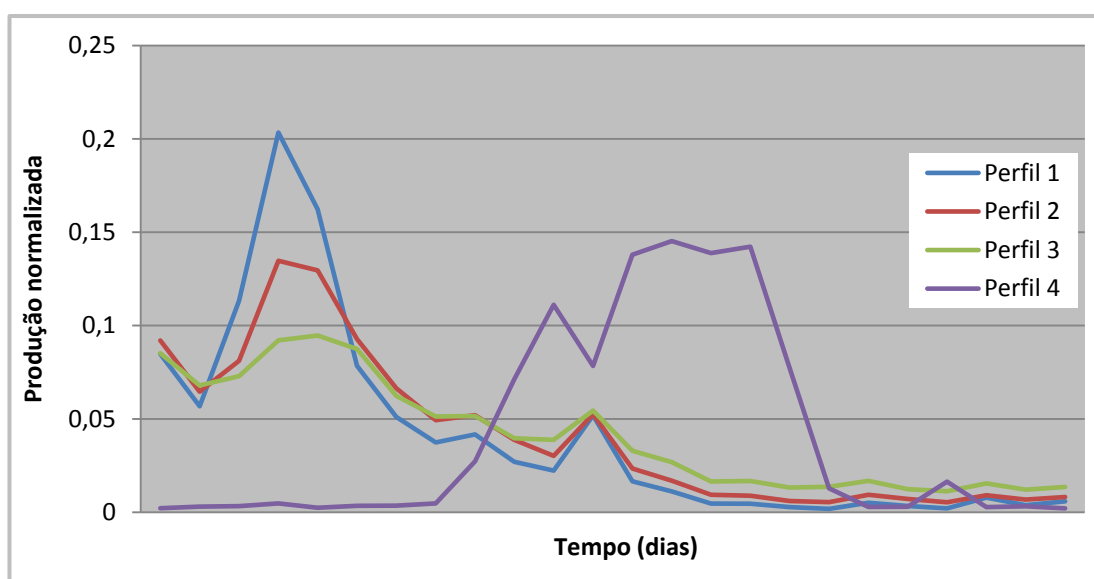


Figura 86 - Curvas dos Perfis Anuais de Produção.

Após análise da figura anterior observa-se que os perfis de produção obtidos através da técnica de agrupamento cobrem quase todos os comportamentos de produção abordados no ponto 5.2.1-. Os Perfis 1, 2 e 3 ostentam um padrão semelhante residindo a única diferença na amplitude do primeiro máximo. O modelo apresentado no Perfil 4 modeliza o perfil típico de produção de CMH cuja finalidade é, para além das preocupações energéticas, a preocupação com as produções agrícolas, daí ser utilizada em aproveitamentos com designação de aproveitamentos hidroagrícolas.

Atendendo à análise dos diferentes perfis de produção em função das características das CMH pode-se dizer que o Perfil 1 apresenta uma exploração típica a fio-de-água, com decaimento mais rápido que pode ser dependente de uma maior fragilidade da área hidrográfica.

Assim apresentará caudais baixos condicionados pelas dimensões das áreas. Contudo, dado que apresenta um elevado valor de produção, será o indício da existência de quedas elevadas.

Relativamente ao Perfil 4, conforme referido anteriormente este possui características específicas de produção. Deste modo, para ser possível proceder a modelização do comportamento típico de produção, é necessário considerar que estes aproveitamentos possuem regimes de exploração de albufeira, com áreas elevadas. Só assim é possível armazenar elevadas quantidades de água para produzir em épocas secas, bem como com quedas reduzidas e caudais elevados. Quanto ao decaimento pouco haverá a dizer para este perfil de produção dado que não se encontra uma explicação válida.

Os Perfis 2 e 3 são caracterizados por possuírem valores intermédios das características enumeradas anteriormente, designadamente, queda, caudal e área hidrográfica.

Contudo, com o objectivo de verificar se as suposições anteriores possuem fundamento, procedeu-se à elaboração de um *cluster* hierárquico na ferramenta *SPSS* que realiza um agrupamento das diferentes variáveis. Particularmente, para se proceder à determinação deste agrupamento consideraram-se as variáveis perfil, área, queda, caudal, tipo de turbina, tipo de exploração e decaimento.

Após a elaboração do cluster e realizando uma análise em função do tipo de perfil conclui-se que:

- A área e o caudal são menores para o Perfil 1, seguindo os perfis 2 e 3. O Perfil 4 apresenta as áreas mais elevadas;
- A queda possui um comportamento inverso à área e ao caudal. O Perfil 1 apresenta valores de queda e caudal mais elevados seguido dos perfis 2, 3 e 4;
- No Perfil 1 são normalmente empregues turbinas do tipo *Pelton*. Os Perfis 2 e 3 empregam turbinas *Francis* com alguma mistura da *Pelton* e *Kaplan*. Enquanto o Perfil 4 é caracterizado pelas turbinas *Kaplan*;
- O Perfil 1 é constituído por centrais a fio-de-água enquanto o Perfil 4 apresenta centrais de albufeira. Os Perfis intermédios (2 e 3) são caracterizados por possuírem centrais de fio-de-água com algumas centrais de albufeira;
- O decaimento possui valor mais elevado para o Perfil 1 seguido dos Perfis 2 e 3. Para o Perfil 4 não se consegue concluir nada em relação a esta variável.

5.2.6- Avaliação do Potencial Regional

Avaliar o potencial regional é um estudo que ainda não se encontra realizado para o território nacional. Assim, avaliar a quantidade de potência que pode ser instalada numa deter-

minada região torna-se algo importante, na medida em que permite identificar zonas com maior potencial e comparar com o seu verdadeiro potencial instalado.

Neste estudo apresentar-se-á uma avaliação do potencial existente ao longo do território nacional dividido por concelhos.

Para se proceder a este estudo, primeiramente é necessário possuir uma cobertura completa dos rios e ribeiras(os) existentes em Portugal (ver Figura 87), assim como é necessária informação da orografia de todo o território nacional (ver Figura 88).

Reunida a informação necessária realizou-se um varrimento total do território português, no que se refere à altimetria, passando as curvas de nível a um modelo digital de terreno que permite ter uma ideia da orografia do solo em cada ponto do território nacional.

Seguidamente, realizou-se uma junção do mapa da rede hidrográfica com o mapa da altimetria e calculou-se pontos de 100 em 100 metros ao longo dos rio e ribeiras(os). Este processo permite obter o perfil de altimetria ao longo do percurso dos rios ou ribeiras(os). Adicionalmente, com informação dos comprimentos dos rios e ribeiras(os) através da (Eq. 18) procedeu-se à determinação dos declives médios dos rios (ver Figura 89).

$$declive_i = \frac{Alti_{m\acute{a}xima,i} - Alti_{m\acute{i}nima,i}}{L_i} \times 100 \quad (\text{Eq. 18})$$

Onde:

$declive_i$ - Declive do rio ou ribeira(o) i (%);

$Alti_{m\acute{a}xima,i}$ - Altimetria máxima para o rio ou ribeira(o) i (m);

$Alti_{m\acute{i}nima,i}$ - Altimetria mínima para o rio ou ribeira(o) i (m);

L - Comprimento do rio ou ribeira(o) i (m);

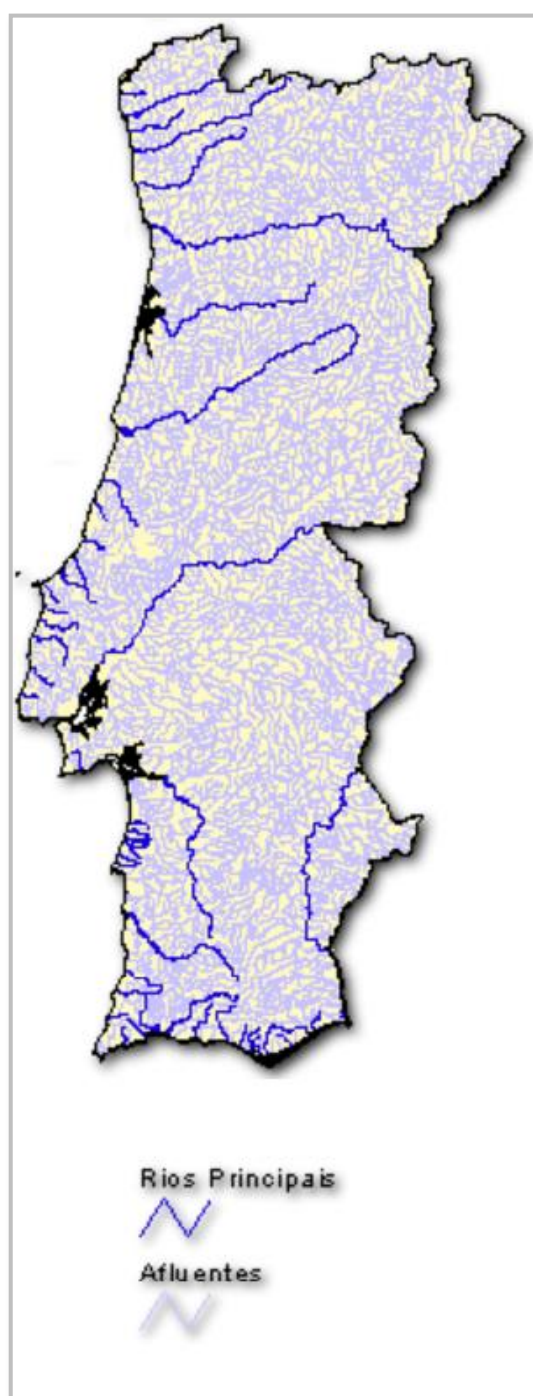


Figura 87 - Rede Hidrográfica do Território Português [51].

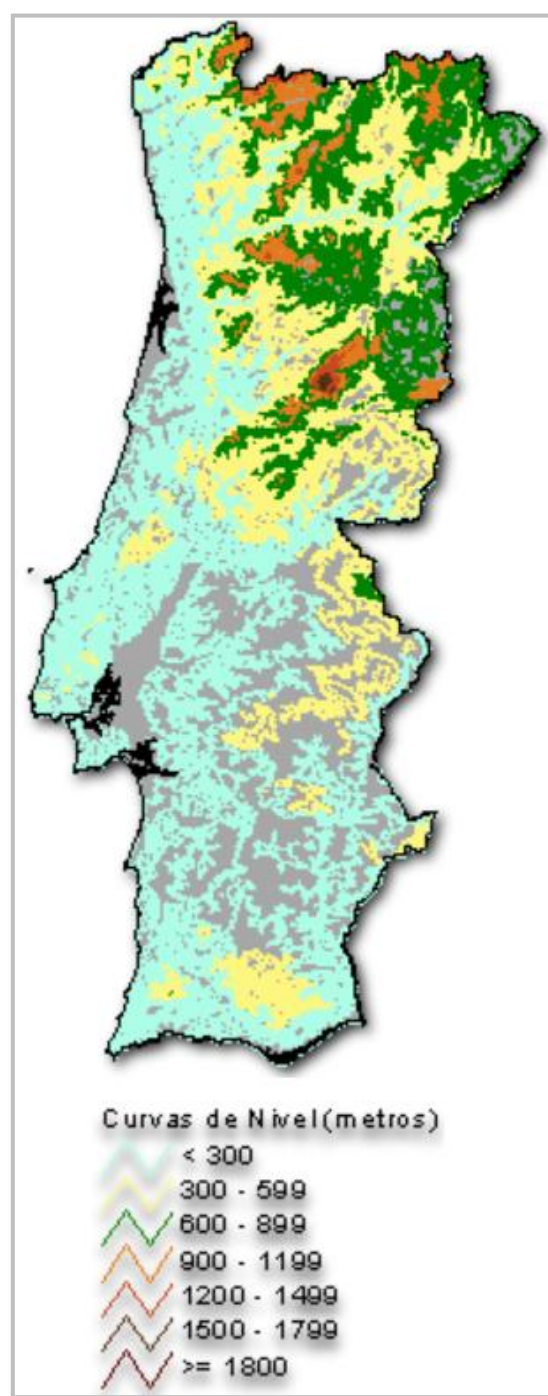


Figura 88 - Altimetria do Território Português [51].

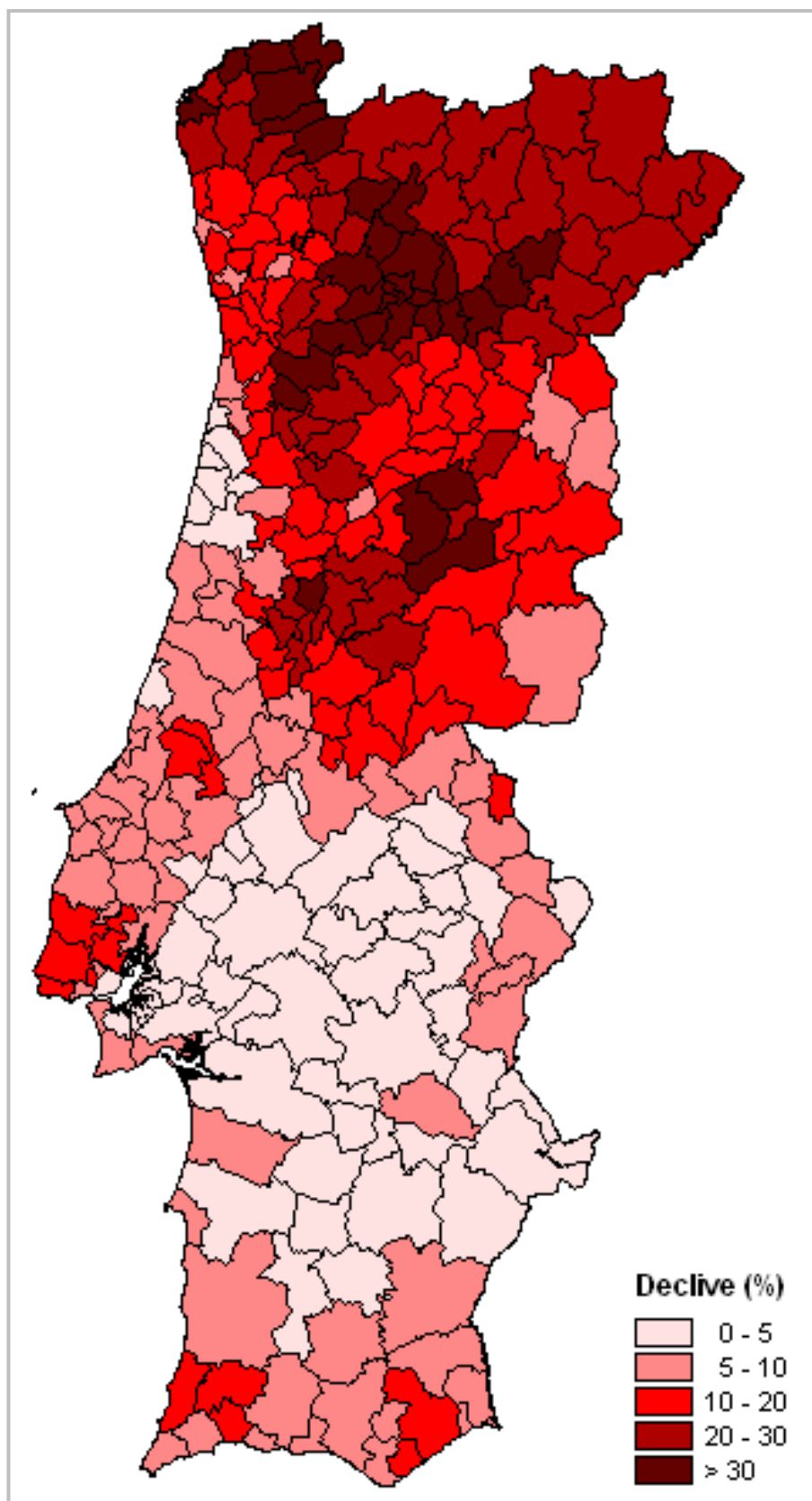


Figura 89 - Declives Médios ao Longo do Perfil do Percurso dos Rios e Ribeiras(os) por Concelho ao longo do Território Nacional.

A figura anterior apresenta os declives médios ao longo do perfil dos percursos dos cursos de água por concelho, permitindo identificar as zonas onde se pode retirar um maior proveito de uma das características físicas das CMH designada de queda.

Para se verificar o potencial existente ao longo do território nacional é necessário cruzar a informação dos declives com a informação da pluviosidade que permitirá ter uma ideia da quantidade de água que cai numa determinada área, de forma a calcular um caudal anual médio. A (Eq. 19) determina, aproximadamente, o potencial disponível em cada região ao longo do território nacional.

$$Potencial = \rho \times g \times \eta \times f_u \times Pluv \times \frac{A}{n^{\circ} \text{ de segundos num ano}} \times H_{média} \quad (\text{Eq. 19})$$

Onde:

Potencial - Potencial Disponível numa Região (kW);

ρ - Densidade da Água (kg/m^3);

g - Aceleração da Gravidade $9,81 (m/s^2)$;

η - Eficiência do Sistema (%);

f_u - Factor de Utilização do Caudal do Rio;

Pluv - Pluviosidade Anual (m);

A - Área da Região (m^2);

$H_{média}$ - Queda Média de uma Região (m).

Refira-se que para realizar os cálculos foi considerada uma eficiência do sistema de 83%, uma vez que é o valor médio de eficiência obtida nas CMH como se constatou no ponto 4.2.9- . Assim como se considerou um factor de utilização do caudal do rio de 0,25, uma vez que é o valor mais usual nas CMH nacionais como se verificou no ponto 4.2.12- . Importa referir que no que diz respeito à queda média foram considerados os valores de declive obtidos anteriormente.

Depois de aplicada a equação anterior (Eq. 19) a todos os concelhos do território nacional obteve-se a Figura 90 onde se pode verificar o potencial disponível.

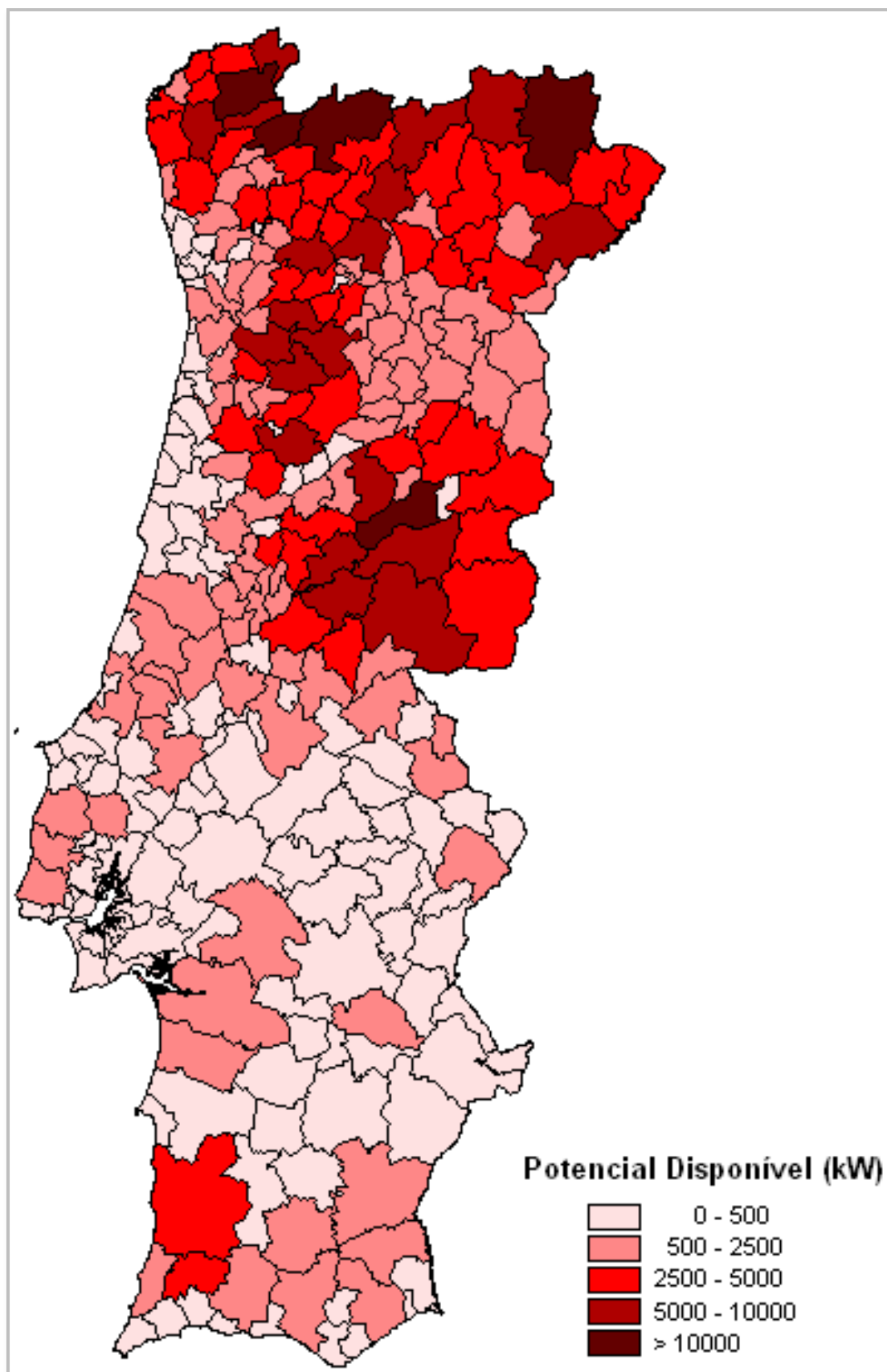


Figura 90 - Potencial Disponível por Concelho.

Na figura anterior apresenta-se detalhadamente a quantidade de potencial disponível por concelho. Contudo, pode-se observar que existe uma maior quantidade de potencial na região

da Guarda, onde se encontra o ponto mais elevado de Portugal Continental e na região abrangida pelos distritos de Bragança, Vila Real e Viana do Castelo.

Com o objectivo de realçar e de identificar os locais que apresentam ainda um potencial aquém do que possuem, foi efectuado um estudo por distrito da quantidade de potência instalada e da quantidade de potencial disponível, apresentando-se na Tabela 4 os resultados obtidos.

Tabela 4 - Avaliação do Potencial por Distrito para a Instalação de CMH.

<i>Distrito</i>	<i>Potência Instalada (kW)</i>	<i>Potencial Disponível (kW)</i>	<i>Potencial Explorado (%)</i>
Aveiro	15815	40326,7593	39%
Beja	12800	23393,99877	55%
Braga	52133	71588,74128	73%
Bragança	29377	118214,6596	25%
Castelo Branco	22582	71426,59424	32%
Coimbra	15703	28099,71086	56%
Evora	0	9438,053716	0%
Faro	1325	5091,130323	26%
Guarda	47445	170336,9598	28%
Leiria	50	4459,022509	1%
Lisboa	0	7582,723806	0%
Portalegre	18677	41045,21018	46%
Porto	18607	36508,04611	51%
Santarém	0	11877,84239	0%
Setubal	3720	9061,391292	41%
Viana do Castelo	16300	52970,16762	31%
Vila Real	73451	149491,8796	49%
Viseu	83380	139906,6987	60%

Realizando uma análise da tabela anterior conclui-se que ainda existe um potencial considerável que está por explorar ao longo de todo o território nacional. Contudo, é no distrito da Guarda e de Vila Real onde se encontra uma maior quantidade de potencial para a instalação de CMH. No entanto, é no distrito de Viseu onde se encontra a maior quantidade de potência instalada e no distrito da Guarda onde se encontra a maior quantidade disponível de potencial.

Com o objectivo de demonstrar a percentagem de potencial explorado por cada distrito foi elaborado o mapa que se apresenta na Figura 91.

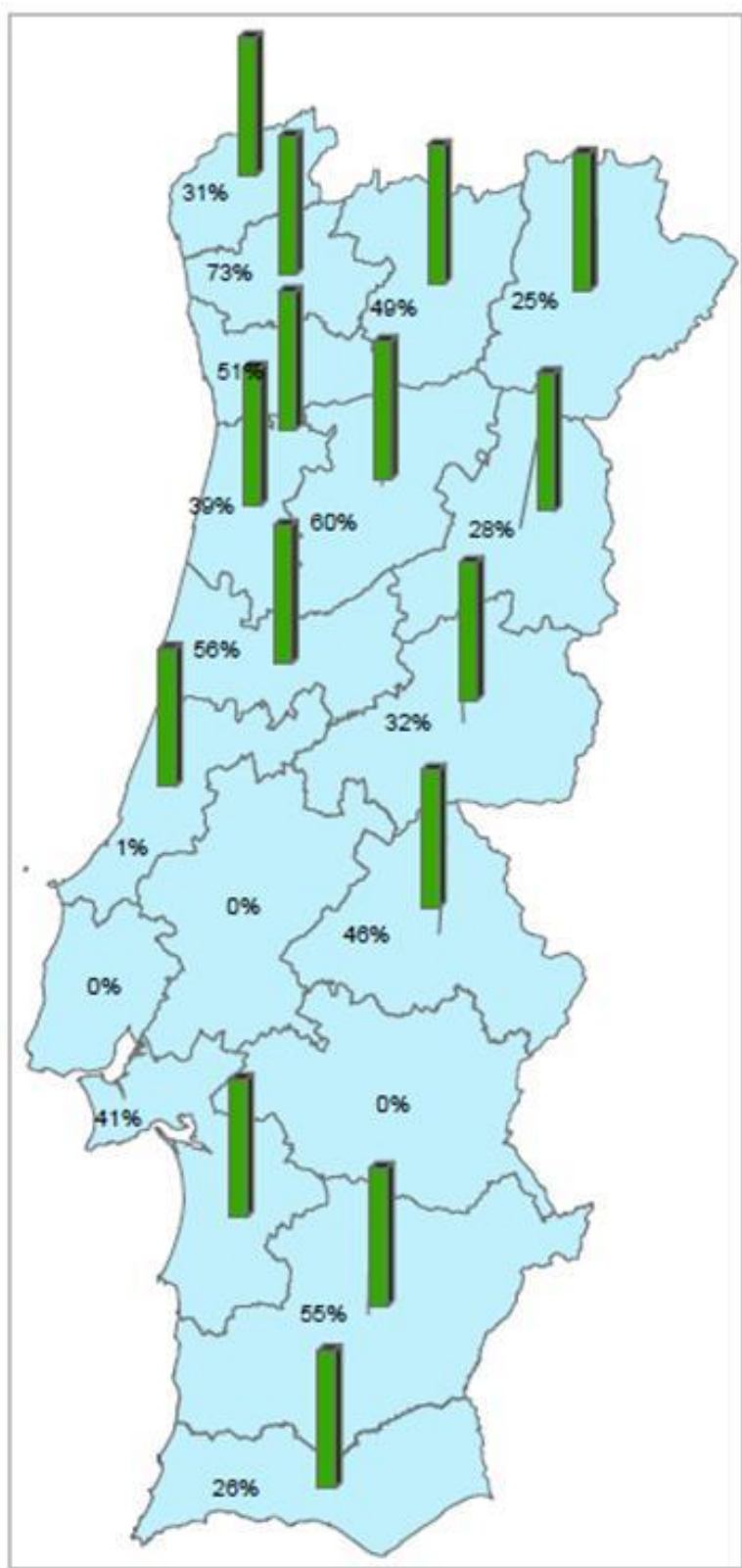


Figura 91 - Percentagem do Potencial Mini-Hídrico Explorado por Distrito.

Capítulo 6

Conclusões

6.1- Conclusões Gerais

Actualmente, a caracterização 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.

No entanto, dado que a energia hídrica é uma das prioridades contempladas pelas políticas energéticas nacionais, é de interesse proceder à caracterização deste tipo de aproveitamento relativamente ao estudo e tipificação das características técnicas, à caracterização de produção e à caracterização do recurso hidrológico.

Concretamente, após o estudo e a tipificação das características técnicas das CMH conclui-se que:

- A maior parcela de CMH encontra-se no intervalo de potência de 0 a 1MW, existindo também uma parcela significativa entre os 9 e os 10MW;
- As quedas variam desde uma dezena de metros até ao valor mais elevado de 475 m. Porém é no intervalo entre os 0 a 40m que se encontra uma maior quantidade de CMH;
- O caudal varia entre 0 e 85m³/s, merecendo especial destaque o intervalo entre 0 e 5m³/s, pois é onde se encontram mais de 55% das CMH;
- A área da bacia hidrográfica pode variar desde 1km² até alguns milhares de km². No entanto uma grande parte das CMH possui uma área entre os 0 e os 300km², com maior frequência para o intervalo de 0 a 100km²;
- A eficiência normalmente utilizada para determinar a potência a instalar numa CMH situa-se entre os 80% e os 95%, merecendo mais evidência o intervalo entre os 85 e os 90%;

- A eficiência real obtida a partir do funcionamento dos equipamentos presentes nas CMH é de 83%, o que demonstra que o valor real apresenta-se bastante perto dos valores teóricos considerados;
- As CMH são quase totalmente equipadas com uma ou duas turbinas, cerca de 50% de centrais em cada caso. Contudo provou-se que as centrais com apenas uma turbina são mais eficientes que as centrais com duas turbinas;
- O tipo de turbina mais empregue nas CMH é a turbina *Francis*, mais de 60% das CMH estão equipadas com este tipo de turbina. Porém é a turbina *Kaplan* que apresenta valores mais elevados de eficiência quando comparada com as turbinas *Francis* e *Pelton*;
- A relação queda/caudal consegue separar o tipo de turbinas aplicadas nas CMH, sendo as turbinas *Pelton* utilizadas para valores elevados de queda e valores baixos de caudal. A turbina *Kaplan* para valores elevados de caudal e valores baixos de queda. Enquanto a turbina *Francis* preenche a parte intermédia de caudais e quedas;
- A grande maioria das CMH encontra-se sobredimensionada, isto é, possuem um valor de potência instalada superior ao que realmente conseguem atingir. Contudo existem casos inversos que são centrais que apresentam condições para instalarem mais potência e não o realizam. Estes casos são maioritariamente as CMH cuja potência instalada é de 10MW que não pretendem instalar mais potência beneficiando assim da tarifa aplicada as CMH;
- Normalmente as CMH utilizam entre 15 a 25% da sua capacidade instalada, isto é, só produzem entre 15 a 25% do que realmente poderiam produzir;
- As CMH utilizam a quantidade de caudal do rio consoante o seu tipo de exploração. Contudo é o intervalo de 20 a 25% que contém uma maior quantidade de CMH. Este factor de utilização do caudal do rio pode ser determinado a partir da área da bacia hidrográfica. Áreas de pequenas dimensões possuem valores mais elevados do factor de utilização do caudal do rio, com o aumento das dimensões da área da bacia este valor vai decrescendo;
- O factor de utilização da capacidade instalada está relacionado com o factor de utilização do caudal do rio. Para valores mais elevados do factor de utilização da capacidade instalada encontram-se valores mais baixos do factor de utilização do caudal do rio e vice-versa.

No que se refere à caracterização da produção de CMH conclui-se que:

- Existem comportamentos típicos de produção, sendo muito deles originários das estratégias de operação adoptadas pelas diferentes concessionárias;
- Os comportamentos de produção possuem decaimentos que diferem com a época do ano. Contudo isso só altera o valor do factor de escala. Estes decaimentos

podem ser descritos por uma equação que se rege em função da relação queda caudal;

- Os máximos de produção atingidos em épocas diferentes não se relacionam com o factor de utilização do caudal do rio, como se esperava inicialmente;
- A pluviosidade é uma variável que influencia a produção, contudo o atraso existente entre a produção e a pluviosidade não se relaciona com nenhuma característica física da central (queda, caudal ou área da bacia);
- Existem 4 Perfis típicos de produção. Cada perfil é representado pelas suas características próprias, isto é:
 - Perfil 1 - Áreas e caudais pequenos, quedas elevadas, turbinas *Pelton*, centrais a fio-de-água, decaimentos elevados;
 - Perfis 2 e 3 - Áreas, caudais, quedas e decaimentos médios, turbinas Francis com alguma mistura das *Pelton* e *Kaplan*, centrais maioritariamente a fio-de-água;
 - Perfil 4 - Áreas e caudais elevados, baixas quedas, turbinas *Kaplan*, centrais de albufeira.

Em relação à caracterização hidrológica e à avaliação do potencial para a instalação de CMH, conclui-se que:

- A região mais a norte de Portugal é a mais castigada pela quantidade de precipitação anual, nomeadamente o distrito de Viana do Castelo, Braga e Aveiro;
- O intervalo de pluviosidade com maior frequência de ocorrência numa determinada hora é de 0 a 0,1mm, em qualquer uma das regiões (norte, centro ou sul);
- A quantidade de pluviosidade diária mais frequente situa-se no intervalo de 0 a 0,15mm para qualquer região;
- A região norte é a que apresenta um maior número de dias sucessivos com chuva, seguida das regiões centro e sul;
- A região sul é a que apresenta um maior número de dias sucessivos sem chuva, seguido pelas regiões centro e norte;
- Existe uma correlação entre séries de pluviosidade em função da distância entre elas. Esta correlação é mais forte quando se utiliza valores de pluviosidade diários;
- O modelo de previsão de precipitação *MM5* possui uma correlação semelhante à correlação existente entre a pluviosidade e a distância, quando se utilizam valores de pluviosidade diária reais;
- Ainda existe potencial para a instalação de novas CMH, uma vez que a maior parte dos concelhos apresenta uma exploração do potencial na ordem dos 50%;

Em suma, o trabalho realizado caracterizou as CMH em termos de características técnicas e envolventes, produção e avaliação do potencial para a instalação de novas CMH.

6.2- Trabalhos Futuros

Nesta dissertação realizou-se um estudo pioneiro no que se refere à caracterização das CMH, especialmente às características específicas e de produção, assim como uma avaliação do potencial ainda permissível de ser explorado por região. No entanto, existe uma quantidade de trabalhos futuros e ideias a serem exploradas, o autor desta dissertação sugere as seguintes:

- Verificar se o parâmetro decaimento é coincide com o decaimento noutra ano;
- Efectuar estudos dos atrasos da pluviosidade em relação à produção, tendo em consideração as estratégias de operação das centrais e as características dos solos que estão presentes na área da bacia hidrográfica;
- Integrar modelos hidrométricos para simular a produção das centrais através de factores de escoamento;
- Realizar a validação dos modelos de avaliação regional do potencial.

Referências

- [1] Energy Information Administration, "World Carbon Dioxide Emissions by Region, 2003-2030 (Billion Metric Tons of Carbon Dioxide)". Disponível em <http://www.eia.doe.gov>. Acesso em 22 de Maio de 2009.
- [2] Energy Information Administration, "The Role of Renewable Energy Consumption in the Nation's Energy Supply, 2007". Disponível em <http://www.eia.doe.gov>. Acesso em 22 de Maio de 2009.
- [3] United Nations, "Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change", 1998.
- [4] European Commision, "Metas de Quioto na UE (a alcançar ate 2012)". Disponível em <http://ec.europa.eu/>. Acesso em 23 de Maio de 2009.
- [5] Jornal Oficial das Comunidades Europeias, "Directiva 2001/77/CE do Parlamento Europeu e do Conselho", 27 de Setembro de 2001.
- [6] "Resolução de Conselho de Ministros n.º 1/2008 [Novas Metas 2007]": Diário da República, 1.ª série - N.º 3 - 4 de Janeiro de 2008.
- [7] REN - Rede Eléctrica Nacional, S.A., "Potencial Hidroeléctrico Nacional: Importância Sócio-Económica e Ambiental do seu Desenvolvimento", Novembro 2006.
- [8] Ministério da Economia e da Inovação, "Energia e Alterações Climáticas": Publicação do MEI, 2007.
- [9] Instituto da Água, DGEG, REN, COBA, PROCESL, "Programa Nacional de Barragens com Elevado Potencial Hidroeléctrico", Novembro de 2007.
- [10] Direcção Geral de Energia e Geologia, "Renováveis : Estatísticas Rápidas", Março de 2009.
- [11] C. Dragu, T. Sels, and R. Belmans, "Small Hydro Power State of The Art and Applications."
- [12] Agência de Energia & Instituto Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial (ADENE & INETI) "Relatório Síntese", Lisboa, Novembro de 2001.
- [13] Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação (INETI), "Potencial Eólico em Portugal Continental": Departamento de Energias Renováveis, Unidade de Energia Eólica e dos Oceanos.
- [14] Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial (INEGI), "Energia Eólica", Dezembro de 2007.
- [15] Ana Estanqueiro, Paulo Costa, Pedro Miranda, "Development and Validation of the Portuguese Wind Atlas": Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação, I.P. Portugal.
- [16] ADENE, DGEG, INETI, "Água Quente Solar para Portugal", Lisboa, Novembro de 2001.
- [17] Cristina Camus Eduardo Eusébio, "Gestão de Energia - Energia Solar ", Março 2006.
- [18] associação de energias renováveis (apren), "Publicações da apren". Disponível em <http://www.apren.pt>. Acesso em 29 de Maio de 2009.
- [19] Museu de Electricidade, "Centrais eléctricas em actividade". Disponível em <http://www.wikienergia.pt>. Acesso em 27 de Maio de 2009.
- [20] Rui M. G. Castro, "Introdução à Energia Mini-Hídrica", Março de 2008.
- [21] Ministério da Indústria e Energia, "Decreto-Lei n.º 189/88", Maio de 1988.
- [22] Direcção Geral de Energia, "O Programa VALOREN e os Recursos Energéticos Endógenos", Julho de 1988.

- [23] Portal das Energias Renováveis, "Hídrica - Estado em Portugal". Disponível em <http://www.energiasrenovaveis.com>. Acesso em 24 de Maio.
- [24] European Small Hydropower Association (ESHA), "State of the Art of Small Hydropower in UE-25", 2004.
- [25] RESCUE, "Technology Status Bulletin - Small Hydropower".
- [26] European Energy Forum, "Renewable Energy Sources, the Solution for the Future". Disponível em <http://www.europeanenergyforum.eu>. Acesso em 24 de Maio de 2009.
- [27] F. H. Schwartz and M. Shahidehpour, "Small Hydro as Green Power," in *EIC Climate Change Technology, 2006 IEEE*, 2006, pp. 1-6.
- [28] Institut National Polytechnique de Grenoble, "Objectives for small Hydro Technology".
- [29] O. Paish, "Small hydro power: technology and current status," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 6, pp. 537-556, 2002.
- [30] ESHA, "Guide on How to Develop a Small Hydropower Plant", 2004.
- [31] J. K. Kaldellis, D. S. Vlachou, and G. Korbakis, "Techno-economic evaluation of small hydro power plants in Greece: a complete sensitivity analysis," *Energy Policy*, vol. 33, pp. 1969-1985, 2005.
- [32] A. Harvey, *Micro-hydro design manual <a> guide to small-scale water power schemes*. London: Intermediate Technology Publications, 2000.
- [33] L. Monition, M. L. Nir, and J. Roux, *Micro hydroelectric power stations*. Chichester: John Wiley, 1984.
- [34] Sigma Engineering Ltd, "Inventory of Undeveloped Opportunities at Potential Micro Hydro Sites in British Columbia": BC Hydro and Power Authority, 2000.
- [35] M. Oprisan and S. Pneumáticos, "Potential for Electricity Generation from Emerging Renewable Sources in Canada," in *EIC Climate Change Technology, 2006 IEEE*, 2006, pp. 1-10.
- [36] Lorenzoni A., "Strategic Study for the Development of Small Hydro Power in the European Union": European Small Hydro Association, 2001.
- [37] D. G. Hall, "Feasibility Assessment of Water Energy Resources of the United States for New Low Power and Small Hydro Classes of Hydroelectric Plants," DOE/ID-11263; Other: DOE/ID/DOE-05-00134; TRN: US200904%237, 2006.
- [38] Penche, C., "Layman's Handbook on how to Develop a Small Hydro Site. 2 ed": European Small Hydro Association, 1998.
- [39] Timo Javanainen, "Analysis of Short-Term Hydro Power Production in the Nordic Electricity Market": Helsinki University of Technology, 2005.
- [40] European Small Hydropower Association, "Hydropower Technology".
- [41] R. Magureanu, M. Albu, V. Bostan, A. M. Dumitrescu, M. Pelizza, F. Andreea, G. Dimu, F. Popa, and M. Rotaru, "Optimal operation of Francis Small Hydro turbines with variable flow," in *Industrial Electronics, 2008. ISIE 2008. IEEE International Symposium on*, 2008, pp. 1562-1567.
- [42] Punys, P. and B. Pelikan, "Review of small hydropower in the new Member States and Candidate Countries in the context of the enlarged European Union", 2007.
- [43] Balat, H, "A renewable perspective for sustainable energy development in Turkey: The case of small hydropower plants", 2007.
- [44] International Energy Agency, "International Small Hydro Atlas". Disponível em <http://www.small-hydro.com>. Acesso em 24 de Maio de 2009.
- [45] Idaho National Laboratory, "Hydropower Evaluation Software". Disponível em <http://hydropower.inl.gov/resourceassessment/software/>. Acesso em 24 de Maio de 2009.
- [46] Sigma Engineering Ltd., "Small Hydro Power Resource in the Provincial System", 1983.
- [47] Power Supply Engineering, "Executive Report on the Green Energy Study for British Columbia. Phase 1: Vancouver Island": BC Hydro, 2001.
- [48] Wilson, E.M., "Assessment Methods for Small-Hydro Projects, in Implementing Agreement for Hydropower Technologies and Programmes": International Energy Agency, 2000.
- [49] International Energy Agency, "Assessment Tools and Methodologies". Disponível em <http://www.small-hydro.com/index.cfm?Fuseaction=planning.tools>. Acesso em 24 de Maio de 2009.

- [50] Powell Group Inc., "Manual for IMP 5.0 (Integrated Method for PowerAnalysis)", 2004.
- [51] Agência Portuguesa do Ambiente, "Atlas do Ambiente". Disponível em <http://www.apambiente.pt>. Acesso em 24 de Maio.
- [52] Instituto de Meteorologia, "O Clima de Portugal continental em 2007". Disponível em <http://www.meteo.pt>. Acesso em 2 de Junho de 2009.
- [53] V. M. G. d. Sousa, *Modelação da gestão integrada de mini-hídricas*. Porto: [s. n.], 1989.
- [54] P. J. Schreier, "A Unifying Discussion of Correlation Analysis for Complex Random Vectors," *Signal Processing, IEEE Transactions on*, vol. 56, pp. 1327-1336, 2008.
- [55] A. Lencastre and F. M. Franco, *Lições de hidrologia*. Lisboa: Universidade Nova de Lisboa. Fundação da Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2006.
- [56] "Decreto - Lei n.º 168/99 de 18 de Maio": DIÁRIO DA REPÚBLICA - I SÉRIE - A N.º 115 - 18-5-1999.