

Produção Hidroelétrica Dispersa por reequipamento de Moinhos Hidráulicos Tradicionais

Xavier Sousa Campos

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM HIDRÁULICA, RECURSOS
HÍDRICOS E AMBIENTE**

Orientador: Professor Doutor Francisco Manuel de Oliveira Piqueiro

Coorientador: Professor Doutor Joaquim Manuel Veloso Poças
Martins

JUNHO DE 2023

MESTRADO EM HIDRÁULICA, RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTE 2022/2023

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL Tel.

+351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ m.ec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400 Fax

+351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2022/2023 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2015.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

A meus Pais

“The noblest pleasure is the joy of understanding”

Leonardo da Vinci

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar quero agradecer aos meus pais, por tudo e todas as vezes que me ajudaram, apoiaram e ensinaram ao longo do meu percurso académico que chega agora ao fim. Sem vocês não seria possível terminar esta jornada.

Ao meu irmão e à minha madrinha, pelo carrinho, apoio, confiança e motivação que me deram durante todo este percurso.

Ao professor doutor Francisco Piqueiro, pela total disponibilidade demonstrada, conselhos e suporte dados ao longo da realização desta dissertação, a sua ajuda e orientação mostrou ser extremamente valiosa para a conclusão da dissertação.

Um agradecimento aos meus amigos mais próximos, em especial, aos que conheci na faculdade e me acompanharam durante os bons momentos e apoiaram nos mais difíceis, aos quais desejo sucesso. Isto é só o começo, pessoal.

A todos aqueles que fizeram parte da minha jornada ao longo destes anos e que, de alguma maneira contribuíram para o percurso que agora se aproxima do fim.

A todos, muito obrigado.

RESUMO

Este trabalho, realizado no âmbito de uma dissertação para obtenção do grau de mestre em engenharia civil na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto pretende criar abordagens que permitam pelo reequipamento de antigos moinhos tradicionais, a produção de energia elétrica por pequenas instalações dispersas e, assim, serem um importante complemento na produção elétrica nacional.

Neste trabalho é estudada a viabilidade da instalação de equipamentos de microgeração de energia elétrica encontrados na literatura aplicáveis a moinhos fluviais tradicionais contendo o procedimento necessário para ter o sistema a produzir energia de maneira a revalorizar as infraestruturas existentes.

É feita uma introdução aos diferentes órgãos que se interligarão no processo, desde a infraestrutura e como está concebida, os equipamentos eletromotores que permitem aproveitar a energia hídrica para produzir energia elétrica e, posteriormente é proposto um método que visa simplificar o processo de avaliação inicial do potencial hidroelétrico de uma dada localização estudada.

Sem descartar a necessidade de estudos mais complexos para correta análise e implementação do potencial do empreendimento, a presente dissertação permite uma janela de orientação sobre o modo de funcionamento do aproveitamento hidroelétrico baseando-se em métodos expeditos correlacionais que permitam a aproximação da disponibilidade hídrica.

Esta abordagem permite a rápida comparação entre possíveis locais de empreendimento para fins de produção de energia elétrica e visa auxiliar futuros estudos semelhantes no processo de decisão de empreendimento estabelecendo um método simplificado para determinação do potencial económico do mesmo.

O processo é exemplificado pela aplicação do método a dois casos de estudo com características diferentes, o Moinho de Rodízios localizado na freguesia de Covelas, no Rio Trofa e a Azenha de Chaves localizada em Fradelos, na margem direita do Rio Ave.

PALAVRAS-CHAVE: hidroeletricidade; revalorizar; pré-viabilidade; expedito; comparar

ABSTRACT

This dissertation was made in order to achieve a Master's degree in Civil Engineering in Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto and intends to create approaches that allow, through old traditional water mill reequipment, the production of electric energy by straggling small hydropower plants and thereby become an important complement of national electricity production.

This work studies whether the implementation of electric microgeneration equipments found in literature that are applicable to traditional water mills is viable or not containing the necessary procedure to have the system producing energy and revaluing its existent infrastructure.

An introduction is made to the different existing organs involved on the process, from the water mill's infrastructure and how's it conceived, the electromotors that allow the harvest of water's energy to produce electricity. It is posteriorly proposed a method that aims to simplify the initial evaluation process of hydroelectric potential of a given location.

Without discarding the need for more complex studies that allow the proper analysis and implementation of the enterprise potential, this dissertation can serve as guidance of comprehension of the system's future operating conditions and behavior. It is based on expeditious correlational methods that allow an approximation of water's energy availability.

This approach facilitates the swift comparison among potential project sites for the purpose of electrical energy production, aiming to assist future similar studies in the entrepreneurial decision-making process by establishing a streamlined method for determining its economic potential.

The process is exemplified through the application of the method to two distinct case studies, namely the "moinho de rodizios do Martins" situated along Trofa River in Covelas and "Azenha de Chaves" on the right bank of the Ave River located in Fradelos.

KEY WORDS: hydroelectricity; revaluing; pre-feasibility; expeditious; compare

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS.....	vii
RESUMO.....	ix
ABSTRACT	x
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 ASPETOS GERAIS.....	1
1.2 ENQUADRAMENTO.....	2
1.3 OBJETIVOS.....	3
1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	3
2. ESTADO DE ARTE	5
2.1. MOINHOS TRADICIONAIS	5
2.1.1. ASPETOS GERAIS.....	5
2.1.2. MOINHOS DE RODÍZIO (OU DE RODA HORIZONTAL)	6
2.1.3. AZENHAS (OU MOINHOS DE RODA VERTICAL).....	8
2.2. TECNOLOGIA DE PRODUÇÃO HIDROELÉTRICA DE PEQUENA ESCALA	9
2.2.1. INTRODUÇÃO.....	9
2.2.2. TURBINAS	10
2.2.2.1. TURBINAS PELTON.....	12
2.2.2.2. TURBINAS FRANCIS.....	13
2.2.2.3. TURBINAS KAPLAN OU HÉLICE.....	14
2.2.2.4. TURBINAS BANKI-MITCHELL OU OSSBERGER	15
2.2.2.5. FUNCIONAMENTO DE UMA BOMBA COMO TURBINA.....	16
2.2.2.6. RODAS “TRADICIONAIS”	17
2.2.2.7. PARAFUSO DE ARQUIMEDES	17
2.2.2.8. EXEMPLOS DE GAMAS DE APLICAÇÃO DE DIFERENTES TURBINAS	19
2.2.3. GERADOR.....	19
2.2.3.1. GERADOR ASSÍNCRONO	20
2.2.3.2. GERADOR SÍNCRONO.....	20
2.3. ENERGIA ELÉTRICA:.....	21
2.3.1. EM PORTUGAL	22

2.3.2. PRODUÇÃO DE ENERGIA EM MOINHOS HIDRÁULICOS	24
2.3.3. PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO	24
2.3.4. PROCESSO NORMATIVO E LEGISLATIVO NACIONAL EM 2023.....	25
2.3.4.1. DECRETO-LEI N.º 49/2015	25
2.4.3.2. DECRETO-LEI N.º 58/2005	26
3. METODOLOGIA	29
3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	29
3.2. PRECIPITAÇÃO	32
3.2.1. MÉTODO DAS DUPLAS ACUMULAÇÕES	34
3.2.2. MÉTODO DE THIESSEN	35
3.3 CAUDAIS.....	37
3.3.1. CURVA DOS CAUDAIS CLASSIFICADOS	38
3.4. SELEÇÃO DO GRUPO GERADOR	39
3.5. POTENCIAL ENERGÉTICO	40
3.6. ANÁLISE ECONÓMICA SIMPLIFICADA.....	41
4. MOINHO DE RODÍZIOS DO MARTINS (RIO TROFA - COVELAS)	45
4.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	46
4.2. PRECIPITAÇÃO	47
4.2.1. SELEÇÃO E RECONSTITUIÇÃO DOS POSTOS DE MONITORIZAÇÃO.....	46
4.2.2. PRECIPITAÇÃO MÉDIA.....	51
4.3. CAUDAL E ENERGIA	51
4.3.1. CAUDAL.....	51
4.3.2. SELEÇÃO DO GRUPO GERADOR	52
4.3.3. ENERGIA	53
4.4. ANÁLISE ECONÓMICA SIMPLIFICADA.....	54
5. AZENHA DE CHAVES (RIO AVE – FRADELOS)	57
5.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	58
5.2. PRECIPITAÇÃO	60
5.2.1. SELEÇÃO E RECONSTITUIÇÃO DOS POSTOS DE MONITORIZAÇÃO.....	60

5.2.2. PRECIPITAÇÃO MÉDIA.....	63
5.3. CAUDAL E ENERGIA.....	64
5.3.1. CAUDAL.....	64
5.4 SELEÇÃO DO GRUPO GERADOR.....	65
5.5 ENERGIA	66
5.6 ANÁLISE ECONÓMICA SIMPLIFICADA.....	67
6 CONCLUSÃO	68
REFERÊNCIAS	69
Anexo A	72
ANEXO B	103

INDICE DE FIGURAS

Figura 1- Moinho de rodízio do Martins e respetivo açude	6
Figura 2- Esquema representativo de um típico moinho de rodízio. [7].....	6
Figura 3- Canal (levada) e torre de pressão de um moinho de rodízio de elevada queda. [7].....	7
Figura 4- esquema representativo dos elementos construtivos de uma azenha [5]	8
Figura 5- Diferentes tipos de azenhas dependendo do seu ponto de ataque à roda que varia a posição de incidência da água.(a) - jato de água superior; (b) - tomada de água intermédia; (c) - tomada de água alta; (d)- tomada de água baixa[6].....	9
Figura 6- configuração de uma turbina pelton de eixo horizontal [9].....	12
Figura 7- turbina pelton com 2 injetores [8].....	13
Figura 8 - Turbina Francis - Distribuidor [9].....	13
Figura 9 - Turbina francis vertical e turbina francis horizontal com gerador [8].....	14
Figura 10- Esquema de uma turbina Kaplan [9]	14
Figura 11 - Turbina Banki ou Crossflow [9]	15
Figura 12 À esquerda, esquema global da turbina Banki-mitchell; à direita o seu principio de funcionamento [8]	15
Figura 13 - Demonstração da inversão do sentido de uma bomba centrífuga: à esquerda, o seu funcionamento normal e à direita, a funcionar como modo turbina	16
Figura 14 - gama de aplicabilidade das PAT - Pump as turbine (bomba a funcionar como turbina) [12]	17
Figura 15-Roda tradicional de um moinho [29].....	17
Figura 16 - Esquema da geometria de um parafuso de Arquimedes[14].....	18
Figura 17- Retirado de [16]	19
Figura 18- Retirado de [17]	19
Figura 19- Retirado de [13]	19
Figura 20- Evolução da percentagem do valor bruto da eletricidade consumida proveniente de fontes renováveis [20]	22
Figura 21 - Evolução da Produção Elétrica em Portugal Continental [22]	23
Figura 22 - Consumo de Eletricidade por setor de atividade [21].....	23
Figura 23- Visualizador do SNIAmb [27].....	31
Figura 24- Página inicial do SNIRH.....	32
Figura 25 Divisão da área da bacia hidrográfica do Rio ave através do método dos polígonos de Thiessen.....	33

Figura 26- exemplos de registos de precipitação média mensal nos postos meteorológicos de Arada, Barragem de Guilhofrei, Brancelhe, Castelões e Santo Tirso	34
Figura 27 Aplicação do método das duplas acumulações: à esquerda a série P e P' das estações modelo e a reconstituir. À direita as respetivas somas acumuladas.....	35
Figura 28 Ajuste da série de somas acumuladas obtida através do exemplificado na figura 6.	35
Figura 29 - 1º Passo do método de Thiessen, unir as estações meteorológicas em triângulos unindo postos udométricos consecutivos.....	36
Figura 30- 2º Passo do método de Thiessen, traçar as bissetrizes dos segmentos de reta e determinar as suas interseções	36
Figura 31- 3º Passo do método de Thiessen, unir os circuncentros, determinar a área de representatividade de um posto medindo a área do polígono que o rodeia. [27].....	37
Figura 32- Exemplo de uma curva de caudais classificados e da sua empregabilidade e utilidade. No presente caso de estudo t0 será considerado como t=0 e não como caudal de cheias. [30]	39
Figura 33-Gráfico com representatividade da variação da eficiência de um sistema Pump as Turbine [31]	41
Figura 34 - Tabela de custo mínimo médio e máximo (€) por kw de potência instalada [30].....	42
Figura 35- Moinho de Rodizios do Martins	45
Figura 36 Localização (vista aérea) do moinho de Rodizios do Martins.....	45
Figura 37-Bacia hidrográfica da secção em estudo no Rio Trofa	46
Figura 38- Bacia hidrográfica da secção modelo no Rio Beça	46
Figura 39- Exemplo de como a área de influência de um posto pode representar toda a bacia hidrográfica.....	48
Figura 40- Bacia hidrográfica da Azenha do Martins e respetivos postos udométricos mais próximos	50
Figura 41- Bacia hidrográfica do Rio Beça em Cunhas e respetivos postos udométricos seleccionados	50
Figura 42- Curva de Caudais classificados rio Beça.....	52
Figura 43- Curva de caudais classificados Rio Trofa.....	52
Figura 44 - Azenha de Chaves, Fradelos [35].....	57
Figura 45- Localização (vista aérea) da Azenha de Chaves	57
Figura 46- Bacia Hidrográfica do Rio Ave na secção da Azenha de Chaves.....	58
Figura 47- Acréscimo à bacia hidrográfica do Ave da figura 44, correspondente à secção do Açude de Tougues.....	59

Figura 48 - Determinação da área de influência do posto de Parada sobre a bacia do açude do Tougues.....	59
Figura 49- Bacias hidrográficas da ponte do ave (montante) e do açude de tougues (jusante).....	63
Figura 50-Divisão pelos polígonos de Thiessen da bacia hidrográfica da Azenha de Chaves.....	63
Figura 51- Vista aérea e medição do açude da Azenha de Chaves (margem superior).....	65

INDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Áreas das bacias do Rio Trofa e do Rio Beça.....	46
Tabela 2 - Postos udométricos completos e incompletos utilizados	49
Tabela 3 - Precipitação média anual das bacias em estudo e modelo	51
Tabela 4 - probabilidade de ocorrência dos caudais classificados	53
Tabela 5.....	54
Tabela 6- Valores de n, número de anos de tempo de retorno	54
Tabela 7- Áreas das bacias hidrográficas em estudo (Chaves) e modelo (Touques)	59
Tabela 8 - Postos udométricos utilizados no método de Thiessen para a bacia da Azenha de Chaves	61
Tabela 9 - Postos udométricos utilizados no método de Thiessen para a bacia do Açude de Touques	62
Tabela 10 - Precipitação média anual das bacias em estudo e modelo.....	64
Tabela 11- Largura de cada secção na azenha (medidas no local).....	64
Tabela 12- probabilidade de ocorrência dos caudais classificados	65
Tabela 13- percentagens necessárias ao calculo do rendimento	59
Tabela 14- Resultados médios de energia produzível por dia em ano médio.....	67
Tabela 15 - Valores de n, número de anos de tempo de retorno	67

Símbolos, Acrónimos e Abreviaturas

EU – União Europeia

GEE – Gases de Efeito de Estufa

COP21 – Conferência das Nações Unidas sobre mudanças Climáticas

REN – Rede Elétrica Nacional

DGEG – Direção Geral de Energia e Geologia

ENE – Estratégia Nacional para Energia

APRH – Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos

DL – Decreto-Lei

INAG- Instituto da Água

ARH – Administração das Regiões Hidrográficas

CNA – Conselho Nacional da Água

CRH – Conselho da Região Hidrográfica

CCDR – Comissões de Coordenação e Desenvolvimento Pessoal

SNIAmb – Sistema Nacional de Informação de Ambiente

SNIRH – Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos

1.

INTRODUÇÃO

1.1 ASPETOS GERAIS

A presente dissertação insere-se no projeto de fim de curso para obtenção do grau de mestre em Engenharia Civil, ramo de Recursos Hídricos e Ambiente, na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Esta dissertação pretende estudar a viabilidade económica do reequipamento de moinhos hidráulicos tradicionais para produção de energia elétrica como complemento da rede nacional de energia de maneira dispersa, isto é, satisfazendo necessidades energéticas locais aproveitando a água como fonte de energia renovável.

Para ser capaz de ter uma abordagem que refletisse um efeito de escala da aplicabilidade deste tema, desenvolvem-se procedimentos simplificados para a análise e licenciamento destes projetos. A dissertação focar-se-á na abordagem destes estudos simplificados e do modo como eles poderão ser determinantes para real concretização destes projetos e da produção descentralizada de energia, a partir desta fonte renovável.

O tema em questão apresenta uma alternativa promissora para o desenvolvimento do aproveitamento dos recursos hídricos uma vez que, ao contrário dos grandes aproveitamentos hidroelétricos (barragens, por exemplo) o impacto ambiental será reduzido devido à introdução de um grupo gerador que condicionará apenas a fração do caudal do rio correspondente ao desvio de água já existente no moinho tradicional. A sua dimensão diminuta e a evolução tecnológica moderna tornam este tipo de projetos apelativos no contexto da sustentabilidade e resiliência económica, energética e ambiental.

O grupo gerador será constituído na sua essência por uma turbina e um gerador, máquinas cujo conhecimento do desenvolvimento tecnológico é fundamental para ponderar a sua utilização face à avaliação hidráulica, ambiental e económica.

O canal de desvio tem, na maior parte dos casos, dimensões reduzidas, o que por um lado contribui para a minimização do impacto ambiental da obra, mas, por outro, limita o potencial energético da mesma. Contudo, a presente dissertação tem como princípio a inalteração da infraestrutura existente, aproveitando o desnível energético provocado pelo açude e o circuito de derivação previamente construído.

A exploração deste tipo de tecnologias contribui para a possibilidade de desenvolvimento de projetos autossustentáveis em locais isolados ou servir como auxílio à demanda energética local através da revalorização das infraestruturas existentes, que hoje, caíram em desuso.

Em zonas isoladas, onde o acesso à rede elétrica é limitado ou inexistente, a microprodução de energia tem a grande vantagem de não necessitarem de acesso à rede, podendo responder à demanda energética

local. São, portanto, uma alternativa à construção de linhas de distribuição de energia elétrica que, muitas vezes, revela ser um obstáculo devido às suas implicações ambientais e custos de implementação.

Os casos de estudo abordados neste documento, por não se situarem em zonas muito isoladas, com acesso à rede elétrica próximo, servirão como complemento desta através do fornecimento de energia à rede elétrica.

A produção de energia elétrica com consequências mínimas para o ecossistema é um tema apelativo, mas a sua exploração só se torna interessante se a implementação técnica apresentar viabilidade económica.

Advindo deste raciocínio vem a necessidade da existência de estudos de pré-viabilidade de investimento. Este tipo de estudo permite a um agente de decisão obter uma janela de orientação acerca do comportamento do projeto durante o seu período de vida útil [1].

1.2 ENQUADRAMENTO

A produção de energia elétrica é um tema de grande importância e interesse em todo o mundo devido à sua relação direta com o desenvolvimento económico e social e devido à crescente necessidade de incorporar energias renováveis para combater e aumentar a resiliência face às alterações climáticas.

Uma das principais fontes de energia limpa e renovável é a água, cujo respetivo aproveitamento hidroelétrico contribui significativamente para a matriz energética de diversos países.

No entanto, a produção hidroelétrica convencional por meio de grandes aproveitamentos hidroelétricos apresenta grandes desafios, tais como grandes investimentos e alterações ambientais em grande escala local e regional. Nesse sentido, a produção hidroelétrica dispersa por meio de reequipamento de moinhos hidráulicos tradicionais surge como uma alternativa promissora para gerar energia elétrica que, por ser em pequena escala, apresenta consequências ambientais exponencialmente reduzidas.

A utilização de tecnologias similares não é novidade no mundo, a microprodução de energia mostra ter potencial exploratório. Na Europa, Emanuele Quaranta et al. [2] subestima o potencial energético por aproveitar na reabilitação de moinhos hidráulicos em 5.2 TWh/ano. Já em países em desenvolvimento, a reabilitação de moinhos tradicionais possibilita o fornecimento de energia a muitos agricultores afastados da rede elétrica principal [3].

Em Portugal é um tema sobre o qual já existe pesquisa e mesmo investimento neste tipo de tecnologias, mas, face ao potencial total do património molinológico nacional, há ainda um elevado potencial para complementar a produção de energia elétrica através de fontes renováveis e na promoção de áreas remotas para fins diversos. Neste sentido, a produção hidroelétrica por reequipamento de moinhos hidráulicos tradicionais vem gerar a possibilidade de revalorizar estas infraestruturas.

Assim, de modo a contextualizar o leitor no tema “reabilitação de moinhos hidráulicos tradicionais para produção de energia elétrica dispersa” dar-se-á uma introdução sobre as características dos moinhos tradicionais encontrados em Portugal, realçando as principais componentes do aproveitamento. A ideia base do presente estudo assenta no princípio de que apenas se alterará, na estrutura existente do moinho, o que for essencial para o mesmo produzir energia que, como será adiantado, consiste na mera introdução do equipamento eletromecânico sem prejuízo estrutural. Será por isso também introduzida a

tecnologia utilizada para produzir energia e o procedimento legislativo sob o qual se insere o aproveitamento hidroelétrico.

1.3 OBJETIVOS

O principal objetivo da dissertação pretende abordar o procedimento necessário para implementar um sistema de produção hidroelétrica em infraestruturas molinológicas sem prejudicar a sua condição estrutural.

No contexto do tema desta dissertação pretende-se estimar a viabilidade de dois casos de estudo através de processos simplificados que permitam ao agente de decisão obter uma janela de orientação acerca do comportamento do projeto durante o seu período de vida útil.

Neste contexto, o método empregue visa estimar o tempo de retorno financeiro de uma dada localização através da simplificação do cálculo das variáveis hidráulicas que determinam a disponibilidade do recurso hídrico no local estudado.

Servindo como estudo de pré-viabilidade dos casos de estudo, o modelo desta dissertação procura facilitar a adaptação do método de cálculo da disponibilidade energética em função do mercado de equipamentos disponíveis localmente e das diferentes características hidrológicas e morfológicas de diferentes locais de interesse, ambos no concelho da Trofa.

1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Este subcapítulo apresenta a organização da dissertação, fornecendo uma visão geral dos seis capítulos que compõe este trabalho de Mestrado sobre a avaliação da pré-viabilidade da utilização de infraestruturas molinológicas com o intuito de produzir energia.

O primeiro capítulo é dedicado à introdução, onde são apresentados o contexto, o enquadramento do tema e os objetivos da pesquisa.

O segundo capítulo apresenta o estado da arte da produção hidroelétrica por reequipamento de moinhos hidráulicos, diferenciando os tipos de moinhos existentes e destacando as principais tecnologias utilizadas na sua empregabilidade, os seus impactos ambientais e sociais bem como é feita uma introdução à legislação nacional em vigor para licenciamento deste tipo de projetos.

O terceiro capítulo diz respeito à metodologia empregue na avaliação da pré-viabilidade do projeto. Descreve detalhadamente a abordagem metodológica adotada nesta dissertação. Além disso, será explicada a estrutura do modelo de avaliação de pré-viabilidade desenvolvido para este estudo, incluindo as variáveis consideradas e os critérios de avaliação adotados.

Os capítulos 4 e 5 são dedicados aos casos de estudo, do Moinho do Martins e da Azenha de Chaves respetivamente. Este capítulo apresentará a análise detalhada da aplicação da metodologia de avaliação da pré-viabilidade em dois cenários com condições de funcionamento distintas.

Por fim, o capítulo 6, Conclusão, resume as descobertas e contribuições principais deste estudo de mestrado. Serão destacadas as observações obtidas a partir da avaliação de pré-viabilidade do empreendimento assim como as limitações e sugestões para pesquisas futuras.

2.

ESTADO DE ARTE

2.1. MOINHOS TRADICIONAIS

2.1.1. ASPETOS GERAIS

Os moinhos de água foram introduzidos no atual território português pelos romanos como provam os vestígios materiais encontrados. Difundiram-se em larga escala, nos séculos seguintes, por influência dos «senhores» quer laicos quer religiosos. Este investimento senhorial em moinhos hidráulicos está associado por um lado à emancipação e êxodo dos camponeses e, por outro, ao movimento das arroteias, ou seja, à expansão das áreas agrícolas [4].

A evolução do artesanato para a industrialização levou à perda de uso e, mais tarde, ao abandono destas construções que foram construídas tendo em conta os recursos existentes na área circundante criando um sistema em equilíbrio com o ambiente mas que perde a identidade do outrora moinho. Apesar disto, estas construções não deixam de representar exemplos notáveis de como a energia hidráulica pode ser aproveitada de maneira sustentável.

Em Portugal encontram-se dois tipos de moinhos de água, os de roda horizontal ou rodízio e os de roda vertical ou azenhas. O primeiro possui uma roda horizontal e paralela à corrente de água, conhecida como rodízio e têm geralmente uma estrutura mais compacta. No segundo tipo, a roda motriz é vertical e perpendicular à corrente de água mas a sua arquitetura tende a ser mais diversificada podendo ter dimensões reduzidas ou amplas em função, geralmente, do número de rodas.

Na perspetiva do tema da dissertação, a descrição do funcionamento mecânico dos moinhos será breve e pouco aprofundado pelo que as secções 2.2.2 e 2.2.3 salientam as características do canal de desvio fluvial e o respetivo açude que são os órgãos que contribuem para o aproveitamento energético do desnível hidráulico como a seguir se explicam. Os açudes são normalmente criados em locais naturalmente acidentados e são de construção grosseira e maciça, à base de terra e pedras cuja reabilitação apresenta mais desvantagens do que vantagens por comprometer a integridade da construção antiga e causar possíveis distúrbios no ecossistema natural.

O presente estudo de pré viabilidade do aproveitamento hídrico pretende deixar inalterados o canal de desvio fluvial, o respetivo açude e a estrutura integral do moinho não obstante de que a eficiência do sistema instalado depende das características destes órgãos. A renovação e melhoria destes constituintes pode constituir benefícios não só para aspetos de preservação do património como no que toca à quantidade absoluta de energia produzida e, mediante o devido estudo de benefícios económicos, poderá trazer vantagens. Esta alteração não será estudada e o potencial energético será calculado considerando a estrutura no seu estado corrente.

2.1.2. MOINHOS DE RODÍZIO (OU DE RODA HORIZONTAL)

Os moinhos de rodízio (figura 1.) são constituídos por vários órgãos: açude, levada, cubo de pressão, roda ou rodízio e subjacente engrenagem que fazia girar a mó. O seu funcionamento será explicado acompanhando o trajeto da água.

A água é desviada no local da represa ou açude, órgão responsável pela interrupção do curso normal do rio e criação do desnível energético (figura 2.), por um canal denominado de levada (figura 3.).



Figura 1- Moinho de rodízio do Martins e respetivo açude

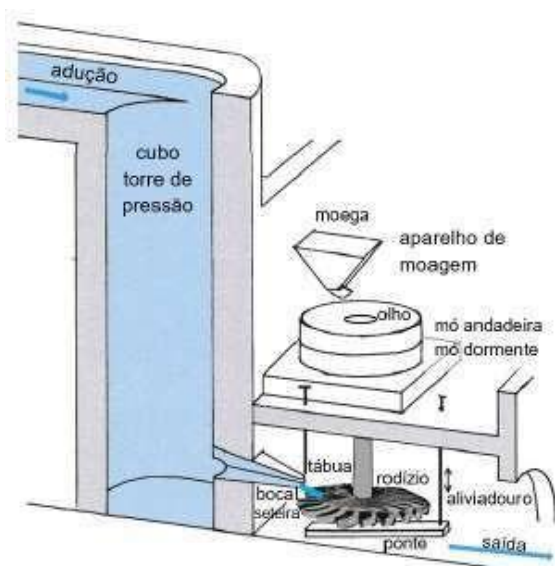


Figura 2- Esquema representativo de um típico moinho de rodízio. [5]



Figura 3- Canal (levada) e torre de pressão de um moinho de rodízio de elevada queda. [5]

O canal de derivação que redireciona a água do rio até ao cubo está teoricamente dimensionado para manter a entrada de água constante, controlável e inclinada em direção ao cubo, em função do caudal fluvial (pode conter regulação). Este órgão de transporte de caudal é o mais extenso do aproveitamento, uma vez que é responsável pelo transporte e aumento de energia da água.

Nos casos em que a levada é relativamente grande, esta dificilmente se encontra intacta devido a casos de deterioração e/ou de interrupção intencional fazendo destes moinhos o tipo menos comum encontrado em condições de reabilitação enquadradas com os objetivos da dissertação. Isto é, a estrutura principal continua existente, mas sob o ponto de vista da inalteração das condições do ecossistema existente, os casos que necessitem de renovação/ reconstrução do canal, serão desprezados. A água é conduzida através do canal de derivação até chegar ao cubo de pressão.

“O cubo é a torre de pressão cilíndrica maioritariamente vertical, feita de alvenaria de pedra grossa, posteriormente feita de betão” [5]. A sua dimensão vertical representa grande parte do potencial do moinho pois quanto maior for a queda, maior será a velocidade da água na secção inferior do cubo que é por onde a água sai em forma de jato para movimentar a antiga roda sendo este o ponto de partida da localização da turbina. A velocidade da água no final pode ser calculada para dois cenários, em superfície livre e sob pressão, caso a afluência da água seja superior à efluência, a água será armazenada em movimento dentro do cubo e a velocidade de saída do jato passa a ser função da pressão. O fator chave do seu dimensionamento é a relação do caudal afluente e o seu diâmetro que devem assegurar a tomada de água na turbina constante.

Chegando por fim à roda ou rodízio, a água fazia movimentar todo o mecanismo do moinho que se encontra em desuso ou mesmo em estado de ruína.

2.1.3. AZENHAS (OU MOINHOS DE RODA VERTICAL)

São moinhos caracterizados por uma roda vertical guarnecida de "penas" é movida por uma forte corrente de água. A água é, similarmente aos moinhos de rodízio, desviada do açude através da levada, que, geralmente nestes casos, está sobreposta ao açude (figura 4.) Esta terá o mínimo declive possível de maneira a criar uma queda abrupta de água sob a roda motriz. O movimento da roda é transmitido à mó por meio duma roda dentada e dum carreto que estão conectados atravessando a parede do moinho pelo eixo da roda principal. Os moinhos com roda vertical dividem-se em diversos tipos, dependendo do ponto de entrada da água (figura 5).

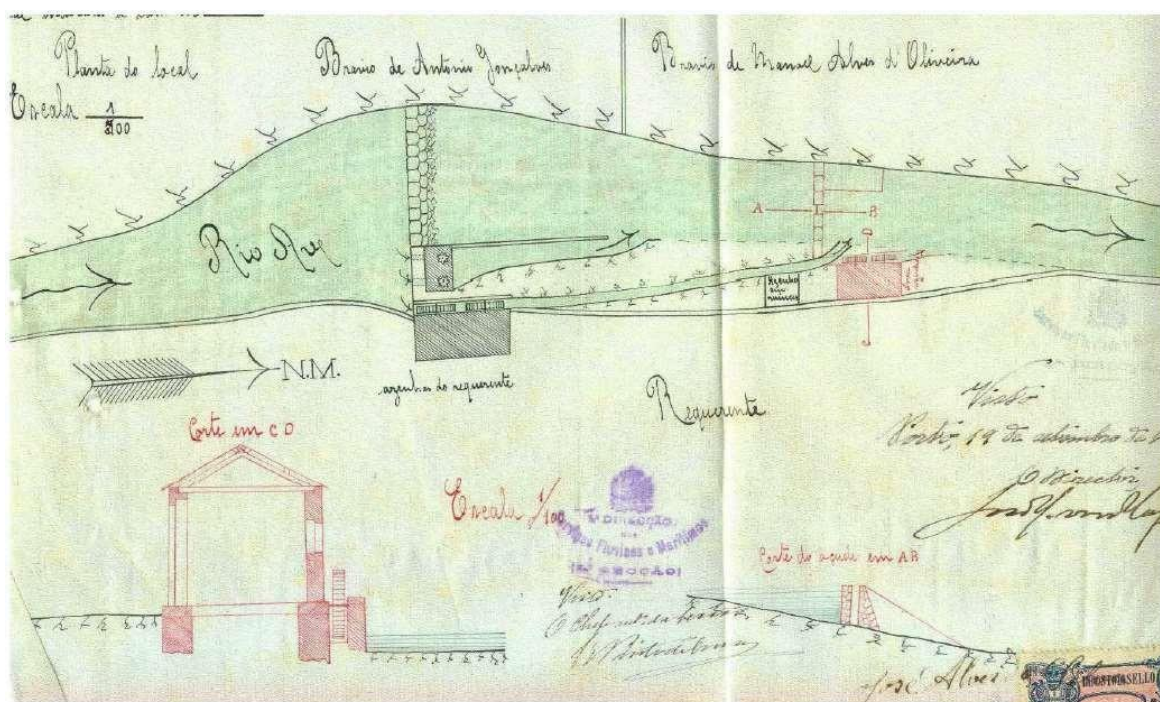


Figura 4— esquema representativo dos elementos construtivos de uma azenha [6]

Os moinhos com roda vertical são menos numerosos mas encontram-se mais facilmente preservados e apresentam geralmente um menor desnível energético mas com uma maior secção do canal de desvio. São geralmente contruídos para regimes de água mais regulares e menos sujeitos a cheias, por isso têm tendência a aparecer mais à medida que o curso do rio é percorrido para jusante. Não costumam apresentar regulação, pois na maior parte dos casos são implementados em sistemas a fio-de-água, cuja execução padece da necessidade de desviar o caudal do rio. É adequado a baixas quedas e caudais elevados tal como na Azenha no caso de estudo [6].

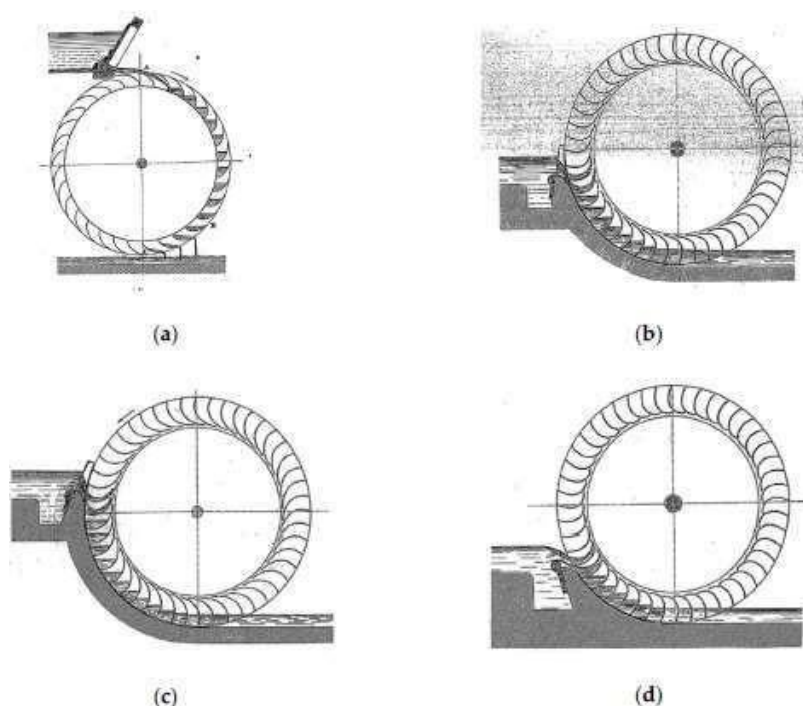


Figura 5- Diferentes tipos de azenhas dependendo do seu ponto de ataque à roda que varia a posição de incidência da água. (a) – jato de água superior; (b) – tomada de água intermédia; (c) – tomada de água alta; (d)- tomada de água baixa[7]

2.2. TECNOLOGIA DE PRODUÇÃO HIDROELÉTRICA DE PEQUENA ESCALA

2.2.1. INTRODUÇÃO

Como foi referido anteriormente, o objetivo de um aproveitamento hidroelétrico será produzir energia elétrica a partir da energia de um fluido, neste caso, o de um curso de água.

Numa central com um micro potencial define-se um potencial instalado inferior a 0.5MW [1], valor que não é consensual em diferentes países. É caracterizada pela simplicidade da construção, pela automatização total da central e pelo seu funcionamento a fio de água, isto é, limitando o armazenamento e não permitindo a sua regularização. Acrescidamente, a sua rentabilidade económica é favorecida por permitirem a implementação de novas tecnologias que visem diminuir os custos e por utilizarem turbinas normalizadas com maiores rendimentos para regimes variáveis [5].

No contexto da reabilitação de antigos moinhos hidráulicos tradicionais, o potencial energético da central hidroelétrica é limitado pela rudimentaridade da queda bruta instalada no passado, cujo valor é baixo, entre 1 e 3 metros, e cuja estrutura terá sofrido um certo grau de degradação pelo que, para as baixas gamas de potências que se obterão, a instalação será doravante designada por central micro ou pico-hidroelétrica,

A central pico-hidroelétrica difere da anterior no sentido de simplificar a instalação o máximo possível de maneira a reduzir os custos de instalação e, consequentemente, no que se refere ao grupo gerador, a seleção tecnológica deixa de ser tão abrangente existindo uma extensa literatura sobre vários tipos de turbina com elevadas eficiências para tão baixa gama de aproveitamento, mas com reduzido número de

manufaturadores. A estes dispositivos tecnológicos, capazes de transformar energia do líquido em energia elétrica dá-se, frequentemente, o nome de grupo gerador. Também é de fazer notar que o impacto ambiental é ainda mais reduzido, e a baixa gama de caudais em que se insere este tipo de aproveitamentos permite muitas vezes negligenciar a consideração de manter o caudal ecológico nos casos em que o tal fica certamente assegurado.

O custo do grupo gerador é a principal parcela dos custos imediatos do empreendimento, por isso, a seleção mais económica do equipamento trará vantagens do ponto de vista da rentabilidade económica do projeto. Para diminuir este custo, os equipamentos selecionados obedecem a normas internacionais. Esta normalização afeta a gama de custos finais dos produtos selecionáveis para execução do projeto na medida em que a sua disponibilidade no mercado se torna mais facilmente explorável pelos fabricantes que, em função destas normas, têm a possibilidade de limitar o número de modelos facilitando a sua produção em série. Este ponto de vista é especialmente favorável no caso de se utilizar uma bomba a funcionar como turbina (secção 2.3.2.5) uma vez que, o mercado dos grupos motores para “pico-desníveis” está mais desenvolvido e é mais abrangente assegurando uma melhor correlação custo/benefício na maior parte dos casos.

Na essência do grupo gerador estão os seus principais constituintes, uma turbomáquina hidráulica (que será designada de turbina, mas pode ser uma bomba a funcionar como turbina) e um gerador. A função da turbina é converter a energia hídrica em energia mecânica que se traduz no movimento rotativo do veio ou eixo acionado pelo impulso do fluido nas pás da turbina. Por sua vez, o gerador, conectado ao veio da turbina, transforma esta energia mecânica em elétrica recorrendo a fenómenos de indução eletromagnética. A energia elétrica produzida é então transportada por linhas de transmissão até ao local onde é consumida. A sua escolha depende das especificações impostas à turbina, no que diz respeito a rendimento, velocidade nominal e de embalamento, constante de inércia, tipo de regulação, etc. [8][9].

Outro órgão de extrema importância é a conduta forçada, responsável pela condução da água à entrada da turbina. Este elemento, apesar de apresentar um custo de manufatura reduzido, deve ser dimensionado com vista a reduzir o melhor possível as perdas de carga que ocorrem na introdução da água no sistema, caso contrário poderá ser responsável pela perda de rendimento do mesmo, o que implica uma diminuição da energia produzível para um mesmo grupo gerador.

2.2.2. TURBINAS

A turbina hidráulica corresponde a uma parcela muito significativa de uma central hidroelétrica, podendo chegar a 50% do custo total de empreendimento, pelo que a sua seleção criteriosa se reveste de particular interesse.

As turbinas podem ser divididas em turbinas de impulso (também chamadas de ação) ou de reação, mediante o seu princípio de operação. Turbinas de ação funcionam sob o mesmo princípio de um moinho. A água, com elevada energia cinética ou proveniente de uma queda brusca que lhe confere energia cinética, é disparada sobre as pás da turbina que fazem girar o seu eixo. Turbinas de reação assemelham-se mais a azenhas pois são projetadas para quedas menos abruptas. A principal diferença entre estes dois tipos de turbinas é que as primeiras, de ação, recebem água a alta pressão e velocidade enquanto as segundas recebem água com pressão mais próxima da atmosférica, mas vazão mais constante. Há ainda a possibilidade de, em aproveitamentos hídricos de pequena dimensão, se justificar a empregabilidade de bombas hidráulicas no seu funcionamento inverso, isto é, bombas a funcionar como

turbinas cujo princípio da bomba de fornecer energia ao líquido é revertido passando esta a funcionar como uma turbina de ação.

O critério para a sua seleção é a rentabilidade económica do projeto no respetivo período de retorno financeiro considerado. Este critério tem em consideração vários aspetos como o rendimento da turbina, a segurança operacional, a resistência à fadiga e a facilidade de manutenção. Estas características variam entre tipos de turbina e tipos de aproveitamento e, regra geral, para cada caso, a turbina empregue é tanto mais cara quanto menor for a sua velocidade nominal [9]. Isto deve-se ao facto de uma menor velocidade nominal da turbina implica a utilização de aceleradores de velocidade de maneira a esta ser compatível com a do gerador.

O processo de seleção exige, além das condições técnicas multicriteriosas, conhecimento das soluções presentes no mercado uma vez que existem diversos tipos de turbinas com características próprias do fabricante.

Quanto à trajetória do fluido relativamente ao eixo da máquina, as turbinas podem ainda ser divididas em:

- Radiais, se as linhas de corrente estão contidas em planos perpendiculares ao eixo, exceto eventualmente na imediata vizinhança deste;
- Axiais, se as linhas de corrente apresentam uma evolução no sentido paralelo ao do eixo;
- Mistas, se a velocidade das linhas de corrente apresenta componentes axiais e radiais em cada ponto;
- Tangenciais, em que um ou vários jatos incidem tangencialmente sobre a periferia da roda.

No entanto, as turbinas são comumente classificadas com base na sua semelhança com um determinado tipo de construção e forma de um tipo de turbina base (normalização). Embora haja uma grande variedade de produtores de turbinas, a demanda por uma máquina que ofereça um bom rendimento, segurança operacional, resistência à fadiga e facilidade de manutenção a um preço razoável, levou à produção de um número limitado de turbinas. Consequentemente, a maioria das turbinas existentes são baseadas em modelos de sucesso previamente desenvolvidos:

- Turbinas Pelton
- Turbinas Francis
- Turbinas Kaplan
- Turbinas Banki-Mitchell ou Ossberger
- Bombas a funcionar como turbinas

O tipo de turbinas a utilizar não depende apenas da queda e do caudal. Estes dois fatores caracterizam as condições de instalação e funcionamento da turbina, mas, a variabilidade dos caudais pode gerar problemas de funcionamento sendo necessária a adaptação a esta variabilidade. Aliado a estes fatores, está o vortex formado pela captação de água pelo aproveitamento que depende intrinsecamente do grau de submersão da turbina [10]. O insuficiente grau de submersão pode induzir a captação de ar ou mesmo de material sólido reduzindo a eficiência e comprometendo a integridade da turbina.

Nos moinhos selecionados para este caso de estudo temos duas situações diferentes. A azenhacujo canal construído para a roda principal aproveita a energia hidráulica a fio de água. Um moinho de rodízio, cujo interior não foi possível observar, mas cuja entrada de água se situa, à semelhança do anterior, na margem do canal, e presume-se a existência de um bocal de disparo, que constituirá o canal de desvio típico dos moinhos de rodízio, no seu interior que conduzirá água à roda horizontal (que seria substituída por uma turbina).

As diferentes tipologias dos moinhos implicam uma adaptação do tipo de turbina a utilizar, seleção essa que fica ao encargo do agente de decisão encontrar no mercado a turbina que melhor se adapte às condições do projeto. No presente capítulo serão apresentadas as características principais de cada tipo de turbinas tendo em conta a sua elevada importância para o projeto de hidro aproveitamento.

- Turbinas Pelton

As turbinas Pelton são turbinas de ação, porque utilizam a energia cinética da água que incide à pressão atmosférica sobre a roda para a acionar. A turbina é acompanhada por um órgão capaz de controlar o jato – oinjetor, de maneira a tornar o aproveitamento da energia cinética mais eficiente e, dependendo do projeto, pode existir mais do que um. É constituída por um disco circular, a roda, que é composta, na sua periferia, por copos ou conchas sobre as quais incide, tangencialmente, o jato. Esta turbina pode apresentar um eixo horizontal (figuras 6 e 7) ou vertical e é correntemente utilizada para aproveitamentos com caudais pequenos e altura de queda útil elevada.

Nos pequenos aproveitamentos hidroelétricos costumam-se utilizar turbinas de eixo horizontal, porque permite a utilização de um gerador também de eixo horizontal (os mais comuns) que têm menor custo [8][9].

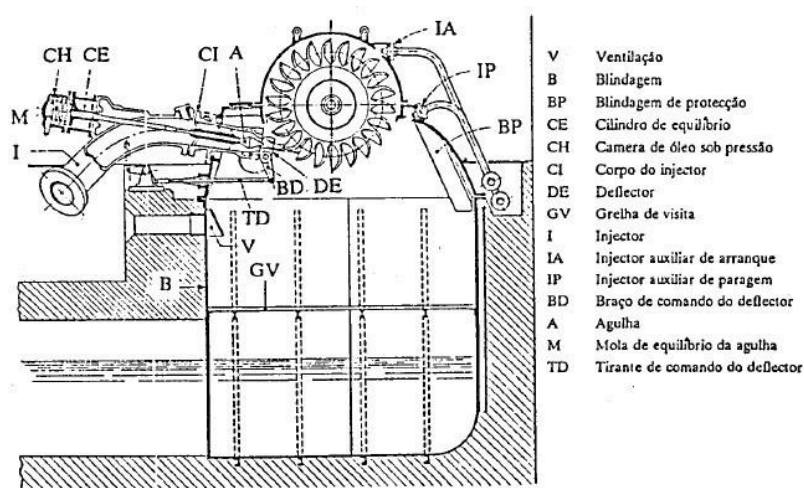


Figura 6- configuração de uma turbina Pelton de eixo horizontal [9]

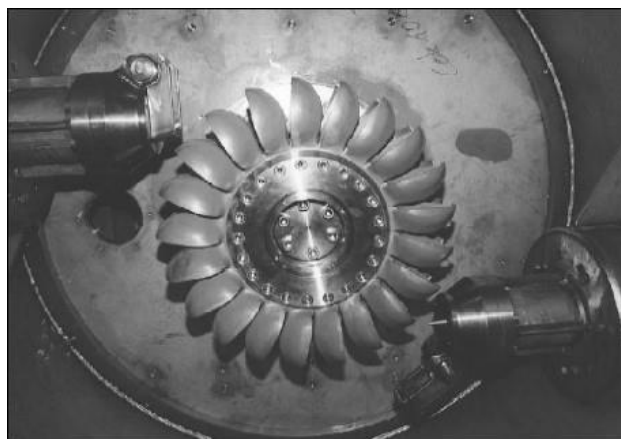


Figura 7- turbina pelton com 2 injetores [8]

A ligação das turbinas Pelton a um gerador e a necessidade de manter constante a frequência da corrente elétrica gerada, obriga a que a roda apresente uma velocidade angular constante. A velocidade da turbina deve, portanto, apresentar uma velocidade de rotação tanto quanto possível invariável, independentemente das condições de funcionamento do gerador e das características da energia hidráulica fornecida à bomba [9]. Esta turbina necessita, portanto, de regulação para controlar a quantidade de energia que entra na roda.

- Turbinas Francis

As turbinas Francis são turbinas de reação devido à pressão sob a qual o escoamento é processado na roda ser inferior à pressão atmosférica. O elemento que caracteriza estas turbinas é a roda, formada por uma coroa de aletas fixas que constituem uma série de canais hidráulicos que recebem água radialmente e a orientam para a saída do rotor numa direção axial (figura 8).

A turbina Francis pode ser empregue a uma vasta gama de quedas e caudais acima dos dez metros de queda. Para valores inferiores utilizam-se turbinas de caixa aberta.

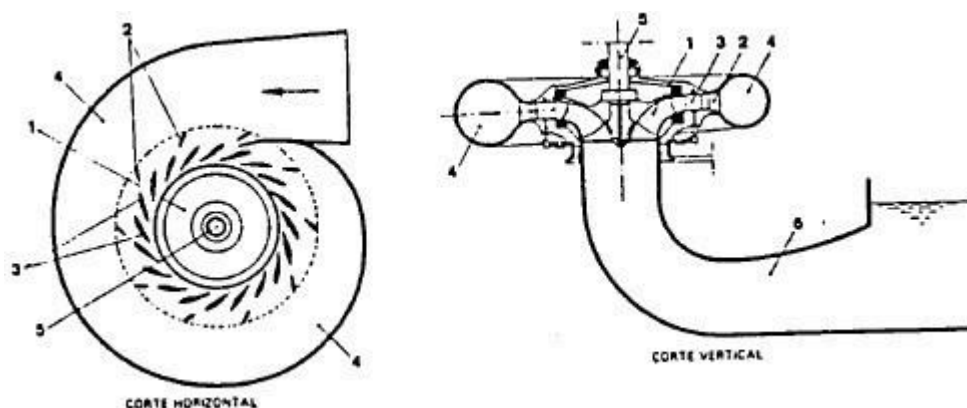


Figura 8 – Turbina Francis – Distribuidor [9]

A sua configuração é tipicamente de eixo vertical, mas existem também variedades construtivas com eixo horizontal, com escoamento axial, como as turbinas do tipo Bolbo.

- Turbinas Banki- Mitchell ou Ossberger

As turbinas Banki-Mitchell ou Ossberger (figura 11.) são turbinas de ação também conhecidas por serem do tipo fluxo cruzado ou “cross-flow” e é um tipo de turbina usado em baixas gamas de potência. Apesar do seu inferior rendimento comparativamente às turbinas tradicionais, a sua configuração permite a utilização total ou parcial da turbina permitindo uma vantajosa adaptabilidade face a caudais variáveis.

São robustas e simples de instalar, apresentam uma forma cilíndrica, sendo a zona periférica de secção simétrica duplamente atravessada pelo escoamento (figura 12.). São também geralmente acompanhadas de multiplicadores de velocidade devido às suas velocidades diminutas.

Para um mesmo caudal é possível aumentar o rendimento da turbina, que cria uma diferença de pressão (vácuo parcial), entre o canal de admissão e o canal de restituição protegendo os rolamentos de alguma água residual.

A gama de caudais para a qual esta turbina é aconselhada pela literatura pode variar entre caudais pequenos não menores que 0.02 m³/s se forem para os designados micro-aproveitamentos, e caudais de valores mais elevados até 10 m³/s [11].

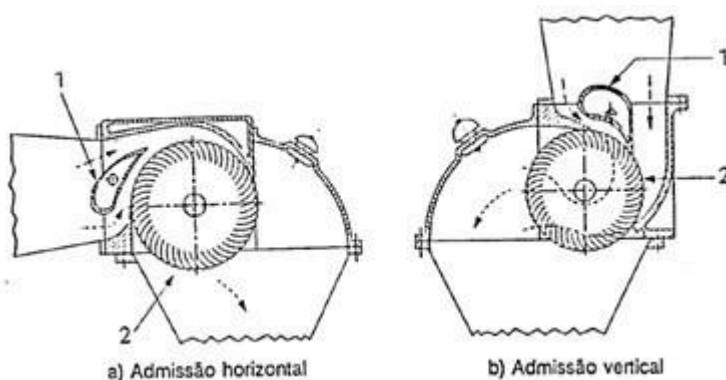


Figura 11 – Turbina Banki ou Crossflow [9]

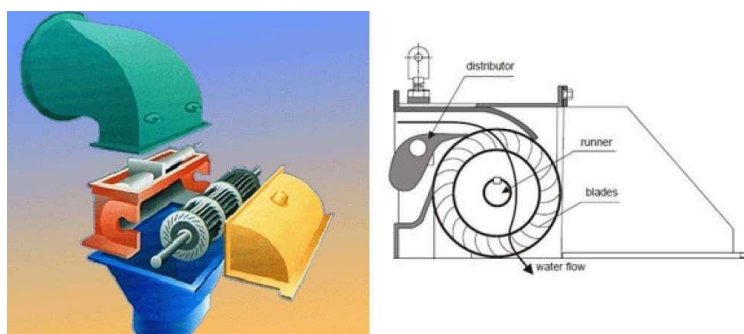


Figura 12 - À esquerda, esquema global da turbina Banki-mitchell; à direita o seu princípio de funcionamento [8]

Apresentam velocidades de rotação diminutas, pelo que é frequente a necessidade de utilização de multiplicadores de velocidade entre os geradores.

- Funcionamento de uma bomba como turbina

Esta opção surge como uma alternativa viável às turbinas convencionais pois contorna o problema da gama de disponibilidade oferecida pelos fabricantes de turbinas uma vez que o mercado da produção de bombas hidráulicas está já bem mais desenvolvido e disponível no mercado. Isto significa que, apesar de não serem construídas com este propósito e da sua adaptação ao modo deturbinamento reduzir a sua eficiência, o seu custo de produção (e consequente preço de comercialização) pode apresentar-se vantajoso face à produção das típicas turbinas. Este comportamento da componente económica acentua-se para projetos na gama dos micro e pico aproveitamentos hidroelétricos devido ao facto de a parcela de investimento para centrais de dimensões reduzidas correspondente ao grupo eletromotor ser mais significativa. Assim, o funcionamento de uma bomba como turbina, apesar de apresentar piores rendimentos, pode ser uma solução mais rentável economicamente (figura 13).

As características de funcionamento da unidade como turbina dependerão das características da bomba em causa. É possível encontrar estudos que apontam para a aplicabilidade destas turbinas em baixas quedas e pequenos caudais (figura 14). Mas o seu principal inconveniente reside na incapacidade, na maior parte dos casos, de regular o caudal turbinado sendo necessário recorrer a uma regulação eletrónica com dissipação de energia [2].

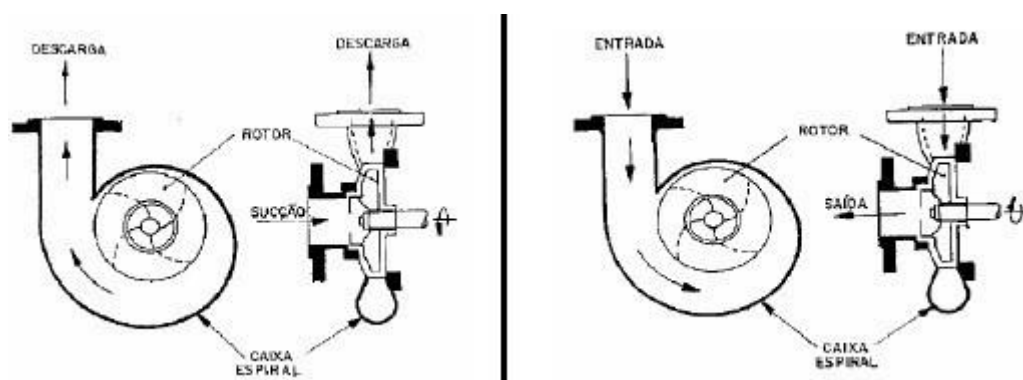


Figura 13 – Demonstração da inversão do sentido de uma bomba centrífuga: à esquerda, o seu funcionamento normal e à direita, a funcionar como modo turbina [8].

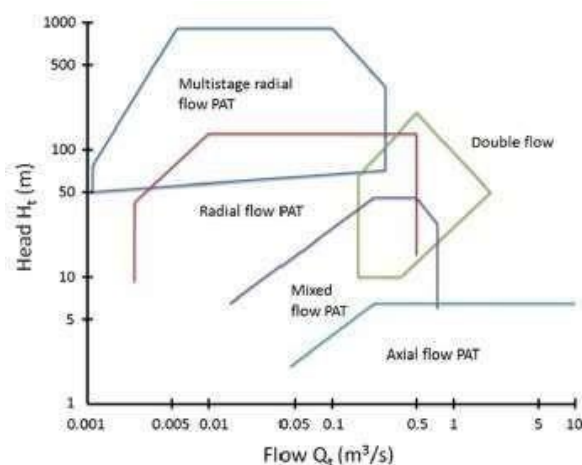


Figura 14 – gama de aplicabilidade das PAT – Pump as turbine (bomba a funcionar como turbina) [12]

- Rodas “tradicionais”

As rodas de água tradicionais foram das primeiras máquinas hidráulicas usadas na antiguidade e atualmente, voltaram a ganhar relevância internacional devido à simplicidade da sua instalação, baixo custo de manutenção, facilidade de produção e da sua boa sinergia ambiental.

Existem vários tipos de rodas de água classificadas conforme a posição da incidência do jato de água como apresentado em (2.2.2) e, mediante a qualidade do processo de fabrico, estas podem atingir rendimentos máximos na ordem dos 75-85%, utilizando mecanismos que permitam a adaptação da inclinação das pás, de maneira a proporcionar uma melhor adaptabilidade à versatilidade dos caudais. A potência gerada pode chegar aos 20 kW/m (kW por metro de largura) [13]. São indicadas para baixas ou mesmo quase inexistentes quedas e caudais até aos 50 m³/s.

Apresentam o inconveniente de necessitarem de mecanismos que permitam excitar a velocidade nominal transmitida ao gerador devido às baixas velocidades de rotação alcançadas pela roda. Mas apesar de tudo, os avanços no estudo da melhoria de performance deste tipo de sistemas mostram ser uma opção economicamente competitiva.



Figura 15-Roda tradicional de um moinho [29]

- Parafuso de Arquimedes

O parafuso de Arquimedes (figura 16) é considerado uma turbina de ação por processar o escoamento à pressão atmosférica e apresenta uma variedade de modos operacionais, podendo ser instalado inclinadamente, horizontalmente (para locais de queda nula) ou submerso (que pode funcionar a velocidades de água afluentes tão baixas como 1m/s) [13-15].

As suas vantagens de aplicação são inúmeras, contam com a sua robustez (associada à longevidade da máquina), simplicidade e prevenção de impactos negativos na fauna aquática o que pode tornar consideráveis locais ambientalmente sensíveis previamente descartados por ser das turbinas mais amigas do ambiente conhecidas [14,16].

A aplicação do parafuso de Arquimedes para o seu uso em aproveitamentos hidroelétricos aparece no fim do século XX tendo o primeiro dispositivo sido introduzido na Europa durante 1994. Desde então verificam-se na literatura significativos estudos do seu potencial e demais características (figura 17). [16] apresenta um modelo analítico que permite ao projetista da instalação hidroelétrica adaptar o seu dimensionamento aos parâmetros do projeto. É uma tecnologia recente, estando apenas desenvolvido em escala completa apenas a versão inclinada do parafuso de Arquimedes [14].

A sua configuração é análoga à de um parafuso de Arquimedes que funcione como bomba (modelo tradicional) invertendo o sentido do transporte de água e a correspondente adaptação às condições de alimentação e saída do fluido. Apresentam potencial para manter elevadas eficiências mesmo para quedas muito baixas.

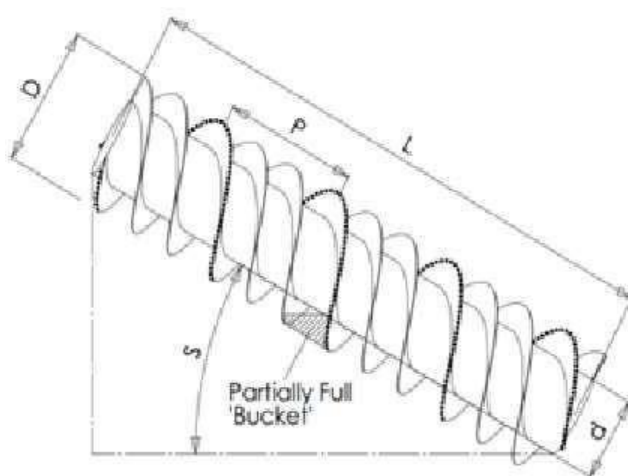


Figura 16 – Esquema da geometria de um parafuso de Arquimedes[15]

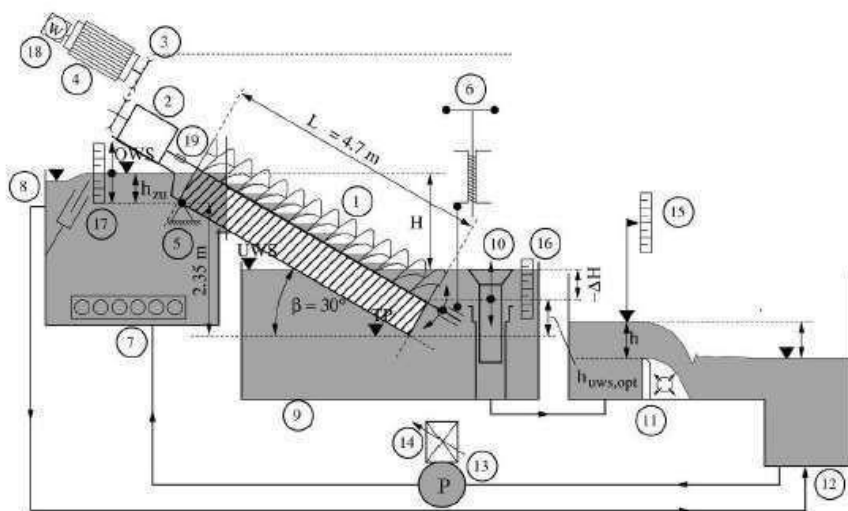


Fig. 8. Experimental setup used by Brada (1996a) to measure the first water power screw: 1, screw; 2, gear box; 3, belt drive; 4, generator; 5, pin joint; 6, crank lever; 7, outlet of the pump to the basin; 8, head water level adjustment; 9, tail water basin; 10, drop inlet spillway; 11, measurement channel with measurement weir; 12, return; 13, pump; 14, rpm control for the pump; 15, water level gauge spillway; 16, water level gauge tail water; 17, water level gauge head water; 18, rpm meter; watt meter; power meter; 19, dynamometer

Figura 17- Retirado de [16]

- Exemplos de gamas de aplicação de diferentes turbinas

Alguns exemplos foram encontrados na literatura, esta secção pretende apenas expor os diagramas de aplicabilidade dos diferentes tipos de turbina em função da faixa de caudal e queda que cada tipo possui. Podem, naturalmente haver ligeiras diferenças uma vez que as características das bombas são definidas no processo individual de fabrico.

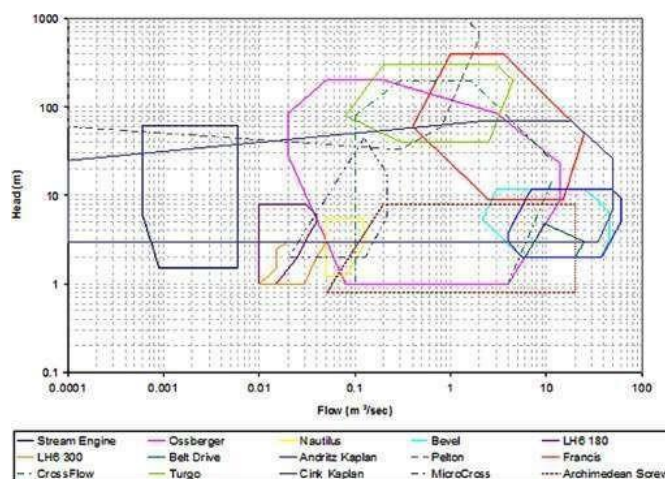


Figura 18- Retirado de [17]

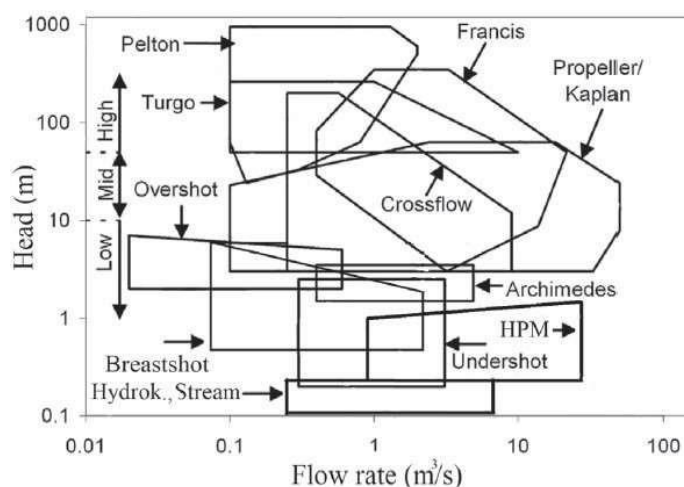


Figura 19- Retirado de [13]

2.2.3. GERADOR

Os Geradores transformam energia mecânica, resultante do movimento rotativo da turbina conectada ao rotor do gerador, em energia elétrica através de fenómenos de indução eletromagnética e podem ser instalados com eixo horizontal ou vertical, não ficando condicionados pela forma de instalação da turbina mas sim pelas condições que lhe são impostas pelo seu modo de funcionamento.

Os geradores podem ser divididos em síncronos e assíncronos que devem ser selecionados tendo em conta o seu modo de operação (de forma isolada ou em paralelo com a rede) e as especificações impostas pela turbina. O primeiro é geralmente utilizado em projetos cujas condições de exploração obriguem à versatilidade, autonomia e maior capacidade de produção energética do gerador. O segundo, gerador assíncrono, que é o tipo de gerador eleito para os presentes casos de estudo, revela ser a solução mais

económica para aproveitamentos hidroelétricos de pequena escala devido às suas conhecidas características de robustez, fiabilidade e economia [8,7].

Na determinação das características deste órgão, procura-se sempre que a sua velocidade seja a mais alta possível, existindo muitas vezes a necessidade de multiplicadores de velocidade entre a turbina e o gerador, cuja presença implica reduções de rendimento e aumento do custo de instalação pelo que é necessário ter isto em consideração na análise económica.

- **Gerador Assíncrono**

O gerador assíncrono é uma máquina elétrica de indução que necessita, para o seu funcionamento, de uma fonte exterior de poder reativa. Isto, aliado às suas vantagens económicas, explica a sua empregabilidade nos presentes casos de estudo cujas localizações são em zonas eletrificadas e com acesso à rede nacional de energia.

Para descrever o funcionamento de um gerador assíncrono é preciso entender-se o funcionamento de um motor assíncrono. Neste, o fluxo magnético, ao atravessar os condutores do enrolamento

rotórico, gera forças eletromotrizes. Esses condutores estão curto-circuitados e, por isso, vão ser percorridos por correntes elétricas. A presença destas correntes elétricas no seio do campo magnético provoca o aparecimento de forças mecânicas que, combinadas, produzem o binário eletromotor da máquina, que tende a deslocar o rotor com a velocidade do campo magnético. Devido aos atritos existentes, a velocidade do rotor, n_i , é inferior à velocidade de sincronismo, n_s . Esta diferença de velocidade é caracterizada por deslizamento S [8].

$$S = \frac{n_i - n_s}{n_s} \quad (1)$$

Quando a velocidade é superior à velocidade de sincronismo a máquina funciona como gerador elétrico. A potência mecânica fornecida pela turbina através do veio da máquina é convertida numa potência elétrica alternada cuja frequência é imposta pela frequência de rede que é quem fornece a energia reativa necessária à manutenção do campo magnético do gerador de indução.

Estes geradores em aproveitamentos de potência superior a 20KVA necessitam, para o seu arranque, de um motor primário, só devendo ser feito o paralelo com a rede quando o gerador tiver atingido uma velocidade não inferior a 90% ou 95% para potências não superiores e superiores a 500KVA respetivamente. No entanto, para aproveitamentos mais pequenos, de baixa tensão e potência não superior a 20KVA, admite-se que estes geradores possam arrancar como motores [8].

- **Gerador Síncrono**

Os geradores síncronos apresentam uma frequência rigidamente definida pela velocidade de rotação e pelo número de pares de polos que necessitam de uma fonte de corrente contínua para alimentação das bobinas de excitação dos polos indutores normalmente situados no rotor.

O gerador síncrono pode alimentar uma carga isolada ou, mais usualmente, estar integrado numa rede à qual estão ligados outros geradores, rodando em sincronismo.

Na primeira situação, o gerador tem, por si só, de manter constante a frequência e a tensão aos terminais por meio da ação de reguladores de velocidade e de tensão. Em termos energéticos, a potência ativa fornecida pelo gerador (igual à energia mecânica deduzida das respectivas perdas) tem de ser igual à potência ativa requerida pela carga, este efeito é assegurado pelo regulador de tensão.

Na segunda, a máquina, antes de ser ligada pelo respetivo disjuntor, tem de ser sincronizada através de um dispositivo designado de sincronizador que assegura, entre outras coisas, a igualdade entre a frequência do alternador e da rede.

Este tipo de geradores podem fornecer ou consumir potência reativa.

2.3. ENERGIA ELÉTRICA

A energia elétrica é um recurso fundamental para a sociedade moderna pois permite o funcionamento de diversas atividades, sejam de carácter industrial, comercial, residencial ou de entretenimento. Desde que foi descoberta, no século XIX, a energia elétrica tem sido alvo de constante evolução acompanhando o desenvolvimento tecnológico e a crescente procura enecessidade energética da humanidade.

A ligação entre combustíveis fósseis e as alterações climáticas está bem estipulada. Estes são responsáveis por 79% das emissões da UE de gases com efeito de estufa (GEE). Para combater este efeito, a sociedade prioriza cada vez mais a necessidade de depender menos destas fontes não renováveis de energia. Com efeito, a tendência global a depender e investir cada vez mais em fontes de energias renováveis solidifica, uma vez que tudo aponta para a crescente demanda energética global.

Em 2016, durante a Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (COP21) realizada em Paris, foi implementado o Acordo de Paris após ter sido ratificado por pelo menos 55 países responsáveis por pelo menos 55% das emissões globais de gases de efeito de estufa.

Este acordo tem como objetivo de manter o aumento da temperatura mundial em relação à era pré-industrial abaixo de 2°C de maneira a mitigar o impacto que as alterações climáticas têm sobre o ambiente. Para isto foi definido o objetivo de alcançar neutralidade carbónica até 2050 na UE usufruindo de fontes renováveis de energia para satisfazer as necessidades energéticas globais tomando os passos necessários à progressiva evolução do setor renovável.

O mercado elétrico europeu foi concebido para incentivar a transição de energia limpa enquanto são asseguradas a segurança e a acessibilidade da energia. Espera-se que a parcela de eletricidade consumida por fontes de energia renováveis cresça de 21.8% em 2021 para mais de 32% em 2030[18]. Este aumento fundamenta-se principalmente no desenvolvimento das energias solar e eólica mas a dependência destas fontes de energia requer uma adaptação do mercado para que, no caso de haver falta de produção, haja energia suficiente para satisfazer as necessidades da demanda.

“A produção de energia a partir de fontes renováveis ajuda a atenuar os efeitos das alterações climáticas e, ao reduzir a dependência das importações, aumenta a segurança do aprovisionamento da UE. Simultaneamente, a integração da produção de energias renováveis no sistema energético coloca desafios. Ainda é necessário proceder a alterações profundas no sistema elétrico para lidar com desafios como a variabilidade da produção de energia a partir de fontes renováveis intermitentes, o armazenamento, a produção de energia descentralizada e uma gestão mais dinâmica da procura” [19].

Com a recente ascensão das tecnologias de produção energética eólica e solar, o objetivo da UE fica cada vez mais próximo de ser alcançado, no entanto, há que ponderar aspetos cíclicos da natureza que afetam diretamente a produção de energia. A proximidade das fontes de produção à rede elétrica beneficia os grandes aglomerados populacionais e industriais mas prejudica mercados mais descentralizados que precisem de energia elétrica para o seu funcionamento. A saturação do mercado de aproveitamento de uma tecnologia renovável advinda de limitações práticas (como por exemplo: não haver espaço para colocar painéis solares ou torres eólicas, um rio já ter demasiadas barragens...) que implica a implementação de “mecanismos de capacidade” provenientes de fontes não intermitentes.

A maneira apresentada para resolver o problema em certas zonas, possibilitando o seu desenvolvimento socioeconómico, é a produção dispersa de energia que pode constituir a autossuficiência elétrica de uma região ou empresa sem necessidade de ligação à rede elétrica nacional (REN) mas que no caso de serem observados benefícios de tal (a produção dispersa pode e alimenta a rede se tiver capacidade para tal), a ligação à rede poderá ser efetuada.

Share of energy from renewable sources in gross electricity consumption, 2004-2021 (%)

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
EU	15.9	16.4	16.9	17.6	18.5	20.7	21.3	23.3	25.1	26.8	28.6	29.7	30.2	31.1	32.1	34.1	37.4	37.5
Belgium	1.7	2.4	3.1	3.7	4.6	6.2	7.3	9.0	11.3	12.5	13.4	15.6	15.8	17.2	18.9	20.8	25.1	26.0
Bulgaria	8.4	8.7	8.7	8.9	9.5	10.9	12.4	12.6	15.8	18.7	18.7	19.0	19.1	19.0	22.4	23.5	23.6	18.8
Czechia	3.7	3.8	4.1	4.6	5.2	6.4	7.5	10.6	11.7	12.8	13.9	14.1	13.6	13.7	13.7	14.0	14.8	14.6
Denmark	23.8	24.6	24.0	25.0	25.9	28.3	32.7	35.9	38.7	43.1	48.5	51.3	53.7	59.9	62.4	65.3	65.3	62.6
Germany	9.4	10.6	11.9	13.7	15.1	17.5	18.2	20.9	23.6	25.3	28.2	30.9	32.3	34.6	37.6	40.6	44.2	43.7
Estonia	0.5	1.1	1.4	1.4	2.0	6.0	10.3	12.2	15.7	12.9	14.0	16.2	16.2	17.6	19.7	22.0	28.3	29.3
Ireland	6.0	7.2	8.5	9.5	10.8	14.1	15.6	18.3	19.8	21.0	23.3	25.7	27.1	30.3	33.3	36.5	39.1	36.4
Greece	7.8	8.2	8.9	9.3	9.6	11.0	12.3	13.8	16.4	21.2	21.9	22.1	22.7	24.5	26.0	31.3	35.9	35.9
Spain	19.0	19.2	20.0	21.7	23.8	27.9	29.7	31.5	33.4	36.0	37.1	37.0	36.7	36.5	35.2	37.1	42.9	46.0
France	13.8	13.7	14.1	14.3	14.4	15.1	14.8	16.2	16.5	17.0	18.5	18.8	19.2	19.9	21.1	22.4	24.8	25.0
Croatia	35.0	35.2	34.8	34.0	33.9	35.9	37.5	37.6	38.8	42.1	45.2	45.4	46.7	46.4	48.1	49.8	53.8	53.5
Italy	16.1	16.3	15.9	16.0	16.6	18.8	20.1	23.5	27.4	31.3	33.4	33.5	34.0	34.1	33.9	35.0	38.1	36.0
Cyprus	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3	0.6	1.4	3.4	4.9	6.7	7.4	8.4	8.6	8.9	9.4	9.8	12.0	14.8
Latvia	46.0	43.0	40.4	38.6	38.7	41.9	42.1	44.7	44.9	48.7	51.0	52.2	51.3	54.4	53.5	53.4	53.4	51.4
Lithuania	3.6	3.8	4.0	4.7	4.9	5.9	7.4	9.0	10.9	13.1	13.7	15.5	16.9	18.3	18.4	18.8	20.2	21.3
Luxembourg	2.8	3.2	3.2	3.3	3.6	4.1	3.8	4.1	4.7	5.3	6.0	6.2	6.7	8.1	9.1	10.9	13.9	14.2
Hungary	2.2	4.4	3.5	4.2	5.3	7.0	7.1	6.4	6.1	6.6	7.3	7.3	7.3	7.5	8.3	10.0	11.9	13.7
Malta	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	1.1	1.6	3.3	4.3	5.7	6.8	7.7	7.5	9.5	9.7
Netherlands	4.4	6.3	6.5	6.0	7.5	9.1	9.6	9.7	10.4	9.9	9.9	11.0	12.6	13.8	15.2	18.2	26.4	30.4
Austria	61.6	62.9	63.5	65.7	65.9	68.6	66.4	66.8	67.4	68.9	71.1	71.5	72.5	71.6	74.2	75.1	78.2	76.2
Poland	2.0	2.5	2.9	3.3	4.2	5.7	6.5	8.1	10.6	10.7	12.4	13.4	13.3	13.1	13.0	14.4	16.2	17.2
Portugal	27.4	27.7	29.3	32.3	34.1	37.6	40.6	45.8	47.5	49.1	52.1	52.6	54.0	54.2	52.2	53.8	58.0	58.4
Romania	28.4	28.8	28.1	28.1	28.1	30.9	30.4	31.1	33.6	37.5	41.7	43.2	42.7	42.0	41.8	42.6	43.4	42.5
Slovenia	29.3	28.7	28.2	27.7	30.0	33.8	32.2	31.0	31.6	33.1	33.9	32.7	32.1	32.4	32.3	32.6	35.1	35.0
Slovakia	15.4	15.7	16.6	16.5	17.0	17.8	17.8	19.3	20.1	20.8	22.9	22.7	22.5	21.3	21.5	22.1	23.1	22.4
Finland	26.7	26.9	26.4	25.5	26.7	26.8	27.2	29.0	29.1	30.5	31.1	32.2	32.7	35.0	36.5	38.0	39.6	39.5
Sweden	51.2	50.9	51.8	53.2	53.7	58.3	55.8	59.6	59.8	61.7	63.2	65.7	64.9	65.9	68.2	71.2	74.5	75.7
Iceland	93.1	94.9	93.5	113.7	90.8	92.9	92.4	93.9	95.4	96.7	97.1	93.1	95.3	93.4	98.5	100.6	102.7	99.6
Norway	98.0	97.4	100.8	99.1	100.2	105.2	98.3	105.9	104.6	106.9	110.1	106.8	105.6	104.9	106.8	110.4	113.8	113.7
Montenegro	52.9	51.4	49.1	46.0	62.1	76.5	81.3	79.8	68.5	67.6	68.5	69.1	65.7	64.5	62.6	64.8	63.5	
Moldova	0.8	0.8	0.8	0.8	1.0	1.8	1.8	1.7	1.7	1.9	2.0	1.9	2.1	2.6	3.0	3.1	3.6	
North Macedonia	14.5	14.0	14.0	13.7	13.8	15.5	15.8	14.8	16.7	18.2	19.3	21.7	24.1	24.8	24.8	23.8	23.5	21.5
Albania	70.0	76.1	74.2	79.6	73.3	70.7	74.6	66.1	72.4	62.7	71.0	79.2	82.1	91.0	92.4	93.0	100.0	94.4
Serbia	14.0	15.6	15.8	13.2	16.7	26.5	23.2	21.1	23.2	25.1	28.8	26.9	25.1	24.9	24.3	26.6	35.7	35.5
Kosovo*	0.5	0.6	0.9	1.0	1.0	1.1	1.4	1.4	1.5	1.6	1.9	1.8	4.0	3.6	4.2	5.2	5.3	5.4
Georgia																		73.0

Results until 2020 are based on the methodology included in Directive 2009/28/EC, while results for 2021 are based on Directive (EU) 2018/2001

* This designation is without prejudice to positions on status, and is in line with UNSCR 1244/1999 and the ICJ Opinion on the Kosovo declaration of independence.

Source: Eurostat (online data code: nrg_ind_ren)

eurostat

Figura 20- Evolução da percentagem do valor bruto da eletricidade consumida proveniente de fontes renováveis [20]

2.3.1. EM PORTUGAL

Em Portugal, o consumo final para fins energéticos apresenta uma tendência crescente tendo sido registado pela APREN um consumo total de 53,32TWh. Em conformidade com este crescimento e com as metas europeias, o desenvolvimento do setor energético português dá sinais positivos de

desenvolvimento dependendo cada vez menos de energia proveniente de fontes fósseis como pode ser observado na figura 21.

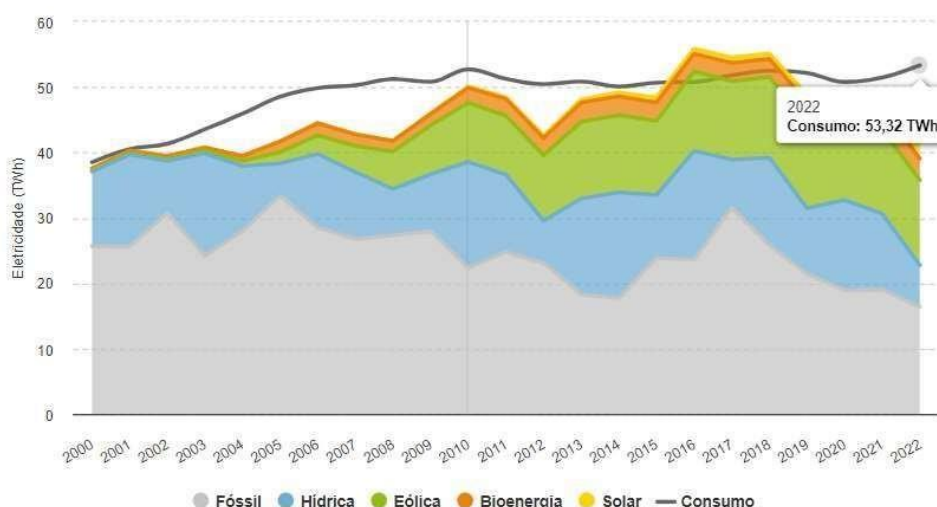


Figura 21 – Evolução da Produção Elétrica em Portugal Continental [21]

A Direção Geral de Energia e Geologia (DGE) disponibiliza dados relativos ao consumo de eletricidade por setor de atividade (figura 22) que mostram uma tendência ligeiramente crescente do consumo continuando o observado na figura 21:

Indicador	Unid.	Fonte	2016	2017	2018	2019	2020	2021p
Consumo de Eletricidade por setor de atividade	-	-						
Agricultura e Pescas	GWh	DGEG	889	1 048	1 109	1 023	1 035	1 114
Indústria	GWh	DGEG	15 809	16 310	16 574	16 902	16 331	16 857
Transportes	GWh	DGEG	425	480	485	500	432	466
Doméstico	GWh	DGEG	12 973	12 604	13 351	13 223	13 702	14 178
Serviços	GWh	DGEG	16 300	16 207	16 454	16 232	14 852	14 695
Consumo de energia como matéria prima	ktep	DGEG	929	946	511	942	897	937
Outros usos não energéticos do Petróleo	ktep	DGEG	279	310	262	262	278	323

Figura 22 – Consumo de Eletricidade por setor de atividade [22]

Apesar deste aumento na demanda energética nacional, é de notar que a origem da energia utilizada, em 2021, o peso da produção de eletricidade a partir de fontes renováveis representou 59,4% do total da produção bruta mais saldo importador, valor que mostra tendência crescente tendo em conta o desenvolvimento nacional no setor das energias renováveis:

Em 2020 foi aprovada pela resolução do Conselho de Ministros n.º29/2010, 15 de Abril a Estratégia Nacional para a Energia (ENE 2020) que vem estabelecer metas para a produção de energia com base

em fontes renováveis, de maneira a alcançar os objetivos de reduzir a dependência energética do país, reduzir o saldo importador energético e, finalmente, criar riqueza e consolidar o setor energético de maneira a produzir mais energia e criar novos postos de trabalho.

No mesmo sentido estabelecido pelo ENE 2020, a Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos (APRH) expressa a importância da aposta nas energias renováveis mencionando a aplicação de um plano de ação para a promoção de mini-hídricas com o objetivo de licenciar de forma rápida 250 MW com vista a alcançar a meta de 8500 MW de potência hídrica instalada até 2020 [23].

2.3.2. PRODUÇÃO DE ENERGIA EM MOINHOS HIDRÁULICOS

A recuperação de moinhos apresenta oportunidades desde a valorização socioeconómica de zonas isoladas, à valorização da estrutura molinológica existente e de auxiliar na transição energética anteriormente referida enquanto, simultaneamente, dá cumprimento à Diretiva Quadro da Água (60/2000/EC), cujo objetivo é a proteção e gestão de recursos hídricos na Europa [24].

“Num contexto de crise energética, e considerando a necessária aposta na produção de energia renovável, incentivar a reconversão dos moinhos e azenhas pode ser relevante em vários concelhos, sobretudo se considerada também a dimensão de valorização patrimonial” [25].

Em Portugal o número de projetos é ainda muito reduzido pelo que, é objetivo deste documento auxiliar no estudo de pré-viabilidade de moinhos existentes enquadrando o leitor nos principais aspetos técnico-operacionais necessários à concretização do projeto, desde as componentes infraestruturais necessárias, os equipamentos eletromecânicos utilizáveis, como anteriormente referidos, o processo normativo necessário e a estima da capacidade produtora de energia bem como o tempo de retorno do investimento do sistema hidroelétrico de maneira a permitir uma rápida janela de orientação do potencial de cada infraestrutura.

2.3.3. PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO

Desenvolver uma pequena central hidroelétrica é um processo iterativo complexo que requer uma abordagem cuidadosa e detalhada.

A primeira etapa envolve a seleção do local, tendo em conta a topografia, disponibilidade hídrica e, no presente caso de estudo, a existência da infraestrutura por reabilitar de um antigo moinho.

A segunda etapa corresponde ao estudo de pré-viabilidade, descrito neste documento, o estudo de pré-viabilidade engloba o estudo de impacto ambiental do projeto e a realização de um estudo detalhado de viabilidade técnica e económica, incluindo uma estimativa do custo de instalação e uma análise à energia potencialmente gerada.

A terceira etapa desenvolve-se no seguimento dos resultados favoráveis da segunda, dando início a um estudo de viabilidade mais complexo e detalhado aprofundando a análise de pontos críticos como a zona de captação ou de derivação de água, as características geológicas do local de instalação de forma a estipular segurança, rigor e precisão na implementação dos materiais e maquinaria necessários à obra.

Finalmente, após a conclusão da última etapa dá-se, naturalmente, a implementação da obra e a sua monitorização ao longo do seu período de vida, importante para verificar o seu bom funcionamento e prevenir eventuais perdas de rendimento ou mesmo danos estruturais de carácter natural e aleatório.

2.3.4. PROCESSO NORMATIVO E LEGISLATIVO NACIONAL EM 2023

2.3.4.1 DECRETO-LEI N.º 49/2015

O Decreto-Lei n.º 49/2015, de 10 de abril, estabeleceu o regime especial aplicável à adaptação de moinhos, azenhas ou outras infraestruturas hidráulicas equivalentes para produção de energia hidroelétrica incluindo os termos e as condições da atribuição do respetivo título de utilização dos recursos hídricos para fins de produção de eletricidade.

Este regime aplica-se indistintamente aos casos que não alterem o regime hidrológico dos rios onde estão inseridos salvaguardando os valores naturais em presença. Surgiu no seguimento da resolução da Assembleia da República nº136/2012, de 7 de novembro de maneira a simplificar e integrar a obtenção do título de utilização de recursos hídricos e acesso à atividade de produção de eletricidade a partir de fontes hídricas com potência igual ou inferior a 1 MVA que respeitem

Segundo o Artigo 2.º do DL 49/2015, o regime é aplicável desde que se verifiquem cumulativamente, as seguintes condições:

- a) Tratar-se da adaptação de moinhos, azenhas ou outras infraestruturas hidráulicas, localizadas em terrenos, leitos e margens privados, tendo por finalidade a produção de energia hidroelétrica;
- b) As infraestruturas previstas na alínea anterior utilizarem águas do domínio público hídrico do Estado;
- c) A recuperação e utilização das infraestruturas previstas na alínea a) não provocar alterações no regime fluvial do curso de água onde estão localizadas, nem implicar a implantação de novas infraestruturas hidráulicas ou o represamento de água;
- d) A potência elétrica instalada ou a injetar na Rede Elétrica de Serviço Público (RESP) ser inferior ou igual a 1 MVA;
- e) A energia elétrica produzida nos moinhos, azenhas ou outras infraestruturas hidráulicas não ser remunerada no âmbito do regime de remuneração garantida ou através de tarifa bonificada;
- f) O cumprimento do disposto no Decreto-Lei 309/2009, de 23 de outubro, alterado pelos Decretos-Leis 115/2011, de 5 de dezembro e 265/2012, de 28 de dezembro, em matéria de sujeição prévia a parecer da administração cultural, da adaptação, com vista à produção de energia hidroelétrica, sempre que os tipos de imóveis a que se refere o presente decreto-lei se encontrem classificados ou abrangidos por zona de proteção, ou a apresentação pelo interessado de comprovativo de consulta à Direção-Geral do Património Cultural sobre a existência de eventuais condicionantes sobre o património cultural.

Cabe à Agência Portuguesa do Ambiente (APA, I.P.) e à Direção-Geral de Energia e Geologia (DGEG), de forma articulada, verificar a utilização de recursos hídricos e de controlar o acesso à atividade de produção de eletricidade a partir de fontes renováveis.

Adicionalmente, a captação de água para fins de produção de eletricidade ao abrigo do regime aplicável a moinhos e azenhas previsto no DL 49/2015, está sujeita a condições de utilização dos recursos hídricos:

1º A captação de água para fins de produção de eletricidade ao abrigo do regime previsto nos artigos anteriores está sujeita a licença prévia, a atribuir nos termos do disposto no Regime da Utilização dos Recursos Hídricos, aprovado pelo Decreto-Lei 226-A/2007, de 31 de maio

2º O exercício da atividade de produção de eletricidade obedece aos regimes simplificados da comunicação prévia ou de registo prévio para produção destinada ao autoconsumo, nos termos da portaria prevista no n.º 3 do artigo 33.º-E do Decreto-Lei 172/2006, de 23 de agosto, ou

no Decreto-Lei 153/2014, de 20 de outubro, respetivamente, **consoante a finalidade do pedido seja a injeção na RESP da totalidade da energia produzida ou a produção em autoconsumo.**[26]

Por último, é importante notar a retificação do presente DL pela Declaração de Retificação n.º 26/2015 que inclui os elementos instrutórios necessários para obtenção da licença de utilização da água omitidos por lapso:

- a) Localização da infraestrutura à escala 1:25 000, incluindo a indicação das coordenadas geográficas;
- b) Descrição das características da infraestrutura, incluindo a respetiva imagem fotográfica;
- c) Identificação da linha de água;
- d) Cópia do título de propriedade dos terrenos e das infraestruturas ou, não sendo o caso, de outrotítulo que habilite o usufruto da infraestrutura;
- e) Descrição e características técnicas das alterações a introduzir na infraestrutura existente, com vista à produção de energia

2.4.3.2. DECRETO-LEI N.º 58/2005

Esta lei é também conhecida por “Lei da Água” tem como principais objetivos assegurar a utilização sustentável, equitativa e eficiente através de medidas de conservação, proteção e recuperação dos corpos de água bem como a promoção da sua qualidade para diversos usos, visa proteger e preservar os ecossistemas aquáticos promovendo a conservação da biodiversidade e dos elementos ecossistémicos associados aos recursos hídricos e define as bases para a garantia do abastecimento público, saneamento e tratamento de águas. É um decreto abrangente mas no contexto da presente dissertação destacam-se os seguintes aspetos:

Os utilizadores dos recursos hídricos têm deveres básicos que devem ser cumpridos:

- a) Evitar qualquer perturbação do estado da água, determinado nos termos da presente lei, e, em especial, qualquer contaminação ou alteração adversa das suas capacidades funcionais;
- b) Obter um uso económico da água sustentável e compatível com a manutenção da integridade dos recursos hídricos.

2 - As águas são usadas de modo a evitar a criação de riscos desrazoáveis ou de perigos para a sua integridade, para a qualidade do ambiente ou para as reservas públicas de abastecimento.

3 - Quem construa, explore ou opere uma instalação capaz de causar poluição hídrica deve, em caso de acidente, tomar as precauções adequadas, necessárias e proporcionais para, tendo em conta a natureza e extensão do perigo, prevenir acidentes e minimizar os seus impactes.

São também mencionados as instalações da Administração Pública responsáveis por exercer as competências previstas na presente lei:

1 - As instituições da Administração Pública a cujos órgãos cabe exercer as competências previstas na presente lei são:

- a) A nível nacional, o Instituto da Água (INAG), que, como autoridade nacional da água, representa o Estado como garante da política nacional das águas;
- b) A nível de região hidrográfica, as administrações das regiões hidrográficas (ARH), que prosseguem atribuições de gestão das águas, incluindo o respetivo planeamento, licenciamento e fiscalização.

2 - A representação dos sectores de actividade e dos utilizadores dos recursos hídricos é assegurada através dos seguintes órgãos consultivos:

- a) O Conselho Nacional da Água (CNA), enquanto órgão consultivo do Governo em matéria de recursos hídricos;
- b) Os conselhos da região hidrográfica (CRH), enquanto órgãos consultivos das administrações da região hidrográfica para as respectivas bacias hidrográficas nela integradas.

3 - A articulação dos instrumentos de ordenamento do território com as regras e princípios decorrentes da presente lei e dos planos de águas nelas previstos e a integração da política da água nas políticas transversais de ambiente são asseguradas em especial pelas comissões de coordenação e desenvolvimento regional (CCDR)

3.

METODOLOGIA

3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

A grandeza do desnível energético e do caudal aproveitado pelo projeto são as características bases que determinam a gama de funcionamento do projeto. Estas características sofrem alterações de caráter natural ao longo do tempo que são de difícil tradução matemática, e portanto, estudar a viabilidade do projeto implica a sua estimativa.

Com o intuito de obter uma abordagem que permita, numa fase anterior ao projeto, uma análise da sua viabilidade de caráter simples que permita uma boa estimativa do potencial do empreendimento, são propostos métodos simplificados e expeditos para estimativa do caudal do aproveitamento, do consequente aproveitamento energético e das suas valias económicas.

A dificuldade da correta estima da disponibilidade do caudal em locais remotos é bem assente devido à sua origem em processos de transformação da água ao longo do seu ciclo natural. Por envolver a utilização de modelos matemáticos complexos que permitem caracterizar esta disponibilidade da energia hidráulica, o estudo da viabilidade dos projetos requer investimentos algo significativos no seu desenvolvimento. Por se tratarem, neste caso, de aproveitamentos hidráulicos de pequena dimensão, a necessidade de estudos complexos surge como um obstáculo no processo de decisão da implementação do projeto.

No que toca à análise económica, esta terá uma abordagem simplificada. Neste tipo de aproveitamentos, o conhecimento do mercado é essencial na determinação da viabilidade do projeto pelo que a presente dissertação procura na literatura valores que possam ser identificáveis com os do mercado nacional.

Neste contexto, o presente documento propõe a utilização de métodos expeditos quer na estimativa do caudal disponível quer na avaliação técnico-económica que permitam uma boa presunção do valor do empreendimento.

A influência da estimativa do caudal de projeto na sua avaliação de viabilidade é de enorme relevância uma vez que as condições operacionais do equipamento hidromecânico gerador de energia estarão diretamente relacionadas com o caudal disponível. A avaliação da viabilidade técnica e económica do projeto é por isso altamente dependente da caracterização hidrológica do curso de água em que o mesmo se insere.

O procedimento da análise de pré-viabilidade técnico-económica tem como objetivo calcular a energia produzível por um aproveitamento e determinar a faixa de rentabilidade a que este estará associado com o objetivo único de produzir energia elétrica a partir da água do rio.

Deste modo, o presente estudo pretende constituir bases que permitam uma estimativa razoável do comportamento hidráulico da variabilidade dos caudais disponíveis de maneira a ser possível avaliar o seu potencial energético para uma posterior análise simplificada do custo de empreendimento e potencial retorno do investimento através da comercialização energética.

O estudo hidrológico consiste na análise detalhada do ciclo hidrológico de uma bacia hidrográfica, neste caso, das bacias hidrográficas dos casos de estudo, com o objetivo de entender a disponibilidade dinâmica da água na região. O principal fator que se pretende determinar com a caracterização hidrológica é a lei de caudais diários previsíveis que serão desviados para o aproveitamento, isto é, os caudais sob os quais o aproveitamento hidroelétrico funcionará em condições de viabilidade técnica e económica.

A correta estimativa destes caudais carece do registo, tão longo quanto possível, dos caudais na secção do aproveitamento e implica um apreciável fator de imprecisão dada a sua natureza aleatória. Os registos hidrométricos de uma seção do rio permitem a melhor aproximação do seu comportamento à realidade no entanto, as estações de registo hidrométrico não existem em todo o lado, estando localizadas predominantemente em rios principais ou que tenham sido objeto de estudos hidrológicos passados. O trabalho de registo, além de demorado (um registo representativo do comportamento hidrométrico tem por norma mais de 20 anos), nem sempre é exequível no local por desconhecimento das possíveis futuras localizações do projeto contribuindo para a inexistência destes registos em pequenos rios ou ribeiros cuja intenção de investimento será a menor possível.

A caracterização fisiográfica é uma componente essencial para o estudo hidrológico na medida em que define as características da geometria, da drenagem, do relevo e das características geológicas da bacia. Tal avaliação requer a extensa caracterização da bacia hidrográfica do rio mas, no presente estudo, terá que ter uma abordagem simplificada de modo a tornar a fase de pré – avaliação exequível.

Por terem características geomorfológicas distintas, um estudo hidrológico mais preciso exigiria a consideração de outras variáveis que ajudam a descrever melhor o seu comportamento hidrodinâmico como o percurso médio do escoamento superficial, a altimetria do rio, o seu perfil longitudinal e a respetiva curva hipsométrica (curva que relaciona diretamente a superfície da bacia com a respetiva altitude), entre outras características e coeficientes cuja análise é recomendada caso se verifique a viabilidade técnico-económica após verificação do respetivo estudo de pré-viabilidade como o que o presente documento sugere.

As características geométricas de um curso de água podem ser avaliadas qualitativamente ou quantitativamente. O conhecimento empírico permite-nos ter uma noção do comportamento do rio mas para efeitos de análise simplificada da viabilidade do projeto, apenas nos interessam parâmetros quantitativos. Importa, portanto, definir que elementos serão relevantes no sentido do tema desta dissertação. No seguimento deste raciocínio, de maneira a simplificar a abordagem, foi considerada como principal elemento influenciador da caracterização fisiográfica aquele que influenciam diretamente a correlação estipulada em 3.3., a área da bacia hidrográfica.

A área da bacia hidrográfica é uma das duas características que definem a correlação estipulada em 3.3. e é definida topograficamente, “representa a área drenada por um curso de água ou por um sistema interligado de cursos de água, tal que todos os caudais efluentes sejam descarregados através de uma única saída (secção de referência), ou seja, constitui uma área que contribui, através da precipitação aí caída, para a alimentação de um dado curso de água.”[27].

Deste modo, procedeu-se à obtenção da área da bacia hidrográfica através da plataforma digital “SNI Amb” (Figura 23) que disponibiliza páginas estatísticas e dinâmicas com acesso direto à base de dados do sistema de monitorização de recursos hídricos nacionais.

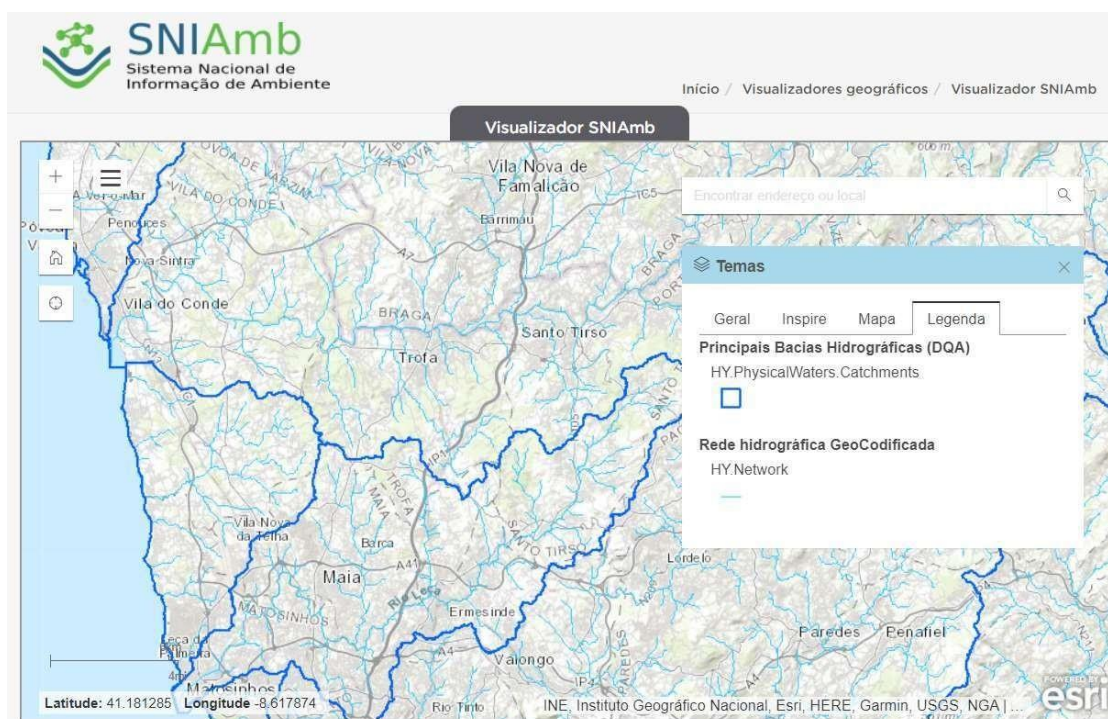


Figura 23- Visualizador do SNIAmb [27]

No seguimento da definição das variáveis que influenciam a determinação do caudal da secção do aproveitamento em estudo, surge a precipitação das bacias hidrográficas respetivas a cada bacia, modelo e em estudo. Os escoamentos são resultado da transformação de parte das precipitações sobre a bacia hidrográfica, na sua interligação com as características geográficas, morfológicas e geológicas da bacia.

A presente dissertação propõe que a estima dos caudais do aproveitamento necessária para efeitos de avaliação da pré-viabilidade seja efetuada consoante a equação 2 capítulo 3.3 correlacionando caudais com a área e precipitação média de uma bacia modelo com esses mesmos parâmetros da secção em estudo.

Selecionar a bacia modelo é um processo iterativo que implica a procura de uma bacia cujas características fisiográficas e morfológicas se assemelhem às do rio em estudo, contudo, a procura destas semelhanças deve ser feita apenas em bacias hidrográficas cujos caudais tenham sido registados/monitorizados na secção de referência da bacia hidrográfica.

Nestas circunstâncias, o presente estudo explora a possibilidade de revalorizar infraestruturas hidráulicas tradicionais existentes estimando a lei de caudais diários no canal hidráulico do moinho ou azenha para posterior análise económica do aproveitamento. O método aplicado assenta na correlação da lei de caudais na secção de estudo com os caudais registados na secção de um curso de água modelo com características que possam ser consideradas hidrologicamente semelhantes às da secção dos cursos de água do projeto de aproveitamento hidroelétrico que, como foi referido nos parágrafos anteriores, são as bacias hidrográficas e as respetivas precipitações.

O método empregue na estimativa do potencial energético e consequentemente financeiro permitiu ter uma ideia daquilo que seria a quantidade de energia disponível no local de implementação.

3.2. PRECIPITAÇÃO

Segundo Portela e Quintela (2006), surgem alguns modelos determinísticos agregados e distribuídos, com o intuito de estimar escoamentos a partir de precipitações ou outras variáveis climatológicas [27]. No entanto, os mesmos, não são facilmente traduzidos matematicamente devido à complexidade dos processos naturais que ocorrem na bacia e por isso não são adequados ou comumente aplicáveis à prática profissional. Mesmo os modelos determinísticos mais simplistas, necessitam de uma determinada quantidade de informação, partindo do pressuposto que a análise efetuada se baseia na comparação entre escoamentos simulados e escoamentos observados, o que seria possível apenas se os últimos existissem. A falta de dados para calibração desses modelos e respetiva verificação levou ao desenvolvimento e aplicação de técnicas de regionalização hidrométrica, neste caso, o método dos polígonos de Thiessen, que admite uma linearização da variabilidade da precipitação ao longo da região.

A precipitação média de uma bacia hidrográfica assume-se comparável à precipitação média de outra bacia hidrográfica da mesma região hidrográfica devido à semelhança de fatores geográficos e climáticos que influenciam a distribuição de chuva na região. No entanto, é importante referir que existem variações na precipitação entre diferentes bacias hidrográficas, mesmo dentro da mesma região hidrográfica devido a microclimas locais, influência de corpos de água entre outros fatores.

Determinar a quantidade exata de precipitação numa bacia hidrográfica, é impossível. Contudo, a sua estimativa é, hoje em dia, possível com boa precisão através de métodos estatísticos apoiados pela contínua monitorização e registo da pluviometria nacional. O Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos [28] disponibiliza registos de estações meteorológicas (ou postos udométricos) espalhadas pelas regiões nacionais e registam a altura de precipitação, em milímetros ocorrida no local de medição do posto udométrico (Figura 24).

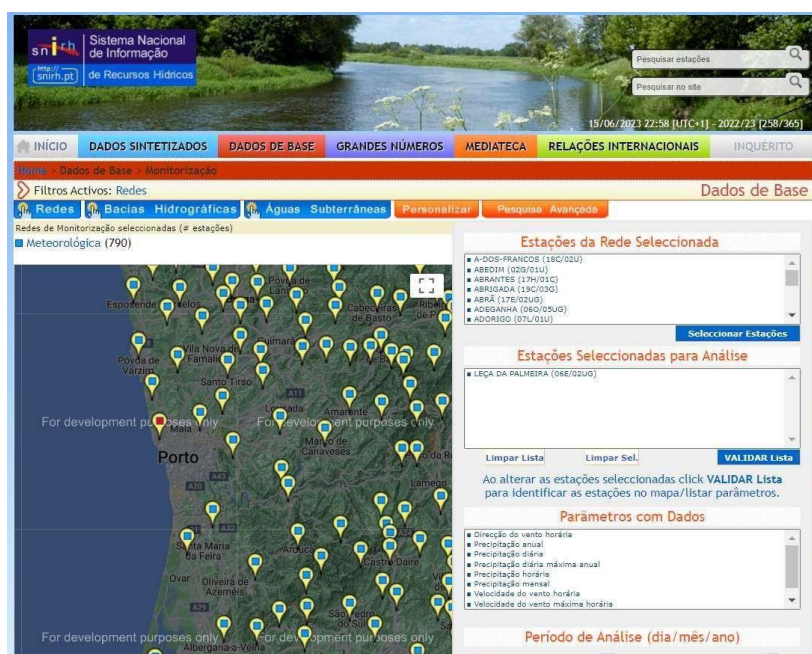


Figura 24- Página inicial do SNIRH

O registo desta precipitação no posto meteorológico considera-se representativo de toda a região de influência do posto sobre a bacia hidrográfica. Esta influência traduz nada mais que a admissão da

possibilidade da precipitação variar linearmente entre cada posto consecutivo meteorológico através da aplicação do método dos polígonos de Thiessen anteriormente referido, exemplificado à frente e que resulta numa divisão da bacia hidrográfica como é observável pela figura 25:

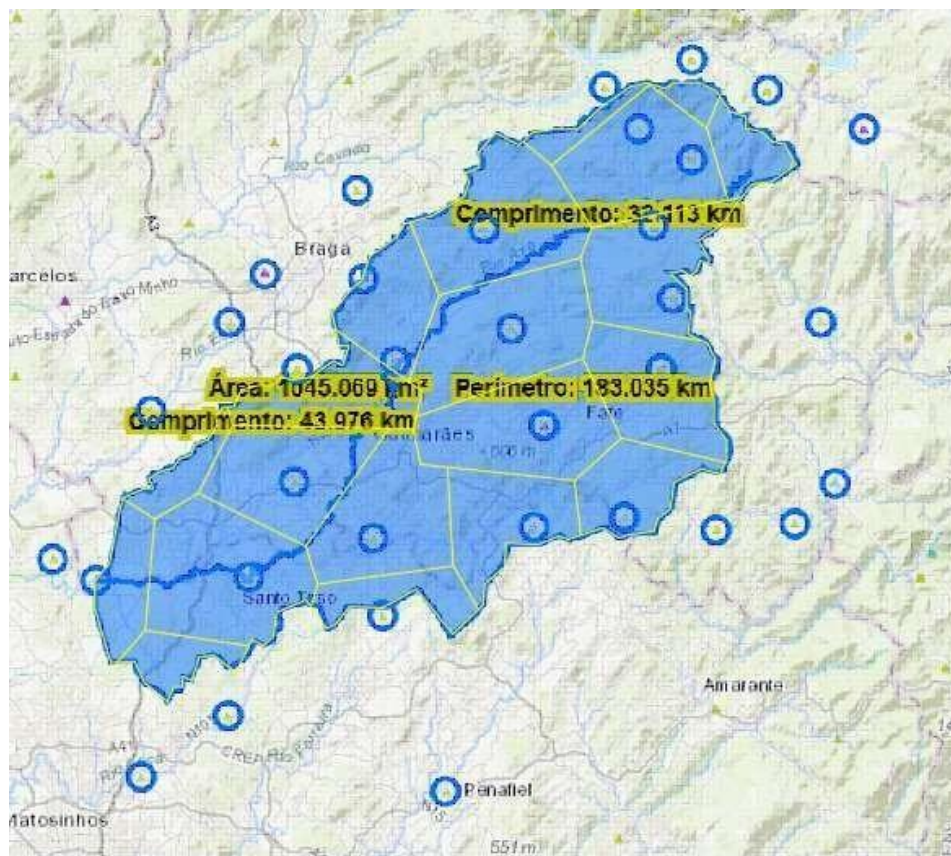


Figura 25 Divisão da área da bacia hidrográfica do Rio Ave através do método dos polígonos de Thiessen.

Antes de ser possível a construção do mapa dos polígonos de Thiessen, é necessário selecionar os apenas necessários postos udométricos que caracterizarão a bacia hidrográfica. As estações meteorológicas encontram-se muitas vezes com registos muito incompletos ou apresentam frequentemente falhas isoladas pelo que é provável a necessidade de recorrer a métodos de reconstrução e homogeneização dos dados, os quais possibilitam estimar os valores dos registos em falta. A utilização de métodos de reconstituição e homogeneização de dados permitem preencher os registos com valores calculados não obstante que os mesmos são meras projeções aproximadas do valor que poderá ter sido observado no instante ou período reconstituído pelo que a sua utilização associa um certo grau de imprecisão. O método utilizado é o método das duplas acumulações.

Assim, a construção do mapa dos polígonos de Thiessen deve considerar a posição geográfica das estações meteorológicas e a qualidade dos registos da mesma uma vez que se pretende minimizar a necessidade de reconstrução de registos que aumenta a imprecisão da análise efetuada.

Este raciocínio conduz ao primeiro passo do método aplicado para calcular a precipitação média de uma bacia hidrográfica. Implica selecionar as estações meteorológicas cujos dados de registo pluviométrico estejam completos consecutivamente num período tão longo quanto possível (em prol de uma melhor descrição estatística), não obstante do pressuposto que quanto melhor distribuídas pela área da bacia

hidrográfica estiverem os postos udométricos, mais próxima da realidade estará a previsão do comportamento pluviométrico da bacia hidrográfica ao longo do período de tempo selecionado.

A seleção dos postos udométricos é por isso um processo iterativo, após seleção inicial dos postos, constrói-se o mapa dos polígonos de Thiesen e verifica-se que postos têm influência sob a bacia hidrográfica, posteriormente procura-se encontrar os postos cujos registos de precipitação estejamo mais completos e homogêneos possível num mesmo período de análise. No presente estudo considerou-se que 20 anos seriam o suficiente para definir esse período. Postos com registos muito incompletos no período mais homogêneo (isto é, com uma maior densidade de registos de diferentes postos no mesmo período) são eliminados e o os polígonos de Thiessen devem ser refeitos. Após seleção dos postos finais, procede-se à reconstituição e homogeneização dos mesmos (se ainda se verificarem falhas nos registos), aplicando-se o método das duplas acumulações abordado no subcapítulo seguinte.

3.2.1. MÉTODO DAS DUPLAS ACUMULAÇÕES

No caso de registos os postos com influência significativa sobre a área da bacia hidrográfica de carecerem é necessário o preenchimento de eventuais dados em falta das séries pluviométricas como foi anteriormente mencionado. A reconstituição destes valores é feita através do método das duplas acumulações aplicado a dados hidrológicos com o objetivo de obter valores pontuais de séries por interpolação ou extrapolação. Este método é aplicável a séries hidrologicamente afins, isto é, comparáveis, da mesma variável [27].

Na figura 26 estão exemplificadas diferentes situações de registos. A verde, estão indicados os postos com registos completos naquelas datas, a amarelo, postos com falhas e a laranja, falta prolongada de registo da estação.

Posto	ARADA	BARRAGEM DE GUILHOFREI	BRANCELHE (CASTELÕES)	SANTO TIRSO
DATA	Precipitação	Precipitação mensal (mm)	Precipitação	Precipitação
01/02/1991 09:00	175.8	187.2	143.8	137
01/03/1991 09:00	274	315.5	367.6	181
01/04/1991 09:00	51.8	74.7	56	35
01/05/1991 09:00	2.9		7	0
01/06/1991 09:00	40.9	75.5	54.6	24.5
01/07/1991 09:00	19.4	71.3	48.5	27.5
01/08/1991 09:00	24.3	3.4	20.2	23.5
01/09/1991 09:00	79.3	141.8	99.2	24
01/10/1991 09:00	115.8	129.1	108.9	47.5
01/11/1991 09:00	302.2	397	285.1	106
01/12/1991 09:00	40.2	20.4	29.7	25
01/01/1992 09:00	102.9	91.8	82.2	36
01/02/1992 09:00	50.1	50.5	46.5	12
01/03/1992 09:00	83	73.5	72.9	46
01/04/1992 09:00	85.1	160.2	96.8	72
01/05/1992 09:00	115.3	130.6	121.8	85
01/06/1992 09:00	96.3	62.8	61.8	32.5
01/07/1992 09:00	4.7	6.5	2	2
01/08/1992 09:00	53		68.2	28
01/09/1992 09:00	58.7	69.9	72.8	44
01/10/1992 09:00	173.3	219.1	175.3	114
01/11/1992 09:00	81.8	104.4	127.4	43
01/12/1992 09:00	235.4	300.2	269.7	87
01/01/1993 09:00	50.2	82.1	69.1	28.5
01/02/1993 09:00	10.9		2.5	12.5
01/03/1993 09:00	36.8	45.1	43.4	47

Figura 26- exemplos de registos de precipitação média mensal nos postos meteorológicos de Arada, Barragem de Guilhofrei, Brancelhe, Castelões e Santo Tirso

A teoria subjacente ao método das duplas acumulações baseia-se no facto de, representando num sistema de eixos coordenados os pares de pontos definidos pelas acumulações sucessivas das séries de valores acumulados das precipitações, no mesmo período, dos postos modelo e do posto incompleto, a curva resultante ser uma linha reta se os valores das referidas séries forem admitidos proporcionais.

Estações / Postos em comparação			Gerar duas novas séries de de valores acumulados		
ANOS	SÉRIE P	SÉRIE P'	ANOS	SÉRIE x	SÉRIE y
Ano 1	P_1	P'_1	Ano 1	$x_1 = P_1$	$y_1 = P'_1$
Ano 2	P_2	P'_2	Ano 2	$x_2 = P_1 + P_2$	$y_2 = P'_1 + P'_2$
Ano 3	P_3	P'_3	Ano 3	$x_3 = P_1 + P_2 + P_3$	$y_3 = P'_1 + P'_2 + P'_3$
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
Ano n	P_n	P'_n	Ano n	$x_n = \sum P_i$	$y_n = \sum P'_i$

Figura 27 Aplicação do método das duplas acumulações: à esquerda a série P e P' das estações modelo e a reconstituir. À direita as respectivas somas acumuladas.

Os pares de valores (x_i ; y_i) serão representados num sistema de eixos coordenados e vão constituir uma nuvem de pontos, à qual deve ser possível ajustar uma reta:

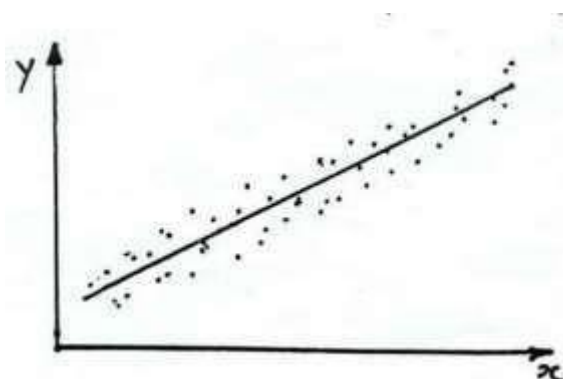


Figura 28 Ajuste da série de somas acumuladas obtida através do exemplificado na figura 27.

A reconstrução da série pluviométria incompleta efetua-se com extrapolação através das retas de regressão definidas entre o posto em estudo e o posto modelo.

3.2.2. MÉTODO DE THIESSEN

Como já foi referido, o método de Thiessen é baseado em técnicas de regionalização hidrométrica, que admitem uma linearização da variabilidade da precipitação ao longo da região considerando então que, para cada polígono, a pluviosidade média é igual à do posto udométrico interior. A construção do mapa dos polígonos de Thiessen faz-se da seguinte maneira:

- 1- Sobre a carta topográfica implantar os postos udométricos disponíveis e de interesse para a bacia em estudo

- 2- Unir os postos de maneira a dividir toda a área ficar dividida em triângulos (figura 29)
- 3- Traçar perpendiculares a meio dos lados dos triângulos unindo-se os circuncentros (figura 30)
- 4- Determinar as áreas de influência de cada posto udométrico dentro da bacia (figura 30)
- 5- Determinar a precipitação ponderada da bacia:

$$PM_{bacia} = \frac{\sum P_i \cdot A_i}{A_{bacia}} \quad (2)$$

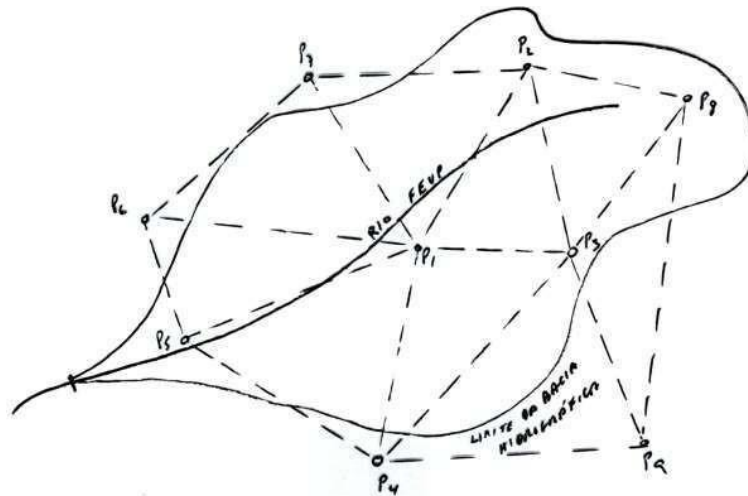


Figura 29 – 1º Passo do método de Thiessen, unir as estações meteorológicas em triângulos unindo postos udométricos consecutivos.

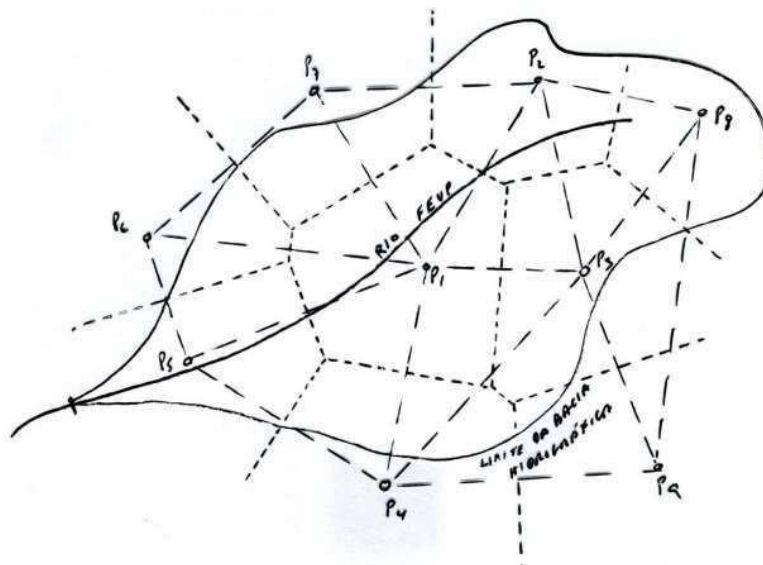


Figura 30- 2º Passo do método de Thiessen, traçar as bissetrizes dos segmentos de reta e determinar as suas interseções.

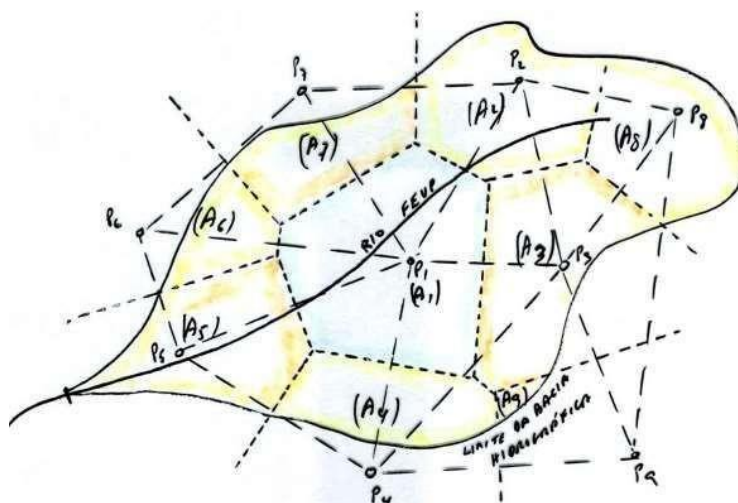


Figura 31- 3º Passo do método de Thiessen, unir os circuncentros, determinar a área de representatividade de um posto medindo a área do polígono que o rodeia. [27]

3.3 CAUDAIS

Na avaliação da produção energética esperada de um dado aproveitamento hidroelétrico, o conhecimento ou do registo dos caudais é um elemento essencial, mas, no entanto, é também o mais difícil de obter. A mais precisa determinação desta variável seria através de medições sucessivas na secção em estudo durante um período de tempo tão longo quanto fosse possível de maneira a obter um maior número de observações que permitissem a melhor estimativa estatística. Como foi referido anteriormente, tal cenário revela ser, na maior parte dos casos, incomportável e é, portanto, necessário recorrer a alternativas de estimação para, de maneira prática, ser possível estimar a disponibilidade do recurso hídrico.

A avaliação do potencial energético de um aproveitamento hidroelétrico envolve a seleção de um grupo gerador que, para ser selecionado, é necessário estipular-se o caudal sob o qual o mesmo funcionará. A abordagem proposta de maneira a simplificar a estimativa do custo do grupo gerador é considerar, no estudo de pré-viabilidade, esse caudal igual ao caudal médio diário afluente à secção em estudo.

Neste sentido, propõe-se a estimativa de caudais médios diários na secção em estudo através do estabelecimento da correlação dos caudais verificados na secção de convergência da bacia modelo com os caudais que se presumem ter ocorrido no passado na secção em estudo caso estes tivessem sido realmente observados e registados.

Este método considera, de maneira a permitir a exequibilidade do estudo simplificado, que a lei de variação diária dos caudais terá o mesmo comportamento e padrão que a lei de caudais do período considerado. Em suma, isto significa que se admitirá que uma turbina cujo valor do caudal médio para um dia seja superior ao máximo turbinável, a turbina terá 24h de funcionamento, fenómeno que pode não ser verificado caso se verifiquem oscilações significativas ao longo do dia.

Esta correlação é materializada partindo do princípio que os caudais médios diários que teriam sido observados na secção em estudo (Q_E) são obtidos a partir dos correspondentes caudais médios diários registados na bacia modelo (Q_M), multiplicados pela relação entre as áreas das bacias hidrográficas (A_E/A_M) e as respetivas precipitações médias diárias (PE/PM) definindo-se a equação 3.

$$Q_E = Q_M \frac{A_E P_E}{A_M P_M} \quad (3)$$

A fórmula de recorrência proposta, tem origem próxima no pressuposto de que a relação entre caudais médios mensais é igual ao produto da relação entre áreas das bacias pela relação entre precipitações mensais das mesmas e, posteriormente, na hipótese de que a relação dos caudais médios diários é idêntica à verificada para os caudais médios mensais. O que acaba de se referir não traduz mais que o facto de se considerar que os coeficientes de escoamento para as duas bacias a relacionar são iguais.

A aplicação da fórmula 3 permite calcular cada valor da série cronológica de caudais da bacia em estudo através da correlação das áreas e precipitações da bacia modelo, obtendo-se assim uma série cronológica dos caudais médios diários estimados na secção em estudo que, por sua vez permite observar analisar e prever as condições hidrológicas sob as quais funcionará o aproveitamento através do método aqui descrito.

A obtenção da série cronológica dos caudais permite, pela sua observação caracterizar e obter diversos parâmetros como caudal máximo de cheias, a variabilidade dos caudais ao longo das diferentes estações, entre outros, no intuito do tema aqui apresentado, os parâmetros utilizados serão os que, de maneira direta, influenciarão o caudal que definirá o potencial energético do aproveitamento.

É importante acrescentar que, o modo de desvio da água e aproveitamento verificado na infraestrutura molinológica também condiciona a lei de variabilidade dos caudais que afetarão o grupo eletromotor. Com isto, considerando que a tipologia do moinho, conforme o seu processo construtivo mencionado no capítulo 2, poderá verificar um desvio de água no qual todo o caudal inferior ao admitido pela secção de desvio será desviado por esta (caso do moinho do Martins à frente analisado) ou verificar uma descarga à mesma cota que a do açude, considerando-se o funcionamento desta tipologia semelhante a um esquema de uma central hidroelétrica a fio de água (caso da Azenha de Chaves).

Como foi diversas vezes mencionado, para definir a viabilidade do aproveitamento importa definir os caudais sob o qual o aproveitamento funcionará. O seu modo de funcionamento é calculado através da definição do seu período de turbinação num ano médio que, por estar sujeito à variabilidade natural do caudal, necessita que sejam estabelecidos limites máximos e mínimos de caudais consoante os quais a turbomáquina operará. Os limites de instalação dos caudais são características individuais de cada equipamento, sendo necessária essa informação por parte do fornecedor. Este período define-se como o intervalo de tempo, num ano médio, para o qual o caudal mínimo turbinável é igualado ou excedido.

De maneira a ser possível calcular o tempo de funcionamento do grupo gerador recorre-se à curvas de caudais classificados do período de caudais analisados na estação hidrométrica modelo admitindo que a variabilidade da secção em estudo admite, de forma análoga, o mesmo comportamento.

3.3.1 CURVA DOS CAUDAIS CLASSIFICADOS

A partir da série cronológica dos registos de caudais, é possível obter, em deterioração da importância da ordem cronológica desta, a curva de caudais classificados ordenando a série cronológica em ordem decrescente de caudais.

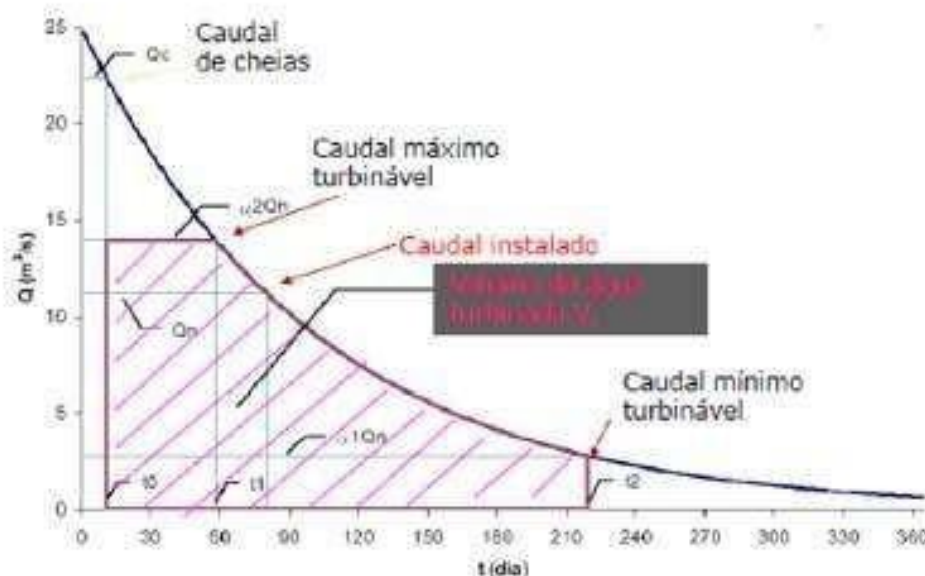


Figura 32- Exemplo de uma curva de caudais classificados e da sua empregabilidade e utilidade.[30] No presente caso de estudo t_0 será considerado como $t=0$ e não como caudal de cheias.

A representatividade desta curva tem elevada importância por representar, no período em análise, o tempo que um certo caudal foi registado ou excedido e desta forma, permite definir o caudal operacional da bomba e o seu tempo de funcionamento ao longo do ano. Para aproveitamentos como os de estudo, sem capacidade de regulação, considera-se que os caudais de valor superiores aos de instalação farão a turbina trabalhar na sua potência instalada máxima, mas o seu excesso é desperdiçado enquanto que, para caudais abaixo do mínimo, a turbina será desligada através de um mecanismo de regulação de carga.

Antes de avançar para o cálculo do potencial energético, é preciso definir as características limitadoras da turbina a empregar pelo que a determinação dos caudais mínimo e máximo é de elevada importância. Estas características dependem do modelo selecionado.

3.4 SELEÇÃO DO GRUPO GERADOR

O grupo gerador é o componente que envolve a maior parcela do custo direto de implementação de um aproveitamento hidroelétrico. A sua seleção deve ser feita considerando a disponibilidade do mercado e, de maneira a analisar a rentabilidade económica de cada tipo de grupo gerador, é necessária uma análise do seu comportamento face às características hidrológicas e técnicas do projeto.

A presente dissertação exemplifica, como é repetidamente referido ao longo do documento, de maneira simplificada, o valor da rentabilidade de um grupo gerador, assumindo um valor modelo o qual deverá ser ajustado consoante as características do fornecedor, neste caso, o grupo gerador com uma bomba a funcionar como turbina conectada à rede através de um motor tradicional que funcionará invertidamente assimilando-se a um gerador assíncrono. Não obstante de que o processo de cálculo deverá ser análogo a qualquer outro grupo gerador selecionado.

3.5 POTENCIAL ENERGÉTICO

Os subcapítulos anteriores definiram os conceitos que permitem a exploração do potencial energético abordada segundo o tema da dissertação.

A potência a instalar assim como a energia produzível são determinadas através de um método que visa simplificar o seu cálculo de maneira a servir apenas de orientação numa fase pre- exploratória. Menospreza a consideração de perdas de carga hidráulica devido a turbulência, à forma da conduta forçada e da influência das suas características no processo de formações de vórtices responsáveis pelo aumento da turbulência, emulsão de ar através da turbina, cavitação, e perdas de carga devido a alterações morfológicas que acontecem ao longo do tempo devido a processos naturais concentrando-se na avaliação preliminar da energia disponível que permita as primeiras estimativas de potência a instalar.

A dificuldade para quantificar o caudal nominal advinda dos vários tipos de turbina existentes e da dependência das suas características do processo de fabrico leva à necessidade de simplificação do processo igualando-se o mesmo ao caudal médio calculado para a secção de estudo como foi mencionado anteriormente.

Assim, considerando a altura de queda constante e tendo definido o caudal nominal, a potência nominal (P_N) a instalar, expressa em Watts é dada pela expressão:

$$P_N = \gamma * Q_N * H_b * \eta \quad (4)$$

Onde:

γ é o peso volúmico da água ($\gamma = 9810 \text{ N/m}^3$) Q_N é o caudal nominal [m^3/s]

H_b é a queda bruta [m]

η é o rendimento global do aproveitamento

O rendimento global do aproveitamento, é dado pela expressão 5 resultado do produto dos rendimentos dos diferentes componentes do grupo gerador, turbina (η_T), gerador (η_G) e uma parcela correspondente a perdas devido a transmissões mecânicas (η_M) [9]. Neste estudo, o rendimento será considerado constante ao longo da gama de caudais turbinados.

$$\eta = \eta_T \times \eta_G \times \eta_M \quad (5)$$

Adicionalmente, o rendimento da turbina para efeitos de aproveitamentos em pequena escala situa-se, conforme exemplos encontrados na literatura, entre os 70 e os 90%, mas considerando a implementação de uma bomba a funcionar invertidamente, o valor de rendimento da turbina será fixado no valor mínimo anterior, 70% acrescido de um fator corretivo associado à variação de rendimento desta à medida que o caudal do aproveitamento se afasta do caudal de projeto, esta variação é observável no seguinte gráfico da figura 33.

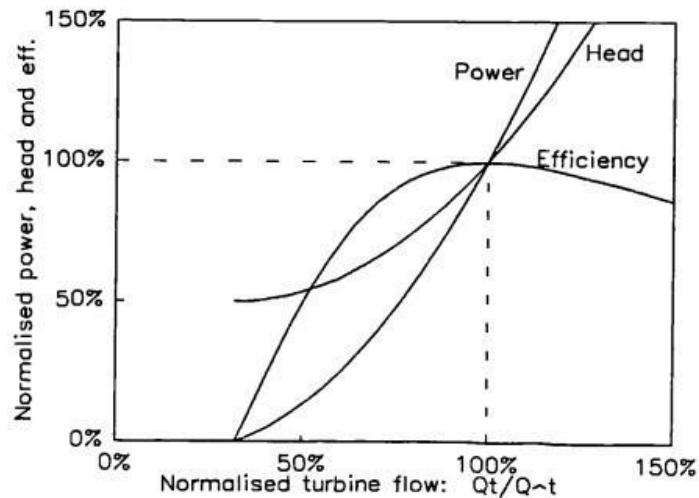


Figura 33-Gráfico com representatividade da variação da eficiência de um sistema Pump as Turbine [31]

Os valores máximos e mínimos do caudal dependem, naturalmente, do tipo de turbina empregue pelo que, o presente estudo será conduzido admitindo que o gráfico acima representa a generalidade do comportamento de bombas a funcionar em sentido inverso. Segundo exemplos encontrados na literatura [31], o sistema *pump as turbine* verifica o seu aproveitamento máximo para Q_E , onde o rendimento é máximo enquanto que para valores inferiores a 50% de Q_E o sistema chega a não produzir energia. É no entanto importante referir que o rendimento observável no gráfico significa que a bomba terá 100% de rendimento, apenas que, 100% do rendimento considerado é mantido para o caudal de projeto e diminui à medida que o este se afasta do mesmo.

A energia pode finalmente ser calculada utilizando a conhecida expressão:

$$E = P(t) * \Delta t \quad (6)$$

Que pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$E = \gamma H_b \eta_c [Q_{Max} t_1 \int_{t_1}^{t_2} Q(t) dt \quad (7)$$

Os termos t_1 e t_2 da expressão (7) não devem ser confundidos com os da figura 32.

A variável t_1 corresponde ao tempo de funcionamento da turbina em regime de caudal máximo e, por sua vez, de t_1 a t_2 corresponde o intervalo de tempo sob o qual a turbina operou entre o máximo e o mínimo caudais.

A equação 6 permite obter a energia total produzida num período de tempo tão grande quanto t_2 , valor para o qual a turbina será desligada (Q_{min}).

3.6 Análise económica simplificada

O presente estudo sugere abordar a análise económica de maneira a considerar apenas os elementos cuja parcela monetária representa a maior parte do investimento, a turbina e o gerador.

O valor estimado do seu custo será baseado com uma análise de preços comumente encontrados na literatura e posteriormente comparado com o valor da energia produzida pelo aproveitamento ao longo do tempo de maneira a se obter um período de retorno espetável do investimento.

Esta abordagem surge no contexto do tema da dissertação, pretende-se simplificar o processo do estudo de pré-viabilidade considerando que as condições infraestruturais do moinho ou azenha não sofrerão qualquer intervenção.

Com efeito, a análise económica aplicada baseia-se no princípio de que um determinado capital se torna mais valioso ao longo do tempo, isto é aumenta que o tempo passa. Este aumento é o interesse ou taxa de juro sobre o capital original relativo ao período considerado. [32]

Representando por i o interesse que um dado capital vence anualmente, e sendo V_a o seu valor no instante presente, designado por valor atual, tem-se o respetivo valor futuro, V_f que é definido no primeiro ano por:

$$V_f = V_a + iV_a = V_a(1 + i) \quad (8)$$

O interesse a considerar é um interesse composto, isto é, a valorização conseguida num determinado período constitui investimento para o período seguinte. Utilizando-se esta noção, V_f é a quantidade de partida para o ano seguinte pelo que final deste período teremos:

$$V_{a2} = V_a(1 + i) + iV_a(1 + i) = V_a(1 + i)^2 \quad (9)$$

Por indução, é possível verificar que ao fim de n anos,

$$V_f = V_a(1 + i)^n \quad (10)$$

A taxa de interesse empregue na avaliação de custos será de 2.5%, ou 0.025 em valor decimal e será aplicada ao valor do investimento inicial. O valor da energia por kwh produzido será considerado constante e igual a 0.11 €/kwh.

Segundo [30] o investimento unitário, isto é o custo por unidade de potência instalada expresso em €/kw em Portugal apresenta uma variabilidade consoante a seguinte tabela que servirá como indicação do valor do investimento a considerar no aproveitamento.

Potência instalada	Mínimo	Máximo	Médio
1 MW - 10 MW	600	2000	1300
500 kW - 1 MW	1300	4500	2900
100 kW - 500 kW	1500	6000	3750
<100 kW	1500	6000	3750

Figura 34 – Tabela de custo mínimo médio e máximo (€) por kw de potência instalada [30]. (Igual a V_a)

Neste sentido, a rentabilidade económica do projeto será verificada quando:

$$V_{E,n} > V_f \quad (11)$$

Sendo $V_{E,n}$ o valor monetário da venda da energia em n anos calculado através de:

$$V_{E,n} = E(kwh/dia) * 365.25(dias\ por\ ano) * 0.11 * (\frac{€}{kwh}) \quad (12)$$

4.

Moinho de rodízios do Martins (Rio Trofa -Covelas)



Figura 35- Moinho de Rodízios do Martins

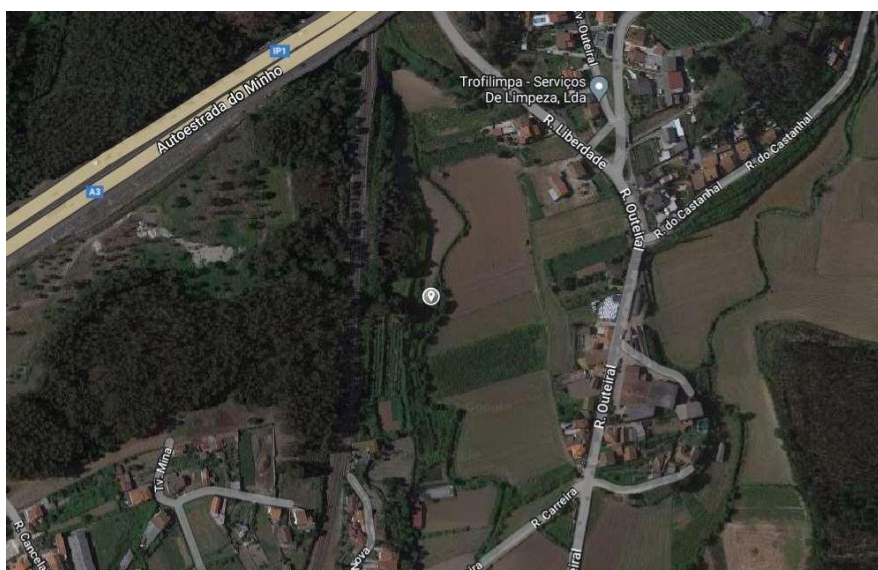


Figura 36 Localização (vista aérea) do moinho de Rodízios do Martins

4.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

O moinho do Martins localiza-se no Lugar do Outeirô em Covelas no rio que assume duas designações distintas, Rio Trofa ou ribeiro de Covelas. Na prática, os populares dividem as nomenclaturas utilizando a primeira para o curso de água aquando da confluência do ribeiro proveniente da Peça Má e a segunda é utilizada a montante da confluência, devendo ser utilizada desde a nascente.

Este moinho laborou até 1970 estando atualmente em desuso [33]. Não foi possível verificar o seu interior, mas a vertente em estudo não implica a consideração dos aspetos físicos da implementação, apenas da avaliação da quantidade de energia produzível na secção da tomada de água.

Como foi explicitado no capítulo 3, não havendo registo de caudais, a avaliação dos caudais disponíveis na secção de estudo depende analogamente dos caudais observados na secção da bacia hidrográfica modelo.

A precariedade da monitorização dos cursos de água, que foi anteriormente referida, dificulta encontrar linhas de água similares com estações de registo e monitorização do seu caudal em rios de pequena dimensão ou ribeiros como é o caso do Rio Trofa. Isto deve-se naturalmente, à acrescida importância dos principais cursos de água em deterioração dos seus afluentes. Com isto, de maneira a contornar a falta de monitorização em rios que pudessem ter características semelhantes à do rio Trofa, foi selecionado um outro rio de segunda ordem (isto é, que desagua num rio de primeira ordem desaguando este no mar), o Rio Beça que será doravante designado de rio modelo neste caso de estudo.

Neste sentido, foi definida a bacia hidrográfica do rio Beça a montante da estação hidrométrica de Cunhas. Apesar das suas diferentes condições fisiológicas, morfológicas e geométricas, as bacias à mesma região hidrográfica favorecendo a fiabilidade da correlação pluviométrica estabelecida.

As áreas das bacias são apresentadas pela tabela 1 e pelas figuras 37 e 38

	Bacia do Ribeiro de Covelas/ Rio Trofa	Bacia Rio Beça
A- Área da Bacia (Km²)	10,883	339,947

Tabela 1- Áreas das bacias hidrográficas do Rio Trofa e do Rio Beça

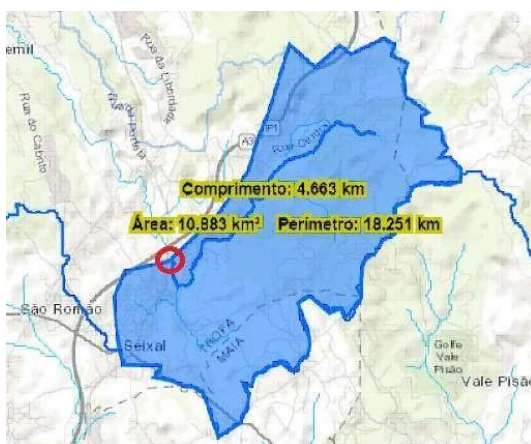


Figura 37-Bacia hidrográfica da secção em estudo no Rio Trofa

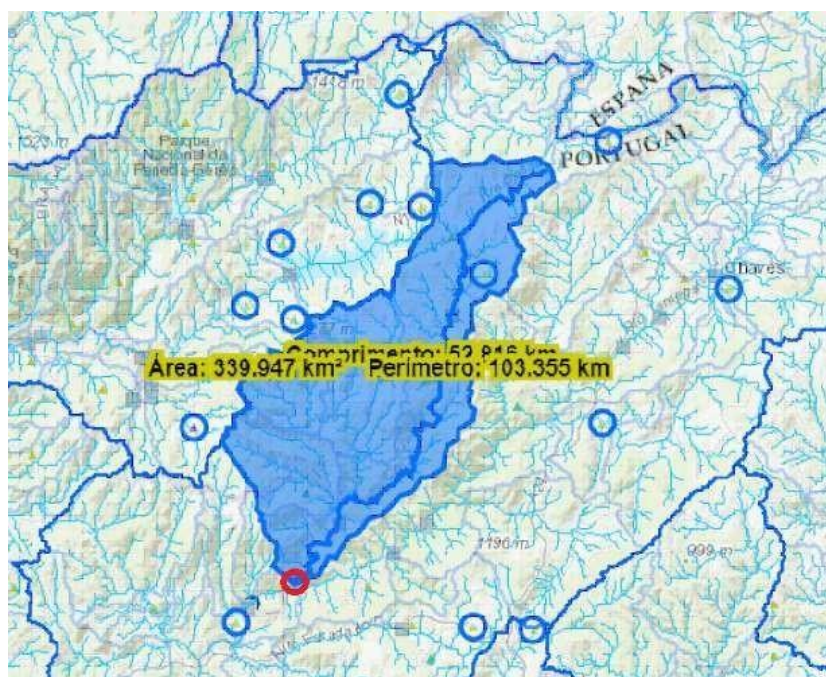


Figura 38- Bacia hidrográfica da secção modelo no Rio Beça

4.2 PRECIPITAÇÃO

4.2.1 SELEÇÃO E RECONSTITUIÇÃO DOS POSTOS DE MONITORIZAÇÃO

A seleção dos postos udométricos que representarão o comportamento da bacia hidrográfica foi baseada em dois princípios, homogeneização de registos e proximidade à bacia hidrográfica. Procedendo-se à aplicação do método descrito no capítulo 3.

O processo seletivo das estações udométricas verificou uma homogeneização dos registos, isto é, uma maior densidade de registos contínuos, no período de 1980 a 2000, pelo que foi o período considerado representativo da variação pluviométrica do presente estudo. De maneira a complementar as falhas nas estações e uma posição estratégica que permita uma boa representatividade da variação pluviométrica foi utilizado o método das duplas acumulações definido em 3.2.1.

A bacia hidrográfica do rio Beça em Cunhas apresenta ao seu dispor um algo variado leque de estações meteorológicas. Procedeu-se à observação e comparação dos seus registos selecionando-se as estações com maior homogeneização no período de 1980-2000. As estações que carecessem de registos neste período foram rejeitadas, procedendo-se à reconstituição daquelas que foram selecionadas para representar a bacia hidrográfica.

Contudo, bacias hidrográficas mais pequenas contêm naturalmente menos postos udométricos em seu redor, pelo que a área de influência de um posto pode ser maior que a própria bacia hidrográfica (figura 39) facilitando o processo pois nestes casos o valor da precipitação da bacia é representado na totalidade pelos registos do posto em questão.

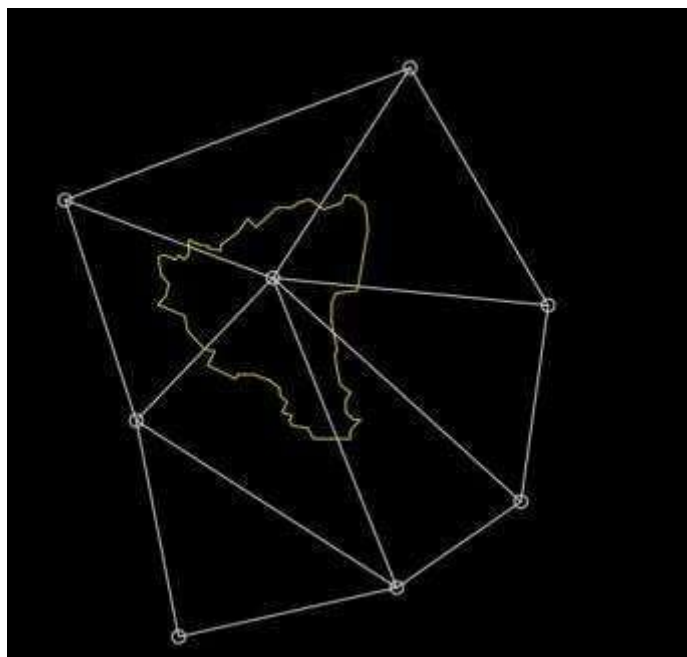


Figura 39- Exemplo de como a área de influência de um posto pode representar toda a bacia hidrográfica

O processo seletivo das estações meteorológicas representativas da bacia hidrográfica do moinhodo Martins encontrou o obstáculo de nenhum dos postos mais próximos verificar um registo completo de dados. Neste sentido, recorreu-se extensivamente ao método das duplasacumulações de maneira a preencher o período meteorológico em análise (1980-2000) nas seguintes estações:

- A estação de Santo Tirso tem dados registados a partir de Agosto de 1978 até Maio de 1982 sem interrupções
- A estação de Água Longa tem dados registados a partir de Abril de 2006 até Janeiro de 2023 com várias interrupções.

Por conseguinte procedeu-se à aplicação do método das duplas acumulações definido no ANEXO A para completar o restante registo.

O rio Beça dispunha, naturalmente devido à sua dimensão, de mais postos meteorológicos em seu redor, e foram seleccionados com base no processo iterativo anteriormente descrito. Foram 4 as estações em que se reconstituíram dados:

Estação Meteorológica	Falha desde	Até
Cavez	01/07/1996	01/08/1998
Cervos	Registo Completo	
Gralhós	Registo Completo	
Lixa do Alvão	01/10/1998	01/12/1999
Salto	Registo Completo	
Soutelinho da Raia	01/07/1996	01/01/2000
Telhado	01/05/1999	01/08/1999

Tabela 2 – Postos udométricos completos e incompletos utilizado

O processo de seleção e reconstituição dos dados pluviométricos de ambas as bacias é observável no ANEXO A. O resultado é observável nas figuras 40 e 41.

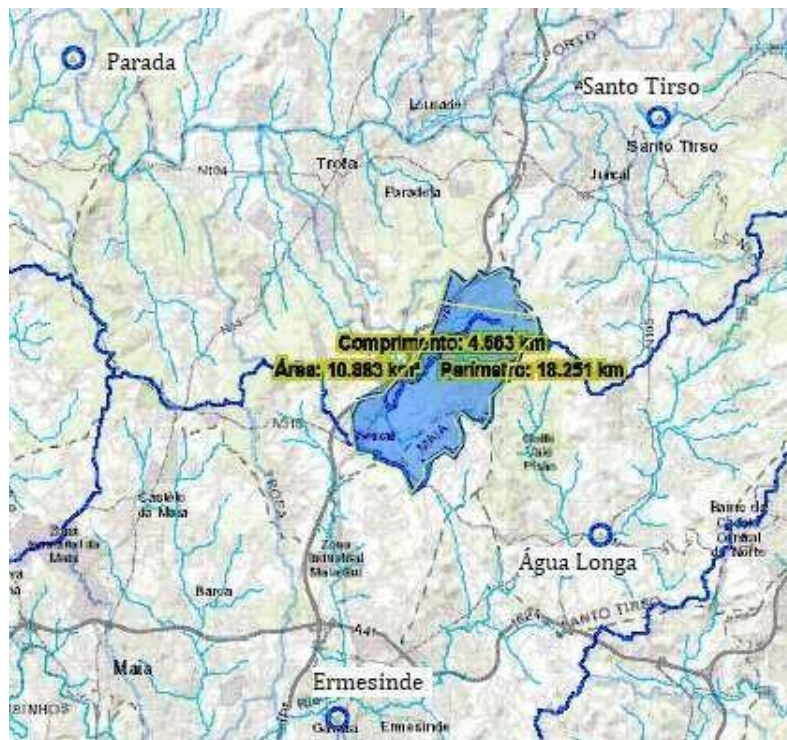


Figura 40- Bacia hidrográfica da Azenha do Martins e respectivos postos udumétricos mais próximos

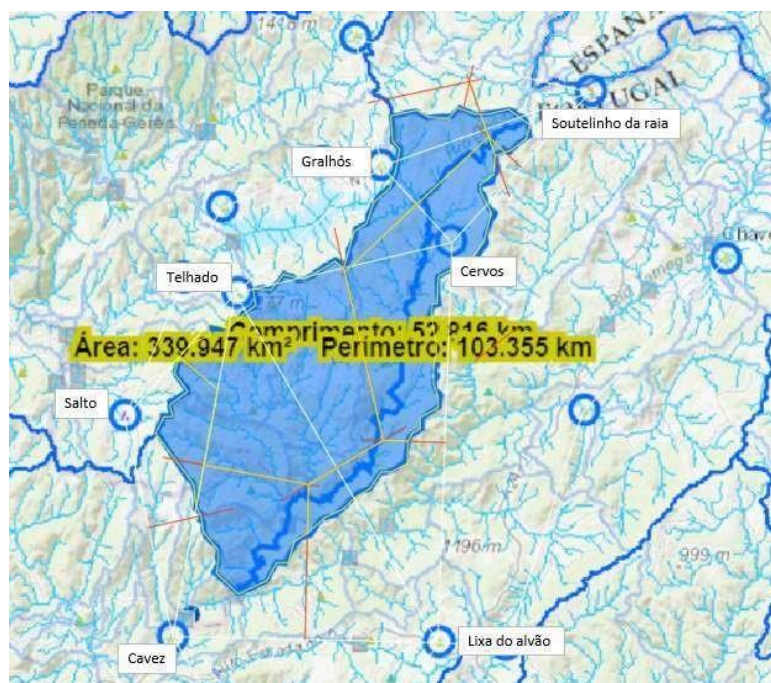


Figura 41- Bacia hidrográfica do Rio Beça em Cunhas e respetivos postos udumétricos selecionados

4.2.2 PRECIPITAÇÃO MÉDIA

O cálculo da precipitação das bacias hidrográfica em estudo e modelo serviu-se do passo anterior que permite a utilização da fórmula 2 (3.2.2).

E, para os registos considerados, agora reconstituídos obtiveram-se os seguintes resultados:

Precipitação média diária	
Bacia do rio em estudo	Bacia do rio modelo
2.22mm/dia	3.68mm/dia

Tabela 3 – Precipitação média anual das bacias em estudo e modelo

4.3 CAUDAL E ENERGIA

4.3.1 CAUDAL

Como foi referido anteriormente, a estimativa dos caudais médios a utilizar é condicionada pela informação disponível sobre a precipitação da bacia hidrográfica e da respetiva área e dos caudais observados na bacia modelo bem como pelo caudal médio registado na secção modelo que, neste caso é igual a 8.05m³/s.

Utilizando a equação 3. É então possível obter o caudal médio diário da secção em estudo:

$$Q_E = 8.05 \frac{10.883}{339.947} \frac{2.22}{2.68} = 0.156m^3/s$$

Este caudal $Q_E = 0,156 \text{ m}^3/\text{s}$ corresponde ao caudal médio da seção do rio na qual está localizado o aproveitamento, será o valor considerado da turbina a instalar por se considerar que todo o caudal inferior a este valor, no local do Moinho do Martins, vir a ser desviado para o aproveitamento.

A variabilidade do caudal é um processo natural inevitável, pelo que é necessário definir a sua variação para, estatisticamente ser possível prever o modo de funcionamento do aproveitamento. Como foi explicitado no capítulo 3.

Para tal utiliza-se a curva de caudais classificados, que se assemelha à curva de caudais classificados de todo o período em estudo (20 anos) do rio modelo por se considerar que ambas seguem o mesmo padrão natural.

A curva de caudais classificados no período em análise do rio modelo é dada pela figura 42:

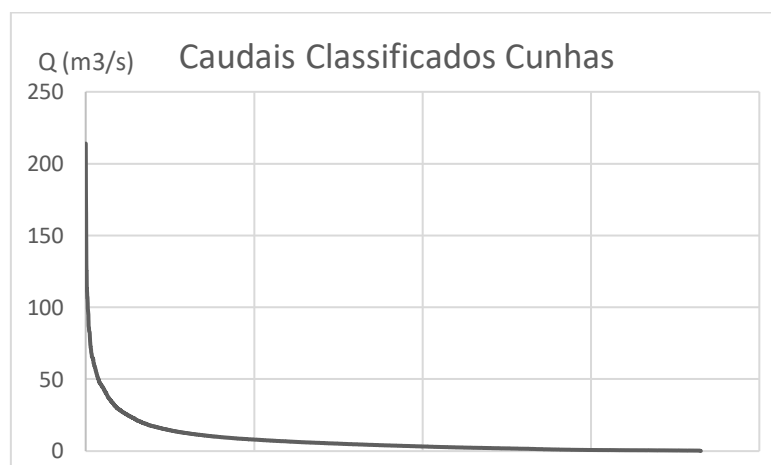


Figura 42- Curva de Caudais classificados rio Beça

De maneira análoga, admite-se que a curva de caudais classificados correspondente à bacia em estudo tem o mesmo padrão de variabilidade e, por isso, o seu formato é o mesmo. Diferem no entanto, na sua grandeza absoluta traduzida pela diferença entre os caudais da bacia modelo e da bacia em estudo observável na comparação das curvas modelo e a calculada.

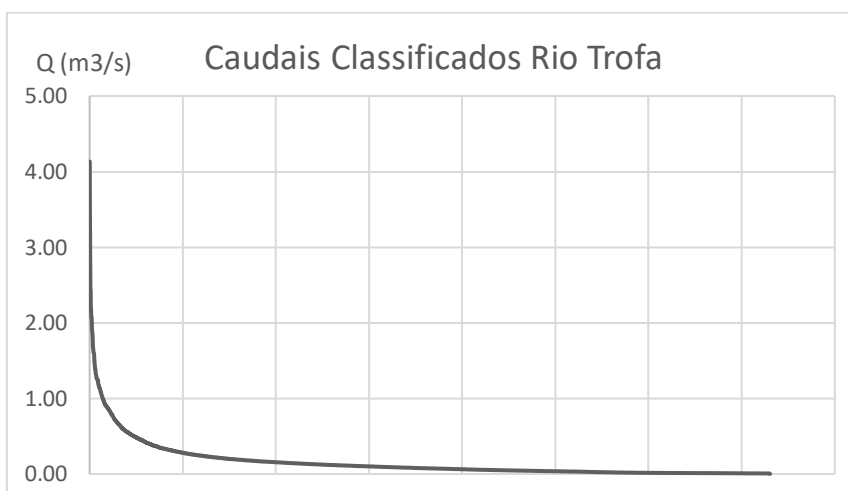


Figura 43- Curva de caudais classificados Rio Trofa

Ora, como explicitado no capítulo anterior, a análise desta curva permite calcular o volume turbinado pelo aproveitamento para um dado ano médio considerado. Para isso é necessário definir os valores máximo e mínimo de caudal a que a turbina estará sujeita durante o seu período de funcionamento que, por sua vez, são comumente expressos através de uma relação com o caudal instalado.

4.3.2 SELEÇÃO DO GRUPO GERADOR

Como foi mencionado anteriormente, de maneira a generalizar o processo, o presente estudo aplicou um sistema turbina-gerador com uma bomba em funcionamento invertido conectada a um motor tradicional que funcionará invertidamente assemelhando-se a um gerador de indução.

A partir do gráfico da figura 33 é possível observar a variação do rendimento de bombas a funcionar como turbina proposto por [31].

Os valores Q_{min} e Q_{max} a adotar foram, portanto Q_e e $50\%Q_e$, $Q_{max}=156l/s$ e $Q_{min}=78l/s$.

A tabela seguinte indica as percentagens de tempo da curva dos caudais classificados na secção em estudo:

% de Ocorrência	Q_E (m ³ /s)
10	0.359
20	0.205
30	0.142
40	0.103
50	0.074
60	0.050
70	0.034
80	0.017
90	0.011
100	0.002

Tabela 4 – Probabilidade de ocorrência dos caudais classificados

Ora, é possível observar que Q_E é verificado entre 20 e 30% das vezes, mais precisamente, é verificado 27% enquanto que o Q_{min} é verificado entre 40 a 50% das vezes, concretamente, 48%. Por causa da variação de rendimento que a turbina sofre quando o caudal varia entre o máximo emínimo, admite-se, por subestimavaria do gráfico da figura 33 (Capítulo 3.5), que o rendimento da turbina neste intervalo será constante e igual a 50% do rendimento da turbina de maneira a simplificar o processo de cálculo.

Deste modo e considerando como rendimento da bomba a funcionar como turbina 70%, o rendimento fixado foi calculado através da seguinte interpolação:

$$\eta_T = \frac{\%Q_E}{\%Funcionamento} \eta_t + \frac{\%Q_{min}}{\%Funcionamento} (\eta_t * 0.5) \quad (13)$$

$$\eta_T = \frac{27 * 100}{48} * 0.7 + \frac{21 * 100}{48} * (0.7 * 0.5) = 54,69$$

Obtém-se assim um rendimento global de:

$$\eta_C = 0.5469 * 0.95 * 0.99 = 0.5143$$

4.3.3 ENERGIA

A potência a instalar é calculada através da expressão 3 (capítulo 3.5), resultando em:

$$P_n = 9810 * 0.5143 * 1.5 * 156 * 10^{-3} = 1,2kW \text{ de potência a instalar.}$$

A energia produzível é nada mais do que a variação de potência fornecida à rede ao longo do tempo traduzida pela conhecida formula (5).

Esta equação pode ser reescrita e calculada como foi explicitado em 3.5, equação (6).

O cálculo da equação anterior é exemplificado no ANEXO B e os resultados obtidos para o presente caso de estudo foram: 12,05kwh produzidos em média por dia.

4.4 ANÁLISE ECONÓMICA SIMPLIFICADA

Como é explicitado no capítulo 3.6, a análise económica dependerá dos valores disponibilizados e observados na literatura pelo que o valores aqui considerados podem sofrer alterações significativas.

Ora, a potência instalada no aproveitamento do caso de estudo é muitíssimo inferior a 100kw pelo que os valores do investimento inicial considerados serão:

mínimo = 1500€/kw

médio = 3750€/kw

máximo = 6000€/kw

Com a energia anteriormente obtida, deduz-se a rentabilidade anual económica do projeto comosendo:

$$V_{E,n} = 12.05 * 365.25 * 0.11 = 484\text{€/ano.}$$

Aplicando a fórmula da taxa de interesse aos valores estipulados pela tabela (valores) obtemos as seguintes fórmulas de calculo:

Mínimo	Médio	Máximo
$Vf=1500*(1+0.025)^n$	$Vf=3750*(1+0.025)^n$	$Vf=6000*(1+0.025)^n$

Tabela 5

O número de anos n que leva o valor monetário gerado pela comercialização energética ultrapassa o valor composto final do investimento quando:

$$484 * n > Vf$$

Obtendo-se para cada valor estipulado os resultados:

Mínimo	Médio	Máximo
4 anos	10 anos	20 anos

Tabela 6- Valores de n, número de anos de tempo de retorno

Significando que o período de retorno, para a quantidade de energia estimada neste aproveitamento terá um tempo de retorno do investimento de 4 anos se se verificar um investimento inicial de 1500€, 10 anos se o investimento inicial for de 3750 e 20 anos caso o investimento seja de 60.

5.

Azenha de Chaves (Rio Ave – Fradelos)



Figura 44 – Azenha de Chaves, Fradelos [35]

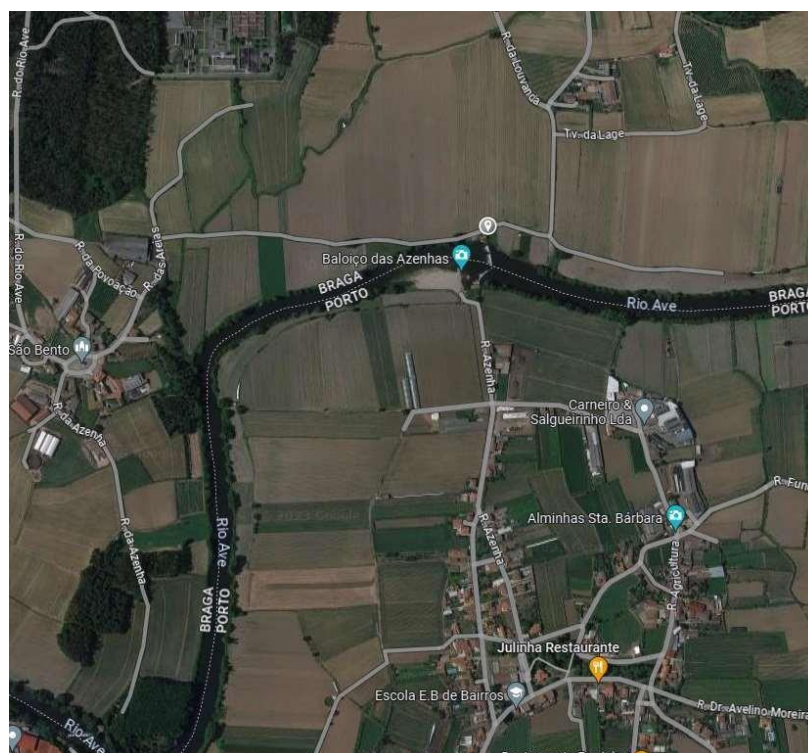


Figura 45- Localização (vista aérea) da Azenha de Chaves

5.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

A Azenha de Chaves está implantada na margem direita do rio Ave inserida numa envolvente rural. Existe referência à Azenha de Chaves numa certidão datada de 1793 e terá sido ampliada em 1934 [34]. A azenha possui 3 entradas de água paralelas pelo que a sua utilização conjunta deve ser abordada num estudo que considere a possibilidade de alterações na infraestrutura da azenha. No presente documento será estudada a possibilidade de apenas 1 grupo gerador funcionar, desaproveitando as restantes entradas de água.

O estudo hidrográfico da azenha de Chaves é, de forma análoga à do moinho do Martins, essencial para estimar o caudal disponível e, por conseguinte, analisar a sua viabilidade técnica e económica. No entanto, o Rio Ave está convenientemente mais monitorizado que o rio Trofa dispensando a correlação com uma bacia de um rio modelo sendo possível correlacionar bacias hidrográficas de secções consecutivas do mesmo rio. A bacia modelo, necessária para correlacionar os caudais da secção da bacia modelo com as em estudo, será então a da secção da Açude de Tougues que contém uma estação de registo hidrométrica.

O método utilizado para correlacionar os caudais é o mesmo. Correlaciona-se o caudal da secção em estudo com o da modelo através da relação entre as suas áreas e precipitações médias das respetivas bacias utilizando-se a equação (3).

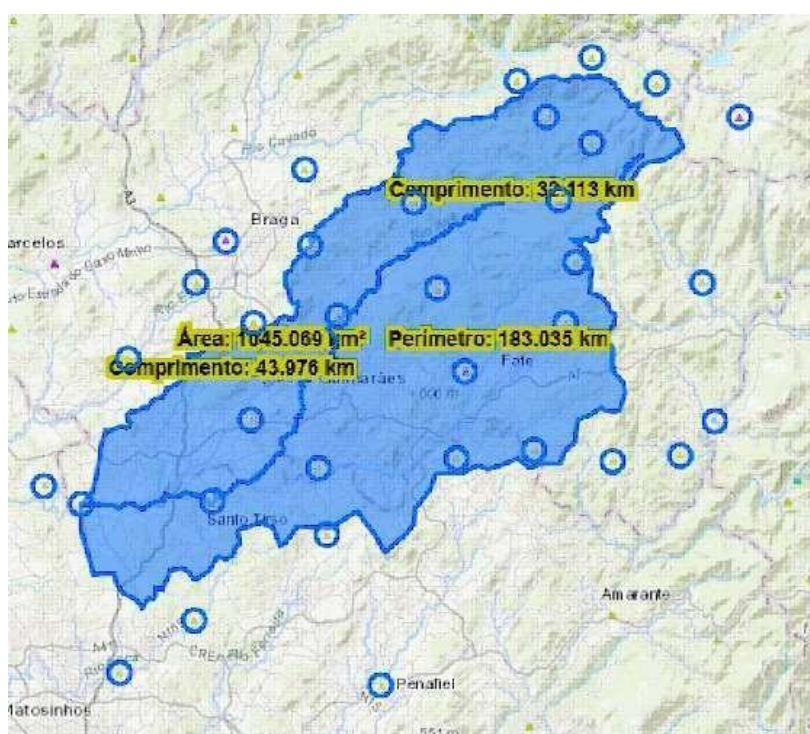


Figura 46- Bacia Hidrográfica do Rio Ave na secção da Azenha de Chaves

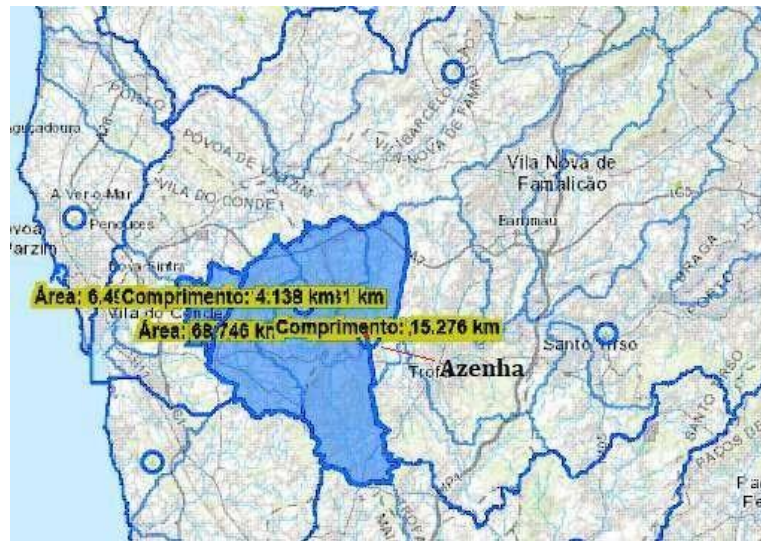


Figura 47- Acréscimo à bacia hidrográfica do Ave da figura 44, correspondente à secção do Açude de Tougues

As áreas das bacias são apresentadas pela tabela 7

	Bacia Azenha de Chaves	Bacia Açude de Tougues
Área da bacia (Km2)	1045.069	1120,309

Tabela 7- Áreas das bacias hidrográficas em estudo (Chaves) e modelo (Tougues)

Determinou-se que ao acréscimo da bacia hidrográfica corresponde à extensão da mesma ao longo do trecho da Azenha de Chaves até à secção modelo mais a jusante, apenas fazia corresponder uma estação meteorológica que cuja área de influência determinada pelo método de thiesen cobretoda a área desta extensão como é observável na figura 48.

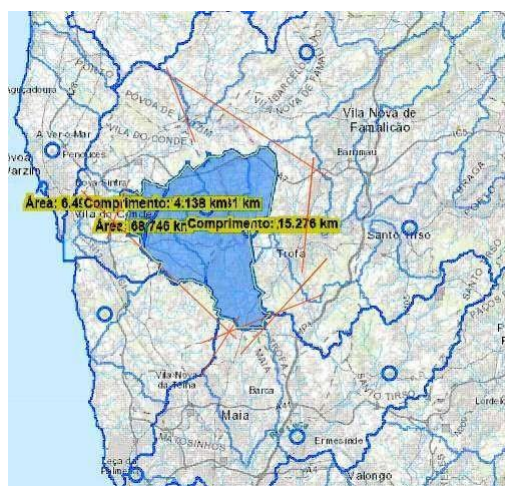


Figura 48 – Determinação da área de influência do posto de Parada sobre a bacia do açude do Tougues

Este posto (PARADA) constitui os dados completos no período em análise portanto, o cálculo da precipitação média em ambas as bacias hidrográficas fica dependente da reconstituição dos postos selecionados na bacia a montante que é a da azenha.

5.2. PRECIPITAÇÃO

5.2.1. SELEÇÃO E RECONSTITUIÇÃO DOS POSTOS DE MONITORIZAÇÃO

Analogamente ao processo conduzido para o caso de estudo anterior, o processo iterativo inicial verificou uma homogeneização dos registos no mesmo período, de 1980 a 2000. Foram selecionadas 21 estações meteorológicas com uma boa representatividade geográfica da região e reconstituídos os dados de 9 estações udométricas segundo as seguintes tabelas:

Estação meteorológica	Dados reconstituídos de:	Até:	Porcentagem de representatividade da bacia
Arada	Série Completa		5.25%
Brancelhe	1 falha isolada a 01/07/1999 não reconstituída		7.35%
Castelões	Série Completa		6.72%
Escudeiros	01/01/1980	01/04/1980	5.00%
Fafe	Série Completa		7.88%
Fontela	01/01/1980	01/05/1980	8.58%
Gontim	01/01/1980	01/05/1980	6.22%
Lamoso	Série Completa		2.70%
Lordelo	01/01/1980	01/04/1980	7.20%
Loureiro	01/01/1980	01/05/1980	4.06%
Moreira do Rei	01/01/1980	01/05/1980	6.53%
Parada	Série Completa		3.03%
Penede	Série Completa		1.08%
Povoa do Lanhoso	01/01/1980	01/04/1980	8.98%
Salamonde	Série Completa		0.75%
Salto	Série Completa		0.01%
Sameiro	Série Completa		4.50%
Santo Tirso	01/06/1982	01/01/2000	8.98%
Viatodos	Série Completa		1.77%
Zebral	Série Completa		2.22%
Água Longa	01/01/1980	01/01/2000	2.05%

Tabela 8 – Postos udométricos utilizados no método de Thiessen para a bacia da Azenha de Chaves

Estação meteorológica	Dados reconstituídos de:	Até:	Percentagem de representatividade da bacia
Arada	Série Completa		4.89%
Brancelhe	1 falha isolada a 01/07/1999 não reconstituída		6.86%
Castelões	Série Completa		6.27%
Escudeiros	01/01/1980	01/04/1980	4.66%
Fafe	Série Completa		7.35%
Fontela	01/01/1980	01/05/1980	8.00%
Gontim	01/01/1980	01/05/1980	5.80%
Lamoso	Série Completa		2.52%
Lordelo	01/01/1980	01/04/1980	6.72%
Loureiro	01/01/1980	01/05/1980	3.79%
Moreira do Rei	01/01/1980	01/05/1980	6.09%
Parada	Série Completa		9.55%
Penede	Série Completa		1.00%
Povoa do Lanhoso	01/01/1980	01/04/1980	7.58%
Salamonde	Série Completa		0.70%
Salto	Série Completa		0.01%
Sameiro	Série Completa		4.20%
Santo Tirso	01/06/1982	01/01/2000	8.38%
Viatodos	Série Completa		1.65%
Zebral	Série Completa		2.07%
Água Longa	01/01/1980	01/01/2000	1.91%

Tabela 3 – Postos udométricos utilizados no método de Thiessen para a bacia do Açude de Tougues

O processo de seleção e reconstituição dos dados pluviométricos de ambas as bacias é idêntico ao observável no ANEXO A, resultando nos seguintes mapas:



Figura 49- Bacias hidrográficas da ponte do ave (montante) e do açude de tougues (jusante)

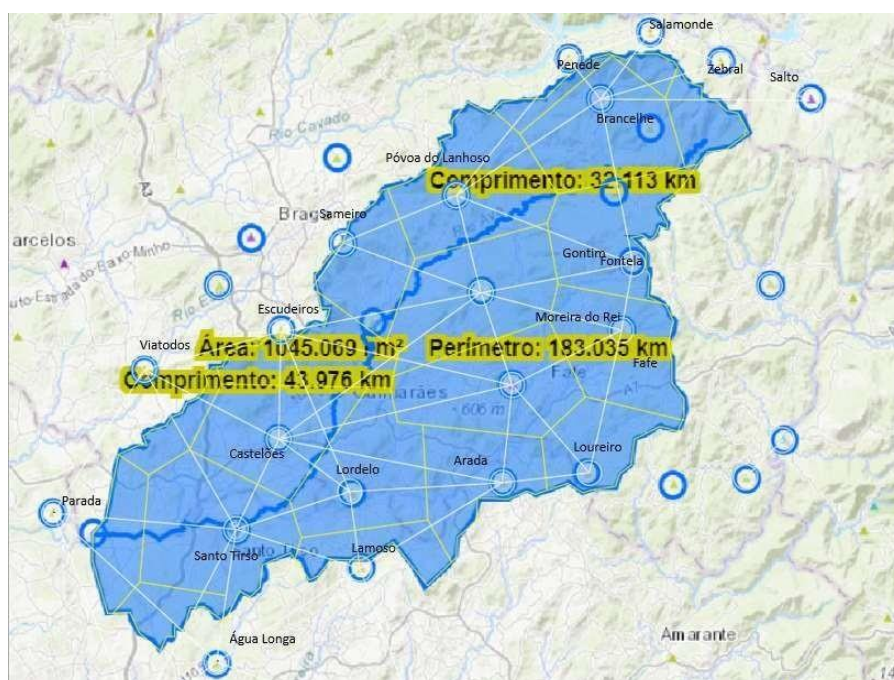


Figura 50-Divisão pelos polígonos de Thiessen da bacia hidrográfica da Azenha de Chaves.

5.2.2. PRECIPITAÇÃO MÉDIA

O cálculo da precipitação média das bacias seguiu as mesmas orientações que as do caso de estudo anterior explicitadas no Anexo A tendo sido obtidos os valores da tabela 10:

Precipitação média diária

Bacia do rio em estudo	Bacia do rio modelo
4.34mm/dia	4.30mm/dia

Tabela 10 - Precipitação média anual das bacias em estudo e modelo

5.3. CAUDAL E ENERGIA

5.3.1. CAUDAL

O estudo do caudal na azenha difere do estudo do caudal do Martins no sentido em que foi necessário recorrer-se à estimativa dos caudais em cada secção de aproveitamento da azenha (que possui 3 desvios de canal paralelos entre si). Deste modo, propôs-se que o caudal a considerar em cada secção fosse função da sua percentagem de comprimento na secção transversal do açude. Isto é, tendo o açude 83,47m (figura abaixo) cada secção terá $(L/83.47)$ vezes o caudal da secção estudada.

O caudal na secção do açude é dado pela expressão:

$$Q_E = 24.055 * \frac{1045.069}{1120,309} * \frac{1586}{1570}$$

O caudal em cada secção do aproveitamento é, neste contexto, dado pela expressão 13:

$$Q_E = 24.055 * \frac{1045.069}{1120.309} * \frac{1586}{1570} * \frac{L}{83.47} \quad (13)$$

Secção 1	Secção2	Secção3
L=0.7m	L=1.4m	L=0.8m
$Q_{N,s1}=0.190\text{m}^3/\text{s}$	$Q_{N,s2}=0.380\text{m}^3/\text{s}$	$Q_{N,s3}=0.22\text{m}^3/\text{s}$

Tabela 4- Largura de cada secção na azenha (medidas no local)



Figura 51- Vista aérea e medição do açude da Azenha de Chaves (margem superior)

As curvas de caudais classificados deste caso de estudo estão representadas no ANEXO B.

5.4. SELEÇÃO DO GRUPO GERADOR

Da mesma maneira que no caso de estudo anterior, o grupo eletromotor selecionado foi uma bomba a funcionar como turbina e um gerador assíncrono. O mesmo método será aplicado às 3 secções disponíveis neste aproveitamento considerando-as independentes umas das outras.

Frequências classificadas dos caudais			
Secção:	1	2	3
100	0	0	0
90	0,021871	0,043743	0,024996
80	0,039116	0,078233	0,044705
70	0,063843	0,127685	0,072963
60	0,089205	0,178409	0,101948
50	0,122306	0,244612	0,139778
40	0,16518	0,33036	0,188777
30	0,218003	0,436006	0,249146

20	0,301642	0,603284	0,344734
10	0,451668	0,903337	0,516192
0	2,811697	5,623393	3,213368

Tabela 12- probabilidade de ocorrência dos caudais classificados

Podemos observar que os caudais máximos e mínimos das secções correspondem às seguintes percentagens de caudais igualados ou excedidos:

Secção	Qmin igualado ou excedido 35%	Qmax igualado ou excedido1 57%
2	35%	57%
3	35%	57%

Tabela 13- percentagens necessárias ao calculo do rendimento

O rendimento será então comum às 3 secções:

$$\eta_T = \frac{\%Qe*100}{\%funcionamento} * \eta_t + \frac{\%Qmin*100}{\%funcionamento} * (\eta_t * 0.5) \quad (13)$$

$$\eta_T = \frac{35*100}{57} * 0.7 + \frac{22*100}{57} * (0.7 * 0.5) = 56.49$$

Obtém-se assim um rendimento global de:

$$\eta_c = 0.5649 \times 0.95 \times 0.99 = 0.5313$$

5.5. ENERGIA

A potência a instalar é calculada através da expressão 3 (capítulo 3.5). Resultando para cada secção:

$$Pn1 = 9810 * 0.5313 * 1.5 * 190 * 10^{-3} = 1,48kW$$

$$Pn2 = 9810 * 0.5313 * 1.5 * 380 * 10^{-3} = 2,97kW$$

$$Pn3 = 9810 * 0.5313 * 1.5 * 217 * 10^{-3} = 1,70kW$$

A energia produzível é nada mais do que a variação de potência fornecida à rede ao longo do tempo traduzida pela conhecida formula (6), capítulo 3.5.

Esta equação pode ser reescrita analogamente ao caso de estudo anterior, e o seu cálculo é exemplificado no ANEXO B tendo-se obtido os seguintes resultados:

	Secção 1	Secção 2	Secção 3
kwh/dia	18,39	36,77	21,01245

Tabela 14- Resultados médios de energia produzível por dia em ano médio.

5.6. ANÁLISE ECONÓMICA SIMPLIFICADA

O mesmo processo do anterior caso de estudo é também aplicado neste: mínimo = 1500€/kw

médio = 3750€/kw máximo = 6000€/kw

Com a energia anteriormente obtida, deduz-se a rentabilidade anual económica do projeto comosendo:

$$V_{E,n} = 18.39 * 365.25 * 0.11 = 738€/ano.$$

$$V_{E,n} = 36.77 * 365.25 * 0.11 = 1477€/ano.$$

$$V_{E,n} = 21.01 * 365.25 * 0.11 = 844€/ano.$$

As fórmulas de cálculo para os valores de empreendimento mínimo, médio e máximo são iguais às empregues no caso de estudo anterior, na Tabela 5.

As 3 secções estão implementadas em paralelo, no entanto, por motivos de exequibilidade técnica do processo de implementação do grupo gerador, será considerado que apenas se pode instalar uma turbina de cada vez e verificar-se-á o período de retorno fosse escolhida qualquer uma das secções.

O número de anos n que leva o valor monetário gerado pela comercialização energética ultrapassa o valor composto final do investimento quando:

$$738 * n > Vf$$

$$1477 * n > Vf$$

$$844 * n > Vf$$

Obtendo-se para cada valor estipulado os seguintes tempos de retorno resultados:

Secção	Mínimo	Médio	Máximo
1	2 anos	6 anos	11 anos
2	1 ano	3 anos	5 anos
3	2 anos	5 anos	9 anos

Tabela 15 – Valores de n , número de anos de tempo de retorno

6.

CONCLUSÃO

Esta secção encerra a dissertação, proporcionando uma reflexão final sobre os objetivos alcançados e as contribuições para o campo de estudo

O método empregue na estimativa do potencial energético e consequentemente financeiro permitiu ter uma ideia daquilo que seria a quantidade de energia disponível no local de implementação assentando-se em correlações e métodos bem estabelecidos na literatura.

Os resultados obtidos demonstram que a viabilidade económica é distinta nos dois casos de estudo, no moinho de rodízios do Rio Trofa, a inferior disponibilidade do caudal revela condicionar o seu rendimento e, segundo as previsões efetuadas, o tempo de retorno de investimento variará entre 4 e 20 anos.

No caso da azenha, como foi referido anteriormente esta possui 3 entradas de água paralelas entresi e a sua utilização conjunta não foi abordada neste documento. Apesar desta limitação, a Azenha revela resultados impressionantes apresentando, na mais produtiva das suas secções, tempos de retorno variáveis entre 1 e 5 anos.

Para efeitos de pesquisa futura, é possível adaptar o modelo de análise aqui empregue para diferentes cenários e equipamentos, de maneira a facilitar o complexo processo de decisão que por vezes surge na escolha do local a implementar. Apesar de ser um processo que visa simplificar a obtenção de uma estimativa inicial do custo do empreendimento, a simplicidade de execução permite a rápida comparação entre os locais considerados.

Relativamente à aplicação prática, não sendo conhecidos os caudais da zona de implementação, um desafio passa pela medição desses caudais no local e comparar com a metodologia apresentada neste trabalho e adapta-la em função do erro associado observado.

Por fim, resta acrescentar que, apesar de conduzido o estudo nessa direção, a produção de energia não serve apenas para a sua comercialização podendo, esta ser utilizada para as mais diversas funções e contribuir para o seu desenvolvimento sustentável.

Referências

- [1] [HIDROGERAÇÃO, Pinto F., Piqueiro F., FEUP] Manuel De Oliveira, F., Co-Orientador, P., Jorge, E., Teixeira, J., & Gonçalves, C. (n.d.). Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL-ESPECIALIZAÇÃO EM HIDRÁULICA. <http://www.fe.up.pt>
- [2] Quaranta, E., Bódis, K., Kasiulis, E. et al. Is There a Residual and Hidden Potential for Small and Micro Hydropower in Europe? A Screening-Level Regional Assessment. *Water Resour Manage* 36, 1745–1762 (2022). <https://doi.org/10.1007/s11269-022-03084-6>
- [3] Nebiyu Bogale Mereke, 2015, Highly Efficient Cross flow Turbine Runner Design for Upgrading Traditional Water Mill in to Micro Hydro Power Plant (A case Study for Kersa- Minko Village), INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCH & TECHNOLOGY (IJERT) Volume 04, Issue 12 (December 2015),
- [4](https://snirh.apambiente.pt/junior/trabalhos_escolas/flavioferreiracinfaes/AnaAmanda_AnaCoelho/moinhos%20d%20%C3%A1gua.htm)
- [5] [Wittenberg, H., & Rhode, C. (2022). Levadas e moinhos de água na ilha da Madeira – Utilização da água com fins múltiplos - gestão histórica. *Revista Recursos Hídricos*, 43(1), 9– 21. <https://doi.org/10.5894/rh43n1-cti1>]
- [6] [Da, F., & Costa, S. (n.d.). O papel dos moinhos no aproveitamento hidráulico das águas públicas do rio Ave Um contributo na perspectiva do património ligado à água Comunicação apresentada no VII CIER-Cultura, Inovação e Território.]
- [7] [Franco, W., Ferraresi, C., & Revelli, R. (2019). Functional analysis of piedmont (Italy) ancient water mills aimed at their recovery or reconversion. *Machines*, 7(2). <https://doi.org/10.3390/machines7020032>]
- [8][Metodologia de projecto de sistemas de produção de electricidade descentralizada baseados em Energia Hídrica, João Pedro R., António Machado e Moura, FEUP] *relatorio_final_29_07_08_encadernado_prod_energia_descentralizada_hidrica*. (n.d.).
- [9] Francisco Manuel Oliveira Piqueiro. (1991). Efeito da regulação e da forma e dimensões da câmara de carga na produtibilidade energética de um pequeno aproveitamento hidroelétrico.
- [10] Quaranta, E., Bahreini, A., Riasi, A., & Revelli, R. (2022). The Very Low Head Turbine for hydropower generation in existing hydraulic infrastructures: State of the art and future challenges. In *Sustainable Energy Technologies and Assessments* (Vol. 51). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101924>
- [11] <http://www.engineering.lancs.ac.uk/lureg/nwhrm/engineering/index.php?#tab>, acessado em Junho de 2023

- [12] Jain, S. v., & Patel, R. N. (2014). Investigations on pump running in turbine mode: A review of the state-of-the-art. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 30, pp. 841– 868). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.11.030>
- [13] Quaranta, E. (2018). Stream water wheels as renewable energy supply in flowing water: Theoretical considerations, performance assessment and design recommendations. In *Energy for Sustainable Development* (Vol. 45, pp. 96–109). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2018.05.002>
- [14] Waters, S., & Aggidis, G. A. (2015). Over 2000 years in review: Revival of the Archimedes Screw from Pump to Turbine. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 51, pp. 497–505). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.028>
- [15] Waters, S., & Aggidis, G. (2016). Tidal range technologies and state of the art in review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 59, pp. 514–529). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.347>
- [16]
- [17] Nuernbergk, D. M., & Rorres, C. (2013). Analytical Model for Water Inflow of an Archimedes Screw Used in Hydropower Generation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(2), 213–220. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)hy.1943-7900.0000661](https://doi.org/10.1061/(asce)hy.1943-7900.0000661)
- [18] <http://www.engineering.lancs.ac.uk/lureg/nwhrm/engineering/index.php?#tab> acessado em Junho de 2023
- [19] DIRETIVA (UE) 2018/2001 DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO de 11 de dezembro de 2018 relativa à promoção da utilização de energia de fontes renováveis (reformulação) (Texto relevante para efeitos do EEE)
- [20] <https://op.europa.eu/webpub/eca/lr-energy-and-climate/pt/> acessado em Junho de 2023
- [21] https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/images/d/dc/Share_of_energy_from_renewable_sources_in_gross_electricity_consumption%2C_2004-2021_%28%25%29v4.png
- [21] <https://www.apren.pt/pt/energias-renovaveis/producao> acessado em Junho de 2023
- [22] [\[www.dgeg.gov.pt.\]](http://www.dgeg.gov.pt) acessado em Junho de 2023
- [23] <https://dre.tretas.org/dre/272845/resolucao-do-conselho-de-ministros-29-2010-de-15-de-abril> acessado em Junho de 2023
- [24] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:02000L0060-20141120&from=GA> acessado em Junho de 2023
- [25] https://www.psd.pt/sites/default/files/2022-11/PJRC%20PSD_Um%20PJRC%20realista%20reformista%20e%20diferenciador.pdf acessado em Junho de 2023
- [26] <https://dre.tretas.org/dre/598549/decreto-lei-49-2015-de-10-de-abril> acessado em Junho de 2023

- [27] Textos de apoio
https://sigarra.up.pt/feup/pt/ucurr_geral.ficha_uc_view?pv_ocorrencia_id=455273 acessado em Junho de 2023
- [28] <https://snirh.apambiente.pt/index.php?idMain=2&idItem=1> acessado em Junho de 2023
- [29] Kougias, I., Aggidis, G., Avellan, F., Deniz, S., Lundin, U., Moro, A., Muntean, S., Novara, D., Pérez-Díaz, J. I., Quaranta, E., Schild, P., & Theodossiou, N. (2019). Analysis of emerging technologies in the hydropower sector. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 113). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109257>
- [30] Pereira Nogueira Gomez, D., & Hélder Filipe Duarte Leite, D. (2016). FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO Dimensionamento de uma Pequena Hídrica por via do Aproveitamento e Transformação de Moinhos.
- [31] Alatorre-Frenk, C., Ml, A., & Karin, A. (1994). *COST MINIMISATION IN MICRO-HYDRO SYSTEMS USING PUMPS-AS-TURBINES*.
- [32] https://sigarra.up.pt/feup/pt/ucurr_geral.ficha_uc_view?pv_ocorrencia_id=455278 acessado em Junho de 2023
- [33] Associação para a Defesa do Ambiente e Património na Região da Trofa (2006), *Cadernos Culturais*, município da Trofa
- [34] Rogério Bruno Guimarães Matos (2011), *Património á prova de água, apontamentos para a salvaguarda das azenhas & açudes nas margens do Rio Ave*, Vila Nova de Famalicão/Trofa.
- [35] <https://famalicaoid.org/inweb/multimediaNET/FAMALICAO/2021/04/web/169340.jpg> acessado em Junho de 2023

Anexo A

O presente anexo apresenta o procedimento de reconstituição dos postos udométricos representativos das bacias hidrográficas do Rio Trofa e do Rio Beça bem como a respetiva construção do método dos polígonos de Thiessen. O mesmo procedimento deve ser utilizado na reconstituição de dados e divisão pelos polígonos de Thiessen noutros casos de estudo semelhantes.

Rio Trofa:

Método de Thiessen

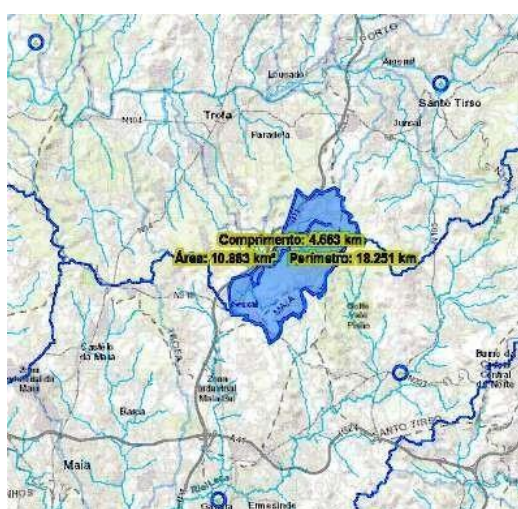


Figura 50

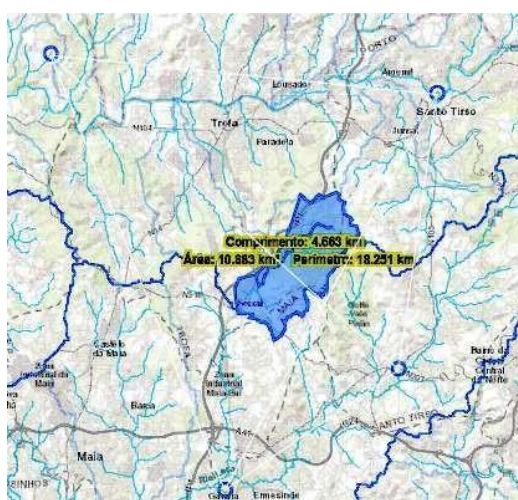


Figura 51

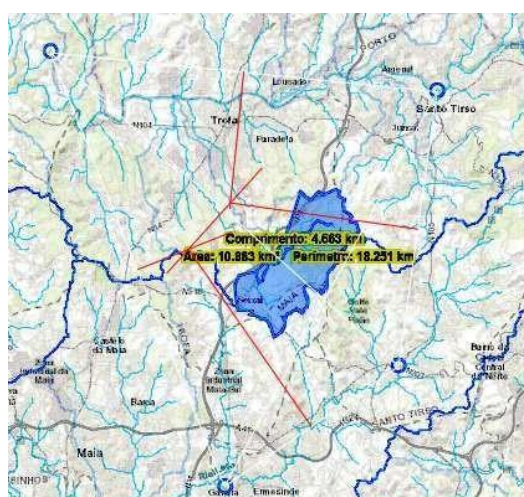


Figura 52

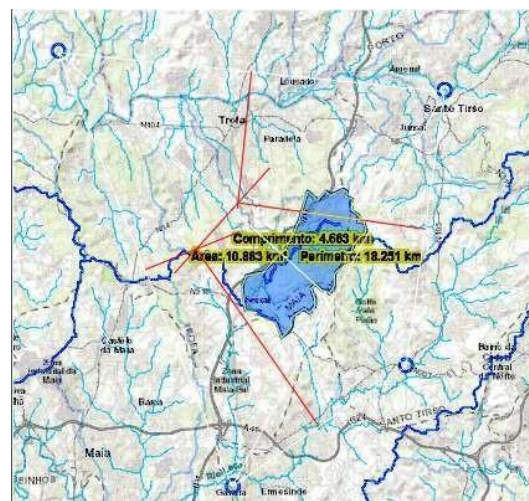


Figura 53

Figuras 49-52 Fases de construção dos polígonos de Thiessen da bacia hidrográfica do moinho do Martins.

Áreas de influência dos postos udométricos da bacia do moinho do Martins

Posto udométrico	Area de representatividade (Km2)
Santo Tirso	1.34589
Agua Longa	9.53711
Total	10.883

Tabela 16- áreas de influência dos postos udométricos da bacia do moinho do Martins

Rio Beça

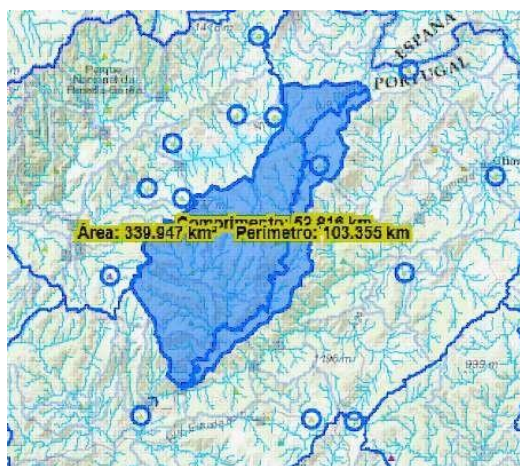


Figura 54

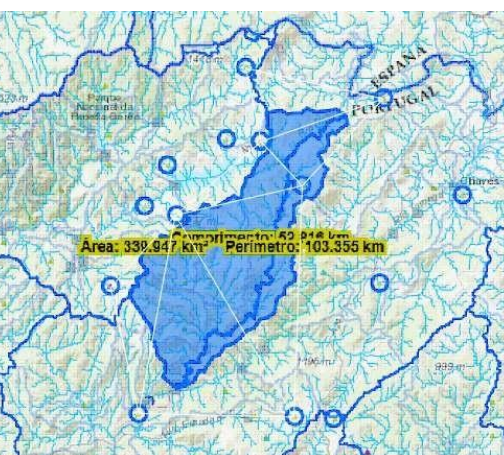


Figura 55

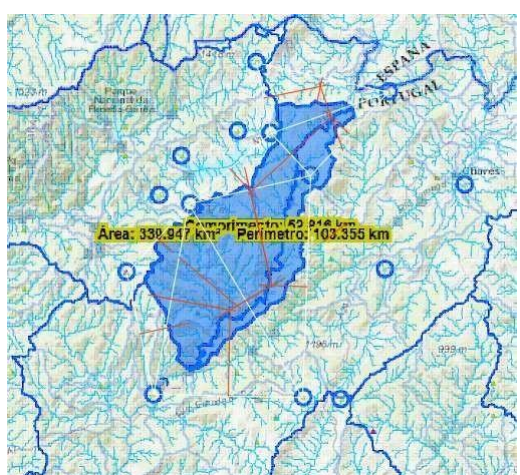


Figura 56

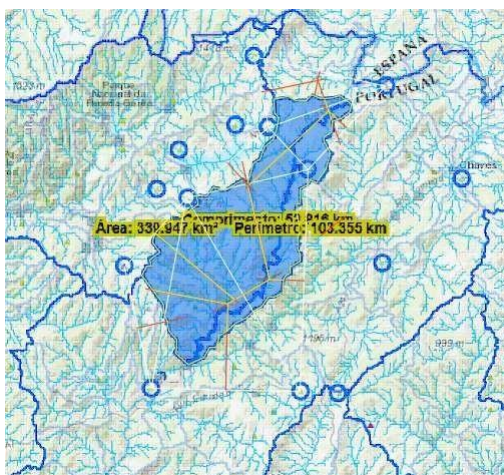


Figura 57

Figuras 53- 56 Fases de construção dos polígonos de Thiessen da bacia hidrográfica do Rio Beça em Cunhas.

Áreas de influência:

Estações	Percentagem de contribuição (%)
Cavez	12.88
Cervos	26.98
Gralhós	10.27
Lixa do alvão	4.95
Salto	11.97
Soutelinho da Raia	1.85
Telhado	31.11

Tabela 17- Áreas de influência dos postos udométricos da bacia hidrográfica do rio Beça.

Reconstituição de dados

A reconstituição de dados foi efetuada para todas as estações com mais de 1 falha em todo o seu registo, no período analisado, postos com apenas uma falha (caso da estação de Brancelhes que apresenta uma falha que é negligenciada no processo de cálculo). A reconstituição das estações carece do registo pluviométrico de estações próximas que permitam caracterizar a estação a reconstituir através da aplicação do método das duplas acumulações que foi explicitado no capítulo 3.2.

O presente anexo demonstra o processo de cálculo e resultados obtidos para duas das estações completadas que servirão de exemplo para as restantes que não serão aqui apresentadas devido à extensão das tabelas de dados.

Existe uma particularidade no processo de reconstituição e homogeneização no posto de Água Longa. Este posto não possuía qualquer registo no período analisado (1980-2000) pelo que se recorreu à reconstituição completa deste período. Para tal, a correlação das somas acumuladas foi implementada utilizando as somas acumuladas dos postos adjacentes no período em análise e as somas acumuladas da estação de água longa num período não correspondente ao dos postos modelo. Tal exceção foi cometida em prol da rápida reconstituição de um posto com uma área de influência muito relevante nas bacias do rio trofa e menos relevante na do Ave. Apesar de se saber que a reconstituição não representa efetivamente a realidade dos valores que teriam sido observados na região, considera-se que a reconstituição dos dados a partir do método das duplas acumulações representa com precisão admissível, a variabilidade pluviométrica observada na região.

Por fim resta acrescentar que, a correlação das somas acumuladas dos postos modelo com as somas acumuladas do posto a reconstituir representada pela reta de regressão obtida, pode originar, no processo de ajustar à reta os valores que estão a ser calculados, valores negativos. Naturalmente sabe-se que não

existem precipitações negativas pelo que estes valores poderiam ter-se considerado iguais a zero, no entanto, os valores negativos foram mantidos com o intuito de respeitar o facto de os valores obtidos serem uma mera representação dos valores que possam ter sido realmente observados, alterá-los mudaria os valores da reta de regressão obtida e consequentemente a previsão seria diferente. Então, os valores negativos mantiveram-se de

maneira fazer corresponder os valores calculados aos que se possam ter observado nos restantes registos não negativos como dita a correlação linear obtida (alterar o valor negativo para zero seria lógico, uma vez não existem precipitações negativas, mas fazê-lo implicava ignorar a correlação linear que se estabeleceu anteriormente).

O posto apresentado é o de Santo Tirso

O processo a seguir apresentado está estruturado da seguinte maneira:

A tabela 12 mostra os postos modelo (Castelões e Lamoso) e o posto a reconstituir (Santo Tirso), no seu formato original, dados obtidos a partir da plataforma digital SNIRH, a cinzento estão representadas as falhas do posto de Santo Tirso.

A tabela 13 mostra as somas acumuladas dos postos modelo bem como o seu total acumulado. A regressão obtida através da disposição das somas acumuladas modelo totais no eixo x e as somas acumuladas de Santo Tirso no eixo y representada no gráfico 1.

Ainda na tabela 13, a cinzento estão representados os valores calculados através do ajuste à regressão do gráfico 1.

Finalmente, na tabela 14, revertendo o processo das somas acumuladas, obtém-se o posto reconstituído apresentado na tabela 14.

Estação de Santo Tirso

Gráfico 1:

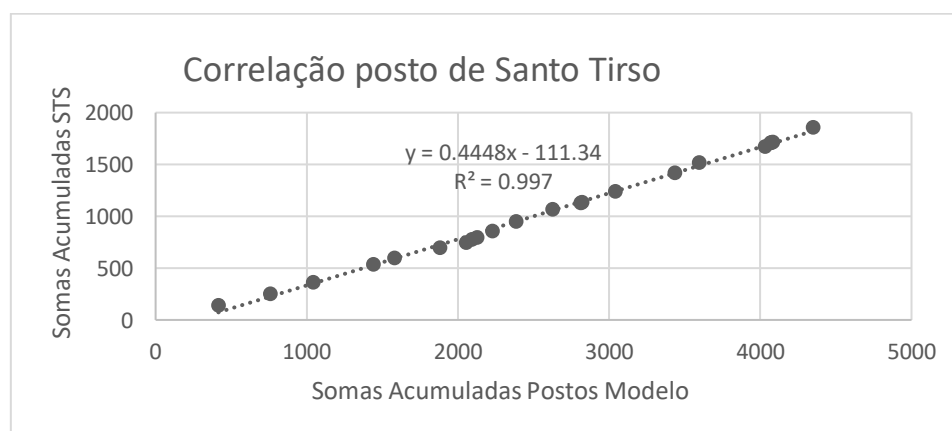


Tabela 18- Registos Estações modelo (Castelões e Lamoso) e estação a reconstituir (Santo Tirso),

DATA	PM Castelões	PM Lamoso	PM STS
01/12/1979	196	219.1	140.5
01/01/1980	178	162.9	111
01/02/1980	162.4	123.4	110.6
01/03/1980	148.5	247	173.9
01/04/1980	80.4	59.4	58
01/05/1980	193.7	107.3	99.3
01/06/1980	97.2	76	52.8
01/07/1980	17.2	20.8	28.3
01/08/1980	22.5	14.4	20.1
01/09/1980	33.9	66	57.5
01/10/1980	28.5	128.9	98.2
01/11/1980	89	151.5	116.2
01/12/1980	104.3	83.3	62.3
01/01/1981	0	6.5	4.4
01/02/1981	52.5	168.7	104.7
01/03/1981	175.2	219	179.9
01/04/1981	60	101.8	100.6
01/05/1981	226.2	207.1	153.9
01/06/1981	2	36.1	36.5
01/07/1981	0	0.9	0.4
01/08/1981	0	13.9	3.5
01/09/1981	85.1	182.7	145.4
01/10/1981	111.6	175.1	
01/11/1981	0	0	0
01/12/1981	663.7	756.8	
01/01/1982	134.6	148.4	69.9

01/02/1982	194.6	155.6	118.8
01/03/1982	31	28.6	13.7
01/04/1982	55.8	43.1	54.6
01/05/1982	83	95.4	96
01/06/1982	56.5	93.9	
01/07/1982	7	16.7	
01/08/1982	11	16.5	
01/09/1982	116.5	147.4	
01/10/1982	67	186.9	
01/11/1982	231.5	306.3	
01/12/1982	232.2	328.1	
01/01/1983	14	26	
01/02/1983	171.5	231.1	
01/03/1983	39.4	29.9	
01/04/1983	342.1	425.5	
01/05/1983	237.7	319	
01/06/1983	55.2	48.5	
01/07/1983	46.9	54.6	
01/08/1983	58.7	59	
01/09/1983	41.4	26	
01/10/1983	50.1	49.5	
01/11/1983	220.8	216.5	
01/12/1983	248.7	321.4	
01/01/1984	294	309.2	
01/02/1984	66.9	63.6	
01/03/1984	190.2	238.5	
01/04/1984	135.6	120.8	
01/05/1984	151.5	163.1	

01/06/1984	69	100	
01/07/1984	6.5	52.5	
01/08/1984	48.4	49	
01/09/1984	51.5	68.4	
01/10/1984	170.6	262.1	
01/11/1984	434	650.6	
01/12/1984	134.7	191	
01/01/1985	344.8	281.6	
01/02/1985	167.6	268.7	
01/03/1985	150	190.9	
01/04/1985	134.8	195.5	
01/05/1985	52.5	80.8	
01/06/1985	55.5	82.1	
01/07/1985	26	38	
01/08/1985	6.5	7.8	
01/09/1985	3	2	
01/10/1985	14.2	25.5	
01/11/1985	239.8	352.9	
01/12/1985	330	395.6	
01/01/1986	167.5	226.3	
01/02/1986	297.5	344	
01/03/1986	75	96.9	
01/04/1986	134.5	156.8	
01/05/1986	51.5	69.5	
01/06/1986	57.5	42.1	
01/07/1986	3	0.5	
01/08/1986	22.5	39.3	
01/09/1986	175	169.4	

01/10/1986	77	65.5	
01/11/1986	154	161.7	
01/12/1986	109.5	125.8	
01/01/1987	139	143.3	
01/02/1987	221	232	
01/03/1987	96	156.5	
01/04/1987	126.5	223.2	
01/05/1987	9	5	
01/06/1987	41	42.2	
01/07/1987	25	54.5	
01/08/1987	54.5	78	
01/09/1987	116	112.5	
01/10/1987	230.5	474.8	
01/11/1987	51	51	
01/12/1987	169	306.5	
01/01/1988	216.5	373.2	
01/02/1988	78	163.3	
01/03/1988	14	18.9	
01/04/1988	199	179.6	
01/05/1988	151.5	154.2	
01/06/1988	161	177.2	
01/07/1988	51	76.5	
01/08/1988	0	9	
01/09/1988	6	28.5	
01/10/1988	192	204.3	
01/11/1988	66	71.4	
01/12/1988	30	38.8	
01/01/1989	27	33.5	

01/02/1989	194	236.2	
01/03/1989	114	91.7	
01/04/1989	131	166.2	
01/05/1989	71.5	90.7	
01/06/1989	36	75.5	
01/07/1989	38	0	
01/08/1989	29	15	
01/09/1989	0	2.3	
01/10/1989	89	129.2	
01/11/1989	269	350.1	
01/12/1989	378	468.6	
01/01/1990	193	229.3	
01/02/1990	94	123.3	
01/03/1990	13	9	
01/04/1990	46	75.5	
01/05/1990	51	29	
01/06/1990	15	18.3	
01/07/1990	10	4.8	
01/08/1990	14.5	28.8	
01/09/1990	27	52.3	
01/10/1990	308	371.5	
01/11/1990	102.5	148.3	
01/12/1990	96.5	138.5	
01/01/1991	174	273.2	
01/02/1991	137	232.4	
01/03/1991	181	287.3	
01/04/1991	35	67.7	
01/05/1991	0	8.8	

01/06/1991	24.5	73.8	
01/07/1991	27.5	28.8	
01/08/1991	23.5	28.1	
01/09/1991	24	92.2	
01/10/1991	47.5	142.6	
01/11/1991	106	348.2	
01/12/1991	25	43.8	
01/01/1992	36	108	
01/02/1992	12	50.9	
01/03/1992	46	53.2	
01/04/1992	72	87.8	
01/05/1992	85	131.6	
01/06/1992	32.5	80	
01/07/1992	2	2.5	
01/08/1992	28	41.1	
01/09/1992	44	53.8	
01/10/1992	114	90.6	
01/11/1992	43	128.2	
01/12/1992	87	322	
01/01/1993	28.5	109.9	
01/02/1993	12.5	22.2	
01/03/1993	47	53.7	
01/04/1993	221.5	223.2	
01/05/1993	159	201.2	
01/06/1993	46	72.7	
01/07/1993	0	0	
01/08/1993	2	8.2	
01/09/1993	136	193.1	

01/10/1993	265	385.9	
01/11/1993	137	186.8	
01/12/1993	99	129	
01/01/1994	245	435.3	
01/02/1994	135	258.2	
01/03/1994	11	20.9	
01/04/1994	66	70.8	
01/05/1994	170	306.4	
01/06/1994	20	8.1	
01/07/1994	2	4.5	
01/08/1994	30	71.5	
01/09/1994	51	69.2	
01/10/1994	117	173.1	
01/11/1994	235	250.7	
01/12/1994	166	131.8	
01/01/1995	204	362	
01/02/1995	226	271.2	
01/03/1995	57	71.2	
01/04/1995	19	41.2	
01/05/1995	71	154.3	
01/06/1995	24	32.8	
01/07/1995	34.5	38.5	
01/08/1995	13	0.6	
01/09/1995	46	121.8	
01/10/1995	36	159	
01/11/1995	140	363	
01/12/1995	182	442	
01/01/1996	225	496	

01/02/1996	138.5	328.8	
01/03/1996	53	111.1	
01/04/1996	44	115.5	
01/05/1996	110	141.2	
01/06/1996	5	5.5	
01/07/1996	9	33.2	
01/08/1996	36	30	
01/09/1996	35	99.2	
01/10/1996	61	126.2	
01/11/1996	179.6	309.6	
01/12/1996	134	340.3	
01/01/1997	162	203.6	
01/02/1997	78	98.6	
01/03/1997	0	0	
01/04/1997	79	92.6	
01/05/1997	210	219.7	
01/06/1997	128	120.2	
01/07/1997	32	27.5	
01/08/1997	78	80.8	
01/09/1997	8	15	
01/10/1997	193	216.2	
01/11/1997	564	621.6	
01/12/1997	294	397	
01/01/1998	157	245.8	
01/02/1998	55	26.9	
01/03/1998	23	44.7	
01/04/1998	312	424.4	
01/05/1998	92	120.2	

01/06/1998	15	46.8	
01/07/1998	12	18.8	
01/08/1998	0	0	
01/09/1998	132	264.4	
01/10/1998	53	76.8	
01/11/1998	71	122.6	
01/12/1998	76	145.7	
01/01/1999	125	153.4	
01/02/1999	24	38.5	
01/03/1999	81	97	
01/04/1999	122	174.4	
01/05/1999	140	129.9	
01/06/1999	27	40.5	
01/07/1999	7	12.5	
01/08/1999	107	114	
01/09/1999	240	243.6	
01/10/1999	266	375.5	
01/11/1999	19	66.5	
01/12/1999	262	411.2	
01/01/2000	25	19.5	

Tabela 19 – Somas acumuladas

DATA	Castelões	Lamoso	Total	STS
01/12/1979	196	219.1	415.1	140.5
01/01/1980	374	382	756	251.5
01/02/1980	536.4	505.4	1041.8	362.1

01/03/1980	684.9	752.4	1437.3	536
01/04/1980	765.3	811.8	1577.1	594
01/05/1980	959	919.1	1878.1	693.3
01/06/1980	1056.2	995.1	2051.3	746.1
01/07/1980	1073.4	1015.9	2089.3	774.4
01/08/1980	1095.9	1030.3	2126.2	794.5
01/09/1980	1129.8	1096.3	2226.1	852
01/10/1980	1158.3	1225.2	2383.5	950.2
01/11/1980	1247.3	1376.7	2624	1066.4
01/12/1980	1351.6	1460	2811.6	1128.7
01/01/1981	1351.6	1466.5	2818.1	1133.1
01/02/1981	1404.1	1635.2	3039.3	1237.8
01/03/1981	1579.3	1854.2	3433.5	1417.7
01/04/1981	1639.3	1956	3595.3	1518.3
01/05/1981	1865.5	2163.1	4028.6	1672.2
01/06/1981	1867.5	2199.2	4066.7	1708.7
01/07/1981	1867.5	2200.1	4067.6	1709.1
01/08/1981	1867.5	2214	4081.5	1712.6
01/09/1981	1952.6	2396.7	4349.3	1858
01/10/1981	2064.2	2571.8	4636	2173.433
01/11/1981	2064.2	2571.8	4636	2173.433
01/12/1981	2727.9	3328.6	6056.5	2805.271
01/01/1982	2862.5	3477	6339.5	2875.171
01/02/1982	3057.1	3632.6	6689.7	2993.971
01/03/1982	3088.1	3661.2	6749.3	3007.671
01/04/1982	3143.9	3704.3	6848.2	3062.271
01/05/1982	3226.9	3799.7	7026.6	3158.271
01/06/1982	3283.4	3893.6	7177	3303.67

01/07/1982	3290.4	3910.3	7200.7	3314.211
01/08/1982	3301.4	3926.8	7228.2	3326.443
01/09/1982	3417.9	4074.2	7492.1	3443.826
01/10/1982	3484.9	4261.1	7746	3556.761
01/11/1982	3716.4	4567.4	8283.8	3795.974
01/12/1982	3948.6	4895.5	8844.1	4045.196
01/01/1983	3962.6	4921.5	8884.1	4062.988
01/02/1983	4134.1	5152.6	9286.7	4242.064
01/03/1983	4173.5	5182.5	9356	4272.889
01/04/1983	4515.6	5608	10123.6	4614.317
01/05/1983	4753.3	5927	10680.3	4861.937
01/06/1983	4808.5	5975.5	10784	4908.063
01/07/1983	4855.4	6030.1	10885.5	4953.21
01/08/1983	4914.1	6089.1	11003.2	5005.563
01/09/1983	4955.5	6115.1	11070.6	5035.543
01/10/1983	5005.6	6164.6	11170.2	5079.845
01/11/1983	5226.4	6381.1	11607.5	5274.356
01/12/1983	5475.1	6702.5	12177.6	5527.936
01/01/1984	5769.1	7011.7	12780.8	5796.24
01/02/1984	5836	7075.3	12911.3	5854.286
01/03/1984	6026.2	7313.8	13340	6044.972
01/04/1984	6161.8	7434.6	13596.4	6159.019
01/05/1984	6313.3	7597.7	13911	6298.953
01/06/1984	6382.3	7697.7	14080	6374.124
01/07/1984	6388.8	7750.2	14139	6400.367
01/08/1984	6437.2	7799.2	14236.4	6443.691
01/09/1984	6488.7	7867.6	14356.3	6497.022
01/10/1984	6659.3	8129.7	14789	6689.487

01/11/1984	7093.3	8780.3	15873.6	7171.917
01/12/1984	7228	8971.3	16199.3	7316.789
01/01/1985	7572.8	9252.9	16825.7	7595.411
01/02/1985	7740.4	9521.6	17262	7789.478
01/03/1985	7890.4	9712.5	17602.9	7941.11
01/04/1985	8025.2	9908	17933.2	8088.027
01/05/1985	8077.7	9988.8	18066.5	8147.319
01/06/1985	8133.2	10070.9	18204.1	8208.524
01/07/1985	8159.2	10108.9	18268.1	8236.991
01/08/1985	8165.7	10116.7	18282.4	8243.352
01/09/1985	8168.7	10118.7	18287.4	8245.576
01/10/1985	8182.9	10144.2	18327.1	8263.234
01/11/1985	8422.7	10497.1	18919.8	8526.867
01/12/1985	8752.7	10892.7	19645.4	8849.614
01/01/1986	8920.2	11119	20039.2	9024.776
01/02/1986	9217.7	11463	20680.7	9310.115
01/03/1986	9292.7	11559.9	20852.6	9386.576
01/04/1986	9427.2	11716.7	21143.9	9516.147
01/05/1986	9478.7	11786.2	21264.9	9569.968
01/06/1986	9536.2	11828.3	21364.5	9614.27
01/07/1986	9539.2	11828.8	21368	9615.826
01/08/1986	9561.7	11868.1	21429.8	9643.315
01/09/1986	9736.7	12037.5	21774.2	9796.504
01/10/1986	9813.7	12103	21916.7	9859.888
01/11/1986	9967.7	12264.7	22232.4	10000.31
01/12/1986	10077.2	12390.5	22467.7	10104.97
01/01/1987	10216.2	12533.8	22750	10230.54
01/02/1987	10437.2	12765.8	23203	10432.03

01/03/1987	10533.2	12922.3	23455.5	10544.35
01/04/1987	10659.7	13145.5	23805.2	10699.89
01/05/1987	10668.7	13150.5	23819.2	10706.12
01/06/1987	10709.7	13192.7	23902.4	10743.13
01/07/1987	10734.7	13247.2	23981.9	10778.49
01/08/1987	10789.2	13325.2	24114.4	10837.43
01/09/1987	10905.2	13437.7	24342.9	10939.06
01/10/1987	11135.7	13912.5	25048.2	11252.78
01/11/1987	11186.7	13963.5	25150.2	11298.15
01/12/1987	11355.7	14270	25625.7	11509.65
01/01/1988	11572.2	14643.2	26215.4	11771.95
01/02/1988	11650.2	14806.5	26456.7	11879.28
01/03/1988	11664.2	14825.4	26489.6	11893.91
01/04/1988	11863.2	15005	26868.2	12062.32
01/05/1988	12014.7	15159.2	27173.9	12198.29
01/06/1988	12175.7	15336.4	27512.1	12348.72
01/07/1988	12226.7	15412.9	27639.6	12405.43
01/08/1988	12226.7	15421.9	27648.6	12409.44
01/09/1988	12232.7	15450.4	27683.1	12424.78
01/10/1988	12424.7	15654.7	28079.4	12601.06
01/11/1988	12490.7	15726.1	28216.8	12662.17
01/12/1988	12520.7	15764.9	28285.6	12692.77
01/01/1989	12547.7	15798.4	28346.1	12719.69
01/02/1989	12741.7	16034.6	28776.3	12911.04
01/03/1989	12855.7	16126.3	28982	13002.53
01/04/1989	12986.7	16292.5	29279.2	13134.73
01/05/1989	13058.2	16383.2	29441.4	13206.87
01/06/1989	13094.2	16458.7	29552.9	13256.47

01/07/1989	13132.2	16458.7	29590.9	13273.37
01/08/1989	13161.2	16473.7	29634.9	13292.94
01/09/1989	13161.2	16476	29637.2	13293.97
01/10/1989	13250.2	16605.2	29855.4	13391.02
01/11/1989	13519.2	16955.3	30474.5	13666.4
01/12/1989	13897.2	17423.9	31321.1	14042.97
01/01/1990	14090.2	17653.2	31743.4	14230.8
01/02/1990	14184.2	17776.5	31960.7	14327.46
01/03/1990	14197.2	17785.5	31982.7	14337.24
01/04/1990	14243.2	17861	32104.2	14391.29
01/05/1990	14294.2	17890	32184.2	14426.87
01/06/1990	14309.2	17908.3	32217.5	14441.68
01/07/1990	14319.2	17913.1	32232.3	14448.27
01/08/1990	14333.7	17941.9	32275.6	14467.53
01/09/1990	14360.7	17994.2	32354.9	14502.8
01/10/1990	14668.7	18365.7	33034.4	14805.04
01/11/1990	14771.2	18514	33285.2	14916.6
01/12/1990	14867.7	18652.5	33520.2	15021.12
01/01/1991	15041.7	18925.7	33967.4	15220.04
01/02/1991	15178.7	19158.1	34336.8	15384.35
01/03/1991	15359.7	19445.4	34805.1	15592.65
01/04/1991	15394.7	19513.1	34907.8	15638.33
01/05/1991	15394.7	19521.9	34916.6	15642.24
01/06/1991	15419.2	19595.7	35014.9	15685.97
01/07/1991	15446.7	19624.5	35071.2	15711.01
01/08/1991	15470.2	19652.6	35122.8	15733.96
01/09/1991	15494.2	19744.8	35239	15785.65
01/10/1991	15541.7	19887.4	35429.1	15870.2

01/11/1991	15647.7	20235.6	35883.3	16072.23
01/12/1991	15672.7	20279.4	35952.1	16102.83
01/01/1992	15708.7	20387.4	36096.1	16166.89
01/02/1992	15720.7	20438.3	36159	16194.86
01/03/1992	15766.7	20491.5	36258.2	16238.99
01/04/1992	15838.7	20579.3	36418	16310.07
01/05/1992	15923.7	20710.9	36634.6	16406.41
01/06/1992	15956.2	20790.9	36747.1	16456.45
01/07/1992	15958.2	20793.4	36751.6	16458.45
01/08/1992	15986.2	20834.5	36820.7	16489.19
01/09/1992	16030.2	20888.3	36918.5	16532.69
01/10/1992	16144.2	20978.9	37123.1	16623.69
01/11/1992	16187.2	21107.1	37294.3	16699.84
01/12/1992	16274.2	21429.1	37703.3	16881.77
01/01/1993	16302.7	21539	37841.7	16943.33
01/02/1993	16315.2	21561.2	37876.4	16958.76
01/03/1993	16362.2	21614.9	37977.1	17003.55
01/04/1993	16583.7	21838.1	38421.8	17201.36
01/05/1993	16742.7	22039.3	38782	17361.57
01/06/1993	16788.7	22112	38900.7	17414.37
01/07/1993	16788.7	22112	38900.7	17414.37
01/08/1993	16790.7	22120.2	38910.9	17418.91
01/09/1993	16926.7	22313.3	39240	17565.29
01/10/1993	17191.7	22699.2	39890.9	17854.81
01/11/1993	17328.7	22886	40214.7	17998.84
01/12/1993	17427.7	23015	40442.7	18100.25
01/01/1994	17672.7	23450.3	41123	18402.85
01/02/1994	17807.7	23708.5	41516.2	18577.75

01/03/1994	17818.7	23729.4	41548.1	18591.93
01/04/1994	17884.7	23800.2	41684.9	18652.78
01/05/1994	18054.7	24106.6	42161.3	18864.69
01/06/1994	18074.7	24114.7	42189.4	18877.19
01/07/1994	18076.7	24119.2	42195.9	18880.08
01/08/1994	18106.7	24190.7	42297.4	18925.22
01/09/1994	18157.7	24259.9	42417.6	18978.69
01/10/1994	18274.7	24433	42707.7	19107.72
01/11/1994	18509.7	24683.7	43193.4	19323.76
01/12/1994	18675.7	24815.5	43491.2	19456.23
01/01/1995	18879.7	25177.5	44057.2	19707.98
01/02/1995	19105.7	25448.7	44554.4	19929.14
01/03/1995	19162.7	25519.9	44682.6	19986.16
01/04/1995	19181.7	25561.1	44742.8	20012.94
01/05/1995	19252.7	25715.4	44968.1	20113.15
01/06/1995	19276.7	25748.2	45024.9	20138.42
01/07/1995	19311.2	25786.7	45097.9	20170.89
01/08/1995	19324.2	25787.3	45111.5	20176.94
01/09/1995	19370.2	25909.1	45279.3	20251.57
01/10/1995	19406.2	26068.1	45474.3	20338.31
01/11/1995	19546.2	26431.1	45977.3	20562.04
01/12/1995	19728.2	26873.1	46601.3	20839.6
01/01/1996	19953.2	27369.1	47322.3	21160.3
01/02/1996	20091.7	27697.9	47789.6	21368.15
01/03/1996	20144.7	27809	47953.7	21441.15
01/04/1996	20188.7	27924.5	48113.2	21512.09
01/05/1996	20298.7	28065.7	48364.4	21623.83
01/06/1996	20303.7	28071.2	48374.9	21628.5

01/07/1996	20312.7	28104.4	48417.1	21647.27
01/08/1996	20348.7	28134.4	48483.1	21676.62
01/09/1996	20383.7	28233.6	48617.3	21736.32
01/10/1996	20444.7	28359.8	48804.5	21819.58
01/11/1996	20624.3	28669.4	49293.7	22037.18
01/12/1996	20758.3	29009.7	49768	22248.15
01/01/1997	20920.3	29213.3	50133.6	22410.77
01/02/1997	20998.3	29311.9	50310.2	22489.32
01/03/1997	20998.3	29311.9	50310.2	22489.32
01/04/1997	21077.3	29404.5	50481.8	22565.64
01/05/1997	21287.3	29624.2	50911.5	22756.78
01/06/1997	21415.3	29744.4	51159.7	22867.17
01/07/1997	21447.3	29771.9	51219.2	22893.64
01/08/1997	21525.3	29852.7	51378	22964.27
01/09/1997	21533.3	29867.7	51401	22974.5
01/10/1997	21726.3	30083.9	51810.2	23156.52
01/11/1997	22290.3	30705.5	52995.8	23683.87
01/12/1997	22584.3	31102.5	53686.8	23991.23
01/01/1998	22741.3	31348.3	54089.6	24170.39
01/02/1998	22796.3	31375.2	54171.5	24206.82
01/03/1998	22819.3	31419.9	54239.2	24236.94
01/04/1998	23131.3	31844.3	54975.6	24564.49
01/05/1998	23223.3	31964.5	55187.8	24658.87
01/06/1998	23238.3	32011.3	55249.6	24686.36
01/07/1998	23250.3	32030.1	55280.4	24700.06
01/08/1998	23250.3	32030.1	55280.4	24700.06
01/09/1998	23382.3	32294.5	55676.8	24876.38
01/10/1998	23435.3	32371.3	55806.6	24934.12

01/11/1998	23506.3	32493.9	56000.2	25020.23
01/12/1998	23582.3	32639.6	56221.9	25118.84
01/01/1999	23707.3	32793	56500.3	25242.67
01/02/1999	23731.3	32831.5	56562.8	25270.47
01/03/1999	23812.3	32928.5	56740.8	25349.65
01/04/1999	23934.3	33102.9	57037.2	25481.49
01/05/1999	24074.3	33232.8	57307.1	25601.54
01/06/1999	24101.3	33273.3	57374.6	25631.56
01/07/1999	24108.3	33285.8	57394.1	25640.24
01/08/1999	24215.3	33399.8	57615.1	25738.54
01/09/1999	24455.3	33643.4	58098.7	25953.64
01/10/1999	24721.3	34018.9	58740.2	26238.98
01/11/1999	24740.3	34085.4	58825.7	26277.01
01/12/1999	25002.3	34496.6	59498.9	26576.45
01/01/2000	25027.3	34516.1	59543.4	26596.24

Tabela 20- Posto de Santo Tirso Reconstituído

DATA	PM STS
01/12/1979	140.5
01/01/1980	111
01/02/1980	110.6
01/03/1980	173.9
01/04/1980	58
01/05/1980	99.3

01/06/1980	52.8
01/07/1980	28.3
01/08/1980	20.1
01/09/1980	57.5
01/10/1980	98.2
01/11/1980	116.2
01/12/1980	62.3
01/01/1981	4.4
01/02/1981	104.7
01/03/1981	179.9
01/04/1981	100.6
01/05/1981	153.9
01/06/1981	36.5
01/07/1981	0.4
01/08/1981	3.5
01/09/1981	145.4
01/10/1981	315.4328
01/11/1981	0
01/12/1981	631.8384
01/01/1982	69.9
01/02/1982	118.8
01/03/1982	13.7
01/04/1982	54.6
01/05/1982	96
01/06/1982	145.3984
01/07/1982	10.54176
01/08/1982	12.232
01/09/1982	117.3827

01/10/1982	112.9347
01/11/1982	239.2134
01/12/1982	249.2214
01/01/1983	17.792
01/02/1983	179.0765
01/03/1983	30.82464
01/04/1983	341.4285
01/05/1983	247.6202
01/06/1983	46.12576
01/07/1983	45.1472
01/08/1983	52.35296
01/09/1983	29.97952
01/10/1983	44.30208
01/11/1983	194.511
01/12/1983	253.5805
01/01/1984	268.3034
01/02/1984	58.0464
01/03/1984	190.6858
01/04/1984	114.0467
01/05/1984	139.9341
01/06/1984	75.1712
01/07/1984	26.2432
01/08/1984	43.32352
01/09/1984	53.33152
01/10/1984	192.465
01/11/1984	482.4301
01/12/1984	144.8714
01/01/1985	278.6227

01/02/1985	194.0662
01/03/1985	151.6323
01/04/1985	146.9174
01/05/1985	59.29184
01/06/1985	61.20448
01/07/1985	28.4672
01/08/1985	6.36064
01/09/1985	2.224
01/10/1985	17.65856
01/11/1985	263.633
01/12/1985	322.7469
01/01/1986	175.1622
01/02/1986	285.3392
01/03/1986	76.46112
01/04/1986	129.5702
01/05/1986	53.8208
01/06/1986	44.30208
01/07/1986	1.5568
01/08/1986	27.48864
01/09/1986	153.1891
01/10/1986	63.384
01/11/1986	140.4234
01/12/1986	104.6614
01/01/1987	125.567
01/02/1987	201.4944
01/03/1987	112.312
01/04/1987	155.5466
01/05/1987	6.2272

01/06/1987	37.00736
01/07/1987	35.3616
01/08/1987	58.936
01/09/1987	101.6368
01/10/1987	313.7174
01/11/1987	45.3696
01/12/1987	211.5024
01/01/1988	262.2986
01/02/1988	107.3302
01/03/1988	14.63392
01/04/1988	168.4013
01/05/1988	135.9754
01/06/1988	150.4314
01/07/1988	56.712
01/08/1988	4.0032
01/09/1988	15.3456
01/10/1988	176.2742
01/11/1988	61.11552
01/12/1988	30.60224
01/01/1989	26.9104
01/02/1989	191.353
01/03/1989	91.49536
01/04/1989	132.1946
01/05/1989	72.14656
01/06/1989	49.5952
01/07/1989	16.9024
01/08/1989	19.5712
01/09/1989	1.02304

01/10/1989	97.05536
01/11/1989	275.3757
01/12/1989	376.5677
01/01/1990	187.839
01/02/1990	96.65504
01/03/1990	9.7856
01/04/1990	54.0432
01/05/1990	35.584
01/06/1990	14.81184
01/07/1990	6.58304
01/08/1990	19.25984
01/09/1990	35.27264
01/10/1990	302.2416
01/11/1990	111.5558
01/12/1990	104.528
01/01/1991	198.9146
01/02/1991	164.3091
01/03/1991	208.2998
01/04/1991	45.68096
01/05/1991	3.91424
01/06/1991	43.72384
01/07/1991	25.04224
01/08/1991	22.95168
01/09/1991	51.68576
01/10/1991	84.55648
01/11/1991	202.0282
01/12/1991	30.60224
01/01/1992	64.0512

01/02/1992	27.97792
01/03/1992	44.12416
01/04/1992	71.07904
01/05/1992	96.34368
01/06/1992	50.04
01/07/1992	2.0016
01/08/1992	30.73568
01/09/1992	43.50144
01/10/1992	91.00608
01/11/1992	76.14976
01/12/1992	181.9232
01/01/1993	61.56032
01/02/1993	15.43456
01/03/1993	44.79136
01/04/1993	197.8026
01/05/1993	160.217
01/06/1993	52.79776
01/07/1993	0
01/08/1993	4.53696
01/09/1993	146.3837
01/10/1993	289.5203
01/11/1993	144.0262
01/12/1993	101.4144
01/01/1994	302.5974
01/02/1994	174.8954
01/03/1994	14.18912
01/04/1994	60.84864
01/05/1994	211.9027

01/06/1994	12.49888
01/07/1994	2.8912
01/08/1994	45.1472
01/09/1994	53.46496
01/10/1994	129.0365
01/11/1994	216.0394
01/12/1994	132.4614
01/01/1995	251.7568
01/02/1995	221.1546
01/03/1995	57.02336
01/04/1995	26.77696
01/05/1995	100.2134
01/06/1995	25.26464
01/07/1995	32.4704
01/08/1995	6.04928
01/09/1995	74.63744
01/10/1995	86.736
01/11/1995	223.7344
01/12/1995	277.5552
01/01/1996	320.7008
01/02/1996	207.855
01/03/1996	72.99168
01/04/1996	70.9456
01/05/1996	111.7338
01/06/1996	4.6704
01/07/1996	18.77056
01/08/1996	29.3568
01/09/1996	59.69216

01/10/1996	83.26656
01/11/1996	217.5962
01/12/1996	210.9686
01/01/1997	162.6189
01/02/1997	78.55168
01/03/1997	0
01/04/1997	76.32768
01/05/1997	191.1306
01/06/1997	110.3994
01/07/1997	26.4656
01/08/1997	70.63424
01/09/1997	10.2304
01/10/1997	182.0122
01/11/1997	527.3549
01/12/1997	307.3568
01/01/1998	179.1654
01/02/1998	36.42912
01/03/1998	30.11296
01/04/1998	327.5507
01/05/1998	94.38656
01/06/1998	27.48864
01/07/1998	13.69984
01/08/1998	0
01/09/1998	176.3187
01/10/1998	57.73504
01/11/1998	86.11328
01/12/1998	98.61216
01/01/1999	123.8323

01/02/1999	27.8
01/03/1999	79.1744
01/04/1999	131.8387
01/05/1999	120.0515
01/06/1999	30.024
01/07/1999	8.6736
01/08/1999	98.3008
01/09/1999	215.1053
01/10/1999	285.3392
01/11/1999	38.0304
01/12/1999	299.4394
01/01/2000	19.7936
01/02/2000	60.44832
01/03/2000	29.71264
01/04/2000	388.088
01/05/2000	113.9133
01/06/2000	19.03744
01/07/2000	72.5024
01/08/2000	27.3552
01/09/2000	51.46336
01/10/2000	116.2707
01/11/2000	356.0179
01/12/2000	497.5978
01/01/2001	434.6141

ANEXO B

O presente anexo apresenta o procedimento utilizado na obtenção das curvas de caudais classificados de cada secção do aproveitamento e consecutivamente utilizado para resolver o cálculo energético da fórmula 6 admitida em 3.5

Será apresentada uma descrição detalhada do processo de construção e significado das fórmulas aplicadas no Microsoft Excel, a fim de fornecer uma visão esclarecedora sobre a tabela seguinte, que desempenha um papel fundamental na fórmula anterior.

Pos	Data	Açude Tougues(m3/	Azenha(m3/s)	secção 1(m3/s)	Sec2	Sec3	Qturb 1(m3/s)	Pot1(Watts)	P2	P3
1	22/12/1989	356,10	335,3	2,81	5,62	3,21	0,19 0,38 0,22	1484,9	2969,8	1697,0
2	31/12/1981	296,59	279,2	2,34	4,68	2,68	0,19 0,38 0,22	1484,9	2969,8	1697,0
3	30/12/1981	293,6	276,4	2,32	4,64	2,65	0,19 0,38 0,22	1484,9	2969,8	1697,0
4	16/12/1989	264,72	249,2	2,09	4,18	2,39	0,19 0,38 0,22	1484,9	2969,8	1697,0
5	21/12/1989	249,75	235,1	1,97	3,94	2,25	0,19 0,38 0,22	1484,9	2969,8	1697,0
6	27/12/1985	235,92	222,1	1,86	3,73	2,13	0,19 0,38 0,22	1484,9	2969,8	1697,0
7	23/12/1989	233,82	220,1	1,85	3,69	2,11	0,19 0,38 0,22	1484,9	2969,8	1697,0

1º É preciso ordenar os valores dos caudais registados da série hidrométrica de forma decrescente como se pode observar na figura 1.

Como se pode verificar, a ordem cronológica dos caudais deixa de fazer sentido e é possível obter-se a curva de caudais classificados da estação hidrométrica modelo representada no gráfico 1.

Classificação dos Qmd por ordem decrescente de caudal		
posiça	Data	Qmd Açude Tougues
1	22/12/1989	356,10
2	31/12/1981	296,59
3	30/12/1981	293,6
4	16/12/1989	264,72
5	21/12/1989	249,75
6	27/12/1985	235,92
7	23/12/1989	233,82

(Figura 1)

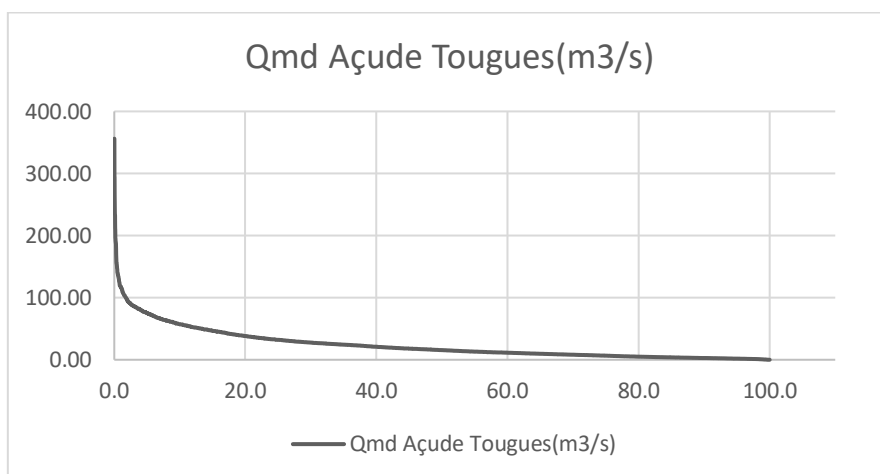


Gráfico 1

2º Através dos caudais registados na bacia modelo, calculam-se os da bacia em estudo (nestecaso, da Azenha de Chaves) utilizando a correlação expressa em 3.3.

$$Q_E = Q_M * \frac{A_{Estudo}}{A_{Modelo}} \frac{P_{Estudo}}{P_{Modelo}}$$

Obtendo-se os resultados obtidos na coluna “Secção Azenha” expressa em m3/s.

As três restantes colunas da figura 2 representam a equação 13 que representa os caudais esperados nas secções onde se localizará a turbina.

$$Q_E = 24.055 * \frac{1045.069}{1120.309} * \frac{4.34}{4.30} * \frac{L}{83.47}$$

Isto permite, de maneira análoga ao passo anterior obter as curvas de caudais classificados, essenciais no cálculo da potência a instalar no aproveitamento. Estas, como já fora mencionadono documento, deverão apresentar uma forma idêntica à curva de caudais classificados da baciamodelo uma vez que a correlação estabelecida entre ambas, é de carater linear. Tal pode ser observado nos gráficos 2 a 4.

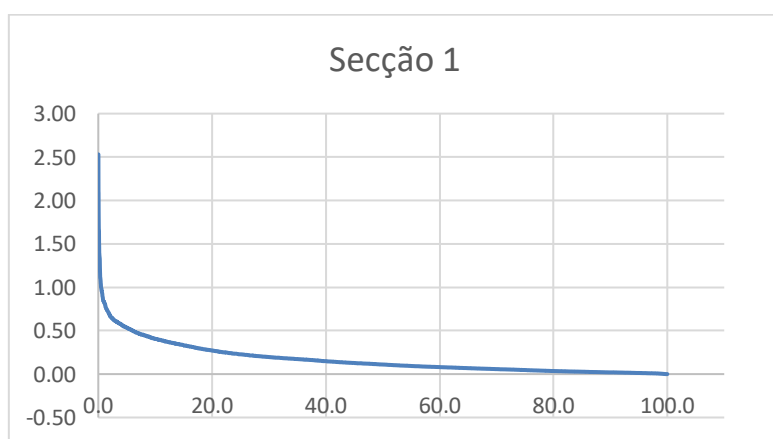
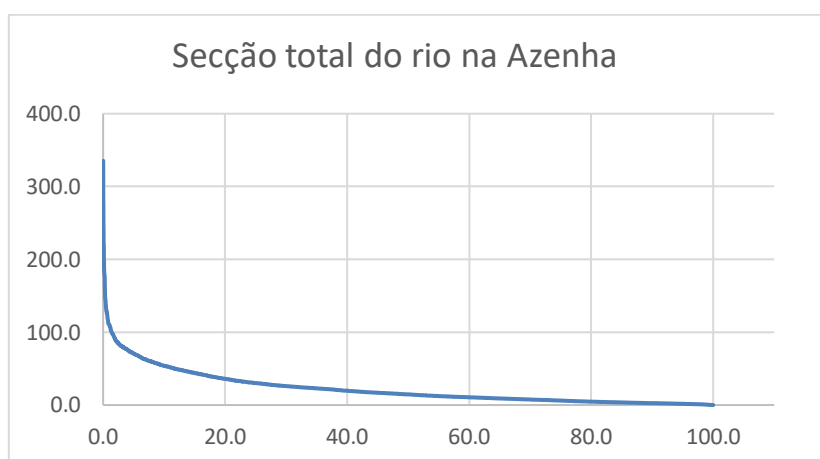
A fórmula observada na Figura 2 corresponde à secção 1 sendo as restantes células adaptadas apenas no primeiro valor da fórmula (0.7 passa a 1.4 e 0.8 nas secções 2 e 3 respetivamente).

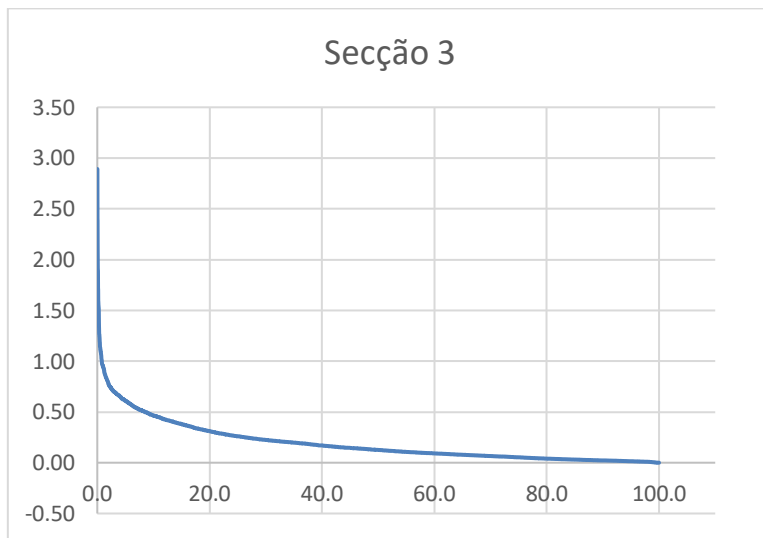
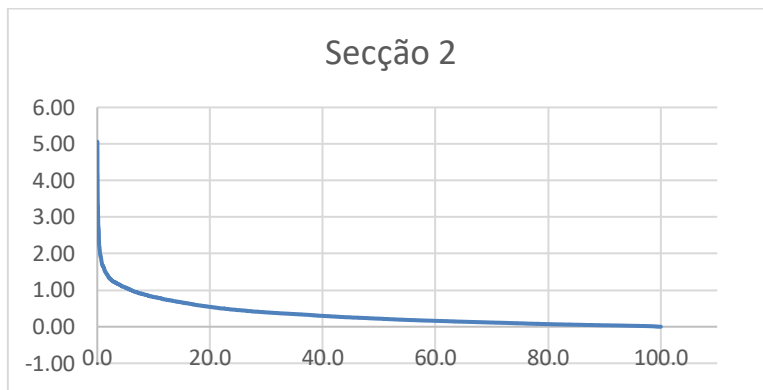
$$= (1045,069/1120,309) * (4,34/4,3) * [Açude \text{ Tougues} (m^3/s)]$$

$$= 0,7/83,47 * [Q_{md} \text{ Açude Tougues} (m^3/s)]$$

Azenha(m3/s)	secção 1(m	secção 2	secção 3
335,3	2,81	5,62	3,21
279,2	2,34	4,68	2,68
276,4	2,32	4,64	2,65
249,2	2,09	4,18	2,39
235,1	1,97	3,94	2,25
222,1	1,86	3,73	2,13
220,1	1,85	3,69	2,11

figura 2





=IF([@[secção 1(m3/s)]]<V\$6;0;IF([@[secção 1(m3/s)]]>V\$5;V\$5;[@[secção 1(m3/s)]]))

=([@Qturb 1(m3/s)]*9810*0,5313*1,5

Qturb 1(m3/s)	2	3	Pot1(Watts)	P2	P3
0,19	0,38	0,22	1484,9	2969,8	1697,0
0,19	0,38	0,22	1484,9	2969,8	1697,0
0,19	0,38	0,22	1484,9	2969,8	1697,0
0,19	0,38	0,22	1484,9	2969,8	1697,0
0,19	0,38	0,22	1484,9	2969,8	1697,0
0,19	0,38	0,22	1484,9	2969,8	1697,0
0,19	0,38	0,22	1484,9	2969,8	1697,0

figura 3

3º Após obtenção da curva de caudais classificados em cada local onde se pretende colocar um grupo gerador, procede-se ao cálculo integral da equação 4

O método de cálculo da expressão (de maneira a evitar uma aproximação analítica da curva de caudais classificados a uma curva com um bom coeficiente de determinação para posteriormente se calcular a sua área) procedeu-se à aplicação da técnica da soma de Riemann, usada para aproximar a área sob uma curva não contínua dividindo-a em retângulos ou trapézios e somando as áreas individuais dessas áreas geométricas. É uma técnica que funciona bem quando o intervalo de tempo entre valores consecutivos é pequeno o suficiente para capturar variações significativas da função.

Deste modo, a área da curva de caudais classificados correspondente ao volume turbinado é representada pela soma dos caudais médios turbinados por dia ao longo de todo o período de funcionamento da turbina.

De maneira a conseguir caracterizar o caudal turbinado, foi definida uma função com dois “if’s” que caracteriza o caudal turbinado em função dos caudais mínimos e máximos turbináveis pelo equipamento eletromotor “=IF([@[secção 1(m3/s)]]<V\$6;0;IF([@[secção 1(m3/s)]]>V\$5;V\$5;[@[secção 1(m3/s)]]))”

	secção 1	secção 2	Secção 3
Qmax (m3/s)	0,171	0,342	0,195
Qmin (m3/s)	0,085	0,171	0,098

V\$6 corresponde ao caudal mínimo, pelo que se o caudal afluente à secção for menor, a turbina deverá encontrar-se desligada.

V\$5 corresponde ao caudal máximo turbinado, pelo que se o valor afluente à secção ultrapassar, o valor turbinado será máximo.

Caso o valor de caudal afluente esteja compreendido entre o máximo e o mínimo, a função toma o próprio valor do caudal.

As várias variações do caudal turbinado em função do caudal afluente à secção podem ser observadas nas seguintes imagens:

Assim, obtém-se, para cada registo de caudal médio diário, o valor correspondente ao caudal turbinado em média nesse dia. As suas variações são observáveis na seguinte imagem:

posição	Data	%tempo	Qmd Açude Tougues(m³/s)	Secção Azenha(m³/s)	secção 1(m³/s)	secção 2	secção 3	Qturb(m³/s)	Qturb2	Qturb3	P1(Watt)	P2(Watt)	P3(Watt)
1	22/12/1989	0,0	356,10	335,3	2,81	5,62	3,21	0,19	0,38	0,22	1578,8	3157,6	1804,4
2	31/12/1981	0,0	296,59	279,2	2,34	4,68	2,68	0,19	0,38	0,22	1578,8	3157,6	1804,4
3	30/12/1981	0,0	293,6	276,4	2,32	4,64	2,65	0,19	0,38	0,22	1578,8	3157,6	1804,4
4	16/12/1989	0,1	264,72	249,2	2,09	4,18	2,39	0,19	0,38	0,22	1578,8	3157,6	1804,4
5	21/12/1989	0,1	249,75	235,1	1,97	3,94	2,25	0,19	0,38	0,22	1578,8	3157,6	1804,4
6	27/12/1985	0,1	235,92	222,1	1,86	3,73	2,13	0,19	0,38	0,22	1578,8	3157,6	1804,4
posição	Data	%tempo	Qmd Açude Tougues(m³/s)	Secção Azenha(m³/s)	secção 1(m³/s)	secção 2	secção 3	Qturb(m³/s)	Qturb2	Qturb3	P1(Watt)	P2(Watt)	P3(Watt)
2245	01/12/1982	33,2	25,41	23,9	0,20	0,40	0,23	0,19	0,38	0,22	1578,8	3157,6	1804,4
2246	06/06/1981	33,3	25,37	23,9	0,20	0,40	0,23	0,19	0,38	0,22	1578,8	3157,6	1804,4
2247	15/05/1981	33,3	25,36	23,9	0,20	0,40	0,23	0,19	0,38	0,22	1578,8	3157,6	1804,4
2248	22/04/1984	33,3	25,33	23,8	0,20	0,40	0,23	0,19	0,38	0,22	1578,8	3157,6	1804,4
2249	14/02/1984	33,3	25,32	23,8	0,20	0,40	0,23	0,19	0,38	0,22	1578,8	3157,6	1804,4
2250	16/05/1988	33,3	25,31	23,8	0,20	0,40	0,23	0,19	0,38	0,22	1578,8	3157,6	1804,4
2251	28/05/1992	33,3	25,29	23,8	0,20	0,40	0,23	0,19	0,38	0,22	1578,8	3157,6	1804,4
posição	Data	%tempo	Qmd Açude Tougues(m³/s)	Secção Azenha(m³/s)	secção 1(m³/s)	secção 2	secção 3	Qturb(m³/s)	Qturb2	Qturb3	P1(Watt)	P2(Watt)	P3(Watt)
3897	01/11/1984	57,7	12,05	11,3	0,10	0,19	0,11	0,10	0,19	0,11	790,9	1581,8	903,9
3898	06/04/1988	57,7	12,05	11,3	0,10	0,19	0,11	0,10	0,19	0,11	790,9	1581,8	903,9
3899	06/05/1989	57,7	12,05	11,3	0,10	0,19	0,11	0,10	0,19	0,11	790,9	1581,8	903,9
3900	19/11/1982	57,8	12,03	11,3	0,09	0,19	0,11	0,09	0,19	0,11	789,6	1579,2	902,4
3901	04/09/1999	57,8	12,00	11,3	0,09	0,19	0,11	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0
3902	18/11/1987	57,8	12	11,3	0,09	0,19	0,11	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0
3903	26/11/1980	57,8	11,99	11,3	0,09	0,19	0,11	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0
3904	30/03/1982	57,8	11,99	11,3	0,09	0,19	0,11	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0
3905	03/04/1982	57,8	11,99	11,3	0,09	0,19	0,11	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0

figura 4.

4º No seguimento do passo anterior, calcula-se a potência média gerada por dia utilizando a equação da potência (capítulo 3.5) como pode ser observado nas colunas do lado direito da figura 3.

$$P_N = \gamma * Q_N * H_b * \eta_c$$

5º Por fim, o cálculo da energia fica completo quando se calcula a área da curva de caudais classificados que pertence ao intervalo de tempo de funcionamento da turbina calculável através da soma da série de potências obtidas no passo anterior, dividida por mil, dividida pelo número total de registos (mesmo com caudal nulo) e multiplicando por 24h obtém-se:

	Energia1	Energia2	Energia3
kwh/dia	17,594	35,188	26,723