

Avaliação do potencial energético no aproveitamento hidroelétrico de pedreiras desativadas

Lídia Julieta Caldas Salgado

Dissertação submetida para a obtenção do grau de
Mestre em Energias Sustentáveis

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica

novembro de 2016

Relatório da Unidade Curricular de Dissertação/Projeto/Estágio do 2º ano do
Mestrado em Energias Sustentáveis

Candidato: Lídia Julieta Caldas Salgado, N° 1140170, 1140170@isep.ipp.pt

Empresa: Mota-Engil, Engenharia e Construção S.A.



Orientação Científica: Professor Doutor Eduardo Vivas, ebv@isep.ipp.pt

Mestrado em Energias Sustentáveis
Departamento de Engenharia Mecânica

isep Instituto Superior de
Engenharia do Porto

novembro de 2016

Aos meus pais, irmã, sobrinhos, cunhado e namorado.

*You can try the best you can
If you try the best you can
The best you can is good enough*

Radiohead

Agradecimentos

À Dra. Isabel Silva e ao Topógrafo Joaquim Barbosa por toda a ajuda e disponibilidade.

Ao Eng. Manuel Costa e à Mota-Engil pela oportunidade concedida, sem a qual este estudo não teria sido possível.

À minha família e namorado pela força, carinho, amizade, apoio e interesse. A eles devo tudo e a eles dedico este trabalho.

À Cristina e restantes amigos pelo apoio e interesse.

Ao Professor Doutor Eduardo Vivas pela disponibilidade.

À Professora Doutora Nídia Caetano pelo apoio, interesse e amabilidade.

Ao Professor Doutor Manuel Azevedo pela acessibilidade e ajuda concedidas.

Ao Professor Doutor Lopes da Costa pela disponibilidade concedida.

Ao Professor Doutor Roque Brandão e Professor Doutor Nuno Gomes pelas dúvidas esclarecidas.

Resumo

Nos últimos anos, o consumo de energia tem vindo a aumentar passando a ser uma presença constante na vida de todos os cidadãos, e ao que tudo indica, no futuro assistir-se-á a um aumento do consumo energético. A par desse crescimento aumentou também a preocupação ambiental, uma vez que grande parte da produção energética, ainda advém dos combustíveis fósseis. Consequentemente, tem vindo a verificar-se um grande investimento em fontes de energias sustentáveis.

Por outro lado, a indústria extrativa é uma atividade que apesar do seu historial e importância, acarreta muita desconfiança por parte do público em geral, em grande parte devido aos efeitos desta atividade sobre o meio ambiente, sendo o passivo ambiental deixado no final de vida de uma pedreira, uma das consequências de elevada preocupação. Devido a tal facto têm sido impostas regras e diretivas bastante exigentes a esta atividade, incluindo a necessidade de recuperação ambiental paisagística no final de vida das pedreiras.

No presente trabalho propõe-se a reconversão de pedreiras desativadas em reservatórios para armazenamento de água, com o intuito de se criar uma central hidroelétrica reversível ligada a outro reservatório artificial, a cota inferior. O potencial de produção de energia seria explorado ao longo do dia, aquando das maiores necessidades de consumo. Por outro lado, em períodos noturnos e de menores consumos, a água seria sujeita a um processo de elevação, por bombagem, para o reservatório superior.

Esta dissertação integra-se na Direção de Agregados da empresa Mota-Engil.

Estudou-se um leque de pedreiras ativas e desativadas de forma a serem escolhidos os casos de maior potencial energético, avaliado em termos de diferença de cotas topográficas, disponibilidade de água através da precipitação e proximidade a cursos de água. Após escolha dos possíveis casos de estudo, procedeu-se à avaliação do potencial hidrológico e estimativa do volume de água armazenado nas pedreiras, bem como do balanço remuneratório entre a venda e a compra de energia.

Palavras-Chave

Produção energética sustentável, pedreiras, potencial energético, centrais hídricas reversíveis, armazenamento de energia.

Abstract

In the past few years, energy consumption has been increasing, becoming a constant presence in the lives of all citizens and all indications are that the future will bring about a growth in energy use. Alongside with this growth, environmental care has also increased, since a large part of energy production still comes from fossil fuels. Consequently, there has been a large investment in sustainable energy sources.

On the other hand, the extractive industry is an activity that, despite its history and importance, entails much suspicion by the general public, largely due to the effects of this activity on the environment, and environmental liabilities left at the end of life a quarry, one of the consequences that raises high concerns. Due to this fact strict rules and policies have been imposed on this activity, including the need for environmental recovery landscape at the end of life of the quarries.

In this work, we propose the conversion of disabled quarries old quarry into reservoirs for water storage, in order to create a pumped-storage hydro central attached to another artificial reservoir at lower level. The power generation potential would be explored throughout the day, when the largest consumer needs occur. On the other hand, at night time and lower consumption periods, the water would be subjected to a lifting process by pumping to the upper reservoir.

This work is part of the Aggregates Direction of Mota-Engil company.

A range of active and deactivated quarries was studied so as to select the cases with the highest energy potential, evaluating them in terms of difference in topographic dimensions, availability of water through precipitation and proximity to water courses. After selecting the possible case studies, we proceeded to the evaluation of the hydrologic potential and estimated volume of water storage in the quarries, as well as the remuneration balance between the sale and purchase of electricity.

Keywords

Sustainable energy production, quarry, energy potential, pumped hydroelectric storage units, energy storage

Declaração

Lídia Julieta Caldas Salgado declara, sob compromisso de honra, que este trabalho é original e que todas as contribuições não originais foram devidamente referenciadas, com identificação da fonte.

5 de novembro de 2016



Assinatura

Índice

AGRADECIMENTOS	IX
RESUMO	XI
ABSTRACT	XIII
DECLARAÇÃO	XV
ÍNDICE	XVII
ÍNDICE DE FIGURAS	XIX
ÍNDICE DE TABELAS	XXI
NOMENCLATURA	XXIII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO	2
1.2. OBJETIVOS	2
1.3. CALENDARIZAÇÃO	3
1.4. APRESENTAÇÃO DA EMPRESA	4
1.5. ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO	4
2. ESTADO DA ARTE	5
3. CENTRAL HIDROELÉTRICA REVERSÍVEL	11
3.1. ARMAZENAMENTO DE ENERGIA	12
3.2. MODO DE FUNCIONAMENTO DAS CENTRAIS	14
3.2.1. <i>Circuito aberto</i>	15
3.2.2. <i>Circuito semi-aberto</i>	16
3.2.3. <i>Circuito fechado</i>	18
3.3. CONSTITUINTES DO SISTEMA	19
3.3.1. <i>Reservatório superior</i>	19
3.3.2. <i>Reservatório inferior</i>	20
3.3.3. <i>Central de produção</i>	20
3.3.4. <i>Conduta forçada</i>	20
3.3.5. <i>Canal de restituição</i>	20
3.3.6. <i>Subestação</i>	21
3.4. TURBINAS	21
3.5. BOMBAS	24
3.6. BOMBAS A FUNCIONAR COMO TURBINAS	28
3.7. GERADORES	29
3.8. MECANISMOS DE CONTROLO E LIGAÇÃO À REDE	31
3.9. VANTAGENS E DESVANTAGENS DAS CENTRAIS HIDROELÉTRICAS REVERSÍVEIS	32
3.9.1. <i>Vantagens</i>	32
3.9.2. <i>Desvantagens</i>	33

4. MIBEL	35
4.1. MERCADO DIÁRIO	36
4.2. MERCADO INTRADIÁRIO.....	37
4.3. MERCADO A PRAZO	37
4.4. RESERVA PRIMÁRIA.....	39
4.5. RESERVA SECUNDÁRIA.....	39
4.6. RESERVA TERCIÁRIA	40
5. CENTROS DE PRODUÇÃO DE AGREGADOS DA MOTA-ENGIL.....	41
6. CASO DE ESTUDO.....	47
6.1. ESCOLHA DO CASO DE ESTUDO.....	47
6.2. HIDROGEOLOGIA.....	51
6.2.1. <i>Recarga dos sistemas hidrogeológicos.....</i>	<i>52</i>
6.2.2. <i>Descarga dos sistemas hidrogeológicos.....</i>	<i>53</i>
6.2.3. <i>Avaliação das disponibilidades hídricas subterrâneas</i>	<i>53</i>
6.3. VOLUME DE ÁGUA NO FOSSO.....	54
6.3.1. <i>Primeiro método.....</i>	<i>56</i>
6.3.2. <i>Segundo método</i>	<i>57</i>
6.4. AVALIAÇÃO TÉCNICA E ECONÓMICA AO CASO DE ESTUDO	64
6.4.1. <i>Balanço remuneratório segundo mercado</i>	<i>64</i>
6.4.2. <i>Escolha da turbina</i>	<i>67</i>
6.4.3. <i>Balanço de caudais</i>	<i>70</i>
6.4.4. <i>Dimensionamento do reservatório inferior</i>	<i>72</i>
6.4.5. <i>Avaliação económica.....</i>	<i>72</i>
6.4.6. <i>Caso central a funcionar com paragens.....</i>	<i>73</i>
7. CONCLUSÕES	81
REFERÊNCIAS DOCUMENTAIS.....	85
APÊNDICES	89
APÊNDICE A.	91
APÊNDICE B.	147
APÊNDICE C.	149
APÊNDICE D.	153
APÊNDICE E.....	157
ANEXOS.....	159
ANEXO I.	161

Índice de Figuras

Figura 1: Reservatório Taum Sauk.....	6
Figura 2: Vista sobre o reservatório existente Hornberg I e ilustração do reservatório Hornberg II .	7
Figura 3: Ilustração do projeto Marmora	8
Figura 4: Vista sobre Okinawa Yanbaru	9
Figura 5: Esquema de uma central reversível	15
Figura 6: Esquema de um circuito aberto.....	16
Figura 7: Exemplo de circuito aberto – Barragem do Alqueva.....	16
Figura 8: Esquema de um circuito semi-aberto.....	17
Figura 9: Exemplo de circuito semi-aberto – Cortes II e La Muela.....	17
Figura 10: Esquema de um circuito fechado	18
Figura 11: Exemplo de circuito fechado – Turlough Hill	18
Figura 12: Turbina Pelton	21
Figura 13: Turbina Francis.....	22
Figura 14: Turbina Kaplan	23
Figura 15: Turbina Deriaz	24
Figura 16: Turbomáquina radial.....	25
Figura 17: Turbomáquina axial	26
Figura 18: Turbomáquina mista	26
Figura 19: Intervalo de aplicação das bombas reversíveis	29
Figura 20: Exemplo de uma bomba reversível.....	29
Figura 21: Exemplo de um Pool simétrico para a hora x	38
Figura 22: Exemplo de um Pool assimétrico	39
Figura 23: Pedreira de Penafiel	42
Figura 24: Extrato do mapa hipsométrico (Classes)	42
Figura 25: Extrato do mapa da precipitação (Quantidade total).....	43
Figura 26: Extrato do mapa da rede hidrográfica total e classificação decimal rede hidrográfica...	43
Figura 27: Possíveis localizações do reservatório.....	44
Figura 28: Possíveis localizações de descarga nos cursos de água	45
Figura 29: Curvas de nível – Pedreira Famalicão	55
Figura 30: Curvas de nível – Pedreira Penafiel.....	55
Figura 31: Mapa da humidade do ar - Famalicão.....	60
Figura 32: Mapa da humidade do ar – Penafiel.....	61
Figura 33: Gráfico do ponto de orvalho	61
Figura 34: Gráfico com preços médios de Portugal	64
Figura 35: Campos de aplicação das turbinas	69

Índice de Tabelas

Tabela 1: Cronograma do projeto.....	3
Tabela 2: Organização dos capítulos.....	4
Tabela 3: Constituintes de cada tipo de circuito.....	19
Tabela 4: Classificação turbinas hidráulicas	24
Tabela 5: Classificação bombas hidráulicas.....	27
Tabela 6: Dados dos pontos para localização do reservatório.....	44
Tabela 7: Dados dos pontos de interseção dos cursos de água.....	45
Tabela 8: Dados pedreira.....	45
Tabela 9: Resumo dos dados das pedreiras	46
Tabela 10: Potencial energético das pedreiras – descarga num reservatório inferior	48
Tabela 11: Potencial energético das pedreiras – descarga a partir de um reservatório com cota superior à pedreira.....	49
Tabela 12: Potencial energético das pedreiras – descarga em cursos de água	50
Tabela 13: Quadro resumo com os potenciais casos de estudo.....	51
Tabela 14: Resumo dados das bombas.....	56
Tabela 15: Caudal e volume extraído pelas bombas	57
Tabela 16: Estações meteorológicas	57
Tabela 17: Volume obtido da precipitação.....	58
Tabela 18: Altitude e fator adimensional	59
Tabela 19: Radiação solar incidente.....	59
Tabela 20: Temperatura do ar Braga.....	60
Tabela 21: Temperatura do ar Porto.....	60
Tabela 22: Evaporação mensal.....	62
Tabela 23: Volume total.....	63
Tabela 24: Volume útil.....	63
Tabela 25: Potencial energético	64
Tabela 26: Balanço remuneratório semanal	66
Tabela 27: Resumo dados	67
Tabela 28: Volume admitido.....	68
Tabela 29: Caudal da turbina	68
Tabela 30: Potência da turbina	69
Tabela 31: Balanço dos caudais horários	71
Tabela 32: Dimensionamento do reservatório inferior.....	72
Tabela 33: Ganhos com a operação da turbina.....	72
Tabela 34: Gastos com a operação da bomba	73
Tabela 35: Lucro total anual.....	73

Tabela 36: Balanço remuneratório mensal	75
Tabela 37: Dimensionamento do reservatório inferior	76
Tabela 38: Lucro total anual	76
Tabela 39: Velocidade do vento horária na estação meteorológica de Escudeiros	78

Nomenclatura

Caracteres

Δh - Diferença de alturas	(m)
Δt - Intervalo de tempo	(h)
η - Rendimento	-
γ - Peso volúmico da água	(N m ⁻³)
A - Área	(m ²)
$Alt.$ - Altitude	(m)
C_m - Fator de atenuação da radiação extraterrestre	-
E - Energia	(N.m)
E_l - Evaporação de lago	(mm mês ⁻¹)
F_{Alt} - Fator adimensional	-
H - Altura	(m)
P - Precipitação	(mm)
Q - Caudal	(m ³ s ⁻¹)
Q_s - Radiação solar incidente na superfície do lago	(W m ⁻²)
Q_{ex} - Radiação extraterrestre	(W m ⁻²)
T_a - Temperatura média do ar	(°C)
T_d - Temperatura média do ponto de orvalho	(°C)
u_2 - Velocidade do vento medida a dois metros de altura	(m s ⁻¹)

V - Volume	(m ³)
\bar{V} - Volume médio	(m ³)
$V. Evap.$ - Volume de evaporação	(m ³)
$V. Precip.$ - Volume de precipitação	(m ³)
\bar{X} - Média da Precipitação anual	(mm)

Abreviaturas

CAPSFIL - Carlos Augusto Pinto Dos Santos & Filhos Lda.

IPMA - Instituto Português do Mar e da Atmosfera

MIBEL - Mercado Ibérico da Energia Elétrica

OMIE – Operador de Mercado Ibérico de Energia (Polo Espanhol)

OMIP - Operador de Mercado Ibérico de Energia (Polo Português)

SNIRH - Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos

1. Introdução

A procura por fontes de energia sustentáveis teve um crescimento acentuado a nível mundial, visto que através do uso deste tipo de fontes de energia é possível diminuir a dependência energética em recursos endógenos, ao mesmo tempo que reduzem as emissões de gases de efeito de estufa. Por outro lado, apresenta-se a problemática criada pelo fim de vida de uma pedreira, cujo impacto ambiental e visual torna indispensável a intervenção no sentido de reabilitar estes espaços.

Existem diversas soluções para a recuperação ambiental e paisagística de antigas pedreiras sendo os mais comuns a recuperação da floresta e/ou agricultura, o cultivo de espécies vegetais autóctones raras, ou muito semelhantes às existentes, a reintrodução de aves ou a conservação da vida selvagem. Existem também outros projetos de recuperação benéficos à sociedade em geral que incluem a criação de áreas recreativas e de lazer, campos de golfe, parques industriais, anfiteatros, campos de jogos ou lagos para pesca.

No alinhamento destas duas temáticas surge a ideia de se criar uma fonte de energia sustentável através da reabilitação de uma antiga pedreira, evitando-se impactos maiores adjacentes aos aproveitamentos hidroelétricos do domínio público, que muitas das vezes provocam perdas naturais e culturais devido à criação de albufeiras.

Este projeto consistirá no aproveitamento do espaço gerado pela exploração de uma pedreira, através do alagamento provocado pela pluviosidade local e que através da criação de um túnel com queda de água provocará o acionamento de turbinas para geração de energia, num local anteriormente industrializado.

1.1. Contextualização

A ideia para este projeto surge no seguimento de um trabalho realizado na área das pedreiras, na Direção de Agregados da empresa Mota-Engil, onde se confrontou a problemática ambiental de recuperação de uma pedreira extinta com as novas utilidades que tal espaço poderia despertar na aplicação de novos projetos, que não só possam reabilitar a degradação do local, mas também iniciar um novo ciclo de vida de um projeto distinto da extração de agregados, mas ainda assim, com alguma rentabilidade.

O presente estudo insere-se no Estágio Curricular na empresa Mota-Engil detentora das pedreiras alvo de estudo desta Dissertação.

1.2. Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é o estudo do potencial energético de um aproveitamento hidroelétrico a partir da reabilitação de uma pedreira desativada. Os objetivos específicos são subdivididos em:

- Seleção do local do projeto de acordo com as pedreiras existentes.
- Estimar o volume de água acumulado.
- Dimensionar o reservatório anexo para onde será encaminhada a água.
- Selecionar a turbina que melhor se adequará a este projeto.
- Avaliar o potencial energético do projeto.

1.3. Calendarização

A calendarização dos trabalhos propostos ao longo do período de elaboração desta dissertação é apresentada no cronograma seguinte:

Tabela 1: Cronograma do projeto

	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov
Início dos trabalhos - Planeamento										
Pesquisa bibliográfica										
Estudo do caso Atdorf / outros										
Estudo das centrais reversíveis e seus componentes										
Avaliação das condicionantes para a escolha da pedreira - caso de estudo										
Avaliação do potencial hidrológico										
Determinação do volume de água no fosso										
Estudo do MIBEL										
Dimensionamento do reservatório artificial										
Elaboração dos balanços remuneratórios										
Redação da Dissertação										
Entrega do trabalho										

1.4. Apresentação da empresa

O presente relatório relata o estudo elaborado ao longo do Estágio Curricular na Direção de Agregados da empresa Mota-Engil. A Mota-Engil é uma empresa cujo principal foco de ação é a construção, abrangendo áreas de negócio como a Engenharia e Construção, Ambiente e Serviços, Concessões de Transportes, Energia e Mineração. Conta já com 70 anos de atividade, está presente em 22 países e participa em mais de 200 empresas.

A Direção de Agregados integra-se na empresa Mota-Engil, cujo o apoio na produção de agregados para a execução de diversas obras permitiu-lhe acumular uma experiência ao longo de cerca de 50 anos. A Direção de Agregados possui um vasto leque de centros de produção espalhados por todo o território nacional cuja origem dos agregados passa pelas rochas magmáticas, rochas sedimentares e rochas metamórficas, sendo líderes em rochas industriais no sector português. No momento contam com 11 pedreiras em produção e uma instalação de britagem e classificação na trituração de escombros provenientes da produção de blocos para rocha ornamental.

1.5. Organização do relatório

De seguida apresenta-se a divisão da dissertação que se encontra organizada em 7 capítulos:

Tabela 2: Organização dos capítulos

Capítulo 1	Introdução
Capítulo 2	Estado de Arte
Capítulo 3	Central Hidroelétrica Reversível
Capítulo 4	MIBEL
Capítulo 5	Centros de Produção de Agregados da Mota-Engil
Capítulo 6	Caso de Estudo
Capítulo 7	Conclusões

2. Estado da Arte

Os sistemas de aproveitamento hidroelétricos são alvo de estudo desde há várias décadas, existindo no momento diferentes tecnologias para as mais diversas aplicações. Todos eles envolvem reservatórios de água tanto naturais, como artificiais. No presente trabalho, os exemplos considerados serão analisados pelo potencial energético enquanto aproveitamentos hidroelétricos constituídos por reservatórios e turbinas reversíveis que funcionam ora como turbinas, enquanto geram energia, ora como bombas enquanto elevam a água do reservatório inferior para o superior.

De seguida serão expostos alguns dos tipos de projetos do género já existentes, e que se encontram espalhados por diversos países.

Iniciando com os sistemas de aproveitamento hidroelétrico em circuito aberto, temos o caso do “*Taum Sauk Pumped Storage Project*” que se encontra localizado em *St. Francois Mountains* nos Estados Unidos da América e foi o primeiro empreendimento do género, tendo começado a operar em 1963. Possui um reservatório superior com uma capacidade de 6,6 milhões de m³ quando está totalmente cheio. Este reservatório é equiparado a uma bateria que armazena a água durante a noite e gera energia nas horas de pico durante o dia. Este projeto está equipado com duas turbinas reversíveis, que funcionam como turbinas para gerar

energia e como bombas para elevar a água do reservatório inferior para o reservatório superior (Rogers, Watkins, & Hoffman, 2005).



Figura 1: Reservatório Taum Sauk (Fonte: Industcards)

Ainda nos Estados Unidos da América são enumerados outros projetos em circuito aberto, tais como, “*Rocky Mountain*” e “*Ludington*”, o primeiro localizado na Geórgia e o segundo em *Michigan* cujo reservatório superior está ligado ao lago *Michigan* que funciona como reservatório inferior.

Na Europa podem encontrar-se projetos semelhantes, como é o caso do aproveitamento hidroelétrico de *Cortes-La Muela* localizado em Espanha, *Le Cheylas* e *Revin* na França, *Campolattaro* na Itália e *Atdorf*, *Goldisthal*, *Koepchenwerk*, *Markersbach*, *Geesthacht*, *Rönkhausen*, *Kirchentellinsfurt* e *Wendefurth* na Alemanha.

No caso alemão salienta-se o caso de *Atdorf* que é um aproveitamento hidroelétrico igualmente em circuito aberto pertencente à empresa *Schluchseewerk AG* e que se localiza a sul da Floresta Negra em *Baden-Württemberg*, Alemanha (Schluchseewerk AG, 2016). Este projeto consiste num reservatório artificial (*Hornberg I*) implantado a uma altitude de 1.017,70 metros relativamente ao nível do mar, cuja dimensão é de 700 metros de comprimento, 300 metros de largura e 46 metros de profundidade, que retém 4,4 milhões de m³ de água, o suficiente para permitir operar à potência máxima durante 7 horas. A água sai do reservatório para um túnel onde sofre uma queda de 630 metros e coloca quatro turbinas com 910 MW de potência a gerar energia. Este sistema é reversível,

pelo que as turbinas efetuam a bombagem da água do reservatório de menor altitude (400 metros relativamente ao nível do mar) para o reservatório de maior altitude (1017,17 metros). A capacidade máxima de bombagem das turbinas reversíveis é de 980 MW. Este empreendimento cuja produção média anual é de 1,16 milhões MWh, contribui para mais de metade da produção total da empresa *Schluchseewerk AG* (Schluchseewerk AG, 2016). Está prevista a construção de outro reservatório (*Hornberg II*) cuja capacidade será de 9 milhões de m³. Será equipada com 6 turbinas reversíveis do tipo Francis. A potência instalada será de 1.400 MW, a capacidade de trabalho de aproximadamente 13 GWh e a descarga de água varia entre 200 e os 270 m³ s⁻¹. Este novo reservatório construído em betão betuminoso incluirá a construção de 26 km de túneis e poços (Fink, Fritzer, & Pehm, 2013).



Figura 2: Vista sobre o reservatório existente Hornberg I e ilustração do reservatório Hornberg II (Fonte: Freiburg-Schwarzwald)

Para os casos de aproveitamentos hidroelétricos em circuito fechado surge o projeto “*Marmora*”. Entre 1955 e 1979 operou em *Marmora, Ontario* no Canadá uma mina de ferro que deixou a céu aberto um fosso de 160 metros de profundidade. A empresa *Northland Power* viu nesta mina abandonada a oportunidade de desenvolver um projeto de aproveitamento hidroelétrico que irá usar o fosso da antiga mina em conjunto com um novo reservatório que será construído a uma altura superior. Serão utilizadas neste projeto turbinas Francis reversíveis, que permitirão gerar energia em circuito fechado, enquanto a água é descarregada para a mina e depois bombeada para o reservatório superior. A potência nominal será de 400 MW. E permitirá operar à potência máxima durante 5 horas (Northland

Power, 2016). Este sistema aproveitará um desnível de 140 metros para acionar as turbinas e armazenará água nas horas em que o sistema não esteja a produzir energia. Para este projeto estabeleceu-se o período de um ano destinado aos estudos ambientais, seguido de quatro anos de construção (Friesen, 2013).



Figura 3: Ilustração do projeto Marmora (Fonte: Northland Power)

Nos Estados Unidos está em estudo um projeto muito semelhante ao anterior. Fazendo uso de uma antiga mina de ferro que operou na cidade de *Eagle Mountain* em *Riverside County*, na Califórnia entre 1948 e 1982. Este projeto utilizará igualmente um desnível entre dois reservatórios, juntamente com quatro turbinas reversíveis com capacidade para produzir 1.300 MW. Coloca-se a possibilidade de utilizar fontes de energia eólica e solar para as horas de recarga do reservatório superior (Eagle Crest Energy Company, 2011).

Como exemplo de sistemas integrados em outros projetos, apresenta-se o caso “*John W. Keys III Pump-Generating Plant*” que eleva a água desde o lago *Franklin D. Roosevelt* até ao lago *Banks*. Este projeto integra parte do anterior projeto denominado “*Columbia Basin Project*” constituído por vários reservatórios cuja principal função era a irrigação de terrenos agrícolas. Em 1935 foi autorizada a construção da barragem *Grand Coulee* com o intuito de utilização para regadios, no entanto em 1941 esta passou a produzir energia. A construção do lago *Banks* iniciou-se em 1948 com objetivo de fornecer água para regadio e atividades recreativas. Em meados de 1960 foram instaladas neste sistema turbinas reversíveis para gerar energia em momentos de pico, num total de 314 MW instalados na atualidade (Interior, 2015).

Existe ainda um caso, único no mundo, em que é utilizada a água do mar, denominado de *Okinawa Yanbaru*, no Japão. Devido à condição geográfica deste país, juntamente com as controvérsias ambientais geradas pelos projetos hidroelétricos em cursos de água doce surge o projeto *Okinawa Yanbaru*, que utiliza água do mar para acionar uma turbina reversível. Este tipo de aproveitamento apresenta como principal problemática a corrosão ambiental nas suas componentes (Fujihara, Imano, & Oshima, 1998).



Figura 4: Vista sobre Okinawa Yanbaru (Fonte: DOE Global Energy Storage Database)

3. Central Hidroelétrica Reversível

De uma forma geral, uma central hidroelétrica reversível é um sistema produtor de energia renovável constituída por um sistema de reservatórios de água.

As centrais hidroelétricas convencionais transformam a energia mecânica da água, sob o efeito da gravidade, em energia elétrica, aproveitando uma diferença de cotas provocada por um açude ou barragem. Por outro lado, as centrais hidroelétricas reversíveis permitem, para além do anteriormente descrito, transformar energia elétrica em energia potencial gravítica através da bombagem de água de um reservatório inferior novamente para um reservatório superior, possibilitando, assim, a sua reutilização (Teixeira, 2012).

Os aproveitamentos hidroelétricos reversíveis possuem dois reservatórios, um a montante e outro a jusante e armazenam a água para os picos de necessidade de energia. O reservatório a montante está localizado a uma cota mais elevada do que o reservatório de jusante. Neste tipo de aproveitamentos, a energia é gerada quando há maior procura e os preços da energia estão mais altos. Depois é utilizada quando os preços da energia são mais baixos e as carências energéticas menores, para bombear a água do reservatório inferior para o reservatório superior.

A energia que é consumida para elevar a água é superior à quantidade de energia que é gerada quando esta é turbinada para o reservatório inferior. No entanto, a central será economicamente viável se a diferença de tarifas compensar essa diferença (Marques, 2015).

Os sistemas hidroelétricos reversíveis são uma tecnologia muito viável no apoio à integração de outras fontes de energias renováveis, tais como, a eólica e a fotovoltaica, uma vez que a intermitência na produção de energia destas fontes permite auxiliar a central hidroelétrica na etapa de elevação da água.

O problema mais comum neste tipo de sistemas prende-se com o facto de serem requeridas algumas especificações na escolha do local de implementação, tais como, desnível topográfico, boas condições geotécnicas, acesso a água e a redes de distribuição de energia (Wänn, 2013).

3.1. Armazenamento de energia

O aumento da produção energética através de fontes renováveis trouxe alguns problemas para o sistema elétrico de energia, uma vez que estas fontes possuem uma grande imprevisibilidade de produção, assim como, um carácter intermitente. À intermitência junta-se também o facto de o consumo ser muito variável ao longo do dia, podendo a produção energética estar desfasada das horas de maior consumo ao longo do dia. Por exemplo, a energia solar apenas produz durante as horas do dia em que há sol. E a energia eólica também está deveras condicionada pelas condições meteorológicas, tendo-se observado o facto de a produção ser maioritariamente no período da noite quando há uma redução na procura energética.

Com o aumento da produção dispersa nas redes elétricas a partir de fontes de energia renovável surgiram problemas como, perdas, flutuações na frequência do sistema, variações lentas e rápidas na tensão, continuidade de serviço, qualidade da onda de tensão, congestionamento nos ramos, alterações nos trânsitos de potência e dificuldades no despacho, tornando-se difícil assegurar o equilíbrio continuado, colocando em causa a confiança de abastecimento por meio de fontes renováveis (Costa & Gouveia, 2000).

Dos problemas enunciados nasce a urgência em serem criados sistemas de armazenamento de energia, permitindo assim que a energia elétrica seja transformada, de forma a poder ser armazenada, podendo posteriormente ser convertida novamente em energia elétrica disponível para consumo. Para superar a problemática introduzida pelas energias renováveis e recuperar a confiança no abastecimento dos consumidores é prioridade criar uma forma económica de armazenamento de energia.

Surge assim a importância dos sistemas hidroelétricos reversíveis, que permitem o equilíbrio das outras fontes de energia renovável, tais como, a energia eólica. A energia produzida numa central reversível pode ser armazenada de forma a ser usada nas horas de maior procura. Nas horas de maior produção de energia de fontes renováveis, em que os consumos estejam reduzidos, esta energia pode ser aplicada para elevar a água através da bombagem do reservatório inferior para o superior. Posteriormente esta água pode ser reutilizada para ser gerada energia através da turbina, nas horas em que os consumos aumentem (Ferreira, 2015).

As vantagens da integração dos sistemas de armazenamento no sistema elétrico passam pela estabilidade da rede em situações de instabilidade de origem interna, tais como, instabilidade angular, instabilidade de tensão e desvios de frequência.

Outra das vantagens é o suporte operacional da rede, como por exemplo, a regulação da frequência através da injeção ou absorção de energia, de maneira a que a frequência se mantenha em situações de oscilações na produção e na carga. Permite a reserva secundária ou terciária. Ajuda no suporte à tensão, através da injeção ou absorção de energia reativa. Permite unidades de *black start* que permitem o arranque de um sistema após a sua paragem completa, sem o uso de geradores ou apoio de rede.

Por fim, outra das vantagens é a fiabilidade uma vez que as falhas na rede são consequência de cavas de tensão e interrupções inferiores a 2 segundos (Neves, 2016).

Estes sistemas possuem diferentes aplicações de armazenamento de energia, sendo elas armazenamento a curto, médio e longo prazo. O armazenamento a curto prazo permite a reserva de energia para fornecimentos que vão desde alguns segundos até a um minuto.

A maior parte das interrupções no serviço de energia são causadas por falhas de pequena duração. E acresce também o facto de existirem indústrias com equipamento sensível ou em

que a própria atividade necessite de energia de elevada qualidade. Assim sendo, esta tecnologia apresenta-se como a ideal no fornecimento rápido de energia ou depressão na tensão, ou quando são solicitadas grandes quantidades de energia e esta deva estar acessível instantaneamente. Estes sistemas também se apresentam como os melhores na estabilização das oscilações no sistema, sendo vantajosos em locais remotos ou em locais onde a rede se apresenta instável.

O armazenamento a médio prazo é direcionado para o fornecimento de energia suficiente para aprovisionar potência nominal desde alguns minutos até algumas horas. É maioritariamente usado na incorporação de energias renováveis, controlo de frequência e reservas rápidas. Como as fontes de energia renovável são caracterizadas pelo fornecimento intermitente, a sua cooperação com este tipo de armazenamento de energia faz com que os operadores possuam ofertas mais seguras de energia. O armazenamento a médio prazo permite ainda o alisamento dos picos máximos de consumos das instalações consumidoras, dado que a energia armazenada permite satisfazer o consumo durante esses picos, o que se traduz em redução de custos.

Por fim, o armazenamento a longo prazo que permite a reserva de energia desde algumas horas até semana ou meses. Nos períodos em que se verificam picos de consumo e os períodos fora destes picos é usado o armazenamento a longo prazo, de forma a aproveitar as diferenças de preços da energia durante estes dois períodos. A técnica de armazenamento noturno e a produção de energia elétrica durante os picos de consumo durante o dia permite o alisamento dos diagramas de carga e a redução da implementação de novas centrais de produção energética (Pinto, 2011).

3.2. Modo de funcionamento das centrais

As centrais hídricas reversíveis são constituídas por dois reservatórios, cujo reservatório superior descarrega a água para o reservatório inferior transformando assim a sua energia potencial em energia cinética. A turbina aciona o gerador que converte a energia mecânica em energia elétrica e a injeta na rede elétrica. Nos períodos em que há menor procura de eletricidade e consequentemente os preços estão mais baixos, ou em momentos em que haja excesso de oferta de energia, a água é elevada do reservatório inferior para o reservatório superior através de uma bomba alimentada por um motor. Após esta fase, inicia-se um novo

ciclo de descarga. Apesar do consumo de energia resultante da fase de bombagem, este tipo de sistema tornou-se importante devido ao equilíbrio que executa na rede elétrica (Reidy, 2014).

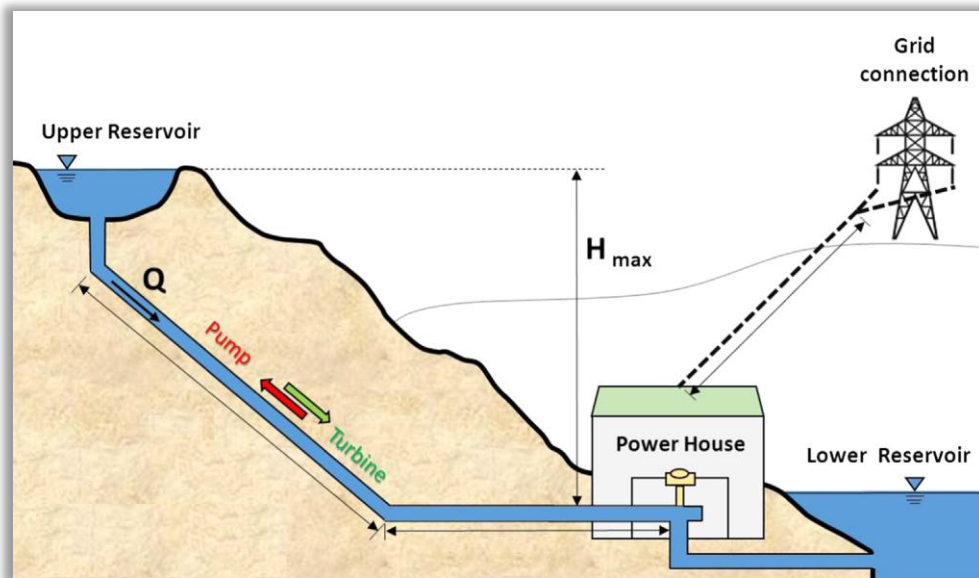


Figura 5: Esquema de uma central reversível (Fonte: Kucukali, 2014)

Existem várias tipologias e classificações das centrais hídricas reversíveis e estas dependem do fim a que se destinam. Em qualquer das tipologias, as turbinas e bombas encontram-se ligadas a um ou mais reservatórios, e podem estar ligadas ou não a um curso de água. As três principais tipologias denominam-se por centrais reversíveis de circuito aberto ou separado, centrais reversíveis de circuito semi-aberto ou combinadas e por fim, centrais reversíveis de circuito fechado ou puras.

3.2.1. Circuito aberto

No site *Federal Energy Regulatory Commission* (Federal Energy Regulatory Commission, 2016) os sistemas de aproveitamento hidroelétrico em circuito aberto são definidos como sendo “projetos que estão continuamente ligados a uma fonte de água que flui naturalmente”, onde os dois reservatórios estão integrados no mesmo rio, figura 6 e 7. Este é o tipo de circuito mais equiparável aos aproveitamentos hidroelétricos convencionais que podem

facilmente ser adaptados com turbinas reversíveis. Em Portugal foram instalados grupos reversíveis em vários aproveitamentos hidroelétricos.

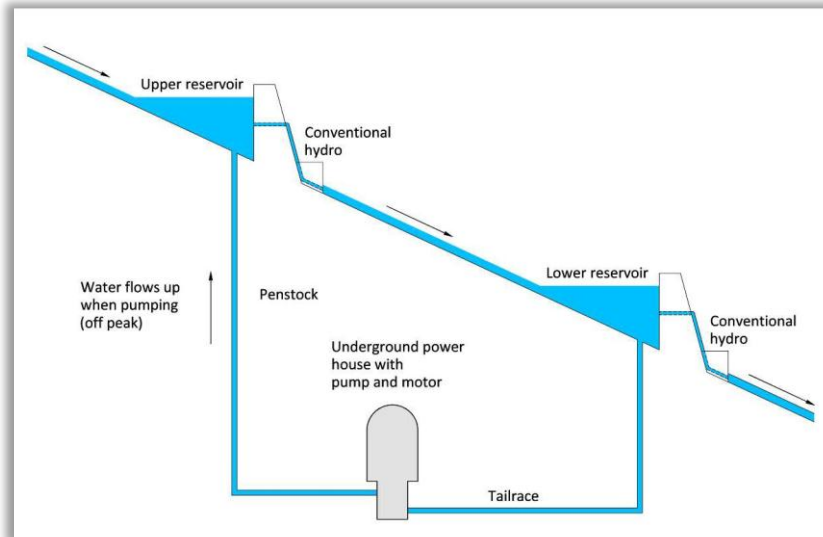


Figura 6: Esquema de um circuito aberto (Fonte: Reidy, 2000)



Figura 7: Exemplo de circuito aberto – Barragem do Alqueva (Fonte: A Terceira Dimensão)

3.2.2. Circuito semi-aberto

Os circuitos semi-abertos são considerados um sistema híbrido entre os circuitos abertos e os circuitos fechados. Estes sistemas constituem-se por um reservatório fechado,

normalmente artificial e por um outro reservatório associado a um rio, em que grande parte da água flui a partir deste último reservatório (Figura 8 e 9) (Reidy, 2014).

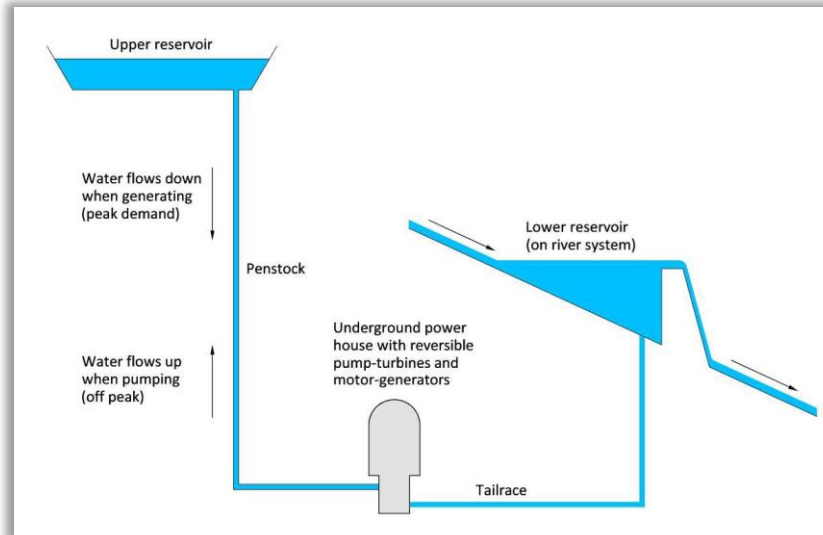


Figura 8: Esquema de um circuito semi-aberto (Fonte: Reidy, 2000)

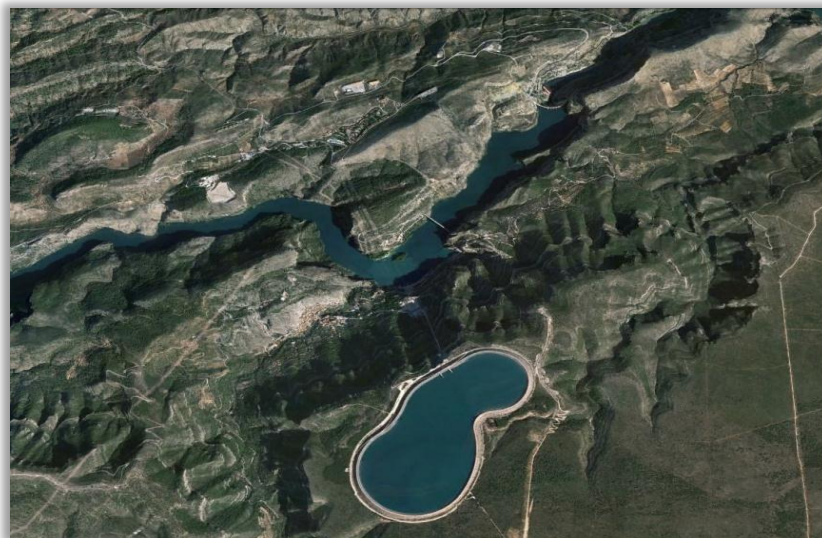


Figura 9: Exemplo de circuito semi-aberto – Cortes II e La Muela (Fonte: Google Earth)

3.2.3. Circuito fechado

Os sistemas em circuito fechado são constituídos por dois reservatórios fechados, em que nenhum dos dois está associado a um rio (Figura 10 e 11). Podem ser naturais ou artificiais. O enchimento inicial é feito através da água do próprio local, captação ou chuva. (Reidy, 2014) Este tipo de circuito apresenta menores impactos ambientais, uma vez que não apresenta problemas, tais como a migração de peixes e de sedimentos (Energy Storage Association, 2016).

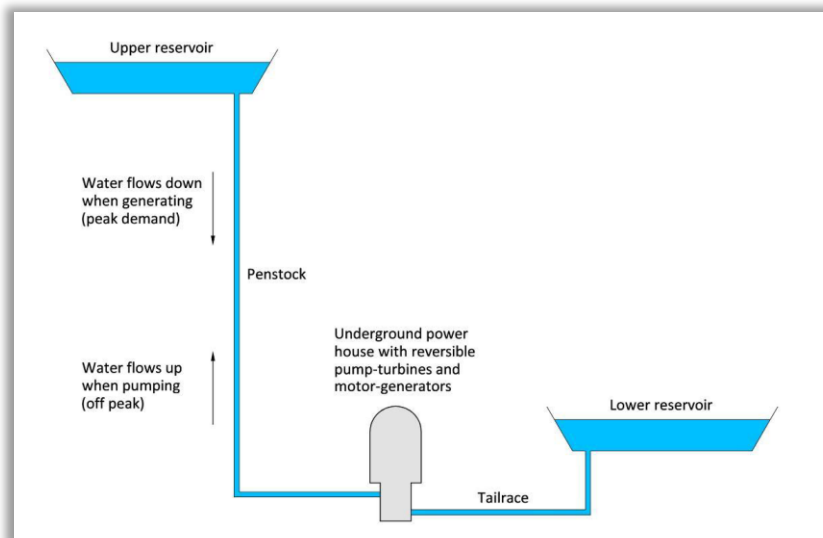


Figura 10: Esquema de um circuito fechado (Fonte: Reidy, 2000)



Figura 11: Exemplo de circuito fechado – Turlough Hill (Fonte: ESB)

De seguida apresenta-se um quadro resumo com os constituintes tipicamente usados para cada um dos três tipos de circuitos. A opção “Lago Natural” é usada preferencialmente, caso as condições assim o permitam, com o intuito de minimizar custos.

Tabela 3: Constituintes de cada tipo de circuito

Tipo de circuito reversível	Reservatório	Reservatório artificial	Lago natural	Rio	Águas costeiras
Circuito aberto	Reservatório superior			✓	
	Reservatório inferior			✓	
Circuito semi-aberto	Reservatório superior	✓	✓		
	Reservatório inferior	✓	✓	✓	✓
Circuito fechado	Reservatório superior	✓	✓		
	Reservatório inferior	✓	✓		

3.3. Constituintes do sistema

3.3.1. Reservatório superior

O reservatório superior pode ser um lago natural ou artificial, ou um rio e está a uma cota superior. Neste caso de estudo será aplicado a um fosso de uma pedreira. Quando é construído um reservatório artificial este pode ter variadas formas e normalmente é coberto com uma camada impermeável. Este pode ser um reservatório de aterro ou com paredes de betão. Nos casos em que o reservatório se aplica a um fluxo de água, rio, é necessária a construção de uma barragem que retenha a água (Reidy, 2014).

3.3.2. Reservatório inferior

Tal como o reservatório superior, o inferior pode ser um lago natural, artificial, um rio ou até o mar. Tem que ter uma capacidade, pelo menos, igual à do reservatório superior. Quando este é um lago natural pode manter-se inalterado ou adaptado a uma maior capacidade.

Quando o reservatório é uma linha de água natural, é necessária a construção de uma barragem que retenha a água. Existe também um único caso, *Yanbaru* na ilha de *Okinawa*, em que o reservatório inferior é o mar (Reidy, 2014).

3.3.3. Central de produção

A central é o local onde se instalam as turbinas e todos os equipamentos auxiliares. Normalmente localiza-se perto do reservatório inferior e a maior parte da estrutura é subterrânea. A profundidade da central é determinada pelas exigências da turbina (Reidy, 2014).

Todo o funcionamento da central é supervisionado e comandado através de um centro de controlo inserido na central de produção.

3.3.4. Conduta forçada

A conduta forçada é a conduta onde a água segue dos reservatórios para a turbina-bomba e vice-versa (Reidy, 2014).

3.3.5. Canal de restituição

O canal de restituição é o túnel que descarrega a água das turbinas para o reservatório inferior (Reidy, 2014). Pode também servir para fazer a ligação a uma linha de água natural, ou para descarga de eventuais volumes em excesso ou ainda, e caso seja necessário, para esvaziamento de um dos reservatórios.

3.3.6. Subestação

A central de produção está ligada à rede elétrica através da subestação. A subestação contém o equipamento transformador e interruptor elétrico e normalmente localiza-se fora da central de produção (Reidy, 2014).

3.4. Turbinas

As turbinas são definidas como máquinas que conseguem obter energia através do movimento de um fluido e podem ser classificadas como turbinas de impulso ou turbinas de reação.

As turbinas de impulso extraem essencialmente energia cinética o que leva a uma variação da quantidade de movimento. Pode-se verificar que a queda de pressão estática ao longo do rotor é igual a zero e a água encontra-se tipicamente à pressão atmosférica. Exemplos deste tipo de turbinas são as Turbinas Pelton.

A turbina Pelton foi concebida por *Lester Pelton* (1829-1908). Este tipo de turbina transforma a pressão da coluna de líquido em alta velocidade à saída do injetor. Os grandes desníveis de água otimizam o funcionamento deste tipo de turbina (Costa, 2014).

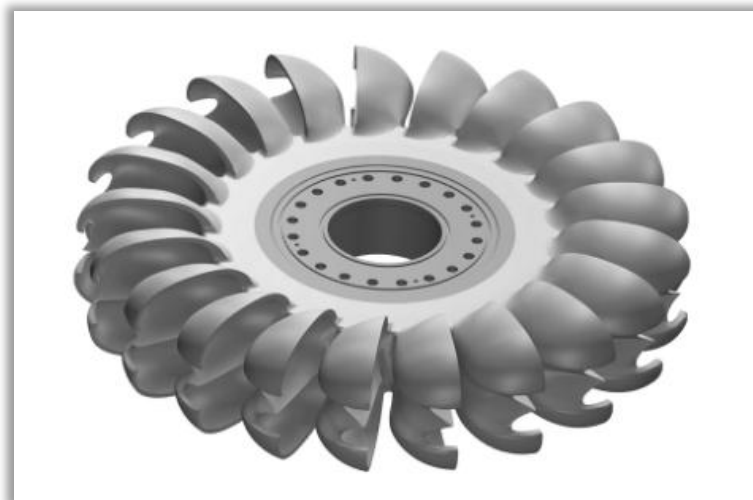


Figura 12: Turbina Pelton (Fonte: Voith)

A turbinas Turgo não são mais do que uma variante da turbina Pelton apesar de estarem direcionadas para aplicações de menor carga do que as que são utilizadas nas turbinas Pelton. Aqui também a pressão é previamente transformada em velocidade, e a ação sobre a turbina é feita a pressão constante.

As turbinas de reação caracterizam-se por serem as mais adequadas para trabalharem com caudais elevados e alturas de nível de líquido reduzidas. Sendo as que mais tipicamente se podem encontrar nos grandes aproveitamentos hidroelétricos. Para além da energia cinética também extraem energia da queda de pressão do fluido, existindo uma variação da velocidade relativa do fluido ao longo do rotor. Este tipo de turbinas caracteriza-se por ter as condutas e o rotor completamente submersos no fluido. Se funcionarem “em sentido inverso”, ou seja, de forma reversível podem-se assemelhar às bombas, recarregando albufeiras em períodos de baixo consumo. Existem diversas configurações, tais como: fluxo radial, fluxo misto e fluxo axial. Exemplos deste tipo de turbinas são as Turbinas Francis e Turbina Kaplan (de Bolbo).

A turbina Francis foi concebida pelo engenheiro *James B. Francis* e geralmente apresentam-se como turbinas de fluxo radial ou misto. Acima do rotor existe uma roda distribuidora. As suas pás ajustam-se para direcionarem corretamente o líquido que chega à voluta (espiral) e, assim, otimizar o aproveitamento da altura de coluna de líquido (pressão) disponível. Existem diversas analogias entre as turbinas Francis e as bombas centrífugas. Analisando inversamente podem funcionar como uma bomba centrífuga (rotação e fluxo), extraíndo energia do fluido, em vez de lhe fornecer (Costa, 2014).

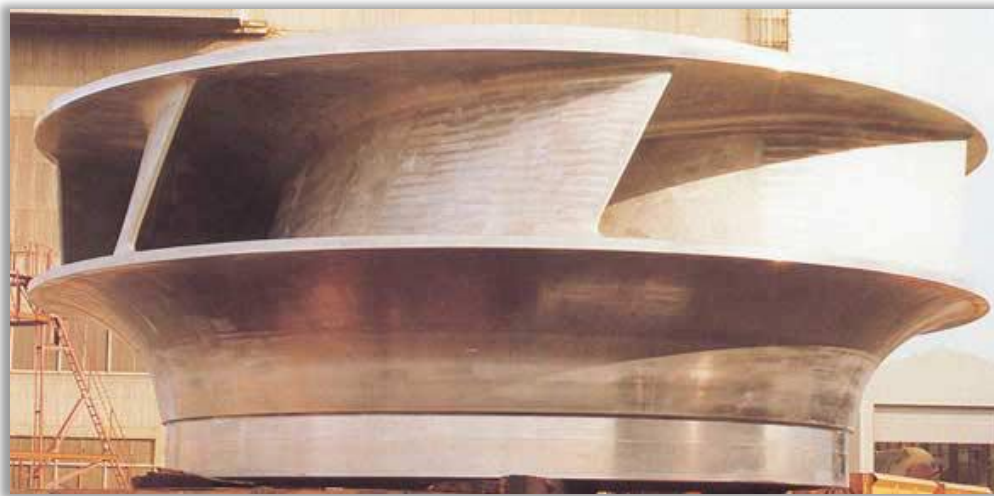


Figura 13: Turbina Francis (Fonte: Costa, 2014)

A turbina Kaplan foi concebida pelo professor alemão *Victor Kaplan* e é um tipo de turbina de fluxo axial. Tal como as turbinas de Francis são constituídas por um rotor e a montante deste existe uma roda de pás distribuidora. São tipicamente usadas em aproveitamentos hidráulicos de muito baixa queda disponível (Costa, 2014).



Figura 14: Turbina Kaplan (Fonte: Voith)

A turbina de Bolbo é uma variante da turbina Kaplan, visto que as Kaplan apresentam um eixo vertical com uma roda direcionadora com pás verticais, contudo existem configurações em que o eixo é horizontal, sendo esta a configuração designada por turbina de Bolbo. A roda direcionadora apresenta pás numa disposição diagonal, imediatamente antes do rotor. Toda a maquinaria de controlo, bem como o gerador elétrico encontram-se no interior de um bolbo, que tem acesso através de um poço (Costa, 2014).

A turbina Deriaz está situada, em termos de características, entre as turbinas Francis e as Turbinas Kaplan. E tal como as Turbinas Kaplan, também possuem pás do rotor ajustáveis (para além da roda direcionadora) (Costa, 2014).



Figura 15: Turbina Deriaz (Fonte: Costa, 2014)

Na tabela seguinte resumem-se os vários tipos de turbinas existentes.

Tabela 4: Classificação turbinas hidráulicas

Turbomáquinas	Modos de ação	Direção do escoamento na roda	Designação corrente
Turbinas	Impulso	-	Pelton
	Reação	Radiais-Mistas	Francis
		Axiais	Kaplan
		Mistas	Deriaz

3.5. Bombas

As bombas são máquinas hidráulicas capazes de elevar a pressão de um fluido, ou seja, possuem a capacidade de comunicar energia a um fluido.

Existem dois tipos de bombas, as bombas de deslocamento positivo (rotativas e alternativas), onde um pistão ou êmbolo aplicam diretamente a ação num fluido, são exemplo, as bombas

de engrenagens, bomba helicoidal, de palhetas e pistão giratório. Por outro lado, existem as bombas rotodinâmicas ou turbo-bombas em que a aceleração provocada através de um rotor dotado de pás transfere movimento ao fluido.

As bombas rotodinâmicas podem ser classificadas como: bombas radiais (centrífugas ou centrípetas), bombas axiais ou bombas mistas.

As turbomáquinas radiais - centrífugas ou centrípetas são aquelas cujas linhas de corrente são inseridas em planos perpendiculares ao eixo, casualmente com exceção na imediata vizinhança deste. Nas turbomáquinas radiais - centrífugas ou centrípetas o líquido é aspirado a baixa pressão, dando-se a transformação de energia de velocidade em pressão através do rotor, saindo pela descarga. Nas bombas centrífugas o fluido move-se dentro do corpo da bomba e é feita pressão através da ação da força centrífuga aplicada pelo propulsor/roda. O fluido é encaminhado desde a entrada até à saída, entrando axialmente pelo centro e saindo radialmente pela periferia. A aspiração do fluido pode ser simples ou dupla, caso seja realizada por um ou dois lados. Esta transformação energética é feita na voluta e no cone divergente que lhe segue (Oliveira, 2008; Ferreira, 2015).

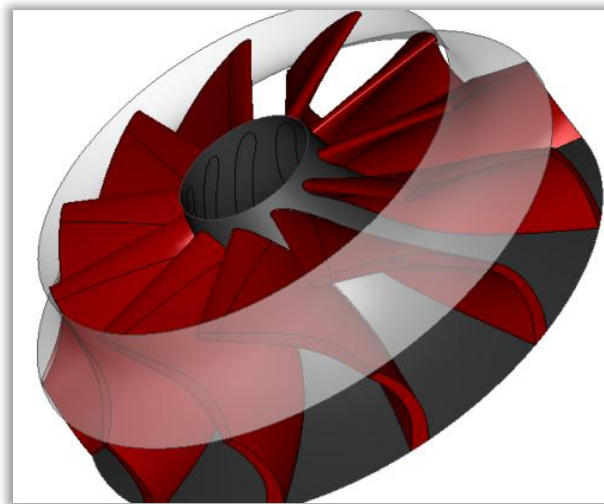


Figura 16: Turbomáquina radial (Fonte: CFturbo)

As turbomáquinas axiais são aquelas cujas linhas de corrente estão situadas em superfícies de revolução, que são muito aproximadamente cilindros, de eixo paralelo ao da turbomáquina. Estas bombas aumentam a pressão no fluido a partir da ação de sucção ou

ação propulsora das pás. Neste tipo de bombas não está presente a voluta, existindo sim um cone divergente a jusante da roda (propulsor) onde se dá a recuperação de energia cinética em energia de pressão (Oliveira, 2008; Ferreira, 2015).

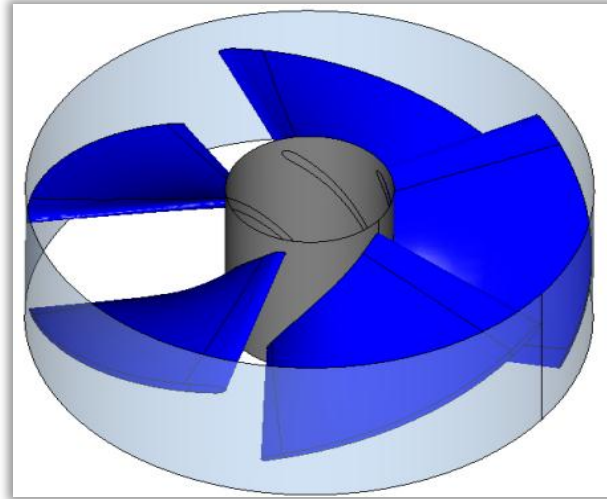


Figura 17: Turbomáquina axial (Fonte: CFturbo)

As turbomáquinas mistas são aquelas cujas velocidades em cada ponto apresentam componentes axiais e radiais apreciáveis. O fluido entra axialmente na bomba e sai numa direção intermédia entre radial e axial. Possuem ainda a denominação de helicoidais, podendo dividir-se em helicocentrífugas e helicocentrípetas, conforme o movimento do fluido, que poderá ser do veio para a periferia ou em sentido inverso. Neste tipo de bombas a pressão é criada uma parte, com recurso à força centrífuga e outra pela ação da sucção das pás sobre o líquido (Oliveira, 2008; Ferreira, 2015).

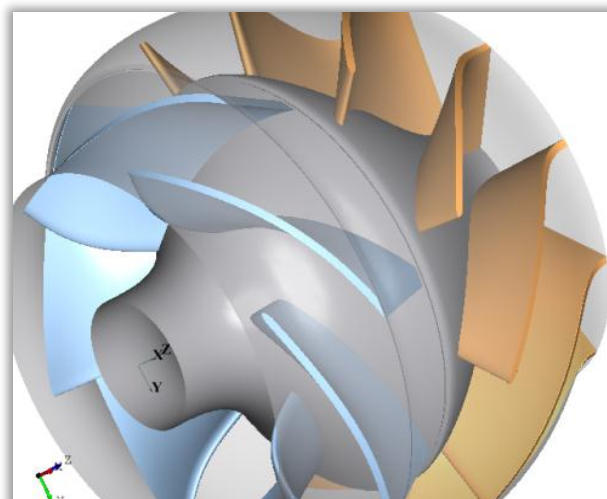


Figura 18: Turbomáquina mista (Fonte: CFturbo)

De seguida apresenta-se um quadro resumo sobre a classificação das bombas.

Tabela 5: Classificação bombas hidráulicas

Turbomáquinas	Modos de ação	Direção do escoamento na roda	Designação corrente
Bombas	Rotodinâmicas	Radiais	Bombas centrífugas
		Mistas	Bombas mistas
		Axiais	Bombas axiais
	Deslocamento positivo	-	Rotativas ou alternativas

As bombas são construídas por duas partes essenciais que permitem as transformações de energia, o impulsor ou roda e o corpo da bomba.

O impulsor ou roda tem a função de modificar a direção das trajetórias líquidas, através da força centrífuga e, assim converter energia mecânica em energia cinética. Este componente é constituído por um núcleo que se move através do seu próprio eixo e onde se ligam as pás. Nas bombas centrífugas e mistas as pás podem ser fechadas, meio abertas ou abertas, conforme existam duas coroas solidárias com as pás, exista uma ou não existam.

Quanto ao corpo da bomba este encaminha o líquido para a roda, convertendo a energia cinética em energia de pressão. É constituído por chumaceiras e por dois trechos da conduta, um trecho da conduta de aspiração a montante do impulsor e a jusante, um trecho de conduta de compressão. O corpo da bomba é constituído por voluta e circular. A voluta é projetada de forma a que se mantenha constante a velocidade de saída do fluído em torno da roda e para que a mesma se reduza na passagem à seção de saída. Quanto à circular, a sua seção é constante e concêntrica com a roda, esta última dotada de pás fixas que orientam o escoamento e reduzem a velocidade do líquido, transformando-o em energia potencial de pressão (Oliveira, 2008; Ferreira, 2015).

3.6. Bombas a funcionar como turbinas

Tem-se vindo a assistir nas últimas décadas a um aumento do uso de bombas a funcionar como turbinas. Estas consistem em turbinas reversíveis que funcionam tanto como bombas ou como turbinas dependendo do sentido de rotação em que estão a atuar. Esta tecnologia permite uma redução nos custos visto que a utilização de turbina e bomba separadamente acarreta custos de aquisição destas duas máquinas, bem como, a necessidade de existir duas condutas para a circulação da água.

De momento já é possível aplicar uma bomba a funcionar como turbina numa gama de alturas com menos de 50 metros até mais de 800 metros e com capacidades unitárias que vão desde abaixo de 10 MW até mais de 500 MW.

A velocidade de rotação da bomba / turbina pode ser variada através da implementação da velocidade variável pelo uso do motor-gerador assíncrono ou síncrono, com conversor de frequência. Com isto, a gama de funcionamento da turbina pode ser estendida e a capacidade da bomba pode ser ajustada para utilizar apenas a quantidade de energia disponível. Esta tecnologia permite a estabilização da rede de forma eficiente (Voith, 2011).

Esta tecnologia apresenta vantagens, tais como, baixo preço, disponibilidade no mercado já equipadas com motores e geradores, fácil instalação e manutenção reduzida (Castro, 2008).

A seleção do tipo da bomba ideal varia com o caudal a descarregar, com a altura de elevação, assim como, os custos iniciais e de manutenção. Na Figura 19 é apresentada a gama de aplicação deste tipo de máquinas.

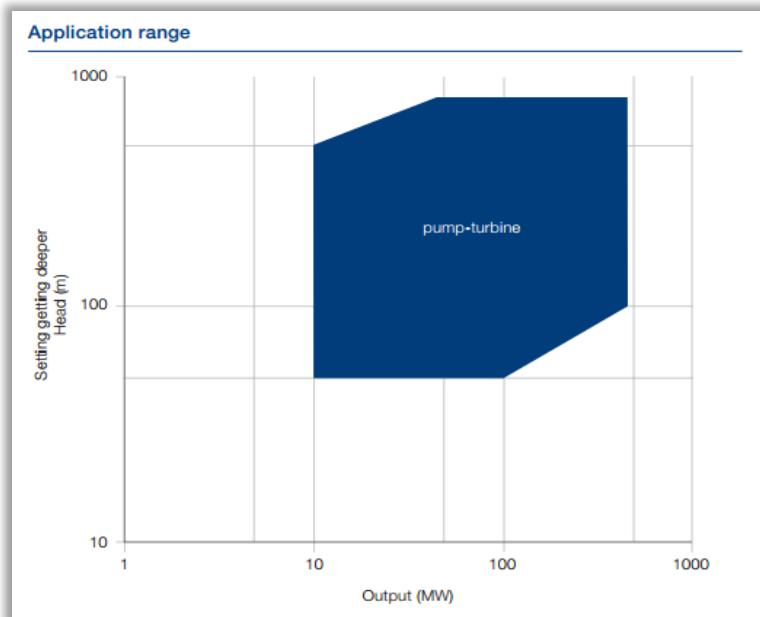


Figura 19: Intervalo de aplicação das bombas reversíveis (Fonte: Voith)

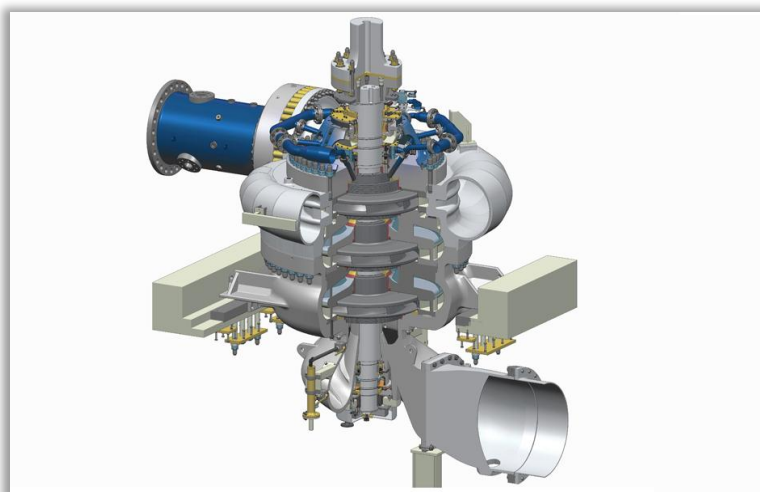


Figura 20: Exemplo de uma bomba reversível (Fonte: Voith)

3.7. Geradores

As turbinas são acionadas através da passagem da água, produzindo-se assim energia mecânica. Para que a energia mecânica seja convertida em energia elétrica é necessário que à turbina esteja acoplado um gerador. Os geradores são máquinas rotativas que convertem a energia mecânica em energia elétrica disponível nos seus terminais. A conversão da energia dá-se através do aproveitamento dos fenômenos de indução eletromagnética. Existem dois

tipos de geradores usados para este fim. O gerador síncrono e o gerador assíncrono (Ramos, 2000).

A escolha do gerador recai diretamente sobre as especificidades impostas à turbina, tais como, rendimento, velocidade nominal e de embalamento, constante de inércia e tipo de regulação (Castro, 2008).

O gerador assíncrono é uma máquina elétrica de indução ou máquina elétrica assíncrona e para a sua atividade necessita de uma fonte exterior de potência reativa. É constituída por um circuito magnético composto por um empacotamento de chapas magnéticas. É visível um enrolamento polifásico distribuído em ranhuras na parte estatórica da máquina. O circuito elétrico rotórico é constituído por cobre ou alumínio, ou seja, material condutos disposto em barras curto-circuitadas nas pontas através de anéis do mesmo material, constituindo-se assim uma gaiola esquilo. Quando as potências são altas o enrolamento rotórico é constituído por um enrolamento que se constitui através de condutores elétricos. No gerador de indução é usado o rotor em curto-circuito de forma a se obter maior robustez e simplicidade (Piqueiro, 1991).

O gerador assíncrono é a solução técnica e economicamente mais escolhida por causa da sua simplicidade, robustez, fiabilidade, economia e manutenção simples. Este gerador não necessita de um sistema de excitação, visto que a rede a que o grupo se encontra ligado fornece esta energia. No entanto, como desvantagem, o gerador assíncrono absorve energia reativa obrigando o sistema a possuir uma bateria de condensadores, para evitar que esta energia seja injetada na rede à qual o grupo electroprodutor está ligado (Barbosa, 2015).

O gerador síncrono é um gerador de corrente alternada em que a frequência se relaciona com a velocidade de rotação n , através do número de pares de polos p , cuja equação é $f = p n$. Este tipo de gerador precisa de uma fonte de corrente contínua com intuito de alimentar as bobinas de excitação dos polos indutores que se localizam no rotor. O circuito estatórico é composto por um enrolamento polifásico, trifásico na maioria das vezes, que se divide na superfície do circuito através de ranhuras, circuito este que é constituído por um empacotamento de chapas magnéticas. O campo magnético que segue o movimento do rotor é criado através de bobinas indutores que transitam em corrente contínua. Assim, os condutores do estator cruzam-se com um fluxo magnético variável que incita uma força

eletromotriz dinâmica, que é alternada em consequência da sucessão dos polos magnéticos (Piqueiro, 1991).

O gerador síncrono é a solução para centrais de maior potência, onde se necessita de soluções técnicas mais complexas e a componente económica não é tão crítica. O custo dos geradores aumenta sensivelmente com o número de polos, ou seja, diminui com o aumento da velocidade nominal. Sendo uma vantagem económica associada ao uso de multiplicadores de velocidade e geradores de indução. No entanto, este conjunto também apresenta desvantagens: redução do rendimento e consequentemente, da energia produzida, mais manutenção, menos fiabilidade, construção especial para proteção contra embalamento. Tudo isto fez com que os projetistas a elegessem como solução habitual em aproveitamentos hidroelétricos, constituída por grupos turbina/alternador, que não necessitam de caixas de velocidades (Castro, 2008).

Quando se trata de potência igual, o gerador de indução é mais pequeno e simples pelo que não precisa de excitatriz, nem possui exigências no momento de inércia. Posto isto, não é afetado no lado do rotor, analisando-se o seu fator de potência em decrescimento para pequenas frações de potência. Assim sendo é dada prioridade à sua utilização para potências constantes, contudo pode ser apetrechado de dispositivos capazes de compensar o fator de potência. Em contrapartida, as máquinas síncronas funcionam em regime de cargas parciais sem necessidade de incluir dispositivos de compensação de fator de potência.

As máquinas síncronas podem ser usadas tanto em rede isolada como a funcionar em paralelo com uma grande rede. Acresce ainda o trabalho em regime de potência variável e tensão constante, assim como, em regime de potência variável. Recebendo para tal, energia reativa, tanto de forma isolada como conectado à rede já existente (Piqueiro, 1991).

3.8. Mecanismos de controlo e ligação à rede

Os dispositivos de controlo e comando principais baseiam-se no controlo da turbina e no controlo do gerador. De forma a ser obtido um desempenho ótimo nas ações de controlo, estes dispositivos vão depender muito do tipo de gerador utilizado, bem como, o seu modo de funcionamento, tendo diferentes opções para o caso de gerador ser síncrono ou assíncrono e estar a funcionar em paralelo com a rede ou em funcionamento isolado.

A ligação à rede deverá ser feita através de um ramal de ligação, que deverá transmitir o máximo de potência posta à disposição da rede pública pelo produtor (Ferreira, 2015).

3.9. Vantagens e desvantagens das centrais hidroelétricas reversíveis

Enumeram-se de seguida as vantagens e desvantagens deste tipo de tecnologia:

3.9.1. Vantagens

- Fonte de energia renovável que evita a emissão de gases poluentes, tais como, os inerentes à queima de combustíveis fósseis.
- Permite a complementaridade com outras fontes de energia, tais como, eólica e fotovoltaica.
- Estabilização da rede elétrica.
- Possui um rendimento energético elevado, entre 80 a 90%.
- Possui um leque variado de potências instaladas e dimensões de obras.
- Gera energia nas horas de maior procura energética, sendo uma resposta rápida em picos de carência, contribuindo assim para a estabilização e fiabilidade da rede.
- Fornecem à rede elétrica serviços auxiliares, tais como, controlo de frequência e reservas energéticas. Esta vantagem deve-se à capacidade destes sistemas de armazenamento de energia responderem a grandes variações de carga em poucos segundos.
- Promove a segurança energética pois compensa as oscilações na procura / oferta de energia.
- Tempo médio de vida longo, podendo chegar aos 100 anos, o que faz com que o investimento inicial tenha retorno a longo prazo devido aos poucos custos de manutenção associados (Ferreira, 2015; Marques, 2015).

3.9.2. Desvantagens

- Requer mais energia para a bombagem do que aquela que é possível produzir, devido aos baixos rendimentos das bombas.
- Elevado investimento de capital.
- Longos períodos de construção e grandes impactes ambientais adjacentes a esta fase.
- Dificuldades na seleção do local devido à exigência de água disponível para turbinar e de desnível topográfico elevado para que o aproveitamento se torne economicamente viável (Ferreira, 2015; Marques, 2015).

4. MIBEL

A compra e venda de eletricidade em Portugal rege-se pelo MIBEL (Mercado Ibérico da Energia Elétrica), que será descrito neste capítulo e no qual serão baseados os cálculos deste estudo. Tanto a venda de eletricidade produzida na fase de geração, como a compra de eletricidade para a fase de elevação da água serão orientadas pelos preços do mercado diário do MIBEL.

Com o intuito de integrar os sistemas elétricos de Portugal e Espanha, os Governos destes dois países juntam-se num processo de cooperação e decidem criar o MIBEL, obtendo-se assim um contributo considerável, tanto para o mercado ibérico, como a nível europeu, dado ter sido uma etapa fundamental para a construção do Mercado Interno de Energia. O MIBEL iniciou em janeiro de 1998 a atividade com o mercado espanhol, mas foi a 1 de julho de 2007 que se iniciou este projeto em toda a sua dimensão, possuindo a tarefa de harmonizar as condições entre os dois sistemas elétricos ibéricos, com o intuito de beneficiar os consumidores dos dois países, no que toca a garantia de acesso a todos os interessados (MIBEL, 2016).

Com a criação do MIBEL tornou-se possível a aquisição de energia elétrica, por parte de qualquer consumidor do espaço ibérico, num regime de livre concorrência, a qualquer produtor ou comercializador cuja ação seja num dos dois países ibéricos.

O MIBEL possui como metas, o desenvolvimento do mercado da eletricidade entre Portugal e Espanha, passando a existir uma metodologia única e integrada de criação dos preços de referência. Permite o livre acesso a todos os intervenientes de forma igualitária em termos de transparência, objetividade, direitos e deveres. Permite o favorecimento dos consumidores de eletricidade dos dois países pois integra os dois sistemas elétricos. Promove a livre concorrência entre as empresas do sector elétrico e favorece a sua eficiência económica. Por fim, organiza a atividade do mercado baseada nos princípios de objetividade, liquidez, transparência, livre concorrência, auto-financiamento e auto-organização (OMIP, 2016).

A entidade responsável pela gestão do mercado “spot” de contratação à vista é o OMIE (Operador del Mercado Ibérico de Energia (Pólo Español), S.A., que institui programas de venda de eletricidade (Produção) e de compra para o dia seguinte ao da negociação, possuindo uma componente de contratação diária e uma componente de ajustes intradiários (mercados intradiários).

O responsável pelos mercados a prazo do MIBEL é o OMIP (Operador do Mercado Ibérico de Energia (Pólo Português), SGMR, S.A.) sendo este o detentor do estatuto de mercado regulamentado. O OMIP regula o funcionamento do mercado, atuando como entidade gestora responsável pela Plataforma de Negociação do mercado de derivados (MIBEL, 2016).

4.1. Mercado diário

No Mercado Diário os preços da eletricidade são estipulados às 12:00 horas durante todos os dias do ano, para a totalidade de horas do dia seguinte. O valor da eletricidade para uma determinada hora, bem como, o seu volume são determinados entre a oferta e a procura, seguindo o modelo marginalista adotado pela UE, com base no algoritmo aprovado para todos os mercados europeus - *EUPHEMIA*.

Os agentes de compra e venda podem ir ao mercado, tanto em Espanha como em Portugal e as suas ofertas são aceites consoante a sua ordem de mérito económico, até que a interligação entre Portugal e Espanha fique completamente preenchida. Se a capacidade de interligação admitir o fluxo comercializado, então o preço da eletricidade será igual em Portugal e

Espanha. Caso não admita, então os preços serão diferentes nos dois países. Em 2014, o preço da eletricidade em Portugal foi o mesmo que em Espanha durante 90% do tempo, demonstrando assim o correto funcionamento do MIBEL.

Do ponto de vista económico, os resultados do mercado diário a partir da contratação livre revelam-se a solução mais eficiente. No entanto é fundamental que também o seja do ponto de vista físico. Assim, os resultados são enviados ao Operador do Sistema que verifica a exequibilidade técnica e a este processo é dado o nome de gestão das restrições técnicas do sistema (OMIE, 2016).

4.2. Mercado intradiário

Após o fecho do mercado diário, os agentes têm a possibilidade de voltar a comprar e a vender eletricidade no mercado intradiário, ou seja, algumas horas antes do tempo real em sessões diferentes. Tal como no mercado diário, existem sessões de contratação fundamentadas em leilões onde o volume e o preço da energia, para cada hora, são definidas através da intersecção entre a oferta e a procura.

O mercado intradiário no MIBEL é o mais líquido da EU devido ao sistema marginalista por sessões, que possibilita a todos os agentes ajustar de forma fácil e em igualdade de condições a sua colocação no mesmo dia da transferência física. O mercado intradiário oferece preços idênticos aos do mercado diário.

O mercado intradiário possibilita o reajuste dos compromissos dos agentes até quatro horas antes do tempo real. Após esse momento, a estabilidade entre a produção e o consumo é assegurada por outros mercados geridos pelo Operador do Sistema (OMIE, 2016).

4.3. Mercado a prazo

O mercado a prazo qualifica-se por ser um mercado organizado e regulamentado de contratação de eletricidade a prazo. O OMIP é a entidade responsável pela gestão da plataforma de negociação e pelo seu normal funcionamento. A estas funções juntam-se

também a admissão dos participantes e a definição, listagem e gestão da negociação de contratos. É também responsável pela promoção do registo das operações (Pinto, 2011).

A determinação do preço da energia no MIBEL é feita através do *Pool* simétrico ou *Pool* assimétrico.

O *Pool* simétrico consiste na definição do preço da eletricidade a partir do ponto de interseção entre a ofertas dos produtores e a procuras dos comercializadores ou grandes consumidores. As ofertas dos produtores são ordenadas por ordem crescente de preço, enquanto que as procuras são ordenadas por ordem decrescente de preço. O valor pode depois ser ajustado ao mercado intradiário. As ofertas e as procuras que ultrapassem o ponto de interseção (tracejado na imagem em baixo) não são aceites, no entanto ainda poderão ser aceites caso haja ajustes no mercado de serviços de sistema (Neves, 2016).

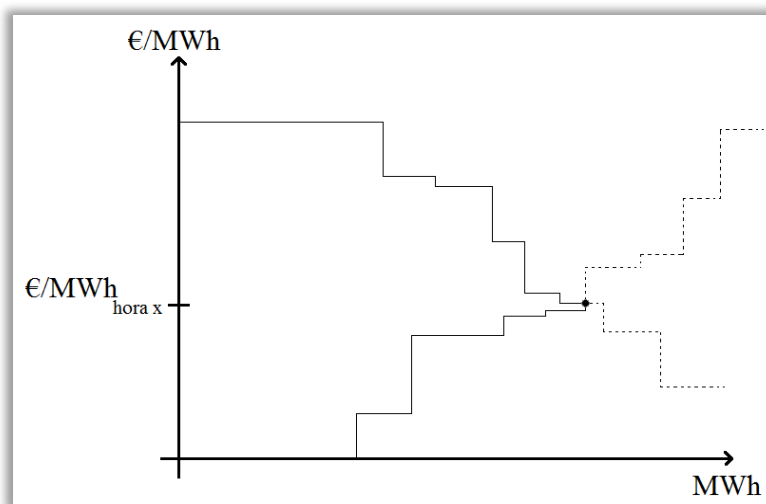


Figura 21: Exemplo de um Pool simétrico para a hora x (Fonte: Neves, 2016)

O *Pool* assimétrico apenas aceita ofertas de venda. As procuras usam previsões de cargas que são transmitidas segundo cada intervalo de negociação através das entidades comercializadoras ou consumidoras. Aqui a carga paga qualquer que seja o valor resultante do funcionamento do mercado e os preços são muito instáveis e muito influenciados pelos preços de venda oferecidos. As curvas apenas apresentam as ofertas de venda e em intervalos de tempos diferentes os preços variam consoante a quantidade, podendo ser mais altos o que provoca o aumento do preço de mercado para aquele instante (Marrucho, 2014).

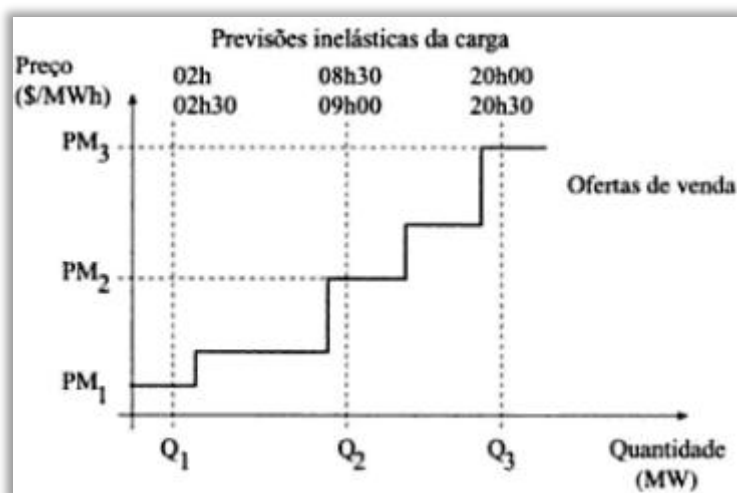


Figura 22: Exemplo de um Pool assimétrico (Fonte: Marrucho, 2014)

Em acréscimo existe também o mercado de serviços de sistema que consistem nos serviços que garantem os níveis de segurança, estabilidade e qualidade de serviço adequados ao bom funcionamento do sistema elétrico. Os serviços de sistema em Portugal são obrigatórios ou complementares: os obrigatórios não são remunerados, no entanto os complementares são (Teixeira, 2012).

4.4. Reserva primária

A frequência do sistema elétrico é regulada através da reserva primária. Este serviço é obrigatório e não remunerado, para todos os grupos geradores em serviço, com potência aparente instalada superior a 10 MVA. Existe um acerto automático do nível de produção da central de maneira que a produção e o consumo se equilibrem em qualquer instante (Teixeira, 2012).

4.5. Reserva secundária

Quando uma perturbação apreciável provoca alterações no sistema elétrico e o controlo primário não é suficiente para repor a situação recorre-se à reserva secundária. Esta também permite manter as trocas de energia elétrica na interligação nos valores programados. Este

serviço do sistema pode ser composto por duas parcelas, a banda de regulação secundária e a energia de regulação secundária (Teixeira, 2012).

4.6. Reserva terciária

A reserva terciária, ou reserva de regulação, aplica-se em situações de reposição da reserva secundária solicitada, de forma que se preserve o nível de reserva secundária consoante o valor estipulado pelo operador de sistema (Teixeira, 2012).

5. Centros de Produção de Agregados da Mota-Engil

A empresa Mota-Engil onde se insere o presente trabalho conta com várias pedreiras espalhadas por todo o território nacional. Avaliou-se a totalidade de centros produtores num total de 15 pedreiras, tanto as desativadas, bem como, as pedreiras que ainda se encontram a produzir. No entanto, para estas últimas foram usados os valores de área e volume de fosso estimados para a fase de fim de vida e não os valores que apresentam na atualidade.

Para cada uma das pedreiras foi analisada a hipsometria do local, com o intuito de se avaliar o relevo e os desníveis topográficos da zona envolvente para implementação de um reservatório artificial. Seguiu-se a análise à precipitação de forma a serem detetadas as pedreiras com maior índice de pluviosidade, recurso este que servirá para enchimento do fosso da pedreira. Foram igualmente avaliadas as redes hidrográficas das zonas de implementação de cada pedreira para avaliar a proximidade a rios ou ribeiras para a possibilidade da descarga de água ser feita num curso de água, em vez de num reservatório artificial. Prosseguiu-se para o levantamento dos locais mais favoráveis em termos de proximidade e desnível topográfico relativamente às pedreiras, para implementação do

reservatório. Aqui foram consideradas as hipóteses de se instalar um reservatório situado a uma altura superior à pedreira, bem como, um reservatório situado a uma altura inferior à pedreira. Por fim, executou-se o levantamento de locais possíveis para a descarga de água em cursos naturais.

De seguida é demonstrada a análise anteriormente descrita para o caso da pedreira de Penafiel. A avaliação feita a cada uma das pedreiras encontra-se no Apêndice A.



Figura 23: Pedreira de Penafiel
(Fonte: Google Earth)

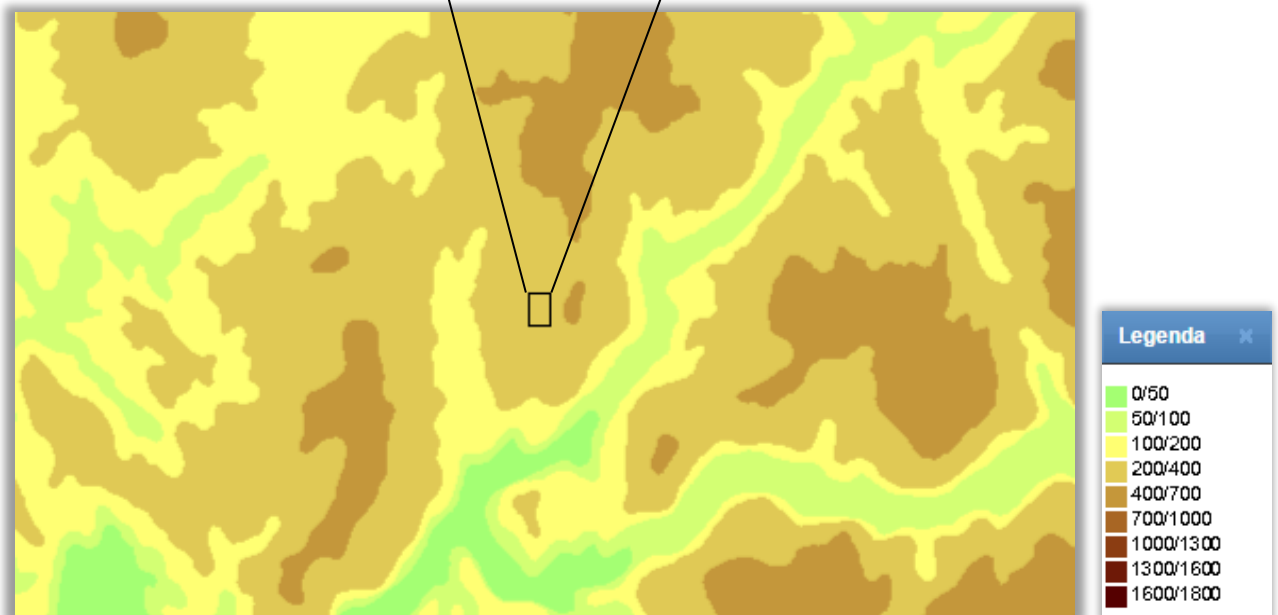


Figura 24: Extrato do mapa hipsométrico (Classes) (Fonte: Atlas do Ambiente)

O Centro Produtor de Penafiel encontra-se, tal como se pode visualizar em cima, a uma altitude entre os 200 e os 400 metros.



Figura 25: Extrato do mapa da precipitação (Quantidade total) (Fonte: Atlas do Ambiente)

A Pedreira de Penafiel localiza-se numa zona onde a precipitação ronda os 1.000 a 1.200 mm.

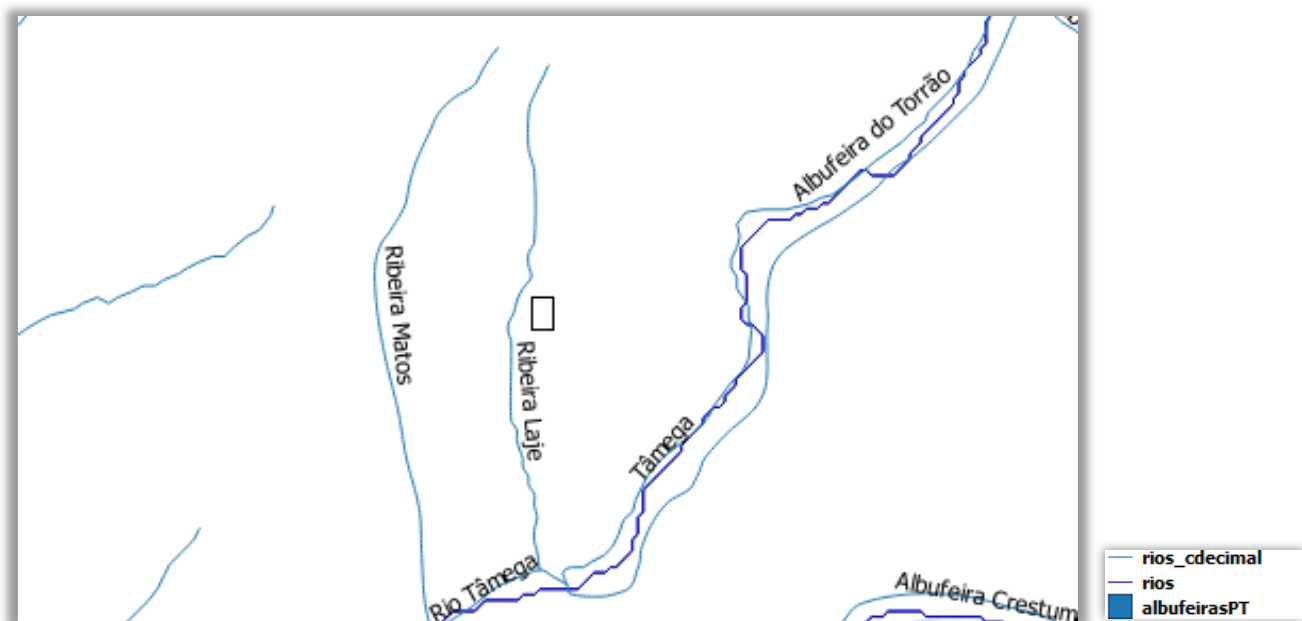


Figura 26: Extrato do mapa da rede hidrográfica total e classificação decimal rede hidrográfica (Fonte: Atlas da Água)

A pedra encontra-se a cerca de 300 metros da Ribeira Laje e a 2,5 quilómetros do Rio Tâmega.

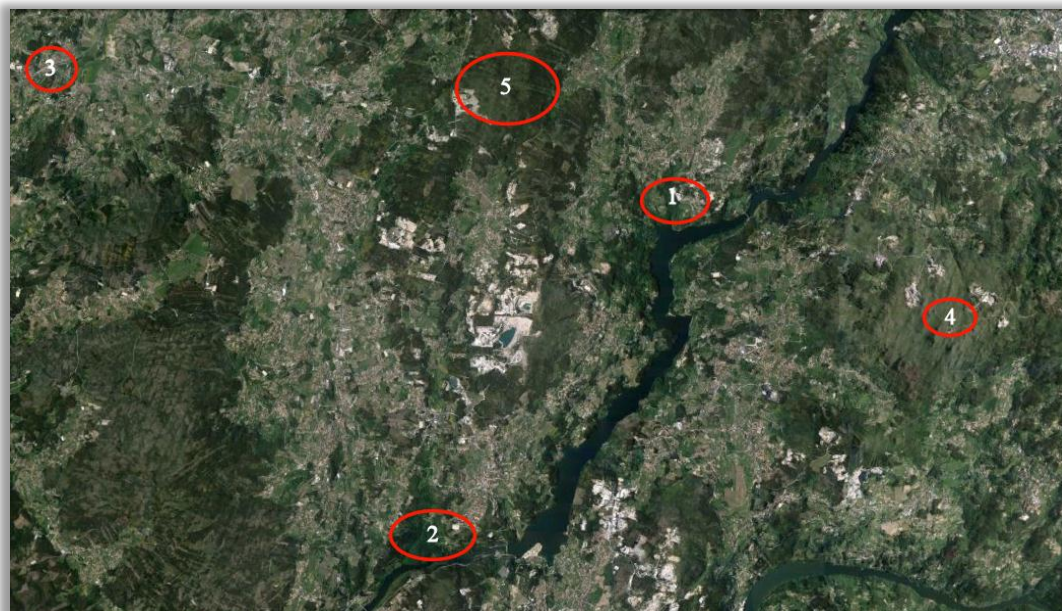


Figura 27: Possíveis localizações do reservatório (Fonte: Google Earth)

Tabela 6: Dados dos pontos para localização do reservatório

Pontos	Altitude (m)	Δh (m)	Distância à pedra (km)	Coordenadas	Tipo de reservatório
1	90	160	3,5	41°08'58.02''N 8°13'53.34''W	Inferior
2	50	200	4,1	41°05'48.24''N 8°16'40.01''W	Inferior
3	120	130	8,5	41°10'13.21''N 8°21'06.67''W	Inferior
4	603	-353	7,5	41°07'47.50''N 8°10'43.24''W	Superior
5	510	-260	3,3	41°09'51.75''N 8°15'44.25''W	Superior

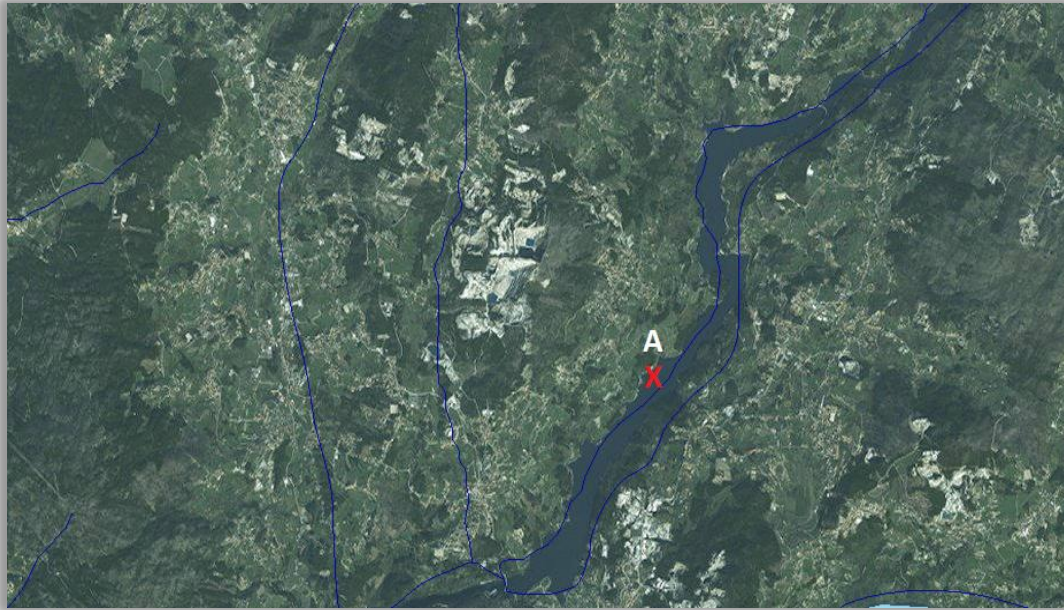


Figura 28: Possíveis localizações de descarga nos cursos de água (Fonte: Atlas da Água)

Tabela 7: Dados dos pontos de interseção dos cursos de água

Pontos	Altitude (m)	Δh (m)	Distância à pedraira (km)	Coordenadas
A	62	188	2,8	41°07'07.66''N 8°14'22.87''W

Tabela 8: Dados pedraira

Nome	Pedreira Mimosa
Localização	Lugar do Funtão de Cima – Cabeça Santa 4579-908 Entre-os-Rios
Atividade	Ativa
Geologia	Granito
Área de escavação	68.873,52 m ²
Fosso	583.449,24 m ³
Área final exploração	147.330,94 m ²
Volume final exploração	16.175.420,41 m ³

Após análise a cada uma das pedreiras resumiu-se os dados obtidos na tabela em baixo.

Tabela 9: Resumo dos dados das pedreiras

Pedreira	Hipsometria (m)	Precipitação (mm)	Menor distância a cursos de água (km)	Maior desnível topográfico (m)	Maior desnível face a um curso de água (m)
Alenquer	100 - 400	700 - 800	1,2	195	195
Amarante	200 - 400	1.600 – 2.000	0,3	- 1037 [*]	278
Bragança	400 - 700	800 – 1.000	1	- 490 [*]	94
Cantanhede	50 - 100	800 – 1.000	2	46	53
Celorico da Beira	400 - 700	700 – 1.000	0,3	- 480 [*]	61
Cervães	200 - 400	1.400 – 1.600	0,2	169	180
Famalicão	200 - 400	1.600 – 2.000	0,8	240	196
Montemor-o-Novo	100 - 200	600 - 700	1,5	- 111 [*]	37
Ourique	100 - 200	500 - 600	0,6	70	33
Penafiel	200 - 400	1.000 – 1.200	0,3	- 353 [*]	188
Santo Tirso	400 - 700	1.600 – 2.000	1	375	386
Tomar	100 - 200	700 - 800	0,1	- 113 [*]	77
Tondela	200 - 700	2.000 – 2.400	0,4	- 300 [*]	96
Vila Flor	400 - 700	800 – 1.000	1	368	356
Vila Franca de Xira	200 - 400	600 - 700	0,05	303	323

*Desnível de um reservatório a uma altitude superior à pedreira

6. Caso de Estudo

6.1. Escolha do caso de estudo

Este capítulo destina-se à escolha da pedreira que servirá de caso de estudo. Para tal, recorreu-se aos dados anteriormente recolhidos de cada uma das pedreiras, tais como, o volume do fosso e a queda, que permitirão aferir o potencial energético caso a caso. É utilizado o volume total do fosso da pedreira considerando este completamente cheio de água para ser turbinada, ainda sem os cálculos de avaliação da precipitação e evaporação.

A estimativa da produção de energia (GWh) é obtida através da equação:

$$E = \gamma \times V \times H \times \eta \quad (1)$$

Sendo, γ o peso volúmico da água (9.810 N m^{-3}), V o volume do fosso (m^3), H a altura de queda útil (93% a 95% da queda bruta) (m) e η o rendimento da turbina (habitual um rendimento para estes equipamentos na ordem do 70% - 80%). (Vivas, 2014)

Selecionou-se o maior valor das diferenças de alturas (quedas), obtidos em cada pedreira, no estudo anterior das localizações dos reservatórios e das interseções com os cursos de água.

De seguida são apresentados na tabela, os valores das estimativas do potencial de produção de energia para cada uma das pedreiras.

Tabela 10: Potencial energético das pedreiras – descarga num reservatório inferior

Pedreira	Volume do fosso (m³)	Queda (m)	Redução da queda 5%	E (GWh) $\gamma = 9810 \text{ N m}^{-3}, \eta = 80\%$
Penafiel	16.175.420,41	200	190	6,70
Famalicão	13.219.500,75	240	228	6,57
Tondela	10.321.105,74	94	89	2,01
Ourique	5.973.315,99	70	67	0,87
Cervães	1.791.248,79	169	161	0,63
Montemor-o-Novo	3.879.956,40	50	48	0,40
Santo Tirso	418.804,76	375	356	0,33
Tomar	1.386.210,39	75	71	0,22
Cantanhede	1.610.487,36	46	44	0,15
Vila Franca de Xira	136.115,09	303	288	0,09
Celorico da Beira	358.863,57	90	86	0,07
Amarante	91.401,32	238	226	0,05
Alenquer	0	195	185	0
Bragança	Sem dados	200	190	-
Vila Flor	Sem dados	368	350	-

Na tabela anterior foram calculadas as estimativas de produção de energia para o caso de a água ser descarregada para um reservatório inferior. Os valores foram ordenados por ordem decrescente e pode-se concluir que o potencial energético das pedreiras de Penafiel e Famalicão destacam-se das restantes com uma diferença muito significativa.

Seguidamente ordenaram-se os valores cujo potencial energético corresponde à descarga da água vinda de um reservatório com cota superior à pedreira, passando o fosso da pedreira a ser o reservatório inferior. Nem todas as pedreiras apresentam locais com altitudes superiores nas suas proximidades, pelo que o resumo em baixo, apenas conta com as pedreiras que apresentaram essas condições.

Tabela 11: Potencial energético das pedreiras – descarga a partir de um reservatório com cota superior à pedreira

Pedreira	Volume do fosso (m³)	Queda (m)	Redução da queda 5%	E (GWh) $\gamma = 9810 \text{ N m}^{-3}, \eta = 80\%$
Penafiel	16.175.420,41	353	335,35	11,83
Tondela	10.321.105,74	300	285	6,41
Montemor-o-Novo	3.879.956,4	111	105,45	0,89
Cervães	1.791.248,79	163	154,85	0,60
Celorico da Beira	358.863,57	480	456	0,36
Tomar	1.386.210,39	113	107,35	0,32
Amarante	91.401,32	1.037	985,15	0,20
Bragança	Sem dados	490	465,5	-
Vila Flor	Sem dados	190	180,5	-

Observando as estimativas de produção de energia na tabela anterior, para o caso de a água ser descarregada a partir de um reservatório superior ao nível da pedreira, conclui-se que as pedreiras de Penafiel e Tondela apresentam os casos com maior potencial.

De seguida formam ordenados os valores cujo potencial energético corresponde à descarga da água saída das pedreiras em cursos de água próximos.

Tabela 12: Potencial energético das pedreiras – descarga em cursos de água

Pedreira	Volume do fosso (m³)	Queda (m)	Redução da queda 5%	E (GWh) $\gamma = 9810 \text{ N m}^{-3}, \eta = 80\%$
Penafiel	16.175.420,41	188	179	6,30
Famalicão	13.219.500,75	196	186	5,37
Tondela	10.321.105,74	96	91	2,05
Ourique	5.973.315,99	33	31	0,41
Montemor-o-Novo	3.879.956,40	37	35	0,30
Cervães	1.791.248,79	180	171	0,67
Cantanhede	1.610.487,36	53	50	0,18
Tomar	1.386.210,39	77	73	0,22
Santo Tirso	418.804,76	386	367	0,33
Celorico da Beira	358.863,57	61	58	0,05
Vila Franca de Xira	136.115,09	323	307	0,09
Amarante	91.401,32	278	264	0,05
Alenquer	0	195	185	0
Bragança	Sem dados	94	89	-
Vila Flor	Sem dados	356	338	-

Uma vez mais as pedreiras de Penafiel e Famalicão apresentam os valores mais elevados da estimativa energética, com uma significativa diferença em relação aos restantes casos.

Tabela 13: Quadro resumo com os potenciais casos de estudo

	Pedreiras com maior potencial energético	E (GWh)
Reservatório inferior	Penafiel	6,70
	Famalicão	6,57
Reservatório superior	Penafiel	11,83
	Tondela	6,41
Descarga em cursos de água	Penafiel	6,30
	Famalicão	5,37

Através da análise da tabela anterior, podemos verificar que os resultados obtidos para a opção da descarga em cursos de água apesar de serem inferiores aos restantes, não apresentam grande discrepância, pelo que em certas situações esta poderá ser uma boa opção, aplicando-se um circuito semi-aberto.

Relativamente à comparação entre a implementação de um reservatório artificial inferior, ou superior, pode-se concluir que a pedreira de Penafiel apresenta um maior potencial no caso da descarga ser feita a partir de um reservatório superior. Para o caso de a descarga ser feita a partir da pedreira para um reservatório inferior, as melhores opções serão a pedreira de Penafiel e a de Famalicão. Posto isto, as pedreiras alvo de estudo serão as de Penafiel e Famalicão, visto apresentarem até ao momento as melhores condições para implementação deste projeto.

6.2. Hidrogeologia

A pedreira de Famalicão insere-se na região hidrográfica do Ave que, por sua vez, está inserida na Unidade Hidrogeológica designada de Maciço Antigo Indiferenciado. Esta é uma região hidrográfica com condições hidrogeológicas favoráveis, no entanto com produtividades limitadas, características deste tipo de meios geológicos. Tal deve-se ao facto de esta zona estar inserida na espessa faixa de alteração das rochas granitóides e das rochas metassedimentares, aliada à pluviosidade elevada e às características geomorfológicas e

estruturais, onde se enumeram várias nascentes permanentes. O aproveitamento das águas subterrâneas é direcionado para o abastecimento das populações e rega e é essencialmente realizado através de poços e galerias de mina que captam aquíferos livres muitas vezes instalados em materiais aluvionares e terraços fluviais.

Nesta região a condutividade hidráulica é baixa e produtividade reduzida, 3 l s^{-1} por captação tubular unitária. O nível superior encontra-se decomposto, onde a permeabilidade é do tipo intergranular podendo coexistir com a circulação fissural com espessuras que vão até aos 100 metros. O nível intermédio encontra-se cortado por falhas, fraturas, diaclases ou filões até profundidades de 200 metros. O nível mais profundo, compacto e sem descontinuidades, caracteriza-se por possuir condutividade hidráulica praticamente nula.

A função capacitiva dos sistemas aquíferos é reduzida apesar da transmissividade possuir valores com interesse para a captação local (Agência Portuguesa do Ambiente, 2012a).

A pedreira de Penafiel insere-se na região hidrográfica do Douro que por sua vez está igualmente inserida na Unidade Hidrogeológica designada de Maciço Antigo Indiferenciado. Esta é uma região hidrográfica caracterizada pelos sistemas fissurados resultantes da litologia predominante desta área. São predominantes os granitos e as formações metamórficas com produtividades reduzidas devido à condutividade hidráulica baixa, não ultrapassando 1 l s^{-1} de caudal médio de exploração, tornando-se importante para o abastecimento local na região.

A circulação da água é determinante nos aquíferos fissurados devido às descontinuidades geológicas. São os sistemas hidrogeológicos mais representativos e estão associados aos granitos e rochas metamórficas do Maciço Antigo. Existe uma forte heterogeneidade espacial das características hidráulicas neste tipo de aquífero.

As unidades porosas têm um desenvolvimento espacial pequeno, mas podem constituir aquíferos de interesse local ou regional (Agência Portuguesa do Ambiente, 2012b).

6.2.1. Recarga dos sistemas hidrogeológicos

A recarga natural dá-se através da infiltração das águas da chuva, através de cursos de águas superficiais que se infiltram por falhas ou fraturas (cursos de água influentes) e ainda, através

da drenância de camadas adjacentes nos casos de aquíferos multicamada. Em zonas de vertentes a infiltração também ocorre devido à vegetação e aos solos com frações minerais arenosas e detríticas. A recarga através da infiltração da água da chuva corresponde à água que se infiltra a um nível inferior no solo, após os processos de evapotranspiração e de escoamento direto e que pode ficar depositada no aquífero. Poderá também formar um escoamento subterrâneo que emergirá à superfície, dando assim o contributo para o escoamento dos cursos de água (escoamento de base) (Agência Portuguesa do Ambiente, 2012a; Agência Portuguesa do Ambiente, 2012b).

No Maciço Antigo Indiferenciado da Bacia do Ave (Famalicão) a recarga subterrânea situa-se entre os 5% e os 10% da precipitação média anual (Agência Portuguesa do Ambiente, 2012a).

No Maciço Indiferenciado da Bacia do Douro (Penafiel) a recarga subterrânea situa-se entre os 5% e os 10% da precipitação média anual para os aquíferos fissurados (Agência Portuguesa do Ambiente, 2012b).

6.2.2. Descarga dos sistemas hidrogeológicos

Tanto para o caso de Famalicão como o de Penafiel, a descarga dos sistemas hidrogeológicos realiza-se através das linhas de água e das nascentes existentes. As águas subterrâneas são descarregadas em zonas de fundo de vale e nas bases de vertentes (Agência Portuguesa do Ambiente, 2012a; Agência Portuguesa do Ambiente, 2012b).

6.2.3. Avaliação das disponibilidades hídricas subterrâneas

As disponibilidades hídricas subterrâneas, tanto da região hidrográfica do Ave, como da região hidrográfica do Douro, apresentam valores que ocorrem devido à precipitação e aos escoamentos superficiais. No Maciço Antigo Indiferenciado da Bacia do Ave estimam-se disponibilidades de $112 \text{ hm}^3 \text{ ano}^{-1}$, valores estes que correspondem a aproximadamente, 90% da recarga subterrânea média da região. Na área Noroeste da Bacia Hidrográfica do Douro as disponibilidades hídricas subterrâneas médias anuais apresentam valores de $968,65 \text{ hm}^3 \text{ ano}^{-1}$ e correspondem também a aproximadamente, 90% da recarga subterrânea

média da região (Agência Portuguesa do Ambiente, 2012a; Agência Portuguesa do Ambiente, 2012b).

Com base no estudo anterior da hidrogeologia das áreas de implementação das pedreiras estima-se que o balanço entre as perdas e os ganhos de água devido a infiltrações e fraturas geológicas será nulo visto que, tanto Penafiel como Famalicão, caracterizam-se por possuírem um nível superior decomposto e um nível intermédio cortado por falhas e fraturas, o que permite que a água sofra infiltrações. Por outro lado, as produtividades hidráulicas que afloram permitem equilibrar este balanço.

6.3. Volume de água no fosso

Estabeleceu-se que a água usada no processo de geração de energia apenas contará com a água acumulada através da precipitação e respetivo débito de evaporação.

Antes de se proceder ao cálculo do volume de água útil convém referir que tanto a pedreira de Penafiel como a de Famalicão possuem áreas que as envolvem, cujas cotas são maioritariamente inferiores às respetivas cotas das pedreiras, como se pode analisar através das curvas de nível das figuras 29 e 30. Pelo que não será considerado qualquer acréscimo no volume acumulado com origem em escorrências de águas vindas de outros locais.



Figura 29: Curvas de nível – Pedreira Famalicão (Fonte: Google Earth)



Figura 30: Curvas de nível – Pedreira Penafiel (Fonte: Google Earth)

Para determinar com maior exatidão, o volume de água retido no fosso das pedreiras para determinação do respetivo potencial energético, executaram-se dois métodos distintos de determinação do volume acumulado no fosso das pedreiras.

6.3.1. Primeiro método

No primeiro método calculou-se a água acumulada através da informação existente do funcionamento das bombas de extração de água instaladas atualmente nas pedreiras. Para normal funcionamento da atividade laboral de uma pedreira é necessário a instalação de bombas que retirem a água acumulada no fundo da pedreira. Esta água segue para um sistema de recirculação onde é aproveitada para outros fins inerentes a esta atividade industrial. Os dados obtidos relativos ao funcionamento dessas bombas encontram-se reunidos na tabela em baixo:

Tabela 14: Resumo dados das bombas

Pedreira	Potência da bomba (CV)	η	H (m)	Δt (h)	
				Inverno	Verão
Famalicão	50	0,60	150	2.880	468
Penafiel	28	0,60	200	4.032	468

De forma a ser calculado o caudal de água extraído pelas bombas usou-se a seguinte expressão:

$$P = \frac{\gamma \times Q \times H}{\eta} \quad (2)$$

Sendo γ o peso volúmico da água (9.810 N m^{-3}), Q o caudal ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$), H a altura de extração da água (m) e η o rendimento da bomba.

Tabela 15: Caudal e volume extraído pelas bombas

Pedreira	Caudal (m ³ s ⁻¹)	Volume (m ³)
Famalicão	0,015	180.730,26
Penafiel	0,006	102.025,15

Da análise da tabela anterior pode-se verificar que é possível acumular durante o período de tempo de um ano, os volumes acima apresentados que correspondem aos volumes extraídos durante a atividade das pedreiras.

6.3.2. Segundo método

No segundo método usado para a determinação do volume de água retido no fosso foram relacionados parâmetros como a área de escavação, a precipitação e a evaporação no local.

Para avaliação da influência da precipitação no volume de água retido no fosso das pedreiras recolheram-se informações relativamente às estações meteorológicas mais próximas das respetivas pedreiras. Em cada estação meteorológica foram recolhidos a partir do SNIRH (Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos) os dados de base da precipitação anual no intervalo de tempo de funcionamento das estações – ver Anexo I. Na tabela seguinte reuniram-se os valores médios da precipitação anual, calculados através dos valores anteriores do Anexo I, juntamente com as altitudes das estações e das pedreiras, bem como a distância de cada estação à pedreira.

Tabela 16: Estações meteorológicas

Pedreira	Estação meteorológica	Média precipitação anual (mm)		Altitude da estação meteorológica	Altitude da pedreira	Distância à pedreira
Famalicão	Escudeiros	1.495,11		185	370	1,9
Penafiel	Entre-os-Rios	1.165,17	$\bar{X} = 1.181,26$	18	275	5,9
	Marco de Canavezes	1.197,35		215	275	10,8

Com o intuito de se calcular o volume através dos valores da precipitação e da área do fosso aplicou-se a seguinte fórmula:

$$V.Prec.(m^3) = \left(\frac{P}{1.000}\right) \times A \quad (3)$$

O volume é representado por V (m^3), a precipitação por P (mm) e A (m^2) corresponde à área do fosso.

Tabela 17: Volume obtido da precipitação

Pedreira	Volume (m^3)
Famalicão	288.961,97
Penafiel	174.035,81

De forma a ser obtida a evaporação correspondente a cada uma das pedreiras recorreu-se à equação de *Linacre* (1993). Esta é uma simplificação da equação de *Penman* e possibilita a determinação dos valores mensais médios da evaporação de lago quando os dados de precipitação mensal e de velocidade do vento são conhecidos (Rodrigues, 2009). A equação, bem como, toda a metodologia envolvida é descrita a seguir:

$$E_l = (0,015 + 0,00042 T_a + 10^{-6} Alt.) [0,8 Q_s - 40 + 2,5 F_{Alt} u_2 (T_a - T_d)] \quad (4)$$

Onde, E_l é a evaporação do lago ($mm\ mês^{-1}$), $Alt.$ é a altitude do local (m), Q_s , é a radiação solar incidente na superfície do lago ($W\ m^{-2}$), u_2 é a velocidade do vento medida a dois metros de altura ($m\ s^{-1}$), T_a e T_d , são, respetivamente, a temperatura média do ar e do ponto

de orvalho (°C). F_{Alt} é um fator adimensional de correção para a altitude do local e é obtida através de:

$$F_{Alt.} = 1 - 8,7 \times 10^{-5} Alt. \quad (5)$$

Tabela 18: Altitude e fator adimensional

Pedreira	Altitude (m)	F _{Alt.} (m)
Famalicão	370	0.968
Penafiel	275	0.976

A radiação solar incidente na superfície do lago ($W m^{-2}$), Q_s é obtida através de:

$$Q_s = Q_{ex}(0,85 - 0,047C_m) \quad (6)$$

Determinada através da atenuação da radiação extraterrestre, Q_{ex} , provocada pelas nuvens, cujo valor, C_m , é obtido dos dados de precipitação aplicados à seguinte fórmula:

$$C_m = 1 + 0,51 \log(P) + [\log(P)]^2 \quad (7)$$

Tabela 19: Radiação solar incidente

Pedreira	Precipitação mensal (mm)	C_m	Q_{ex} ($W m^{-2}$)	Q_s ($W m^{-2}$)
Famalicão	124,59	6,46	1.400	764,95
Penafiel	98,44	5,99	1.400	795,91

A temperatura do ponto de orvalho, T_d , foi obtida através da temperatura do ar e da humidade relativa. A temperatura do ar foi determinada com base nos normais climatológicos do IPMA (Instituto Português do Mar e da Atmosfera) do distrito de Braga e do distrito do Porto, para as pedreiras de Famalicão e Penafiel respetivamente.

Tabela 20: Temperatura do ar Braga

Distrito de Braga (Fonte: IPMA)												
Meses	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
Média da temperatura média (°C)	9	9,9	12,3	13,2	15,8	19,5	21,4	21,4	19,4	15,9	12,3	10,2

Tabela 21: Temperatura do ar Porto

Distrito do Porto (Fonte: IPMA)												
Meses	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
Média da temperatura média (°C)	9,5	10,4	12,6	13,7	15,9	19	20,6	20,8	19,5	16,4	13	10,7

A humidade foi determinada com base no Atlas do Ambiente.

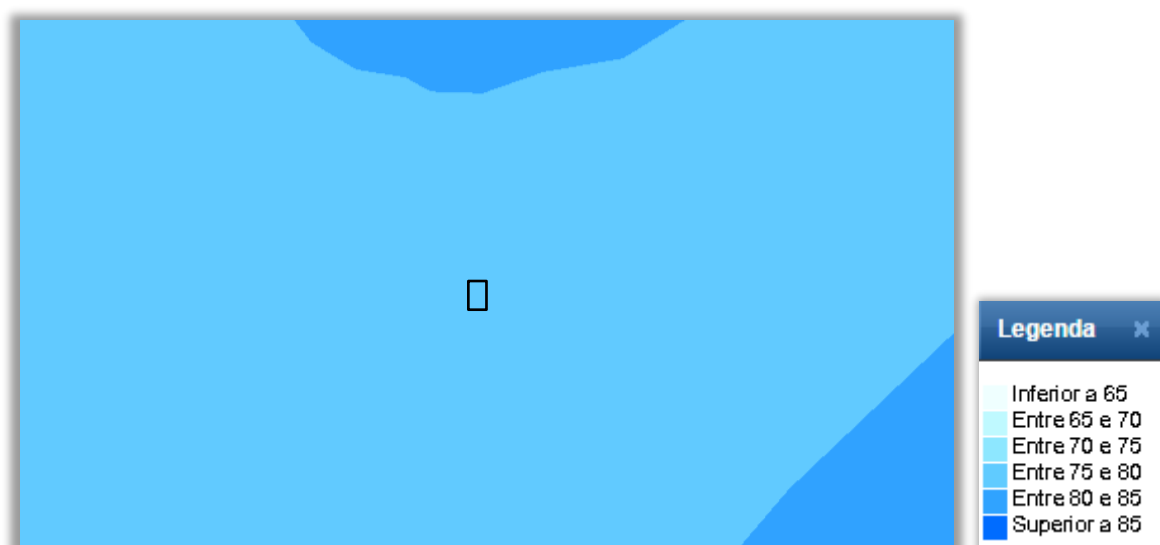


Figura 31: Mapa da humidade do ar - Famalicão (Fonte: Atlas do Ambiente)

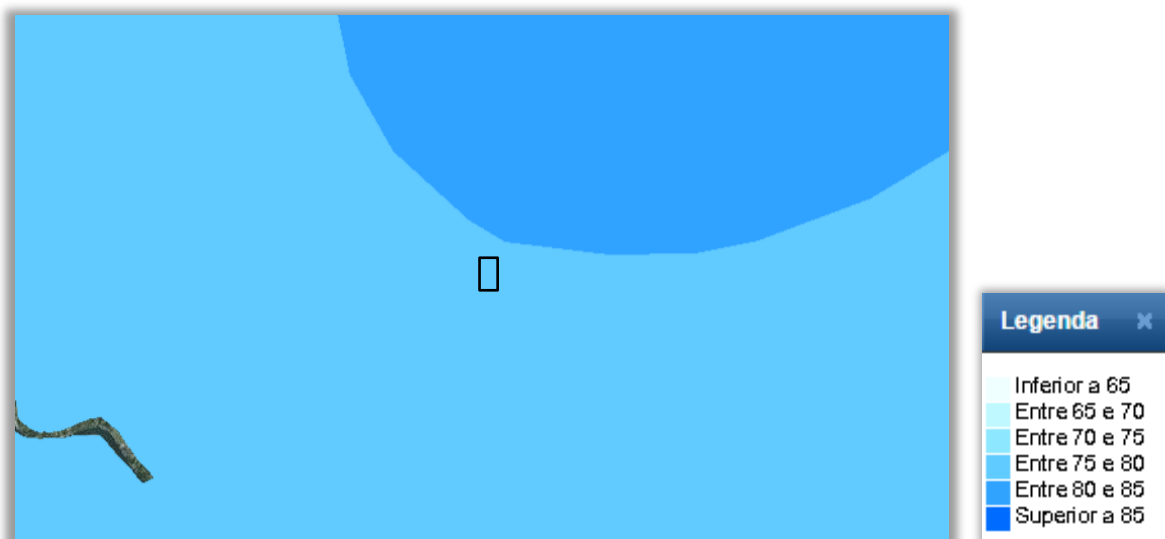


Figura 32: Mapa da humidade do ar – Penafiel (Fonte: Atlas do Ambiente)

Pode-se verificar que tanto na área de implementação da pedreira de Famalicão, como na de Penafiel, a humidade corresponde ao intervalo entre 75% e 80%.

Obtida a temperatura média do ar e a respetiva humidade é possível determinar a temperatura do ponto de orvalho, T_d , através do gráfico apresentado em baixo. Tanto para o caso de Famalicão, como para Penafiel a temperatura do ponto de orvalho corresponde a 12°C.

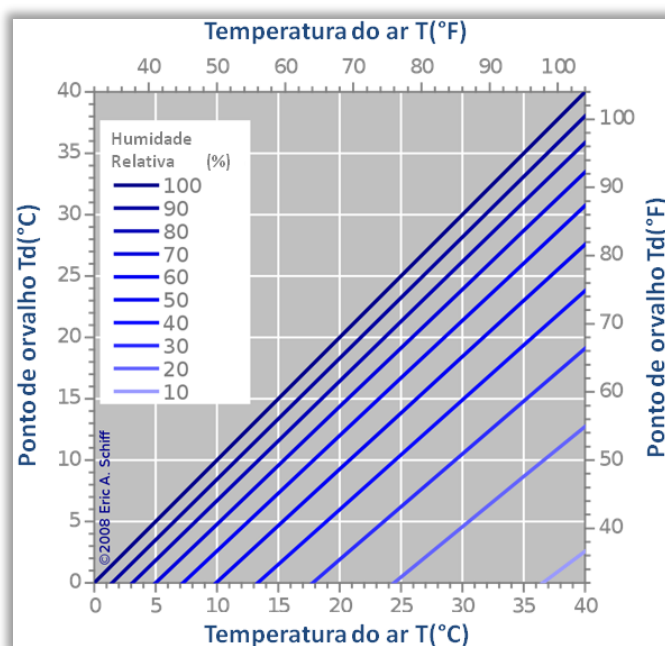


Figura 33: Gráfico do ponto de orvalho (Fonte: Wikipédia)

A velocidade do vento medida a dois metros de altura (m s^{-1}), u_2 , foi obtida através dos dados da velocidade do vento média diária disponíveis no SNIRH para as estações meteorológicas limítrofes às pedreiras. Os dados recolhidos encontram-se reunidos no Apêndice B. Utilizou-se para o cálculo da evaporação, o valor médio da velocidade do vento média diária convertida para a média mensal.

O valor obtido para a evaporação através da aplicação da equação de *Linacre*, bem como, todos os dados inerentes ao seu cálculo encontram-se resumidos no quadro seguinte.

Tabela 22: Evaporação mensal

Pedreira	Alt. (m)	Qs (W m^{-2})	F _{Air}	u_2 (m s^{-1})	Ta ($^{\circ}\text{C}$)	Td ($^{\circ}\text{C}$)	E _l (mm mês^{-1})
Famalicão	370	764,95	0,97	18,76	15,025	12	15,38
Penafiel	275	795,91	0,98	11,17	15,175	12	14,79

Após o cálculo da evaporação determinou-se o volume total que resta em cada um dos fossos, com água disponível para a geração de energia. As equações utilizadas foram as descritas em baixo:

$$V. Evap. (m^3) = \left(\frac{E_l}{1.000} \right) \times A \quad (8)$$

$$V. Total(m^3) = V. Prec. - V. Evap. \quad (9)$$

Os resultados obtidos encontram-se resumidos na tabela seguinte.

Tabela 23: Volume total

Pedreira	E_i (mm ano⁻¹)	V. Prec. (m³)	V. Evap. (m³)	V. Total (m³)
Famalicão	184,52	288.961,97	35.662,01	253.299,96
Penafiel	177,50	174.035,81	26.150,80	147.885,01

Da análise dos valores obtidos na tabela anterior pode-se verificar que o volume calculado pelo segundo método é relativamente aproximado do volume calculado através do primeiro método. Devido a tal aproximação de valores, decidiu-se estabelecer como volume de água útil acumulado durante um ano, o valor médio entre os dois métodos anteriormente apresentados. Valor este que servirá de referência para todos os cálculos subsequentes.

Tabela 24: Volume útil

Pedreira	V. Total (m³)		\bar{V} (m³)
Famalicão	1º Método	180.730,26	217.015,11
	2º Método	253.299,96	
Penafiel	1º Método	102.025,15	124.955,08
	2º Método	147.885,01	

Uma vez mais será aplicada a equação da estimativa da produção de energia (MWh), com os volumes de água calculados, tanto para o caso de Famalicão, como o de Penafiel, com o intuito de escolher o caso de estudo atendendo ao maior potencial energético associado.

$$E = \gamma V H \eta \quad (10)$$

Tabela 25: Potencial energético

Pedreira	Volume do fosso (m ³)	Queda (m)	Redução da queda 5%	E (MWh) $\gamma = 9810 \text{ Nm}^{-3}$, $\eta = 80\%$
Famalicão (reservatório inferior auxiliar)	217.015,11	240	228	107,87
Penafiel (reservatório superior auxiliar)	124.955,08	353	335,35	91,35
Penafiel (reservatório inferior auxiliar)	124.955,08	200	190	51,76

Verifica-se que o caso que apresenta maior potencial energético é a pedra de Famalicão, à qual será aplicada toda a metodologia seguinte envolvida neste estudo. A sua configuração será a pedra a servir de reservatório superior e o reservatório artificial será o reservatório inferior.

6.4. Avaliação técnica e económica ao caso de estudo

6.4.1. Balanço remuneratório segundo mercado

Começou-se pela análise dos preços do mercado MIBEL desde que este teve início. Para tal, recorreu-se ao gráfico em baixo, sendo de salientar que os preços são iguais tanto para compra como para venda de eletricidade.

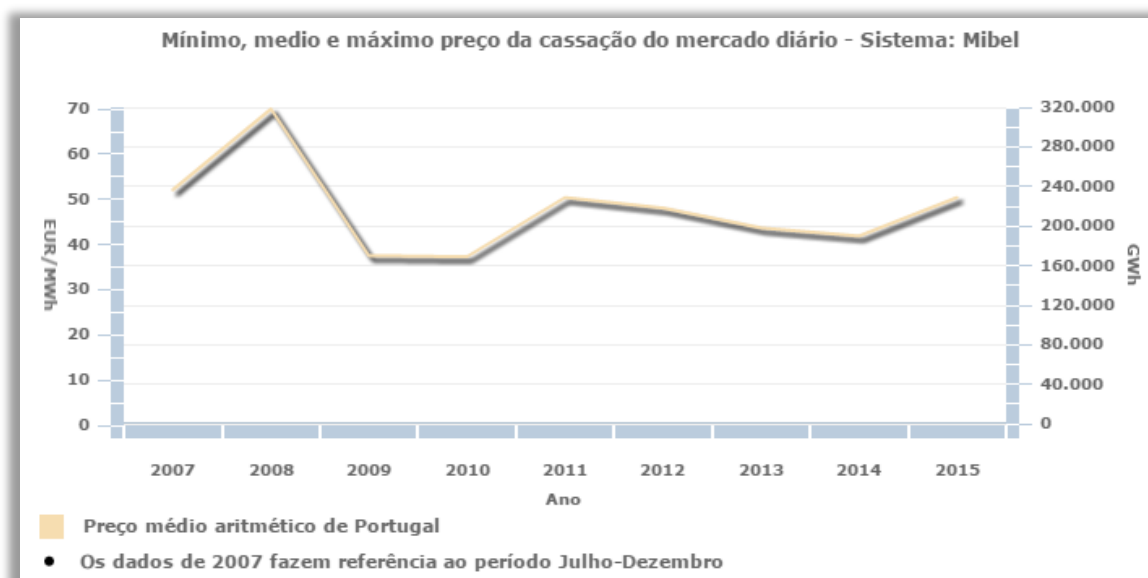


Figura 34: Gráfico com preços médios de Portugal (Fonte: OMIE)

Através dos dados do gráfico anterior verifica-se que a média do preço médio em Portugal, por MWh de energia, entre 2007 e 2015 foi de 47,95 €. Entre 2007 e 2008 observa-se um aumento gradual que atinge o valor máximo de 69,98 €, que após esse momento tende a baixar e a estabilizar entre um intervalo que ronda os 37,33 € de mínimo e os 50,45 € de máximo.


Para o estudo em questão optou-se por escolher uma semana exemplo que fosse característica pela sua variabilidade e que se enquadrasse no registo histórico apresentado anteriormente. Para isso elegeu-se a semana de 10 de outubro de 2016 até 16 de outubro de 2016. No entanto, deveriam ser analisadas outras semanas exemplo.


Na semana em questão os preços do MWh de energia variam entre o limite mínimo de 38,06 € e o máximo de 65 €, sendo o valor médio semanal de 52,3 €. Para que a central apresente resultados positivos terá que se conjugar as horas com os preços mais baixos para a central proceder à atividade de bombagem do reservatório inferior para o superior e nas horas em que os preços estão mais altos turbinar-se a água em sentido inverso.

Para tal, definiu-se que a atividade de bombagem iria ser executada nas respetivas horas em que os preços variam entre o limite mínimo de 38,06 € até 51 €. Na atividade de geração de energia a turbina seria acionada apenas nas horas em que os preços correspondem ao intervalo entre os 52 € e os 65 €. Os preços a cada hora na semana de referência estão reunidos na tabela seguinte, onde se demonstra também a distribuição das horas pelas respetivas operações de bombagem e turbinagem.

Tabela 26: Balanço remuneratório semanal

	Preço horário do mercado diário (€ MWh ⁻¹)						
	Segunda	Terça	Quarta	Quinta	Sexta	Sábado	Domingo
1:00	45,03	58,69	50	56,1	57,05	50	42,41
2:00	40	53,58	47,06	50,29	50	45,8	40,11
3:00	39,39	50	44,78	45,94	45,91	43,04	39,3
4:00	39,19	45,94	41,33	45,69	43,27	42,41	38,06
5:00	39,19	46,12	41,04	45,23	42,41	41,03	38,06
6:00	41,88	51,4	43,2	46,6	45,69	40	38,06
7:00	52,98	59,07	45,94	57,05	54,6	43,02	39,3
8:00	57,14	60	49,34	61,5	59,19	45,8	40,11
9:00	58,5	61,03	48,19	62	58,35	46,69	40,55
10:00	59,69	62	52,34	62,69	59,98	47,6	42,63
11:00	59,69	61,3	53,58	63,01	59,61	48,39	44,64
12:00	58,5	60	53,99	62,49	58,1	44,72	43,27
13:00	57,56	60	53,99	62,49	58,23	43,32	43,04
14:00	57,56	59,69	54,07	62,5	58,2	42,67	43,04
15:00	56,33	57,05	53,99	61,6	56,65	41,03	43,02
16:00	54,01	56,01	52,98	60,2	53,58	38,1	42,18
17:00	55	55,46	52,75	59,07	53,06	38,14	41,69
18:00	57,24	56,65	52,98	59,5	53,51	42,86	42,63
19:00	59,69	57,56	52,98	59,5	56,6	49,92	51,57
20:00	60,51	59	54,35	60,9	59,5	57,05	60,2
21:00	65	62,69	62,3	64	63,38	54,61	63,01
22:00	62,12	61,19	62,08	63,48	59,98	54,07	62,49
23:00	58,45	56,02	58,6	60,5	56,6	49,07	59,94
24:00	55	53,69	54,07	57,05	53	46,1	55,38

 Turbinação

 Bombagem

No Apêndice C encontram-se os gráficos diários com os preços horários nas respectivas horas de turbinagem e bombagem.

Conclui-se que a operação de turbinagem terá um total de 102 horas semanais e a operação de bombagem terá um total de 66 horas por semana.

6.4.2. Escolha da turbina

Neste estudo não foi estudada a hipótese de se usar uma bomba a funcionar como turbina, mas sim uma bomba e uma turbina como sistemas independentes e com circuitos específicos. De seguida procede-se à determinação das características da bomba e da turbina de acordo com a distribuição horária definida anteriormente.

No caso da bomba estipulou-se que esta aceitaria um caudal máximo de bombagem de $0,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e um rendimento de 70%. Foram estipuladas e integradas neste cálculo as perdas de cargas, cuja percentagem estipulada foi de 10%.

Para determinação da potência da bomba usou-se a seguinte expressão:

$$P = \frac{\gamma Q H}{\eta} \quad (11)$$

Tabela 27: Resumo dados

γ	$Q \text{ (m}^3 \text{ s}^{-1}\text{)}$	Desnível a vencer (m)	Altura de elevação com perdas de carga (m)	η	Potência (kW)
9.810	0,5	228	253,3	0,7	1.775,14

Dado que temos um período de bombagem de 66 horas o volume de água necessário será:

$$Q = \frac{V}{t} \quad (12)$$

Tabela 28: Volume admitido

Q (m ³ s ⁻¹)	Horas	Volume (m ³)
0,5	66	118.800

De seguida determinou-se o caudal admitido pela turbina para o volume estipulado de 118.800 m³ e 102 horas de trabalho semanal, através da utilização da equação 12.

Tabela 29: Caudal da turbina

Volume (m ³)	Horas	Q (m ³ s ⁻¹)
118.800	102	0,32

Seguiu-se o cálculo da potência da turbina que conta com um rendimento de 80% e também neste caso foram estipuladas e integradas as perdas de carga na queda útil, cuja percentagem estipulada foi de 10%.

Para determinação da potência da turbina usou-se a seguinte expressão:

$$P = \gamma Q H \eta \quad (13)$$

Tabela 30: Potência da turbina

γ	Q ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	Queda (m)	Queda útil com perdas de carga (m)	η	Potência (kW)
9.810	0,32	228	205,2	0,8	521,01

Face aos dados da turbina obtidos anteriormente é possível determinar qual o tipo de turbina ideal para este caso de estudo. A turbina é um dos componentes principais de um aproveitamento hidroelétrico pelo que a sua escolha deve estar envolvida num processo criterioso de seleção. Para tal, recorreu-se ao gráfico em baixo com o campo típico de aplicação de quatro tipos de turbinas.

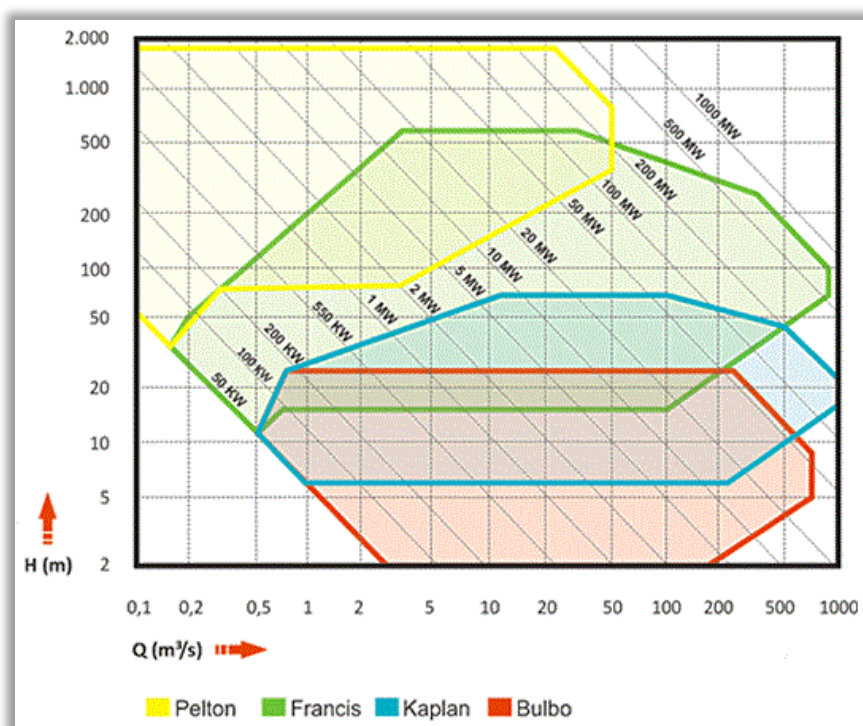


Figura 35: Campos de aplicação das turbinas (Fonte: Hacker)


Dado que se obteve um caudal de $0,32 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, uma altura de 205,2 m e uma potência de 521,01 kW pode-se facilmente determinar que a turbina ideal para o estudo será uma turbina do tipo Pelton.

6.4.3. Balanço de caudais

Na tabela seguinte elaborou-se o balanço com os caudais que a cada hora a central turbina quando está a gerar energia e com os caudais que a cada hora a central eleva quando está em modo de bombagem, de forma a que, ao iniciar uma nova semana, o volume no reservatório inferior seja igual a zero (regularização semanal).

Tabela 31: Balanço dos caudais horários

	Caudal (m ³ h ⁻¹)						
	Segunda	Terça	Quarta	Quinta	Sexta	Sábado	Domingo
1:00	1.800	1.164,71	1.800	1.164,71	1.164,71	1.800	1.800
2:00	1.800	1.164,71	1.800	1.164,71	1.800	1.800	1.800
3:00	1.800	1.800	1.800	1.800	1.800	1.800	1.800
4:00	1.800	1.800	1.800	1.800	1.800	1.800	1.800
5:00	1.800	1.800	1.800	1.800	1.800	1.800	1.800
6:00	1.800	1.164,71	1.800	1.800	1.800	1.800	1.800
7:00	1.164,71	1.164,71	1.800	1.164,71	1.164,71	1.800	1.800
8:00	1.164,71	1.164,71	1.800	1.164,71	1.164,71	1.800	1.800
9:00	1.164,71	1.164,71	1.800	1.164,71	1.164,71	1.800	1.800
10:00	1.164,71	1.164,71	1.164,71	1.164,71	1.164,71	1.800	1.800
11:00	1.164,71	1.164,71	1.164,71	1.164,71	1.164,71	1.800	1.800
12:00	1.164,71	1.164,71	1.164,71	1.164,71	1.164,71	1.800	1.800
13:00	1.164,71	1.164,71	1.164,71	1.164,71	1.164,71	1.800	1.800
14:00	1.164,71	1.164,71	1.164,71	1.164,71	1.164,71	1.800	1.800
15:00	1.164,71	1.164,71	1.164,71	1.164,71	1.164,71	1.800	1.800
16:00	1.164,71	1.164,71	1.164,71	1.164,71	1.164,71	1.800	1.800
17:00	1.164,71	1.164,71	1.164,71	1.164,71	1.164,71	1.800	1.800
18:00	1.164,71	1.164,71	1.164,71	1.164,71	1.164,71	1.800	1.800
19:00	1.164,71	1.164,71	1.164,71	1.164,71	1.164,71	1.800	1.164,71
20:00	1.164,71	1.164,71	1.164,71	1.164,71	1.164,71	1.164,71	1.164,71
21:00	1.164,71	1.164,71	1.164,71	1.164,71	1.164,71	1.164,71	1.164,71
22:00	1.164,71	1.164,71	1.164,71	1.164,71	1.164,71	1.164,71	1.164,71
23:00	1.164,71	1.164,71	1.164,71	1.164,71	1.164,71	1.800	1.164,71
24:00	1.164,71	1.164,71	1.164,71	1.164,71	1.164,71	1.800	1.164,71

 Turbinação

 Bombagem

6.4.4. Dimensionamento do reservatório inferior

Seguidamente foi elaborado o dimensionamento do reservatório inferior, de forma a saber qual o valor máximo de água que este admitirá segundo o balanço elaborado anteriormente.

Considerou-se um ciclo semanal a iniciar às 7:00 de segunda-feira, aquando do início da turbinação quando a fosso da pedra contém o volume máximo de água e reservatório inferior está vazio.

Tabela 32: Dimensionamento do reservatório inferior

Dias	Volume diário (m ³)	Volume acumulado (m ³)	Volume a turbinar	Diferença	Volume do reservatório inferior (m ³)
Segunda (após 7h)	0	0	23.294,12	-23.294,1	70.517,6
Terça	5.400	5.400	45.423,53	-40.023,5	
Quarta	16.200	21.600	65.223,53	-43.623,5	
Quinta	7.200	28.800	87.352,94	-58.552,9	
Sexta	9.000	37.800	108.317,65	-70.517,6	
Sábado	37.800	75.600	111.811,76	-36.211,8	
Domingo (até segunda às 7h)	43.200	118.800	118.800	0	

6.4.5. Avaliação económica

Determinados que estão todos os parâmetros técnicos resta agora verificar a viabilidade económica deste projeto. Para tal calculou-se o total ganho na fase de geração de energia, onde se usou os valores horários do preço da energia da anterior Tabela 26.

Tabela 33: Ganhos com a operação da turbina

Potência da turbina (MW)	€ mês ⁻¹
0,521	12.307,43

Para obtenção do valor dos gastos com a operação de bombagem usou-se igualmente os valores da tabela 26.

Tabela 34: Gastos com a operação da bomba

Potência da bomba (MW)	€ mês ⁻¹
1.775	20.450,85

De referir que aos preços anteriores não foram adicionados os valores referentes às tarifas de acesso às redes.

Tabela 35: Lucro total anual

Total ganho por ano (€)	Total gasto por ano (€)	Lucro (€)
147.689,21 €	245.410,23	- 97.721,02

Através da análise da tabela anterior conclui-se que este projeto não é rentável visto que apresenta um prejuízo de 97.721,02 € anuais. Apesar do número total de horas em que a turbina está em funcionamento ser bastante mais elevado que o número de horas em que a bomba está a trabalhar, as condições em que operam estes dois equipamentos implicam as diferenças remuneratórios nas suas operações. Podemos constatar que o caudal admitido na bomba é superior ao caudal da turbina, valores estes que influenciaram a potência de cada um deste equipamentos e conseqüentemente a energia gasta pela bomba e a energia gasta pela turbina. A este facto também contribuem as perdas de carga e os rendimentos, visto que o rendimento da bomba é inferior ao rendimento da turbina.

6.4.6. Caso central a funcionar com paragens


Seguidamente decidiu-se otimizar o sistema de forma a que apenas se ativaria a turbina nas horas em que os preços do mercado estivessem no seu máximo. E o mesmo se procedeu para o caso da bomba, apenas se ativaria este equipamento quando os preços da eletricidade no

mercado atingissem os seus valores mínimos. Nos valores intermédios a central estaria parada. Assim a bombagem iria ser executada apenas quando os preços variassem entre os 38,06 € e os 40 €. Na atividade de geração de energia a turbina seria acionada apenas nas horas em que os preços correspondem ao intervalo entre os 60 € e os 65 €.

A semana utilizada é a mesma de referência do caso anterior e a distribuição semanal é representada na tabela seguinte.

Tabela 36: Balanço remuneratório mensal

	Preço horário do mercado diário (€ MWh ⁻¹)						
	Segunda	Terça	Quarta	Quinta	Sexta	Sábado	Domingo
1:00	45,03	58,69	50	56,1	57,05	50	42,41
2:00	40	53,58	47,06	50,29	50	45,8	40,11
3:00	39,39	50	44,78	45,94	45,91	43,04	39,3
4:00	39,19	45,94	41,33	45,69	43,27	42,41	38,06
5:00	39,19	46,12	41,04	45,23	42,41	41,03	38,06
6:00	41,88	51,4	43,2	46,6	45,69	40	38,06
7:00	52,98	59,07	45,94	57,05	54,6	43,02	39,3
8:00	57,14	60	49,34	61,5	59,19	45,8	40,11
9:00	58,5	61,03	48,19	62	58,35	46,69	40,55
10:00	59,69	62	52,34	62,69	59,98	47,6	42,63
11:00	59,69	61,3	53,58	63,01	59,61	48,39	44,64
12:00	58,5	60	53,99	62,49	58,1	44,72	43,27
13:00	57,56	60	53,99	62,49	58,23	43,32	43,04
14:00	57,56	59,69	54,07	62,5	58,2	42,67	43,04
15:00	56,33	57,05	53,99	61,6	56,65	41,03	43,02
16:00	54,01	56,01	52,98	60,2	53,58	38,1	42,18
17:00	55	55,46	52,75	59,07	53,06	38,14	41,69
18:00	57,24	56,65	52,98	59,5	53,51	42,86	42,63
19:00	59,69	57,56	52,98	59,5	56,6	49,92	51,57
20:00	60,51	59	54,35	60,9	59,5	57,05	60,2
21:00	65	62,69	62,3	64	63,38	54,61	63,01
22:00	62,12	61,19	62,0	63,48	59,98	54,07	62,49
23:00	58,45	56,02	58,6	60,5	56,6	49,07	59,94
24:00	55	53,69	54,07	57,05	53	46,1	55,38

 Turbinação

 Bombagem

 Parada

No Apêndice D encontram-se os gráficos diários com os preços horários nas respetivas horas em turbinação e bombagem.

Conclui-se que a operação de turbinação terá um total de 30 horas semanais e a operação de bombagem terá um total de apenas 12 horas por semana.

Para este caso também se procedeu ao dimensionamento do reservatório inferior de forma a saber qual o valor máximo de água que este admitirá segundo o balanço elaborado anteriormente.

Considerou-se um ciclo semanal a iniciar às 20:00 de segunda-feira, aquando do início da turbinação quando a fosso da pedraira contém o volume máximo de água e reservatório inferior está vazio.

Tabela 37: Dimensionamento do reservatório inferior

Dias	Volume diário (m ³)	Volume acumulado (m ³)	Volume a turbinar	Diferença	Volume do reservatório inferior (m ³)
Segunda (após 20h)	0	0	2.160	-2.160	19.440
Terça	0	0	7.920	-7.920	
Quarta	0	0	9.360	-9.360	
Quinta	0	0	18.720	-18.720	
Sexta	0	0	19.440	-19.440	
Sábado	5.400	5.400	19.440	-14.040	
Domingo (até segunda às 20h)	16.200	21.600	21.600	0	

Efetuarão-se os cálculos tal como no caso anterior e os resultados obtidos foram:

Tabela 38: Lucro total anual

Total ganho por ano (€)	Total gasto por ano (€)	Lucro (€)
28.703,84	39.773,71	- 11.069,87

Tal como no caso anterior, a operação não apresenta rentabilidade.

Foi ponderada a hipótese de se agregar a este projeto fontes de energia complementares que suprimissem os custos inerentes à operação de bombagem, tais como, a implementação de painéis solar nas imediações da pedreira ou geradores eólicos. No entanto, estas hipóteses foram descartadas. No caso dos painéis solares esta não se revelou uma boa opção devido ao facto de estes apenas produzirem energia durante o período do dia, o que levaria a que a bomba estivesse em funcionamento nesse período e restasse o período da noite para a turbina ser acionada. Como no período noturno existe uma diminuição na procura de eletricidade não seria compensatória a venda de energia durante esse período. Relativamente à aplicação de geradores eólicos, seriam a melhor opção, dado que a sua produção energética é maioritariamente durante o período da noite, o que auxiliaria a operação de bombagem de forma a que durante o dia fosse possível a operação de turbinagem. No entanto analisando os dados obtidos para a velocidade do vento horária, Apêndice E, facilmente se conclui que esta operação não seria eficaz visto que nos períodos da noite na estação meteorológica de Escudeiros são observados valores muito reduzidos da velocidade do vento para essa zona, havendo vários períodos em que o vento é nulo. Na Tabela 39 reúnem-se algumas datas representativas extraídas das tabelas do Apêndice E, na qual se pode constatar que nos períodos noturnos na zona de Escudeiros a velocidade do vento horária é maioritariamente nula.

Tabela 39: Velocidade do vento horária na estação meteorológica de Escudeiros

Velocidade do vento horária (m s ⁻¹)					
Horas	18/03/2003	17/05/2003	01/01/2005	06/10/2006	14/12/2009
19:00	0	0,5	0	2,4	0
20:00	0	0,3	0	1	0
21:00	0	0,4	0	0	0
22:00	0	0	0	0	0,4
23:00	0	0	0	0	0
00:00	0	0	0	0,5	0
01:00	0	0	0,6	0	0
02:00	0	0	0	1	0
03:00	0	0	0	0	0
04:00	0	0	0	0,4	0
05:00	0	0	0	0	0,3
06:00	0	0	0	0	0
07:00	0	0	0	0	0
08:00	0	0	0	0,9	0
09:00	0	0	0	0	0

Existem várias considerações fora do âmbito deste estudo que poderão ser estudadas com o intuito de se obter lucros satisfatórios e maximiza-los, tais como, a integração dos valores das receitas que advém de um sistema como este participar no mercado que crescem aos valores da venda de energia, como por exemplo, a reserva não síncrona. A central poderá considerar-se reserva não girante quando está parada e reserva girante quando está em modo de bombagem, assim poderá diminuir a sua potência de bombagem o que provocará um abaixamento na potência de consumo do sistema elétrico.

Durante este trabalho foram tidas algumas considerações, tais como, na zona de implementação da pedreira de Penafiel foi identificada uma pedreira nas imediações cuja cota difere de aproximadamente 200 metros de altitude e 3 quilómetros de distância relativamente à pedreira da Mota-Engil, o que se revelou um potencial caso de estudo para

implementação do reservatório superior. Apesar de esta pedreira identificada não pertencer à empresa Mota-Engil poderá ser um bom caso de estudo, uma vez que aplicação de uma central hídrica reversível num caso destes implicaria uma redução nos custos de construção, visto que não seria necessário a construção de reservatórios artificiais, dado que ambas as pedreiras possuem condições para estarem interligadas e funcionarem como reservatórios de armazenamento de água.

Na zona referida no tópico anterior, Penafiel, observou-se que a pedreira da Mota-Engil se integra num conjunto de pedreiras que a envolvem. Todas estas pedreiras possuem a mesma característica de estar a cerca de 300 metros de altitude acima do Rio Tâmega e a menos de 2 quilómetros de distância deste, o que as poderia transformar num projeto integrado e conjunto entre as várias empresas para reconversão das pedreiras num único reservatório de elevadas dimensões. Aliado a este facto está também a barragem de Torrão no rio Tâmega a jusante da área das pedreiras, o que torna esta albufeira o reservatório inferior ideal. Encontram-se aqui reunidas todas as condições para a implementação de uma central hídrica reversível semi-aberta com o intuito de se gerar energia, mas também controlar as cheias.

7. Conclusões

O caráter finito da utilização de combustíveis fósseis para a produção de energia, aliado à preocupação ambiental crescente, levou a uma elevada aposta nas fontes de energias sustentáveis.

Com a implementação destas fontes de energias renováveis têm surgido, todavia, problemas como a sua intermitência devido às condições climáticas ou o excesso de produção em horas de pouco consumo, o que implicou a necessidade de se implementarem sistemas de armazenamento de energia. As centrais hídricas reversíveis surgem, assim, com uma importância acrescida por permitir armazenar água para a produção de energia de forma previsível e aquando das maiores necessidades de consumo.

Por outro lado, ao nível da indústria extrativa existe a problemática do passivo ambiental, no fim de vida de uma pedreira, surgindo a necessidade de recuperação, contabilizando-se até ao momento as mais diversas soluções essencialmente do tipo paisagístico.

A solução apresentada neste trabalho consistiu no estudo da possível reconversão de uma pedreira desativada num reservatório de armazenamento de água para geração de energia através da recirculação da água para outro reservatório, a cota inferior e ligado ao anterior através de um circuito hidráulico.

Na ótica de minimização de custos, a reconversão de uma pedreira num reservatório de armazenamento de água traz grandes vantagens devido à redução dos custos que um projeto deste género tem que enfrentar, ao ter que construir dois reservatórios.

Os exemplos estudados foram as pedreiras da empresa Mota-Engil que se encontram por todo o território nacional. Por análise das características dessas pedreiras, com o intuito de se localizar as que possuem maior potencial energético para implementação de uma central hídrica reversível conclui-se facilmente que as pedreiras do sul de Portugal, mais precisamente no Alentejo são à partida excluídas tanto pelo facto de a precipitação nessa zona de Portugal ser reduzida, como o facto de se verificarem desníveis topográficos pouco significativos. As pedreiras do interior norte de Portugal apesar de apresentarem melhores condições a nível de relevo também estão condicionados pelos reduzidos níveis de precipitação característicos dessas zonas. Por essa razão, incidiu-se no estudo das pedreiras do litoral norte que, para além de boas condições topográficas, apresentam também os níveis de precipitação mais elevados de Portugal continental.

Após a seleção de duas pedreiras alvo procedeu-se à estimativa dos volumes de água acumulados nos seus fossos o que permitiu selecionar uma pedreira que passou a ser o caso de estudo.

Ao caso de estudo selecionado procedeu-se à avaliação técnica e económica para análise da viabilidade deste projeto. Para tal, iniciou-se a avaliação com a escolha de uma semana adequada às características médias de variabilidade dos preços no mercado MIBEL e a partir daqui elaborou-se a distribuição semanal que este projeto teria que operar, ou seja, colocou-se as horas de bombagem a coincidir com as horas cujos preços eram os mais baixos no mercado e as horas de turbinação a coincidir com as horas cujos preços eram mais altos. Com a distribuição anterior obteve-se um total de 102 horas semanais em fase de geração de energia e 66 horas em bombagem.

A partir do balanço anterior foi possível determinar as características tanto da bomba como da turbina, bem como, o volume de água a ser utilizado com estas condições, efetuando-se para tal um balanço de caudais, de forma a se obter uma regularização semanal. Foi ainda dimensionado o reservatório inferior.

Após avaliação económica constatou-se que este sistema não é rentável apresentando um prejuízo anual de 97.721,02 €.

Elaborou-se ainda um estudo igual ao anterior, mas em que apenas se ativaria a turbina nas horas em que os preços do mercado estivessem no seu máximo. E apenas se ativaria a bomba quando os preços da eletricidade no mercado atingissem os seus valores mínimos. Nos valores intermédios a central estaria parada, o que fez um total de 30 horas para a fase de geração de energia e 12 horas para a bombagem. Com estas novas condicionantes o prejuízo apresentado foi de 11.069,87 €.

Assim sendo, conclui-se que nos moldes em que foram considerados o sistema, o mesmo não apresenta rentabilidade.

Ao longo da realização desta dissertação foram surgindo novas possibilidades de estudos futuros, tais como:

- Implementação de ferramentas computacionais de previsão de lucros aplicado ao presente caso de estudo.
- Estudo de variabilidade temporal deste projeto ao longo das diferentes épocas do ano.
- Estudo da possibilidade de construção de um sistema de encaminhamento de águas pluviais de sítios críticos sujeitos a cheias para enchimento do fosso da pedreira.

Referências Documentais

- Agência Portuguesa do Ambiente. (2012a). *Plano de Gestão da Região Hidrográfica do Cávado, Ave e Leça RH2 Relatório de Base Parte 2 - Caracterização e Diagnóstico da Região Hidrográfica*.
- Agência Portuguesa do Ambiente. (2012b). *Plano de Gestão da Região Hidrográfica do Douro RH3 Relatório de Base Parte 2 - Caracterização e Diagnóstico da Região Hidrográfica*.
- Barbosa, B. M. de C. (2015). *Avaliação do Potencial Hidroelétrico - Uso de SIG na Bacia do Rio Lima*. Dissertação de Mestrado em Sistemas de Energias Renováveis, Instituto Politécnico de Viana do Castelo.
- Castro, R. (2008). *Energias Renováveis e Produção Descentralizada. Introdução à Energia Mini-Hídrica*. Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Costa, J. C. P. L. da. (2014). *Módulo de Energia Hídrica - Turbinas Hidráulicas - Documentação de Apoio às Aulas. Mestrado em Energias Sustentáveis. 2014/2015*. Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto.
- Costa, P. M. A. da, & Gouveia, E. M. T. M. (2000). *Impacto da Produção Dispersa nas Redes Eléctricas*. II Jornadas da Engenharia Electrotécnica - ESTV, Viseu.
- Eagle Crest Energy Company. (2011). Eagle Mountain Pumped Storage Project. Retrieved March 17, 2016, from <http://eaglemountainenergy.net/>
- Energy Storage Association. (2016). Energy Storage Association. Retrieved June 4, 2016, from <http://energystorage.org/>
- Federal Energy Regulatory Commission. (2016). Federal Energy Regulatory Commission. Retrieved May 30, 2016, from <http://www.ferc.gov/>
- Ferreira, R. (2015). *Sistemas Hidroelétricos Autónomos do Tipo Pumped Hydroelectric Storage*. Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de Mestre em Engenharia Civil – Especialização em Hidráulica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Fink, M., Fritzer, R., & Pehm, M. (2013). Atdorf Pumped-storage Plant: Permitting Requirements of a Large-scale Project in Germany. *HYDRO 2013 - Promoting the Versatile Role of Hydro*.

- Friesen, C. (2013). Pit Power - An Old Mine on Its Way to Becoming Part of a New Energy Future. *Canadian Mining Journal*.
- Fujihara, T., Imano, H., & Oshima, K. (1998). Development of Pump-Turbine for Seawater Pumped Storage Power Plant. *Waterpower 1999*, 47(5), 67–67. [http://doi.org/10.1061/40440\(1999\)67](http://doi.org/10.1061/40440(1999)67)
- Interior, U. S. D. of the. (2015). *Reclamation - Managing Water in the West*.
- Kucukali, S. (2014). Finding the Most Suitable Existing Hydropower Reservoirs for the Development of Pumped-Storage Schemes: An Integrated Approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37, 502–508. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.052>
- Marques, J. A. R. (2015). *Hidroelectricidade e Barragens Reversíveis: Panorama actual*. Dissertação de Mestrado em Ciências e Tecnologia do Ambiente, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto.
- Marrucho, J. (2014). *Gestão a Curto Prazo de Aproveitamentos Hídricos em Ambiente*. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- MIBEL. (2016). MIBEL Mercado Ibérico de Electricidade. Retrieved October 18, 2016, from <http://www.mibel.com/>
- Neves, E. (2016). *Armazenamento de Energia e Utilização em Ambiente de Mercado SPOT*. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Northland Power. (2016). Northland Power. Retrieved March 17, 2016, from <http://www.northlandpower.ca/Default.aspx>
- Oliveira, A. F. M. (2008). *Recuperação de Energia Hidráulica em Sistemas de Distribuição de Água. O Uso de Bombas a Funcionar Como Turbinas*. Relatório de Projecto submetido para satisfação parcial dos requisitos do grau de Mestre Em Engenharia Civil — Especialização Em Hidráulica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- OMIE. (2016). OMIE. Retrieved October 18, 2016, from <http://www.omie.es/inicio>
- OMIP. (2016). OMIP. Retrieved October 18, 2016, from <http://www.omip.pt/>
- Pinto, J. (2011). *Valorização da Produção Hídrica Reversível num Contexto de Crescente Integração de Energia Eólica no Sistema Electroprodutor*. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Energias Renováveis – Conversão Eléctrica e Utilização Sustentáveis, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

- Piqueiro, F. M. O. (1991). *Efeito da Regulação e da Forma e Dimensões da Câmara de Carga na Produtibilidade Energética de um Pequeno Aproveitamento Hidroeléctrico.pdf*. Dissertação para Obtenção do Grau de Mestre em Hidráulica e Recursos Hídricos, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Ramos, H. (2000). *Guidelines for Design of Small Hydropower Plants*. WREAN (Western Regional Energy Agency & Network) and DED (Department of Economic Development), Belfast, North Ireland.
- Reidy, M. K. nee. (2014). *Facilitating Energy Storage to Allow High Penetration of Intermittent Renewable Energy. Development of Bulk Energy Storage & Natura 2000*. stoRE.
- Rodrigues, C. M. M. (2009). *Cálculo da Evaporação de Albufeiras de Grande Regularização do Sul de Portugal*. Dissertação apresentada à Universidade de Évora para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia dos Recursos Hídricos, Universidade de Évora.
- Rogers, J. D., Watkins, C., & Hoffman, D. J. (2005). *Overview and History of the Taum Sauk Pumped Storage Project*. Missouri University of Science and Technology – Rolla, MO.
- Schluchseewerk AG. (2016). Schluchseewerk AG. Retrieved March 10, 2016, from <http://www.schluchseewerk.de/>
- Teixeira, F. E. R. (2012). *O Papel da Geração Hídrica Reversível na Integração da Energia Eólica em Ambiente de Mercado*. Dissertação de Mestrado para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Eletrotécnica – ramo de Energia, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- Vivas, E. B. de F. (2014). *Módulo de Energia Hídrica - Documentação de Apoio às Aulas. Mestrado em Energias Sustentáveis. 2014/2015*. Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto.
- Voith. (2011). *Pumped Storage Machines - Reversible Pump Turbines, Ternary sets and Motor-Generators*. Heidenheim.
- Wänn, A. R. M. (2013). *Facilitating Energy Storage to Allow High Penetration of Intermittent Renewable Energy. Recommendations for Furthering the Sustainable Development of Bulk Energy Storage Facilities*. stoRE.

Apêndices

Apêndice A.

A.1. Alenquer



Figura A.1: Pedreira de Alenquer
(Fonte: Google Earth)

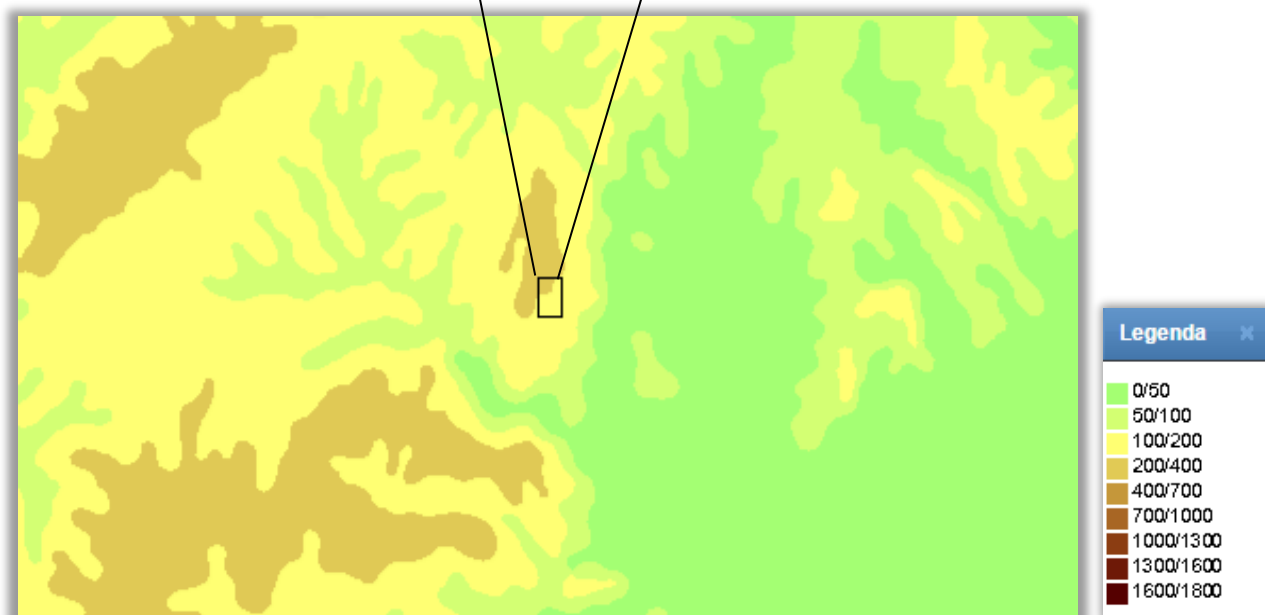


Figura A.2: Extrato do mapa hipsométrico (Classes) (Fonte: Atlas do Ambiente)

Pela análise do mapa anterior pode-se verificar que a Pedreira de Alenquer está localizada a uma altitude entre o 100 e os 400 metros, relativamente ao nível do mar.



Figura A.3: Extrato do mapa da precipitação (Quantidade total) (Fonte: Atlas do Ambiente)

Através da análise do mapa anterior conclui-se que a zona onde se insere a Pedreira de Alenquer possui uma precipitação que ronda os 700 e os 800 mm.

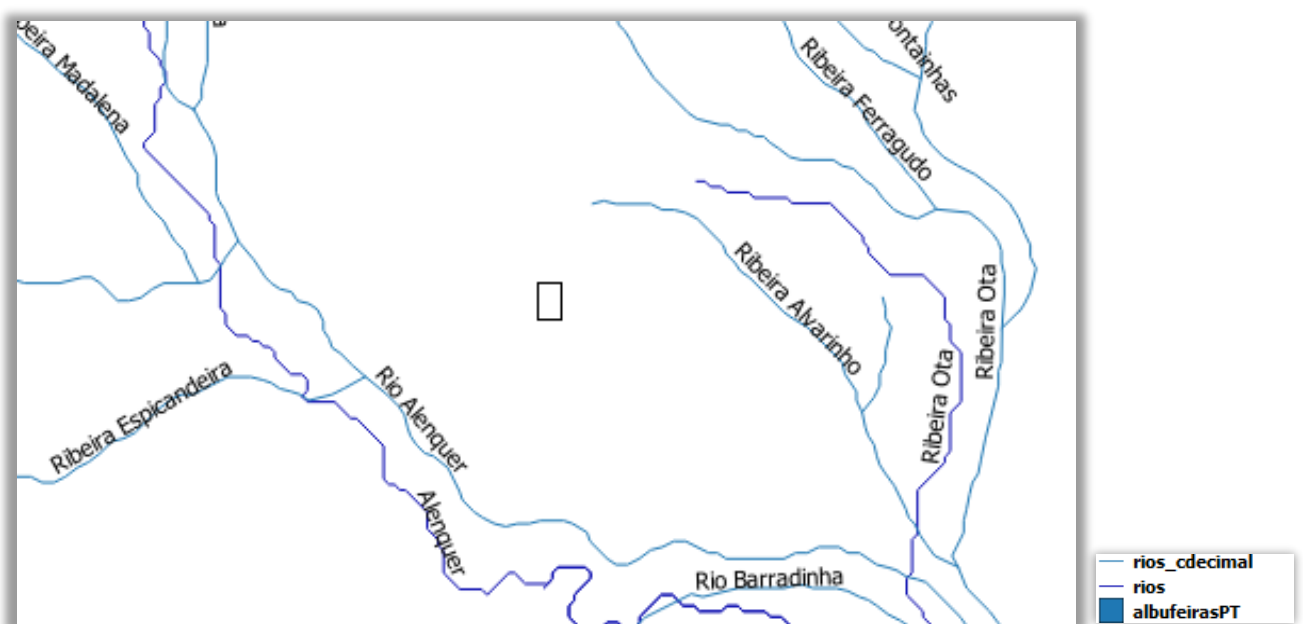


Figura A.4: Extrato do mapa da rede hidrográfica total e classificação decimal rede hidrográfica (Fonte: Atlas da Água)

O centro de produção de Alenquer localiza-se a aproximadamente 1,2 quilómetros da Ribeira Alvarinho e 3,3 quilómetros do Rio Alenquer. O rio Tejo encontra-se a cerca de 10 quilómetros.

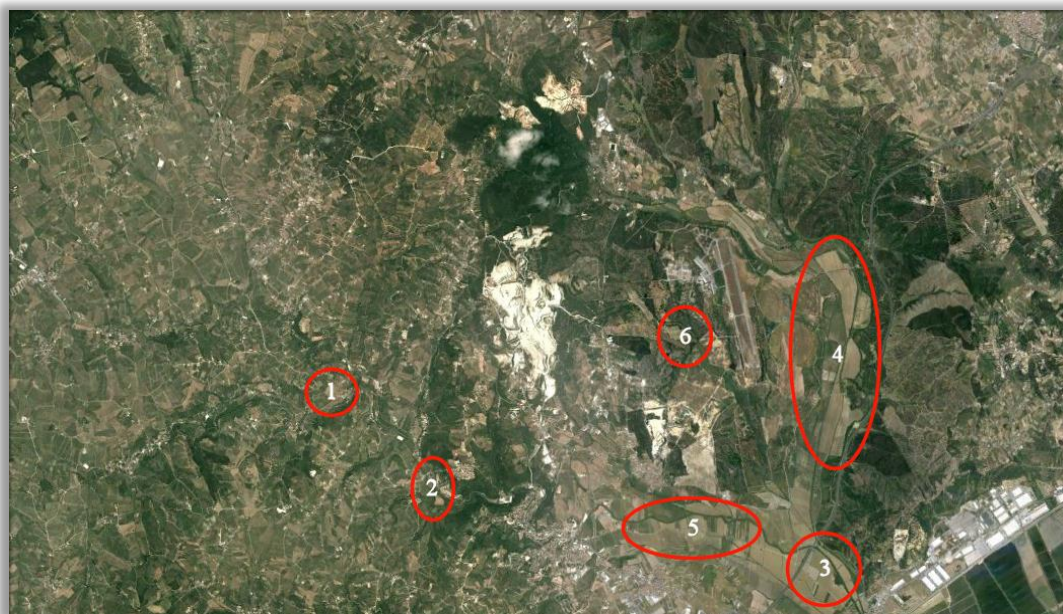


Figura A.5: Possíveis localizações do reservatório (Fonte: Google Earth)

Tabela A.1: Dados dos pontos para localização do reservatório

Pontos	Altitude (m)	Δh (m)	Distância à pedreira (km)	Coordenadas	Tipo de reservatório
1	60	140	3,6	39°04'23.87''N 9°03'07.45''W	Inferior
2	45	155	3,8	39°03'28.93''N 9°01'50.62''W	Inferior
3	6	194	7,5	39°02'40.18''N 8°56'43.94''W	Inferior
4	5	195	6,3	39°04'37.54''N 8°56'33.99''W	Inferior
5	15	185	5,8	39°03'01.07''N 8°57'29.61''W	Inferior
6	25	175	3,5	39°05'06.81''N 8°58'29.31''W	Inferior

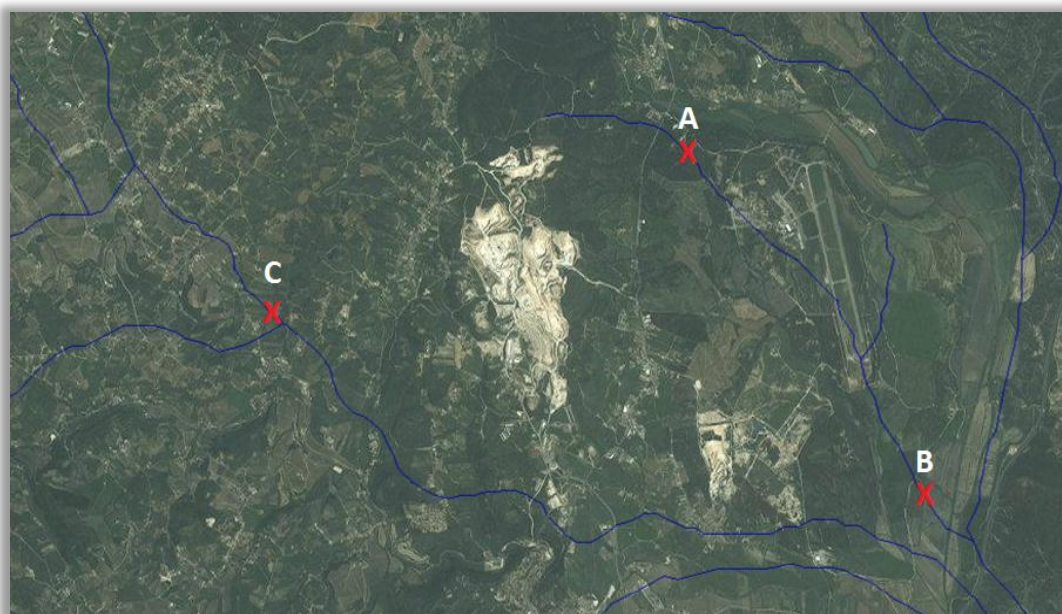


Figura A.6: Possíveis localizações de descarga nos cursos (Fonte: Atlas da Água)

Tabela A.2: Dados dos pontos de interseção dos cursos de água

Pontos	Altitude (m)	Δh (m)	Distância à pedreira (km)	Coordenadas
A	40	160	2,7	39°06'05.84''N 8°59'06.26''W
B	5	195	6,3	39°03'42.02''N 8°57'02.93''W
C	62	138	2,93	39°05'04.58''N 9°02'46.61''W

Tabela A.3: Dados pedreira

Nome	Pedreira Estrada Larga
Localização	Serra da Ota Apartado 41 2584 – 909 Alenquer
Atividade	Não ativa
Geologia	Calcário
Área de escavação	88.453,95 m ²
Fosso	0,00 m ³
Observações	Configuração da pedreira não permite enchimento.

A.2. Amarante



Figura A.7: Pedreira de Amarante
(Fonte: Google Earth)

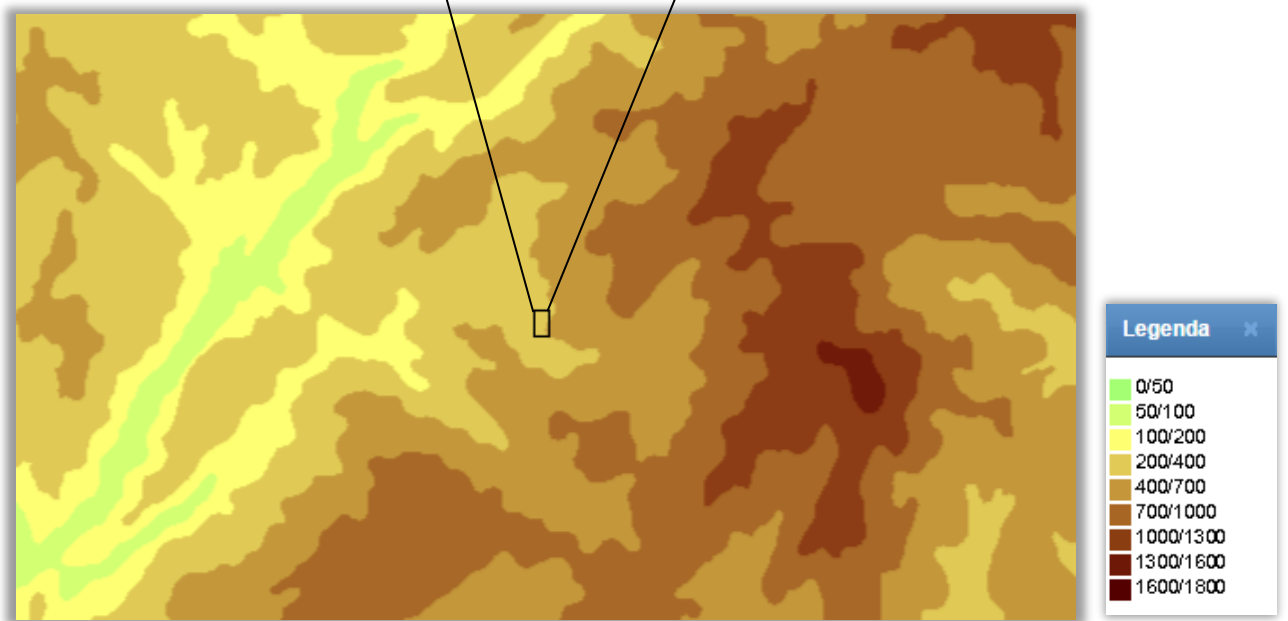


Figura A.8: Extrato do mapa hipsométrico (Classes) (Fonte: Atlas do Ambiente)

Com base na análise do mapa anterior verifica-se que a Pedreira Várzea está localizada a uma altitude entre o 200 e os 400 metros, em relação ao nível do mar.

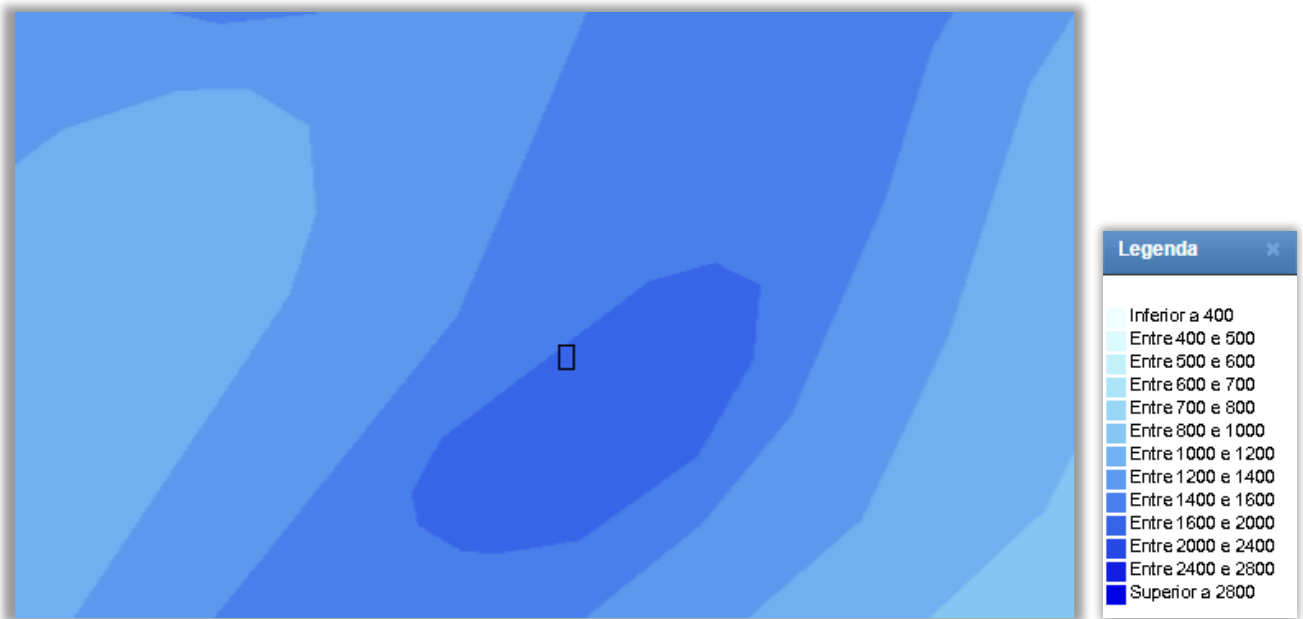


Figura A.9: Extrato do mapa da precipitação (Quantidade total) (Fonte: Atlas do Ambiente)

Da análise do mapa da precipitação verifica-se que a área de implementação da Pedreira de Amarante possui uma precipitação cujos valores são de 1.600 e os 2.000 mm.

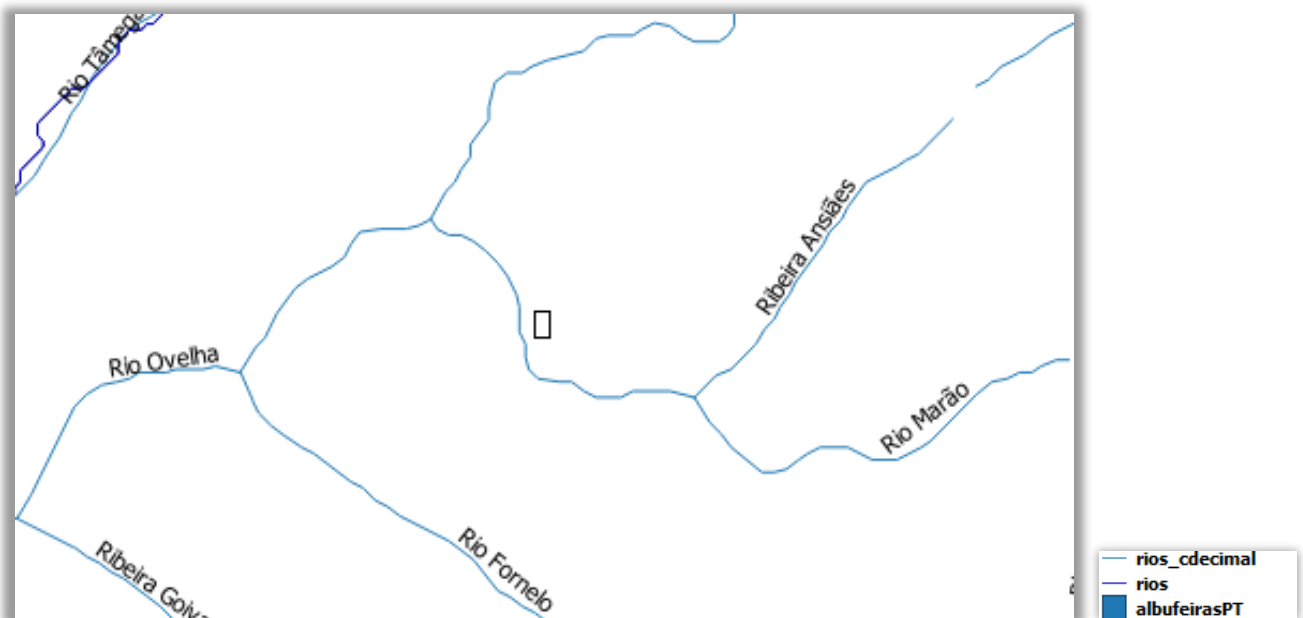


Figura A.10: Extrato do mapa da rede hidrográfica total e classificação decimal rede hidrográfica (Fonte: Atlas da Água)

A pedreira Várzea localiza-se a aproximadamente 300 metros do Rio Marão, a 6 quilómetros do Rio Olo e a 7 quilómetros do Rio Tâmega.

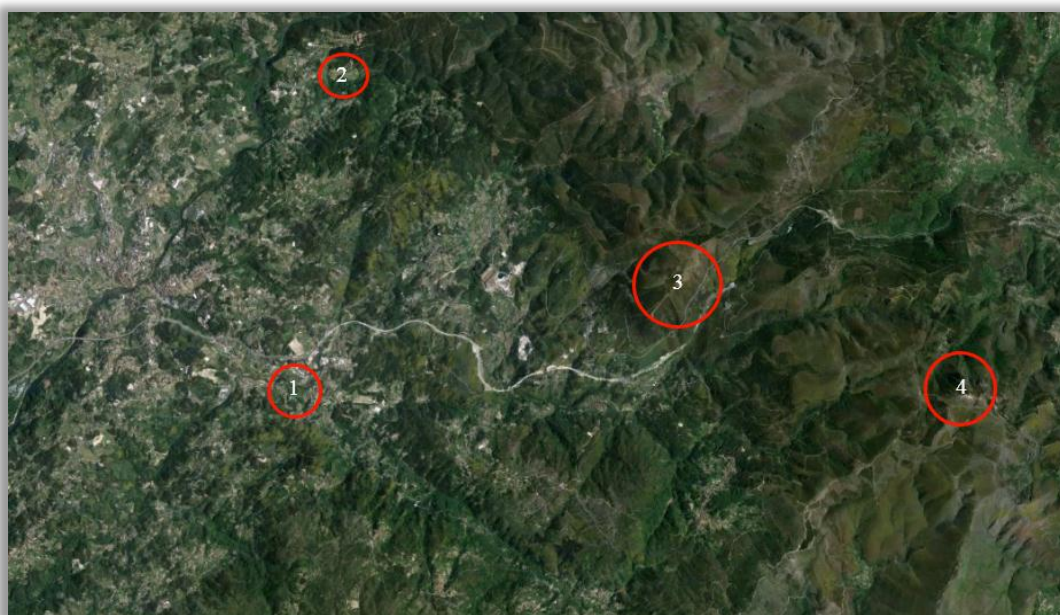


Figura A.11: Possíveis localizações do reservatório (Fonte: Google Earth)

Tabela A.4: Dados dos pontos para localização do reservatório

Pontos	Altitude (m)	Δh (m)	Distância à pedreira (km)	Coordenadas	Tipo de reservatório
1	160	190	4,5	41°15'01.24''N 8°02'18.13''W	Inferior
2	112	238	6,6	41°18'21.99''N 8°01'44.57''W	Inferior
3	951	-601	3,4	41°16'12.10''N 7°56'54.44''W	Superior
4	1.387	-1.037	8,5	41°14'49.62''N 7°53'03.71''W	Superior

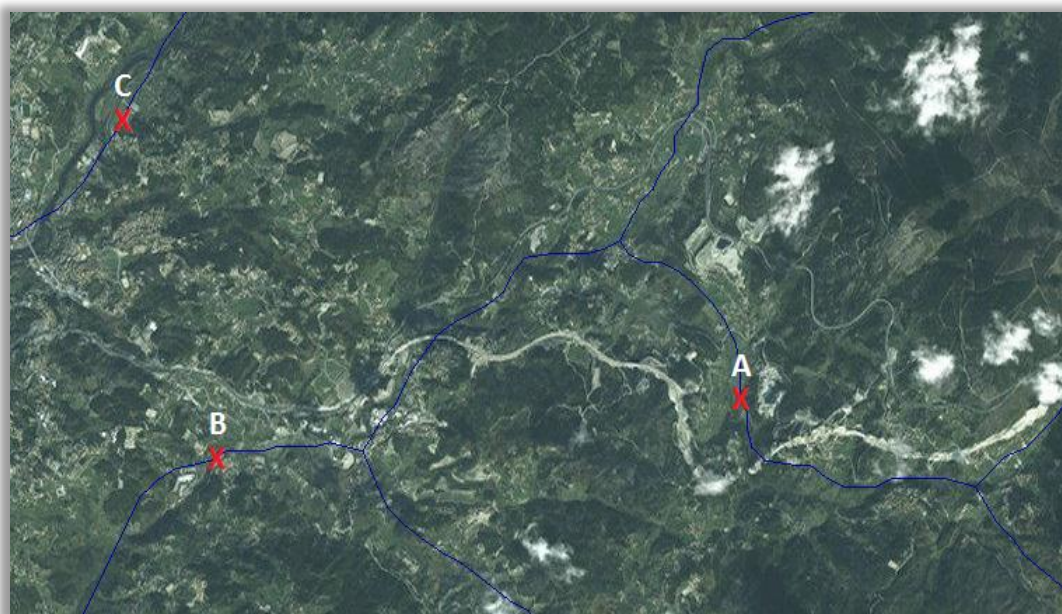


Figura A.12: Possíveis localizações de descarga nos cursos (Fonte: Atlas da Água)

Tabela A.5: Dados dos pontos de interseção dos cursos de água

Pontos	Altitude (m)	Δh (m)	Distância à pedreira (km)	Coordenadas
A	263	87	0,3	41°15'28.07''N 7°59'22.32''W
B	152	198	4,9	41°15'06.51''N 8°02'35.50''W
C	72	278	7,1	41°17'09.62''N 8°03'41.28''W

Tabela A.6: Dados pedreira

Nome	Pedreira Várzea
Localização	Várzea 4600-500 Várzea
Atividade	Não ativa
Geologia	Granito
Área de escavação	33.704,76 m ²
Fosso	91.401,32 m ³

A.3. Bragança



Figura A.13: Pedreira de Bragança (Fonte: Google Earth)



Figura A.14: Extrato do mapa hipsométrico (Classes) (Fonte: Atlas do Ambiente)

A pedreira de Bragança localiza-se a uma altitude compreendida entre os 400 metros e os 700 metros.

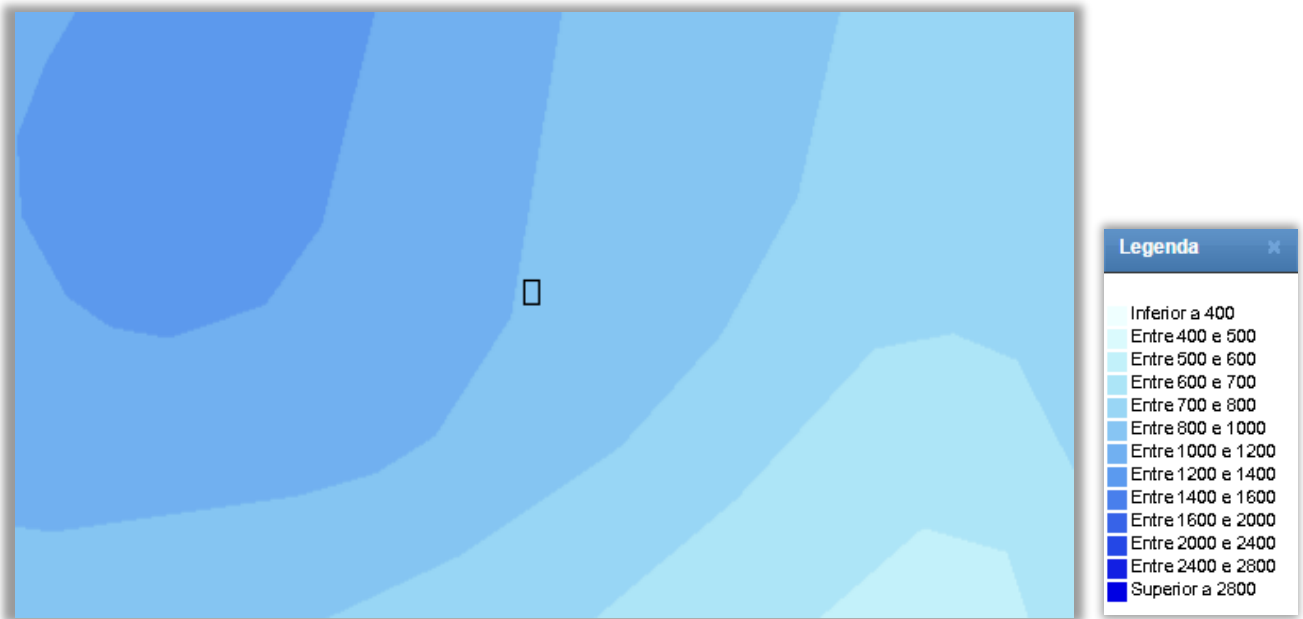


Figura A.15: Extrato do mapa da precipitação (Quantidade total) (Fonte: Atlas do Ambiente)

A precipitação na zona da Pedreira Bragança ronda os 800 e os 1.000 mm, tal como se verifica na figura anterior.

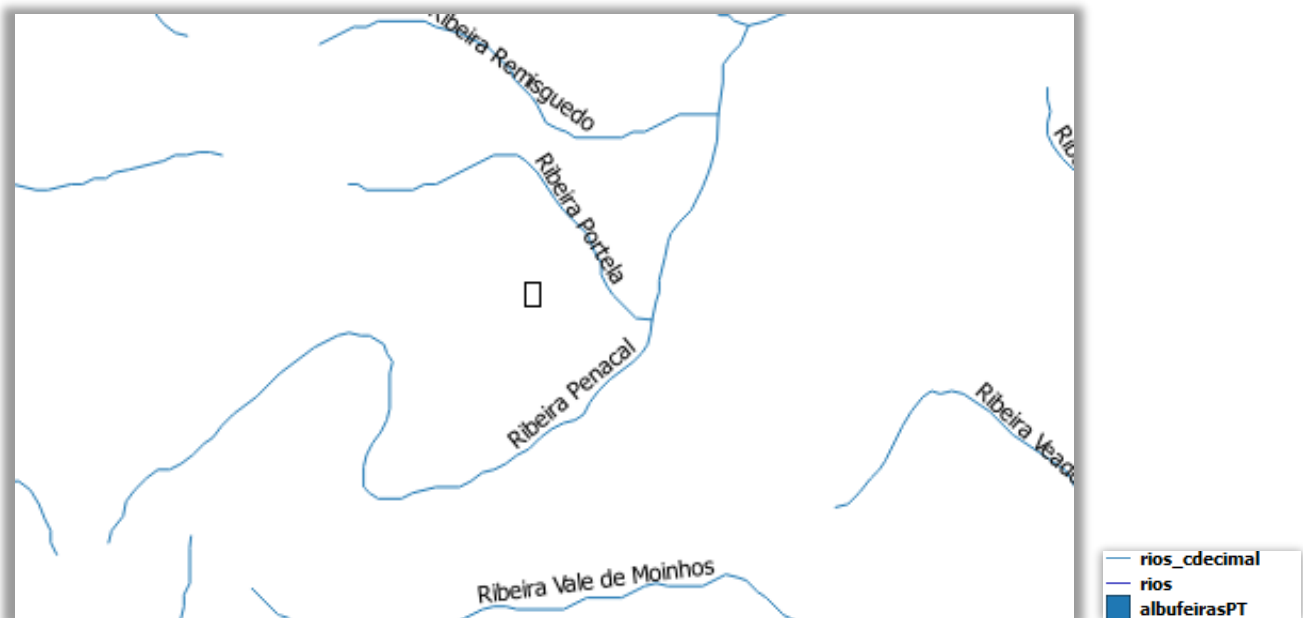


Figura A.16: Extrato do mapa da rede hidrográfica total e classificação decimal rede hidrográfica (Fonte: Atlas da Água)

O centro de produção de Bragança encontra-se a aproximadamente 1 quilómetro da Ribeira Portela e a cerca de 1,8 quilómetros da Ribeira Penacol.

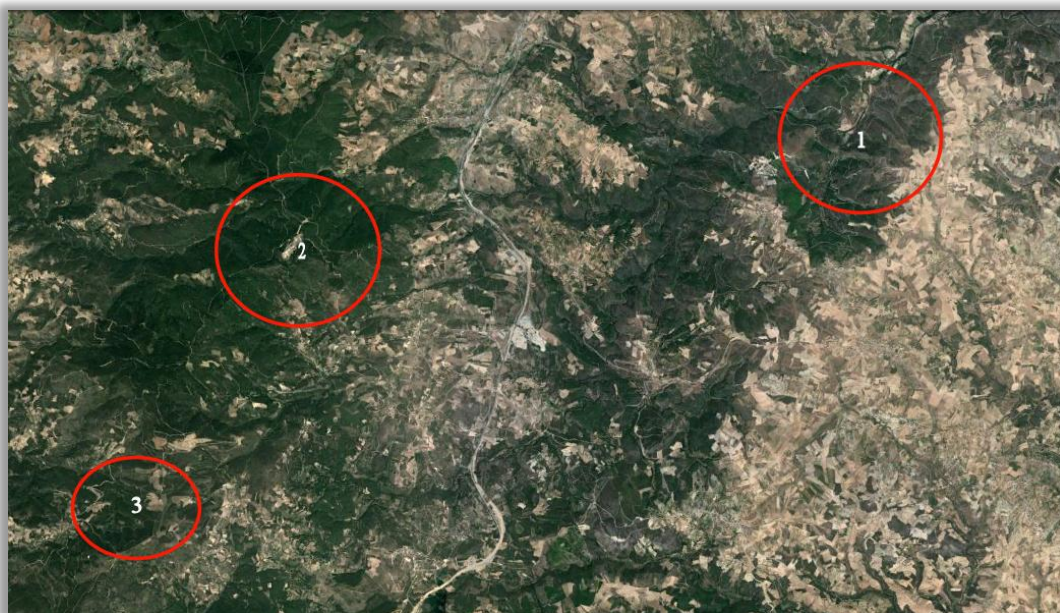


Figura A.17: Possíveis localizações do reservatório (Fonte: Google Earth)

Tabela A.7: Dados dos pontos para localização do reservatório

Pontos	Altitude (m)	Δh (m)	Distância à pedreira (km)	Coordenadas	Tipo de reservatório
1	510	200	9,1	41°44'23.61''N 6°43'49.45''W	Inferior
2	1.200	-490	4,7	41°43'08.95''N 6°51'26.86''W	Superior
3	1.060	-350	8,1	41°40'20.38''N 6°53'18.04''W	Superior

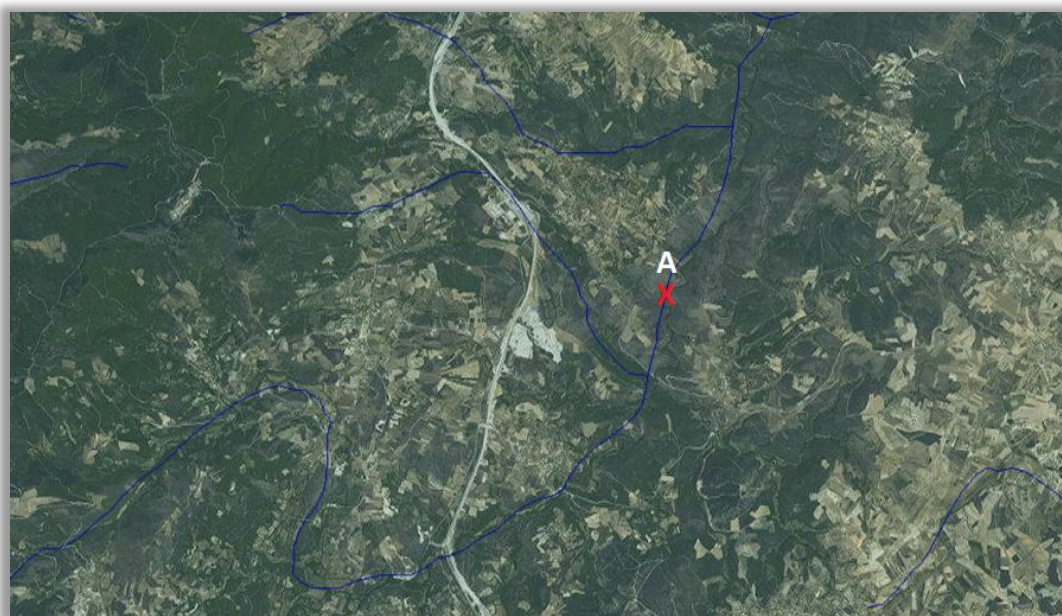


Figura A.18: Possíveis localizações de descarga nos cursos (Fonte: Atlas da Água)

Tabela A.8: Dados dos pontos de interseção dos cursos de água

Pontos	Altitude (m)	Δh (m)	Distância à pedra (km)	Coordenadas
A	616	94	1,9	41°42'26.79"N 6°47'07.42"W

Tabela A.9: Dados pedra

Nome	Pedreira Vale dos Bogalhos
Localização	Sítio do Cachão – Mós 5300-903 Sortes – Bragança
Atividade	Não ativa
Geologia	Granito
Área de escavação	Sem dados
Fosso	Sem dados

A.4. Cantanhede



Figura A.19: Pedreira de Cantanhede (Fonte: Google Earth)

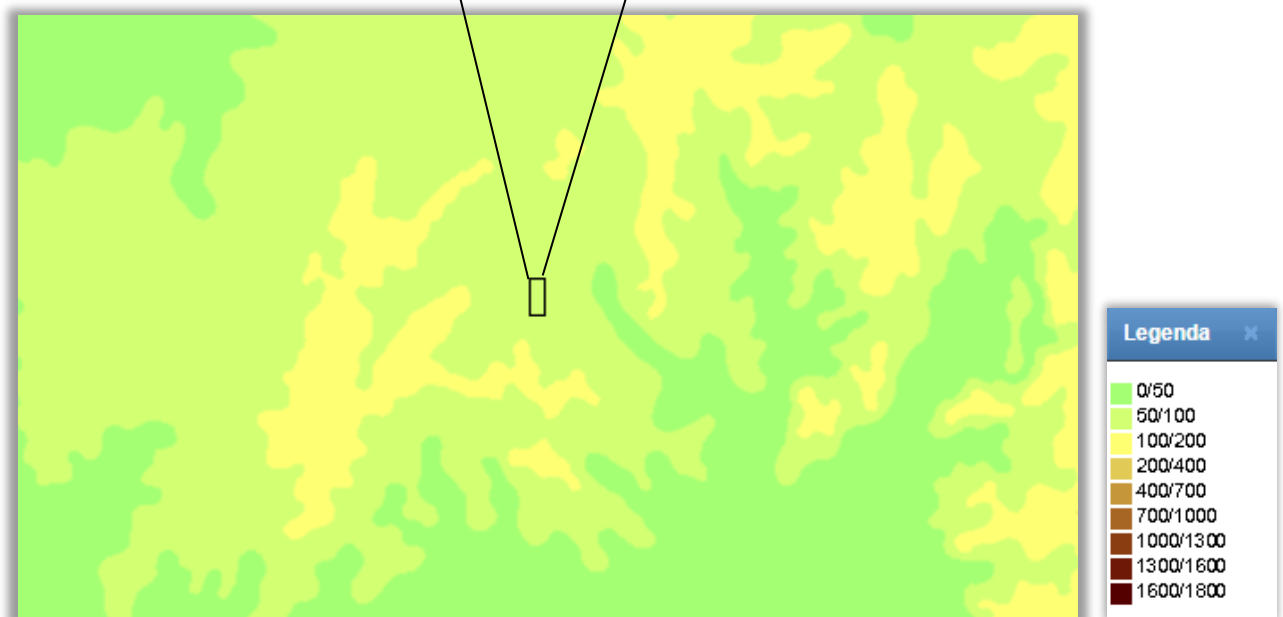


Figura A.20: Extrato do mapa hipsométrico (Classes) (Fonte: Atlas do Ambiente)

Através da análise do mapa anterior verifica-se que a altitude da Pedreira de Cantanhede corresponde a 50 e 100 metros.

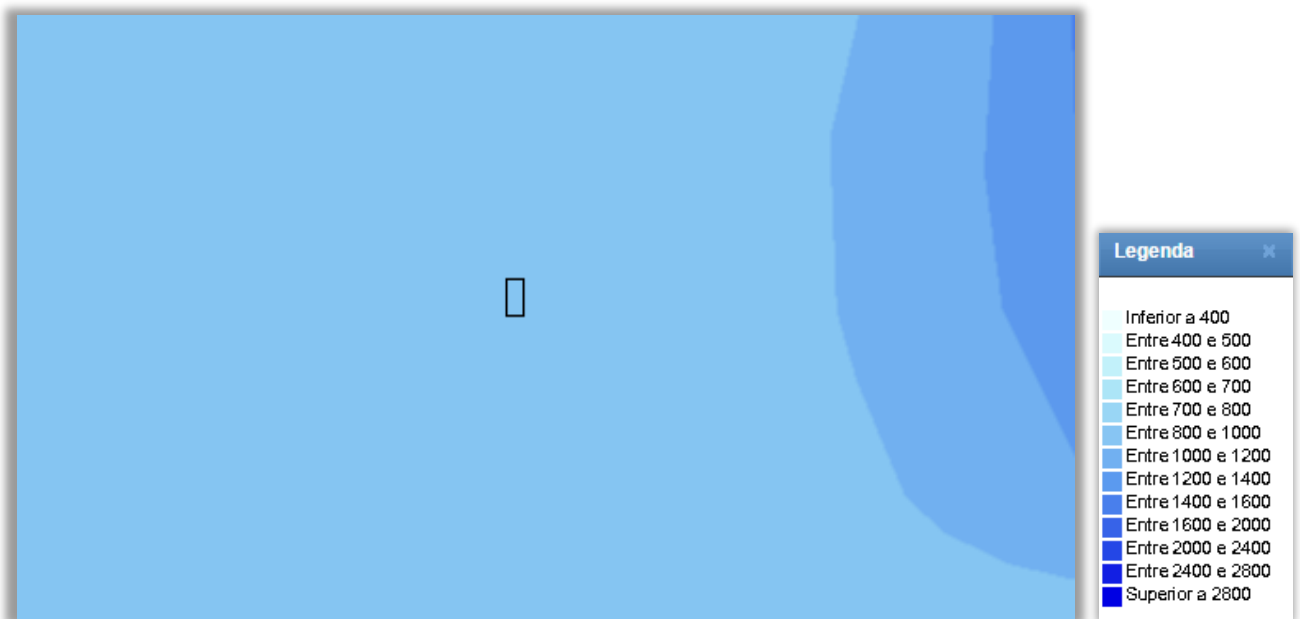


Figura A.21: Extrato do mapa da precipitação (Quantidade total) (Fonte: Atlas do Ambiente)

Através da análise do mapa anterior conclui-se que a Pedreira de Cantanhede insere-se numa zona onde a precipitação ronda os 800 e os 1.000 mm.

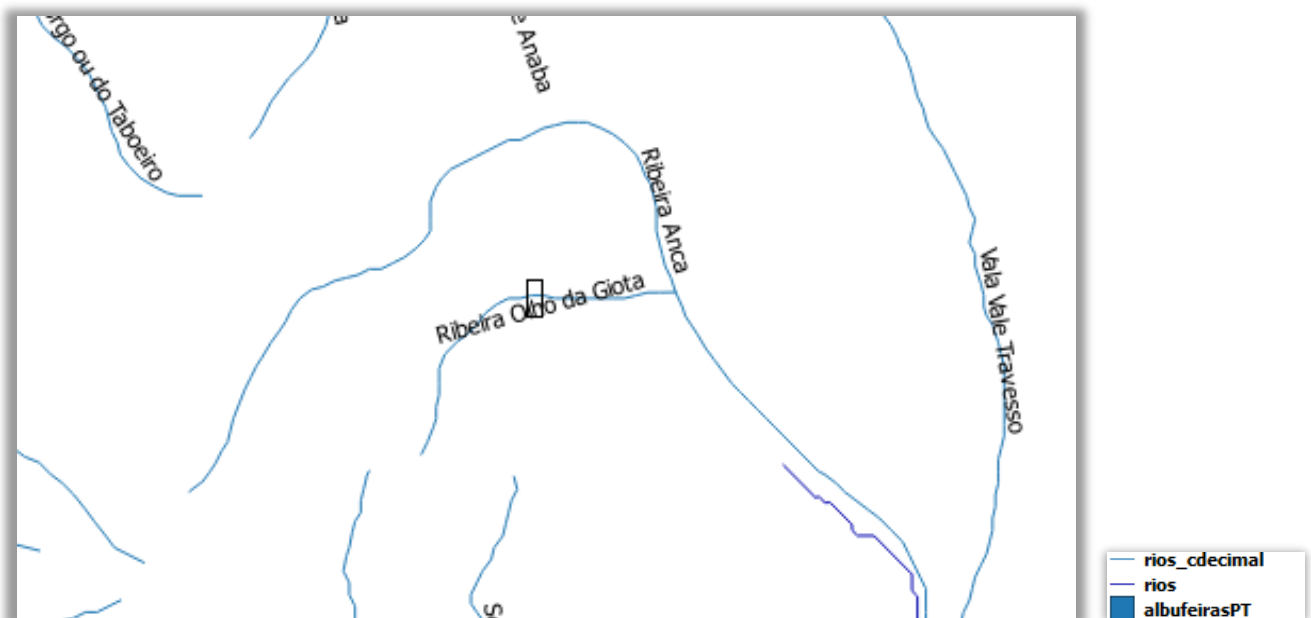


Figura A.22: Extrato do mapa da rede hidrográfica total e classificação decimal rede hidrográfica (Fonte: Atlas da Água)

O centro produtor de Cantanhede encontra-se a cerca de 2 quilómetros da Ribeira Anca.

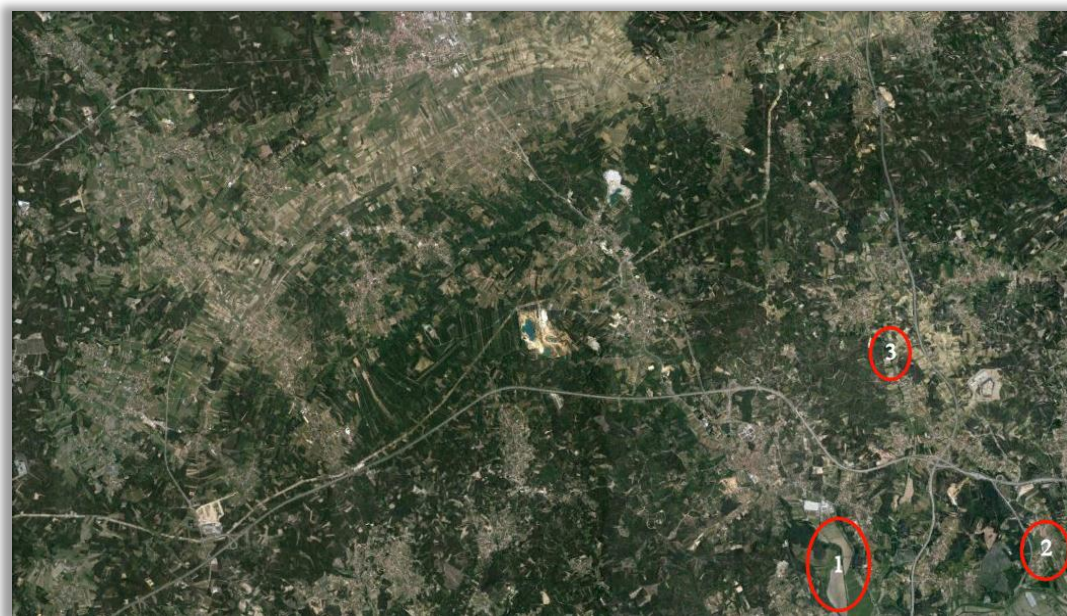


Figura A.23: Possíveis localizações do reservatório (Fonte: Google Earth)

Tabela A.10: Dados dos pontos para localização do reservatório

Pontos	Altitude (m)	Δh (m)	Distância à pedreira (km)	Coordenadas	Tipo de reservatório
1	15	45	7,5	40°15'16.18''N 8°30'08.66''W	Inferior
2	14	46	10,5	40°15'28.14''N 8°27'33.95''W	Inferior
3	30	30	6,7	40°17'24.89''N 8°29'22.01''W	Inferior

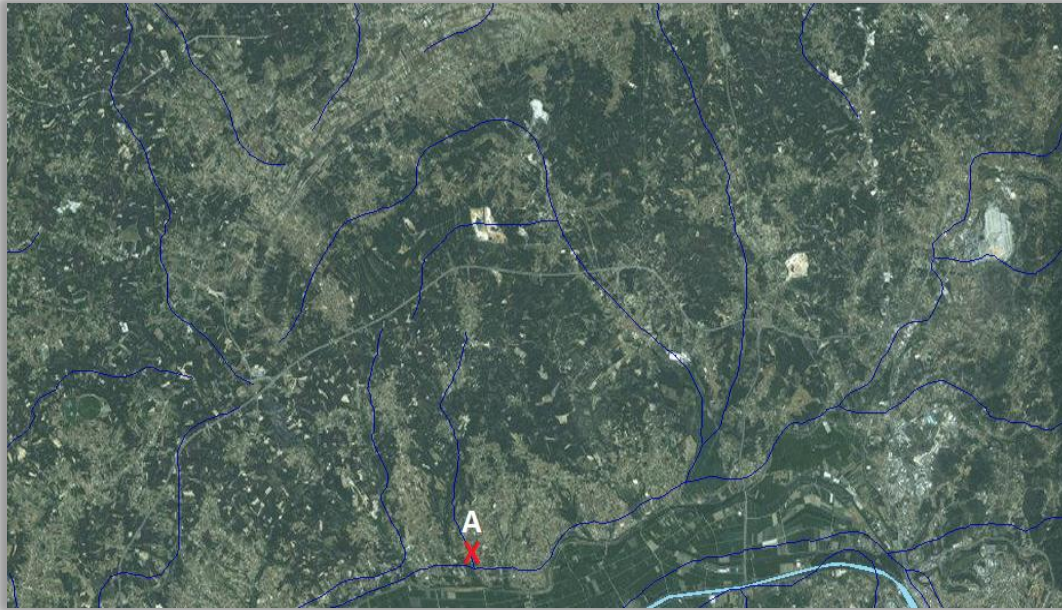


Figura A.24: Possíveis localizações de descarga nos cursos (Fonte: Atlas da Água)

Tabela A.11: Dados dos pontos de interseção dos cursos de água

Pontos	Altitude (m)	Δh (m)	Distância à pedreira (km)	Coordenadas
A	7	53	8,4	40°13'10.72''N 8°34'09.56''W

Tabela A.12: Dados pedreira

Nome	Pedreira Cova da Moura nº 3
Localização	Outil – Apartado 236 3064- 909 Cantanhede
Atividade	Não
Geologia	Calcário
Área de escavação	102.671,30 m ²
Fosso	1.610.487,36 m ³

A.5. Celorico da Beira



Figura A.25: Pedreira de Celorico da Beira (Fonte: Google Earth)

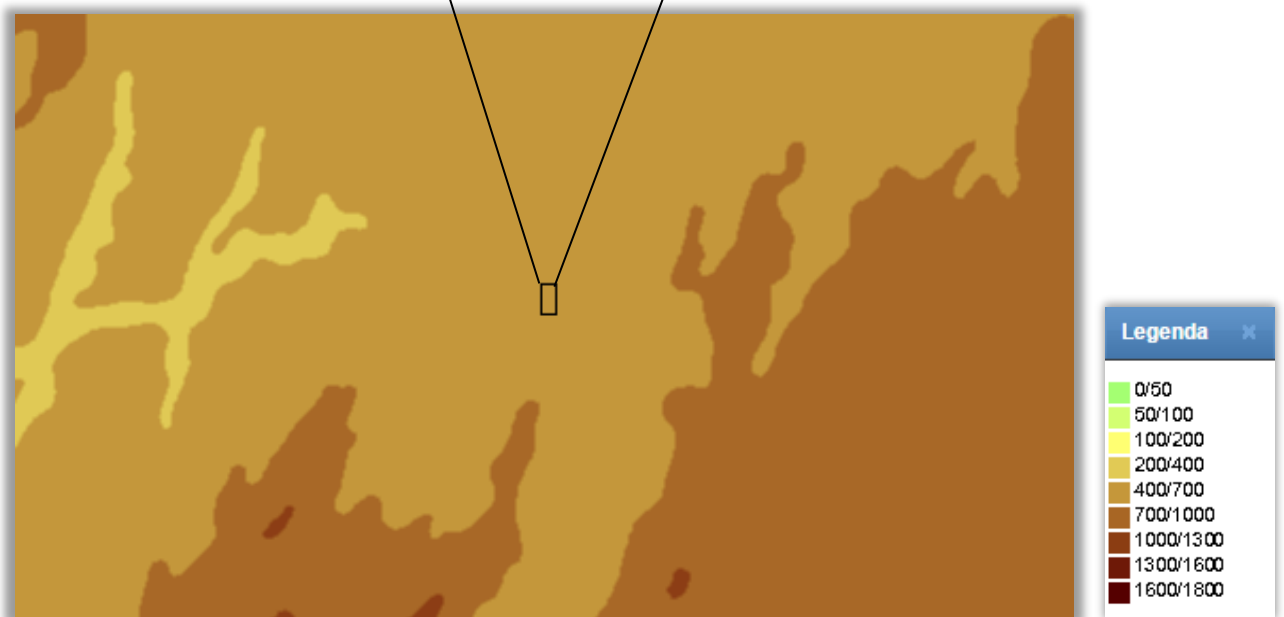


Figura A.26: Extrato do mapa hipsométrico (Classes) (Fonte: Atlas do Ambiente)

A altitude da Pedreira de Celorico da Beira está compreendida entre os 400 e 700 metros.

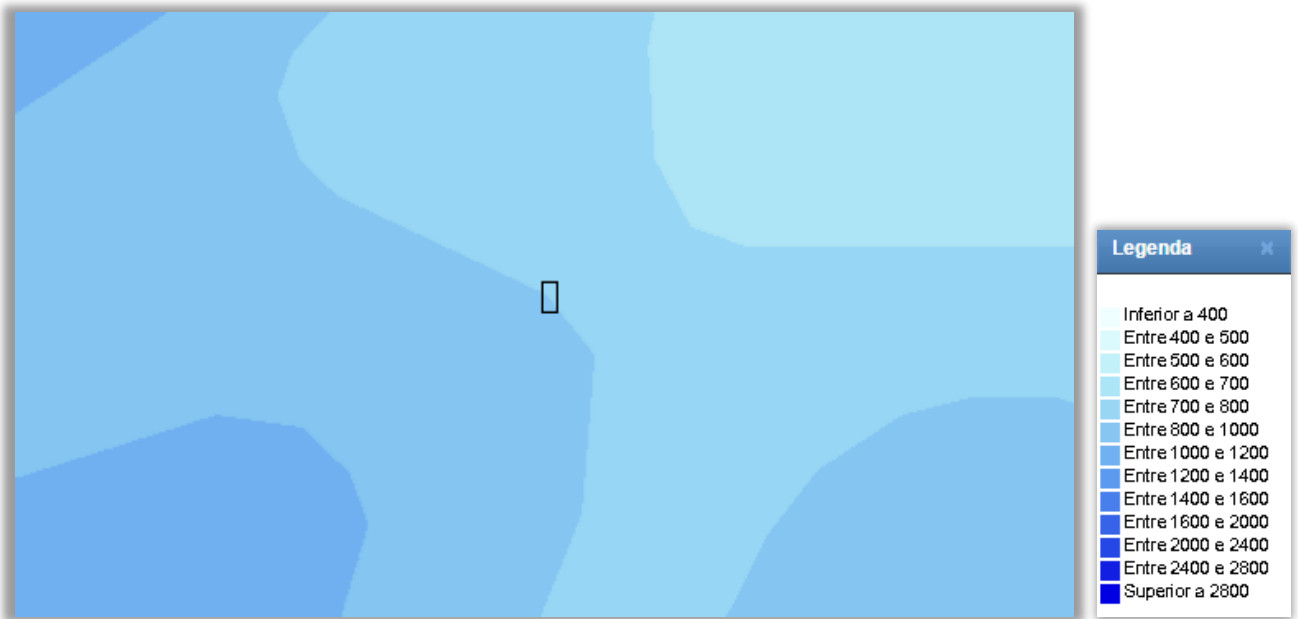


Figura A.27: Extrato do mapa da precipitação (Quantidade total) (Fonte: Atlas do Ambiente)

A precipitação correspondente à área de implementação da Pedreira de Celorico da Beira é de 700 e os 1.000 mm.

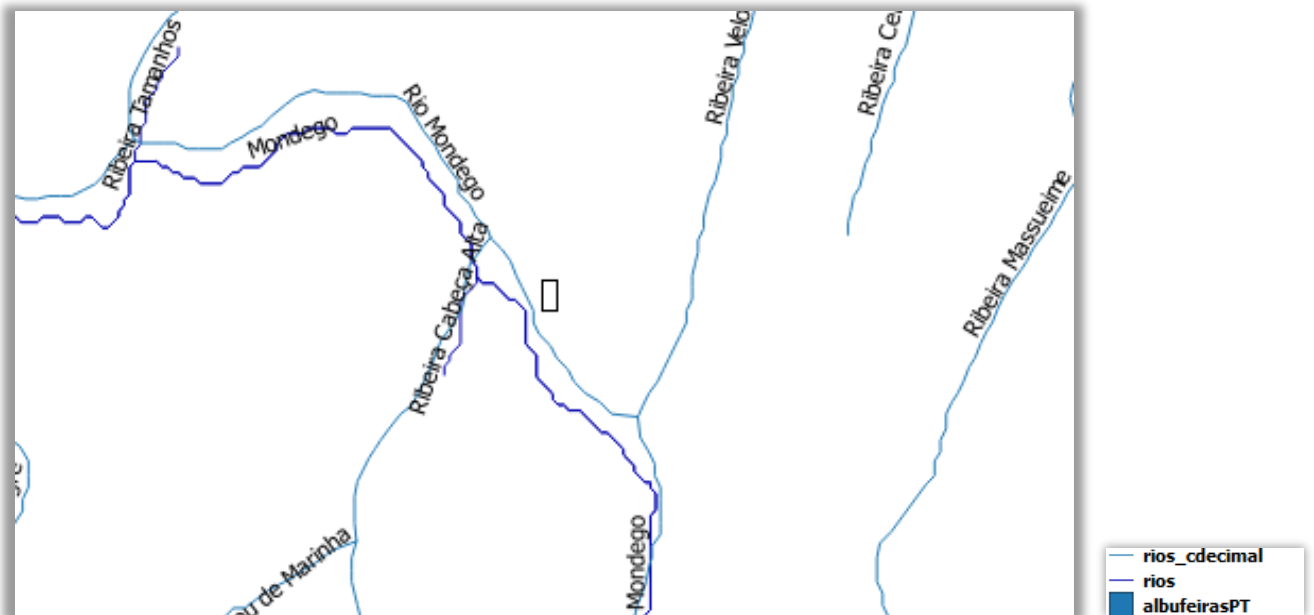


Figura A.28: Extrato do mapa da rede hidrográfica total e classificação decimal rede hidrográfica (Fonte: Atlas da Água)

O centro produtor de Celorico da Beira localiza-se a cerca de 300 metros do Rio Mondego.

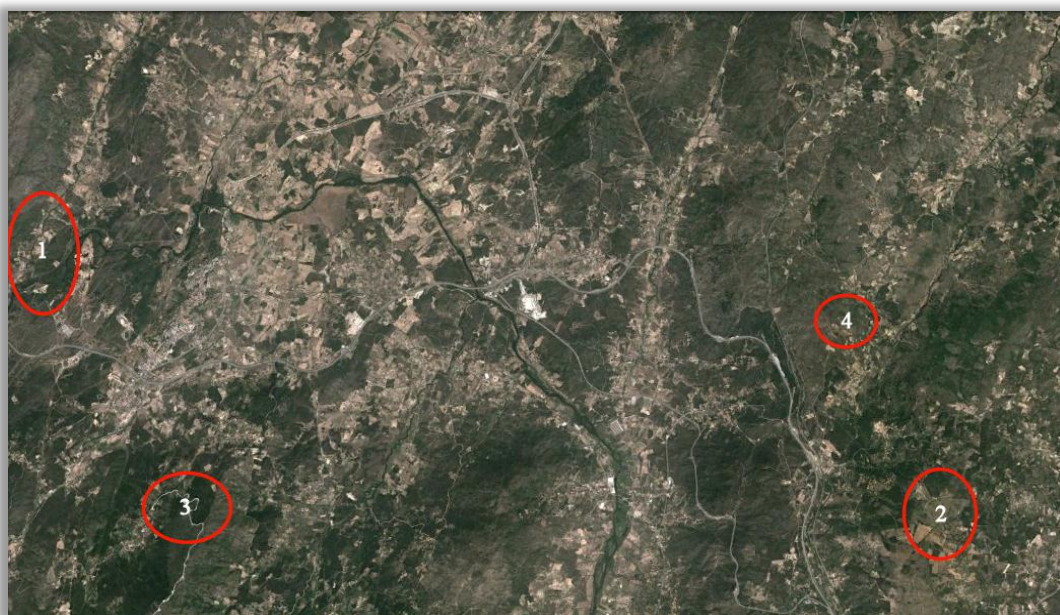


Figura A.29: Possíveis localizações do reservatório (Fonte: Google Earth)

Tabela A.13: Dados dos pontos para localização do reservatório

Pontos	Altitude (m)	Δh (m)	Distância à pedreira (km)	Coordenadas	Tipo de reservatório
1	380	90	9,3	40°38'45.39''N 7°25'17.80''W	Inferior
2	950	-480	8,1	40°36'05.06''N 7°14'02.50''W	Superior
3	812	-342	7,2	40°36'07.38''N 7°23'24.94''W	Superior
4	820	-350	5,4	40°38'02.74''N 7°15'08.70''W	Superior

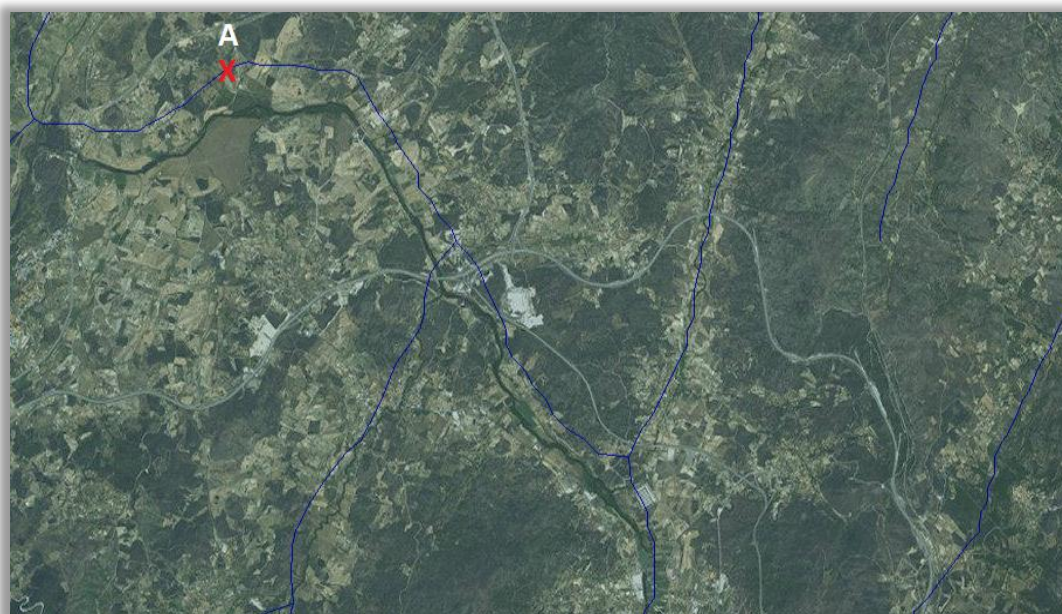


Figura A.30: Possíveis localizações de descarga nos cursos (Fonte: Atlas da Água)

Tabela A.14: Dados dos pontos de interseção dos cursos de água

Pontos	Altitude (m)	Δh (m)	Distância à pedreira (km)	Coordenadas
A	409	61	4,3	40°39'37.11''N 7°21'35.75''W

Tabela A.15: Dados pedreira

Nome	Pedreira Monte das Carrascas
Localização	Quinta das Tapadas – Apartado 9 6360- 909 Celorico da Beira
Atividade	Interrupção
Geologia	Granito
Área de escavação	83.467,39 m ²
Fosso	358.863,57 m ³

A.6. Cervães



Figura A.31: Pedreira de Cervães
(Fonte: Google Earth)

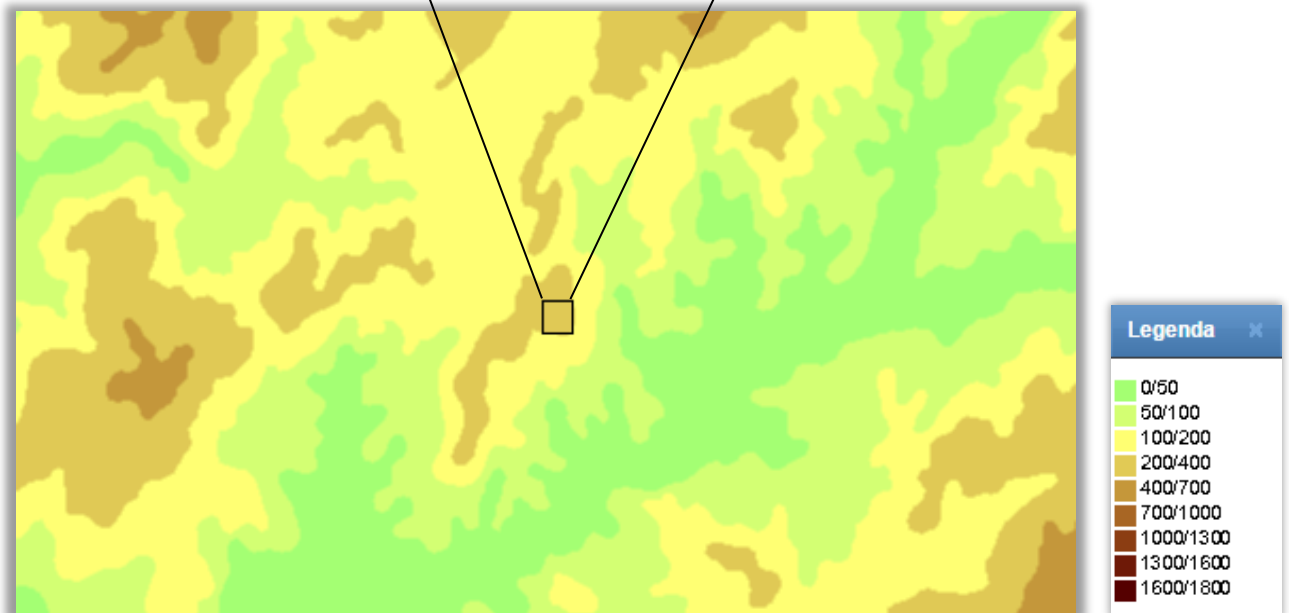


Figura A.32: Extrato do mapa hipsométrico (Classes) (Fonte: Atlas do Ambiente)

O centro Produtor de Cervães localiza-se entre os 200 e os 400 metros de altitude.

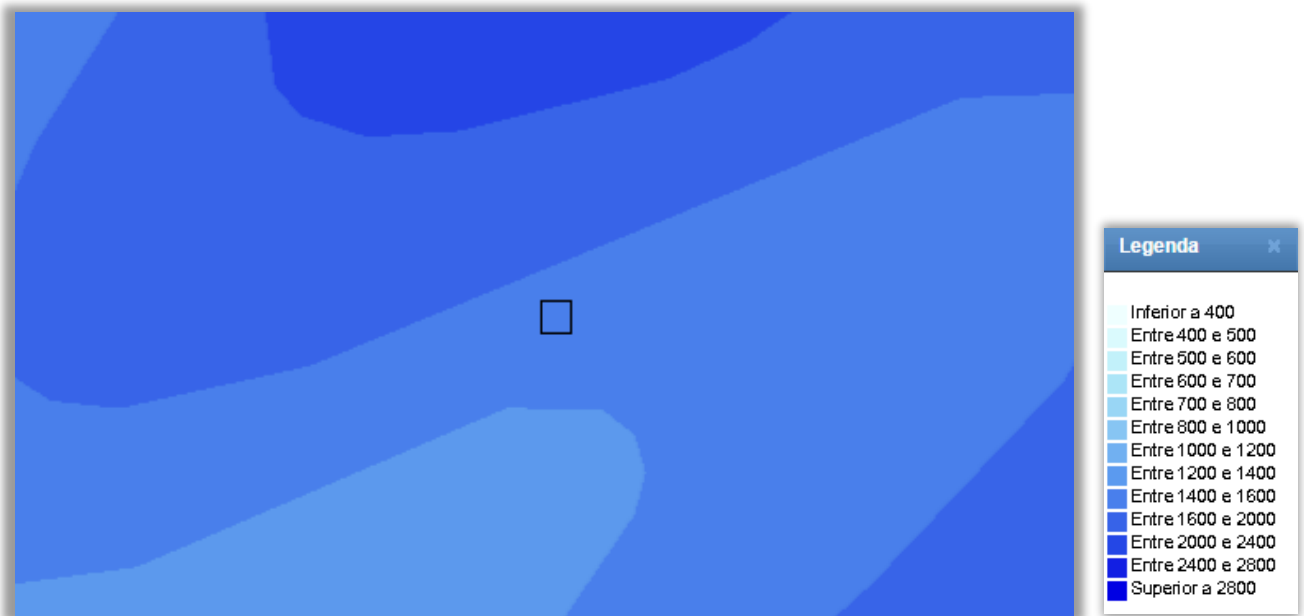


Figura A.33: Extrato do mapa da precipitação (Quantidade total) (Fonte: Atlas do Ambiente)

Relativamente à Precipitação a Pedreira de Cervães localiza-se numa zona onde esta ronda os 1.400 e os 1.600 mm, tal como se pode constatar a partir do mapa anterior.

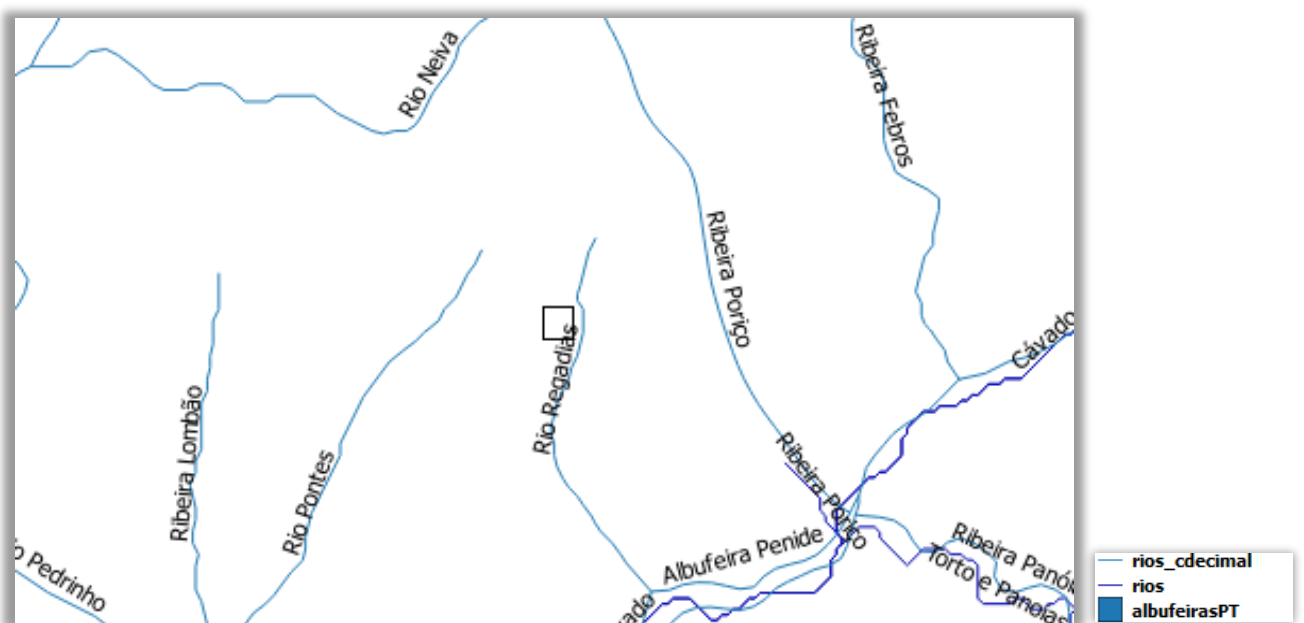


Figura A.34: Extrato do mapa da rede hidrográfica total e classificação decimal rede hidrográfica (Fonte: Atlas da Água)

O Centro Produtor de Cervães localiza-se a cerca de 200 metros do Rio Regadias, a cerca de 1,5 quilómetro do Rio Pontes e a 4,5 quilómetros do Rio Cávado.

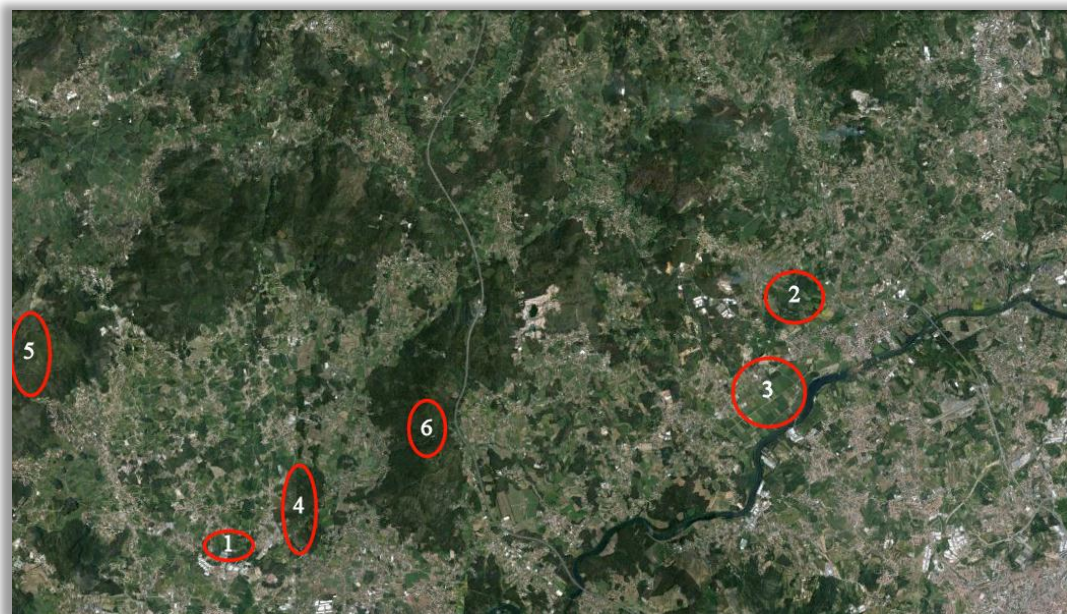


Figura A.35: Possíveis localizações do reservatório (Fonte: Google Earth)

Tabela A.16: Dados dos pontos para localização do reservatório

Pontos	Altitude (m)	Δh (m)	Distância à pedraira (km)	Coordenadas	Tipo de reservatório
1	30	160	7,1	41°33'43.33''N 8°36'29.01''W	Inferior
2	32	158	4,7	41°36'02.97''N 8°32'12.81''W	Inferior
3	21	169	4,5	41°35'10.40''N 8°29'05.32''W	Inferior
4	48	142	5,8	41°34'12.93''N 8°35'32.49''W	Inferior
5	353	-163	9,2	41°35'43.31''N 8°38'57.87''W	Superior
6	301	-111	2,4	41°36'02.97''N 8°32'12.81''W	Superior

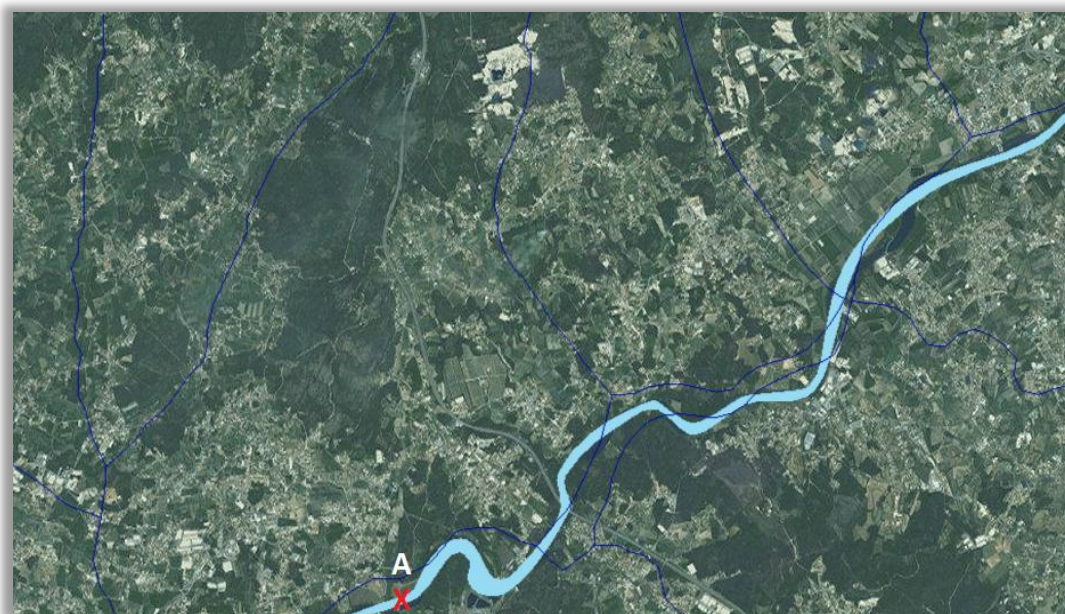


Figura A.36: Possíveis localizações de descarga nos cursos (Fonte: Atlas da Água)

Tabela A.17: Dados dos pontos de interseção dos cursos de água

Pontos	Altitude (m)	Δh (m)	Distância à pedra (km)	Coordenadas
A	10	180	6,1	41°32'55.71''N 8°32'58.01''W

Tabela A.18: Dados pedra

Nome	Pedreira Bouça do Menino
Localização	Lugar do Ilhó – Cervães – Apartado 102 4730- 102 Vila Verde
Atividade	Ativa
Geologia	Granito
Área de escavação	103.307,58 m ²
Fosso	738.710,25 m ³
Área final exploração	136.883,51 m ²
Volume final exploração	1.791.248,79 m ³

A.7. Famalicão



Figura A.37: Pedreira de Famalicão (Fonte: Google Earth)

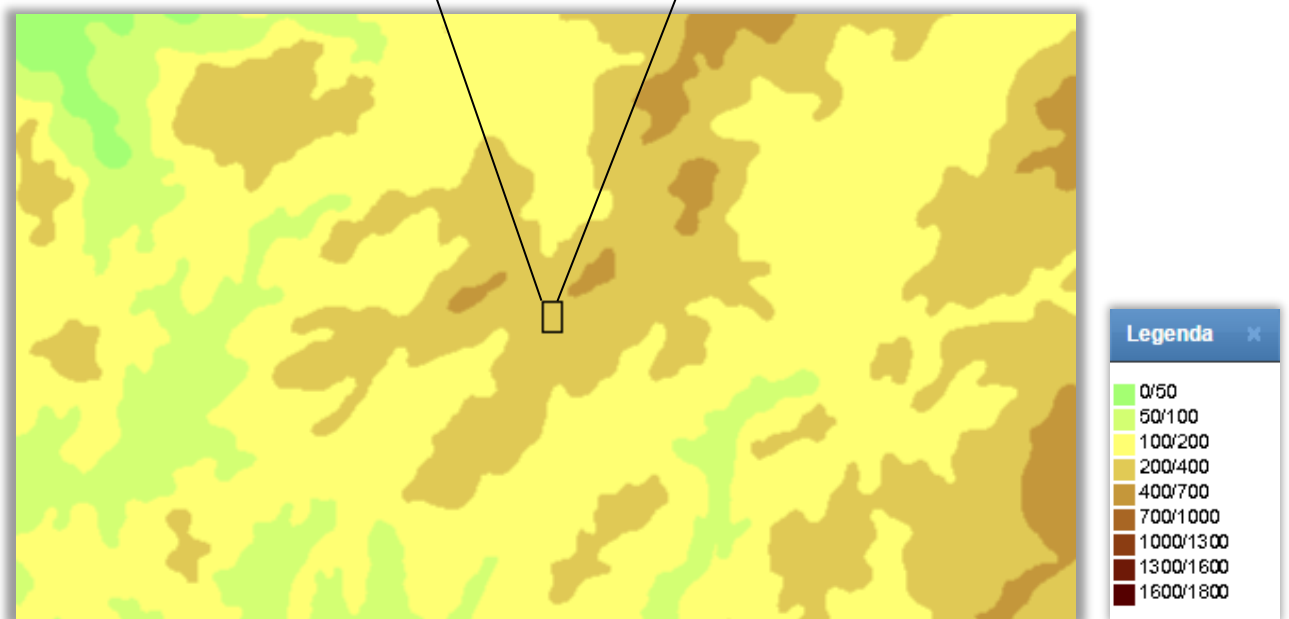


Figura A.38: Extrato do mapa hipsométrico (Classes) (Fonte: Atlas do Ambiente)

Através da análise do mapa anterior conclui-se que a Pedreira de Famalicão está localizada a uma altitude entre os 200 e os 400 metros.

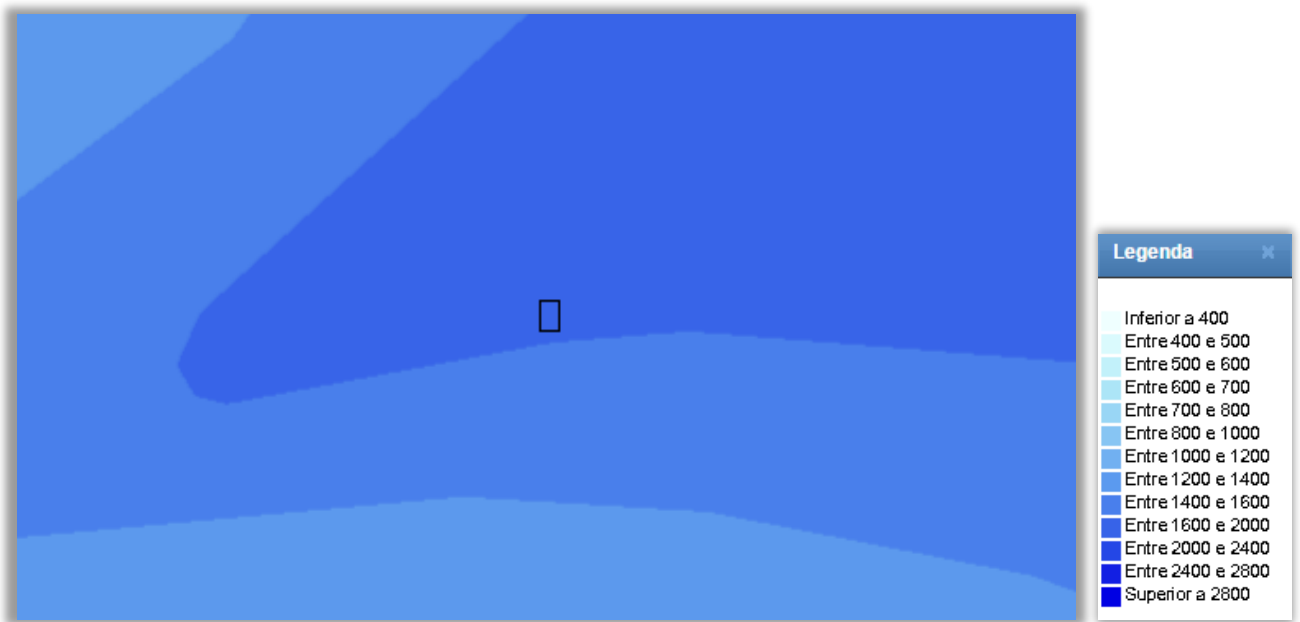


Figura A.39: Extrato do mapa da precipitação (Quantidade total) (Fonte: Atlas do Ambiente)

O mapa da Precipitação indica-nos que a zona de implementação da Pedreira de Famalicão possui uma precipitação que ronda os 1.600 e 2.000 mm.

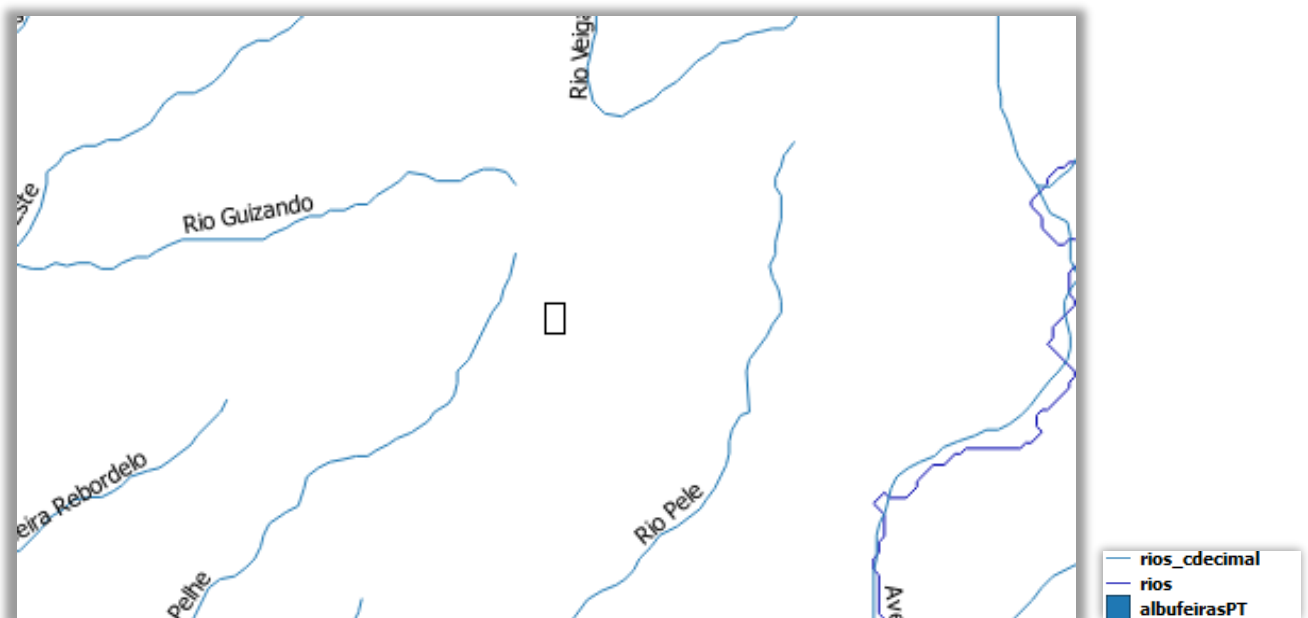


Figura A.40: Extrato do mapa da rede hidrográfica total e classificação decimal rede hidrográfica (Fonte: Atlas da Água)

O Centro Produtor de Vila Nova de Famalicão encontra-se a cerca de 800 metros do Rio Pelhe, a cerca de 2 quilómetros do Rio Guizando, a 2,8 quilómetros do Rio Veiga e a 3 quilómetros do Rio Pele.

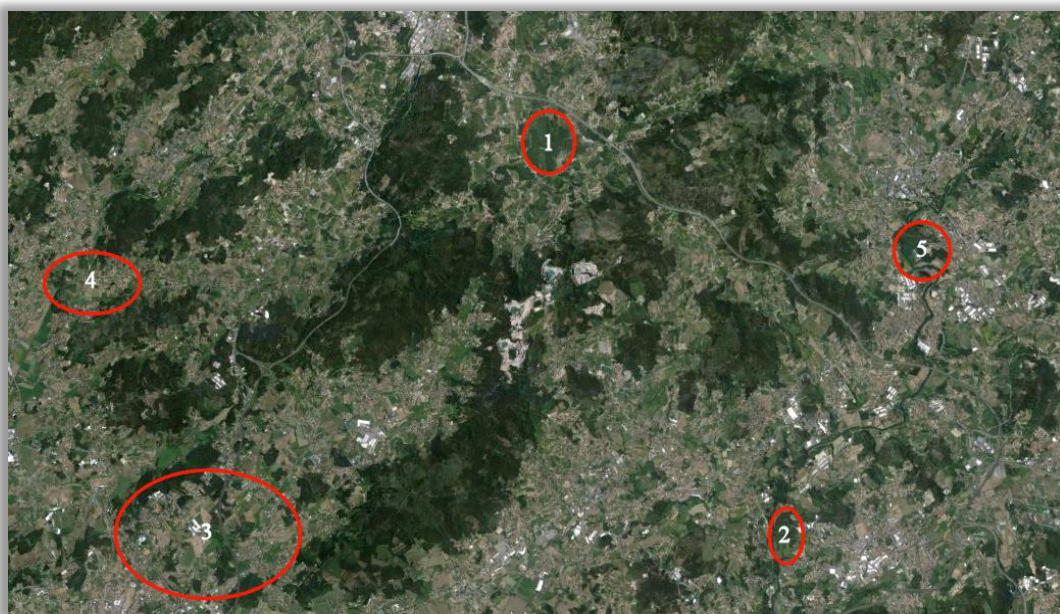


Figura A.41: Possíveis localizações do reservatório (Fonte: Google Earth)

Tabela A.19: Dados dos pontos para localização do reservatório

Pontos	Altitude (m)	Δh (m)	Distância à pedreira (km)	Coordenadas	Tipo de reservatório
1	160	170	3	41°29'31.27''N 8°25'41.15''W	Inferior
2	110	220	6,2	41°25'31.74''N 8°22'30.97''W	Inferior
3	120	210	6	41°27'21.21''N 8°25'18.51''W	Inferior
4	90	240	8,5	41°28'01.95''N 8°31'32.05''W	Inferior
5	110	220	7,1	41°28'20.83''N 8°20'54.04''W	Inferior

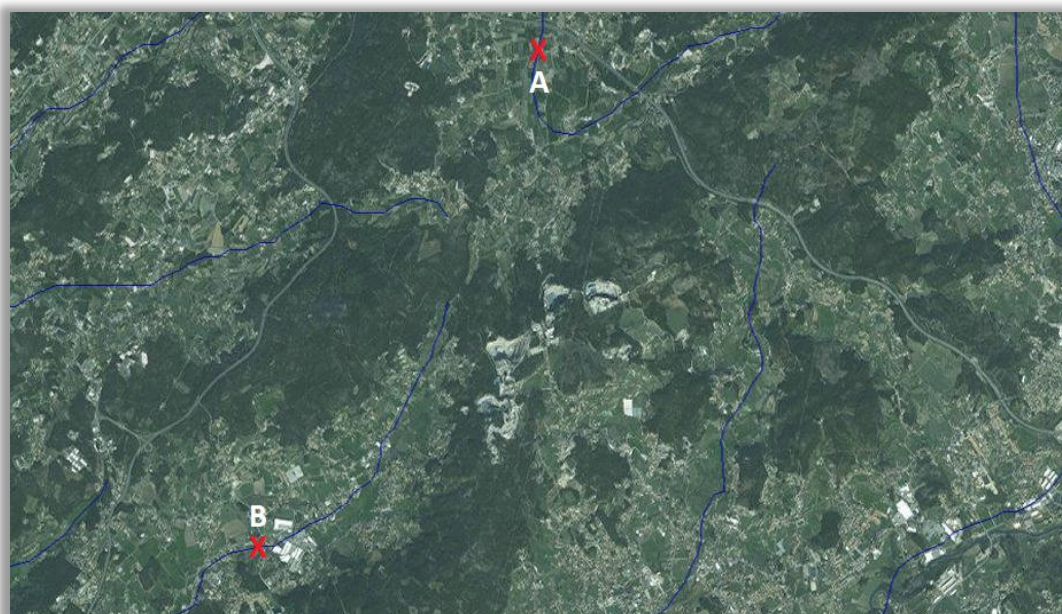


Figura A.42: Possíveis localizações de descarga nos cursos (Fonte: Atlas da Água)

Tabela A.20: Dados dos pontos de interseção dos cursos de água

Pontos	Altitude (m)	Δh (m)	Distância à pedreira (km)	Coordenadas
A	153	177	2,8	41°29'46.60''N 8°25'44.34''W
B	134	196	3,7	41°26'36.10''N 8°28'13.39''W

Tabela A.21: Dados pedreira

Nome	Pedreira Moinho de Vento
Localização	Moinho de Vento nº 4 – Portela 4770-370 V. N. Famalicão
Atividade	Ativa
Geologia	Granito
Área de escavação	113.618,56 m ²
Fosso	2.882.578,93 m ³
Área final exploração	193.271,18 m ²
Volume final exploração	13.219.500,75 m ³

A.8. Montemor-o-Novo



Figura A.43: Pedreira de Montemor-o-Novo
(Fonte: Google Earth)

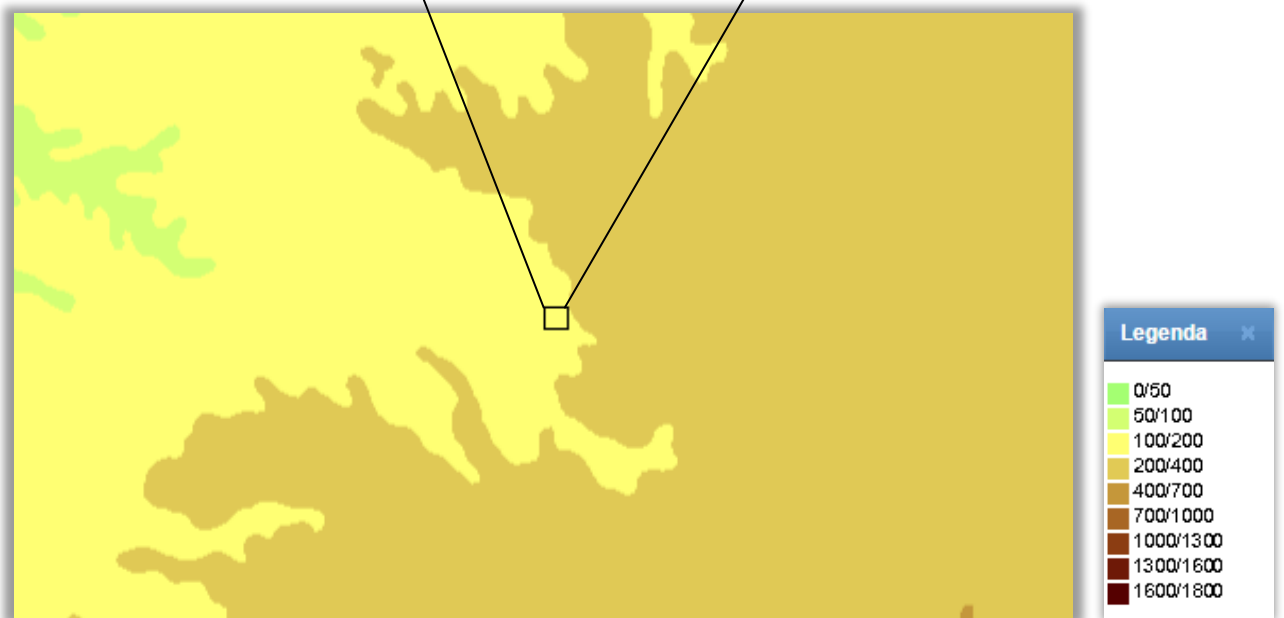


Figura A.44: Extrato do mapa hipsométrico (Classes) (Fonte: Atlas do Ambiente)

A Pedreira de Montemor-o-Novo está inserida, consoante o mapa anterior, a uma altitude entre os 100 e os 200 metros.

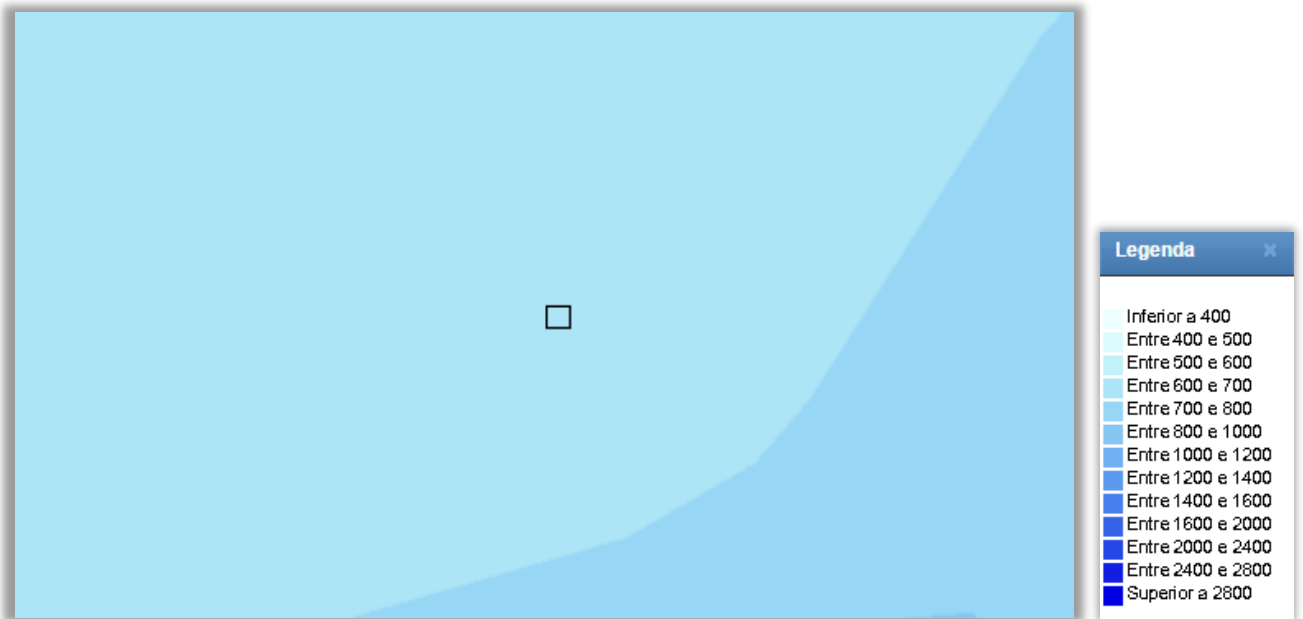


Figura A.45: Extrato do mapa da precipitação (Quantidade total) (Fonte: Atlas do Ambiente)

A precipitação na área da Pedreira de Montemor-o-Novo ronda os 600 a 700 mm, tal como se verifica na figura anterior.

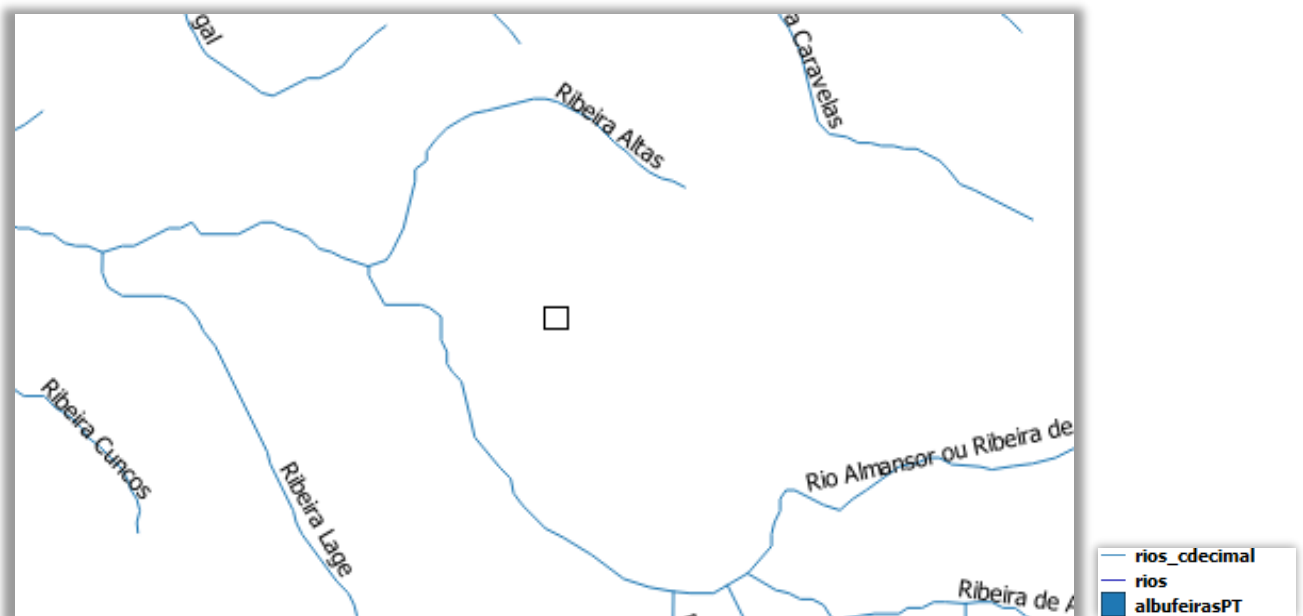


Figura A.46: Extrato do mapa da rede hidrográfica total e classificação decimal rede hidrográfica (Fonte: Atlas da Água)

O Centro Produtor de Montemor-O-Novo está localizado a cerca de 1,5 quilómetros do Rio Almansor e a 2,4 quilómetros da Ribeira Atlas.

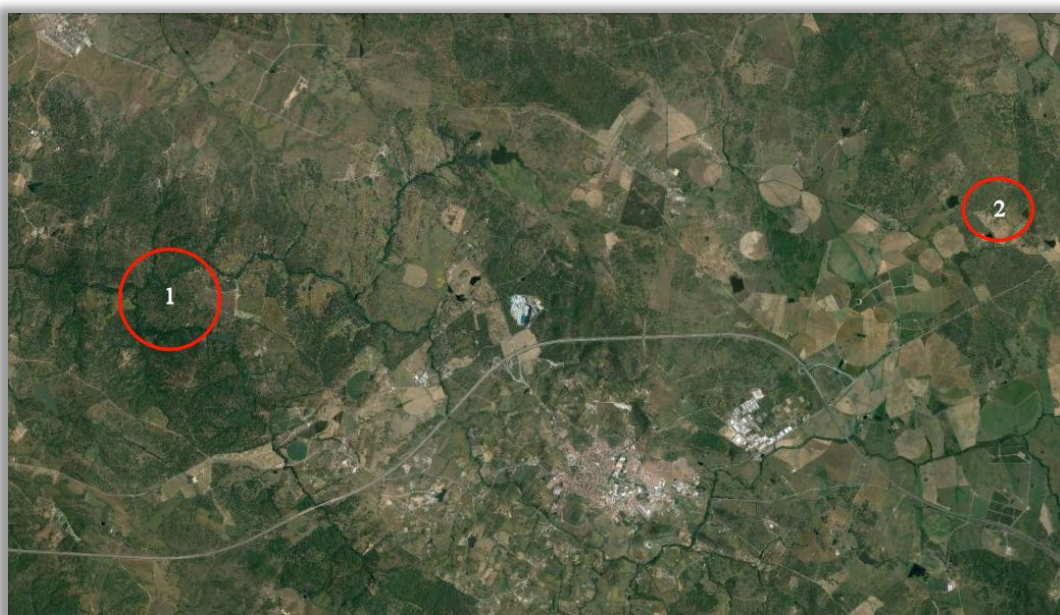


Figura A.47: Possíveis localizações do reservatório (Fonte: Google Earth)

Tabela A.22: Dados dos pontos para localização do reservatório

Pontos	Altitude (m)	Δh (m)	Distância à pedreira (km)	Coordenadas	Tipo de reservatório
1	130	50	6	38°40'30.56''N 8°17'56.55''W	Inferior
2	291	-111	9	38°41'21.72''N 8°08'09.94''W	Superior

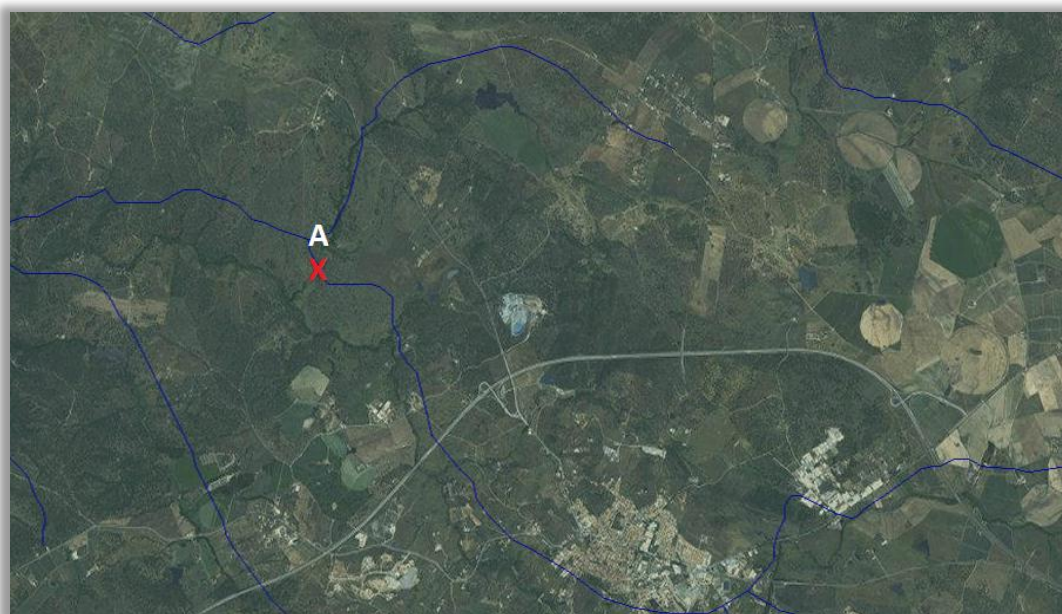


Figura A.48: Possíveis localizações de descarga nos cursos (Fonte: Atlas da Água)

Tabela A.23: Dados dos pontos de interseção dos cursos de água

Pontos	Altitude (m)	Δh (m)	Distância à pedreira (km)	Coordenadas
A	143	37	2,5	38°40'49.44''N 8°15'38.13''W

Tabela A.24: Dados pedreira

Nome	Herdade de Benafessim
Localização	Herdade de Benafessim – Apart. 172 7054-999 Montemor-o-Novo
Atividade	Ativa
Geologia	Granodiorito
Área de escavação	83.742,25 m ²
Fosso	2.968.860,36 m ³
Área final exploração	146.066,41 m ²
Volume final exploração	3.879.956,40 m ³

A.9. Ourique



Figura A.49: Pedreira de Ourique
(Fonte: Google Earth)

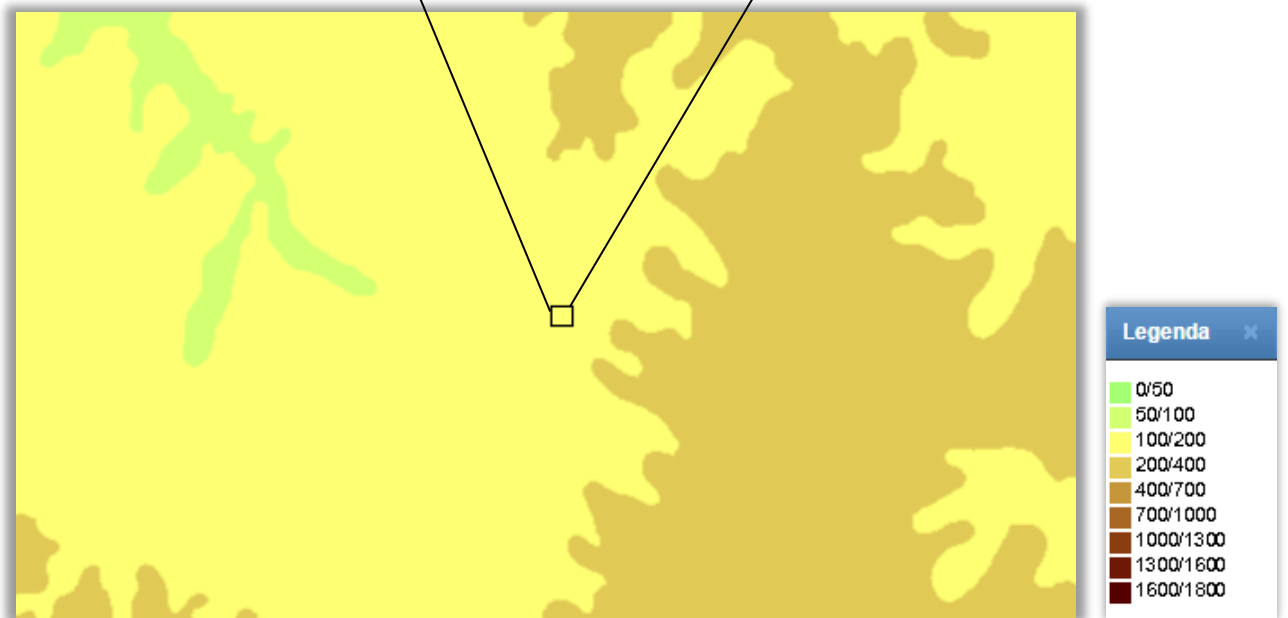


Figura A.50: Extrato do mapa hipsométrico (Classes) (Fonte: Atlas do Ambiente)

Tal como o caso da Pedreira anterior, esta Pedreira também se insere em altitudes entre os 100 e os 200 metros.

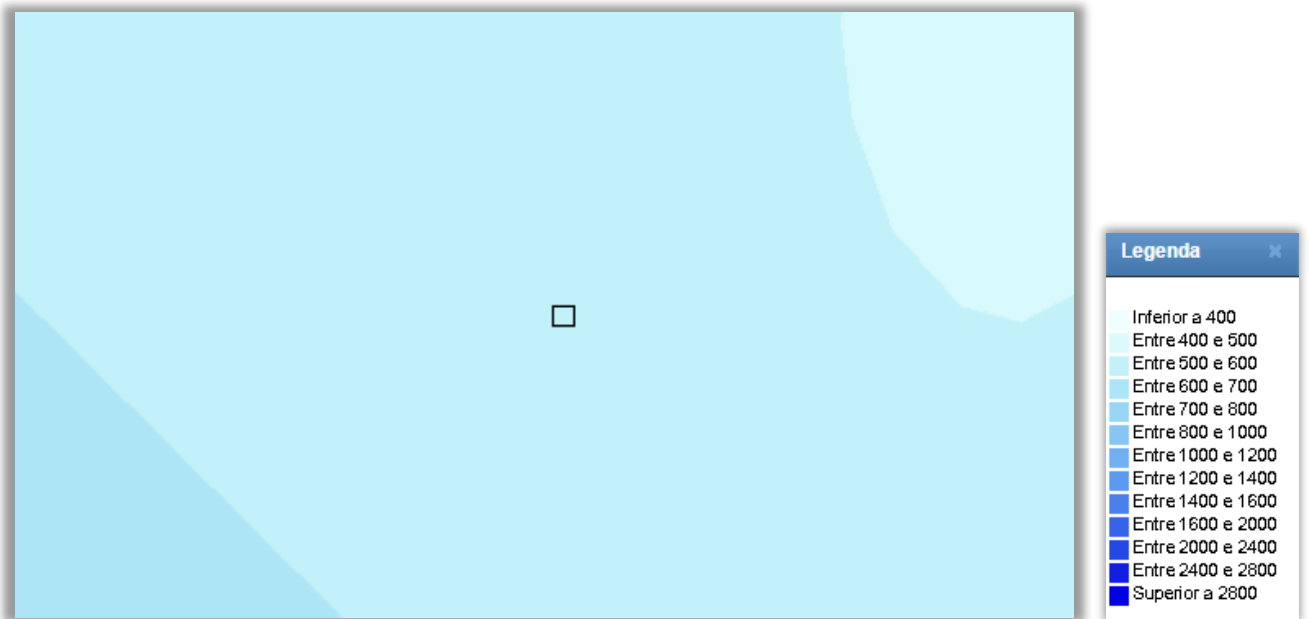


Figura A.51: Extrato do mapa da precipitação (Quantidade total) (Fonte: Atlas do Ambiente)

A Precipitação observada no mapa anterior ronda os 500 a 600 mm.

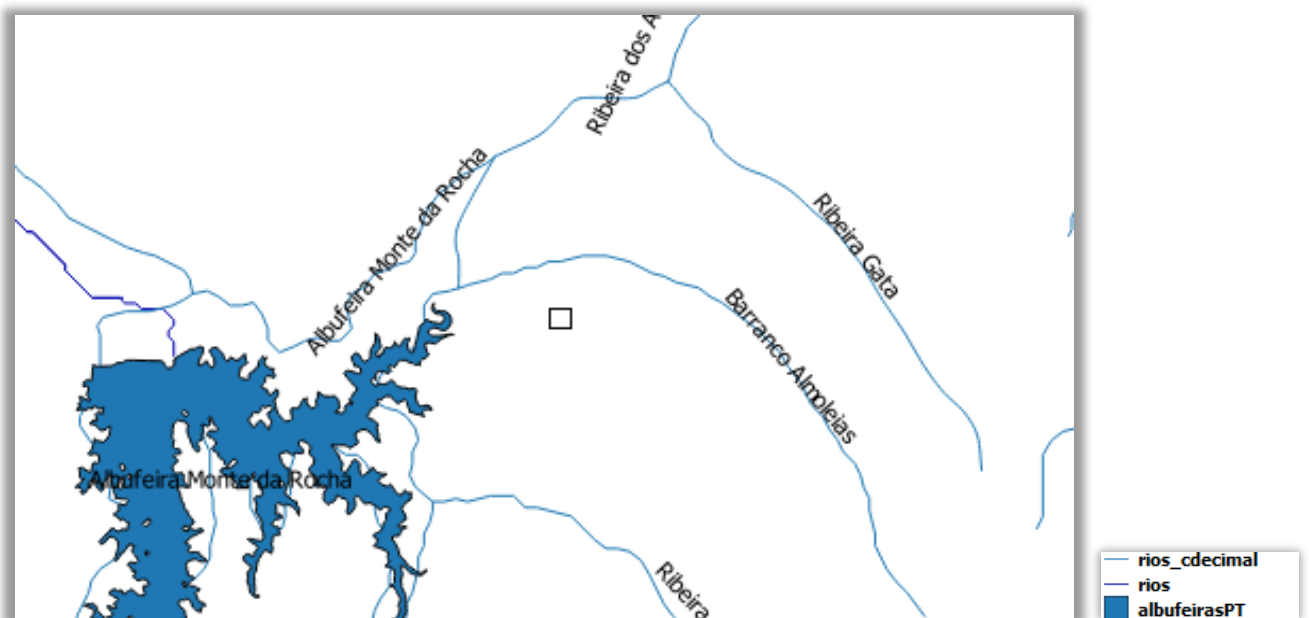


Figura A.52: Extrato do mapa da rede hidrográfica total e classificação decimal rede hidrográfica (Fonte: Atlas da Água)

O Centro Produtor de Ourique localiza-se a cerca de 1,5 quilómetros da Albufeira Monte da Rocha e a cerca de 600 metros do Barranco Almoleias.

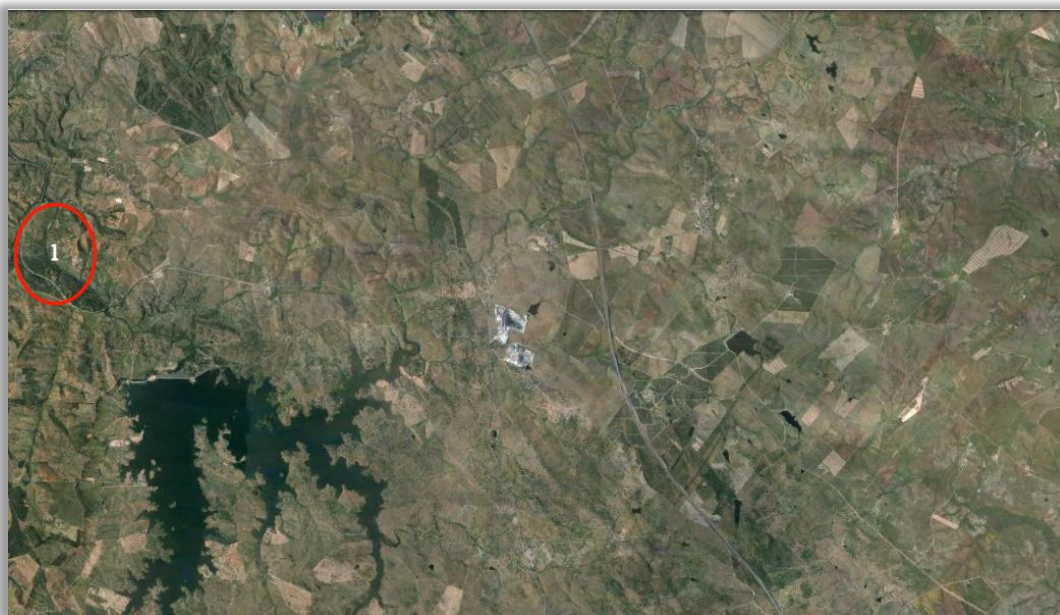


Figura A.53: Possíveis localizações do reservatório (Fonte: Google Earth)

Tabela A.25: Dados dos pontos para localização do reservatório

Pontos	Altitude (m)	Δh (m)	Distância à pedreira (km)	Coordenadas	Tipo de reservatório
1	110	70	8,5	37°44'48.52"N 8°19'04.87"W	Inferior

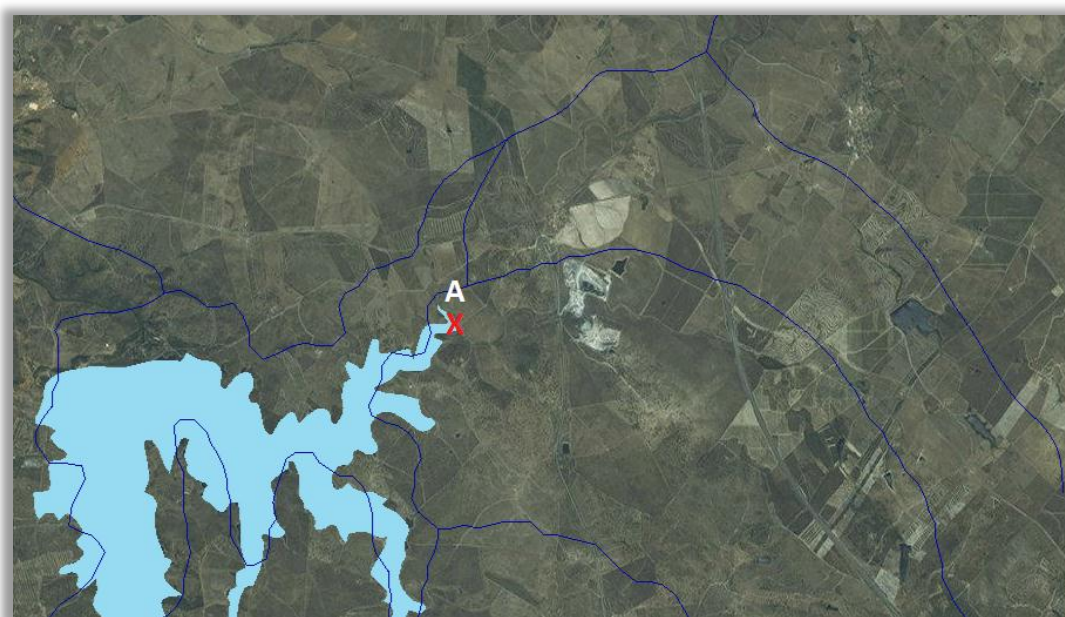


Figura A.54: Possíveis localizações de descarga nos cursos (Fonte: Atlas da Água)

Tabela A.26: Dados dos pontos de interseção dos cursos de água

Pontos	Altitude (m)	Δh (m)	Distância à pedreira (km)	Coordenadas
A	147	33	1,9	37°43'58.62''N 8°14'29.79''W

Tabela A.27: Dados pedreira

Nome	Herdade Reguendo de Matos
Localização	Herdade Reguendo de Matos 7670-909 Ourique
Atividade	Ativa
Geologia	Metavulcanito
Área de escavação	34.453,46 m ²
Fosso	216.301,20 m ³
Área final exploração	175.067,00 m ²
Volume final exploração	5.973.315,99 m ³

A.10. Santo Tirso



Figura A.55: Pedreira de Santo Tirso (Fonte: Google Earth)

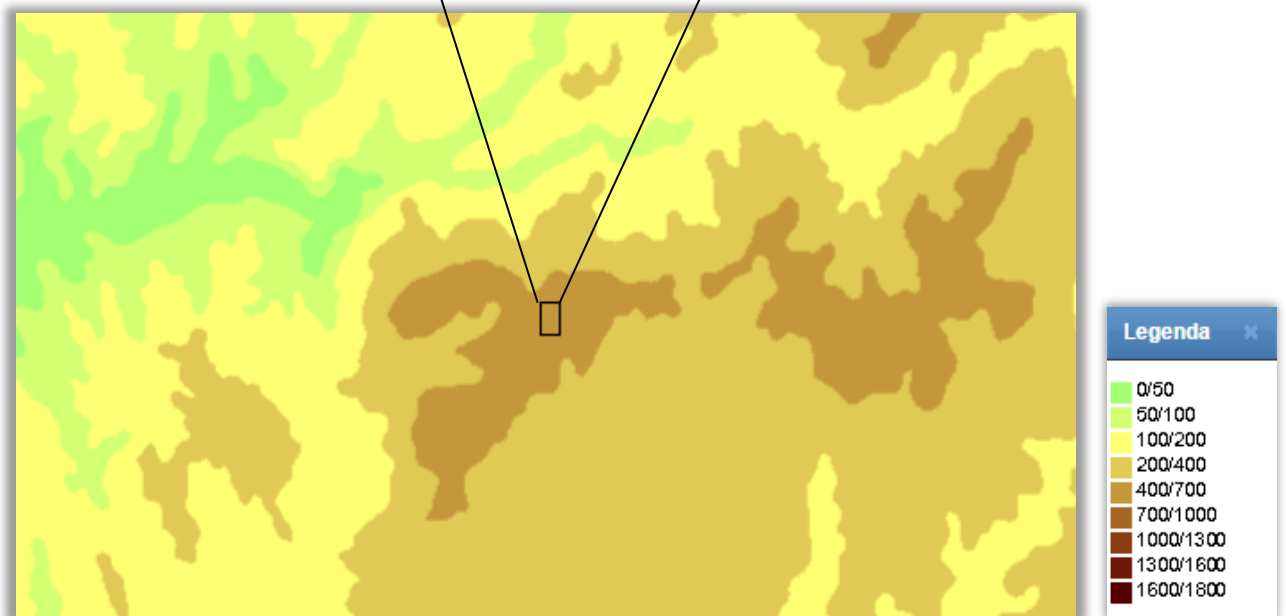


Figura A.56: Extrato do mapa hipsométrico (Classes) (Fonte: Atlas do Ambiente)

A Pedreira de Santo Tirso insere-se no escalão entre os 400 e os 700 metros de altitude.

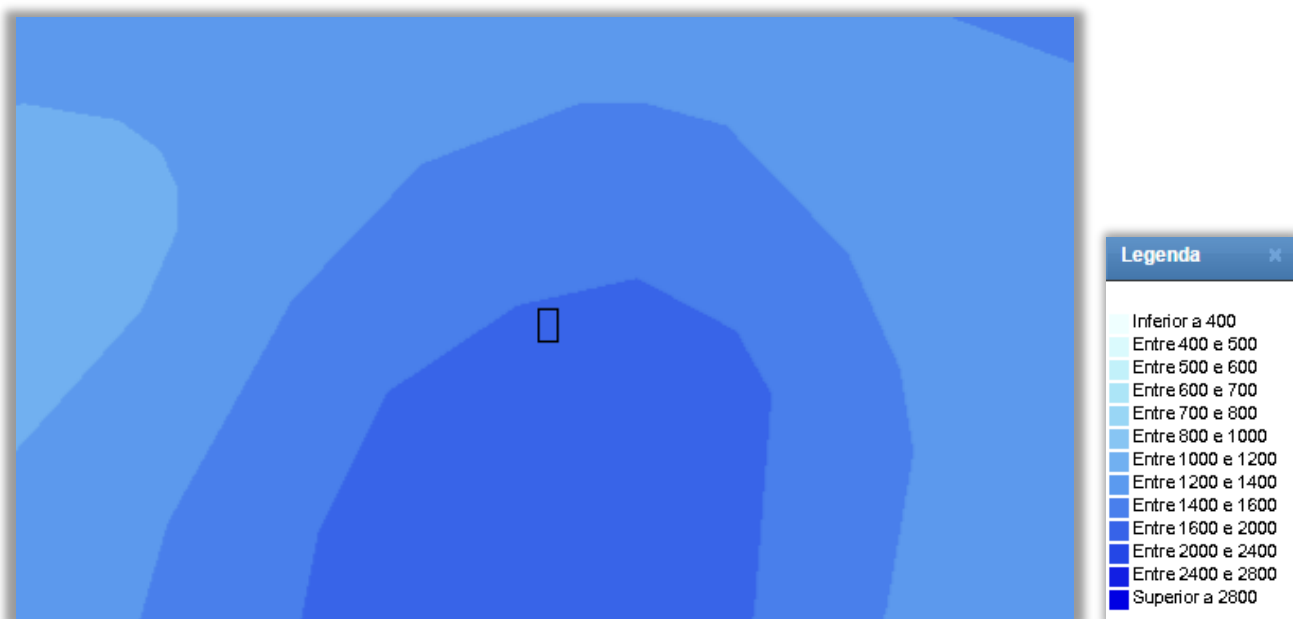


Figura A.57: Extrato do mapa da precipitação (Quantidade total) (Fonte: Atlas do Ambiente)

A Pedreira de Santo Tirso localiza-se numa área onde a precipitação ronda os 1.600 a 2.000 mm.

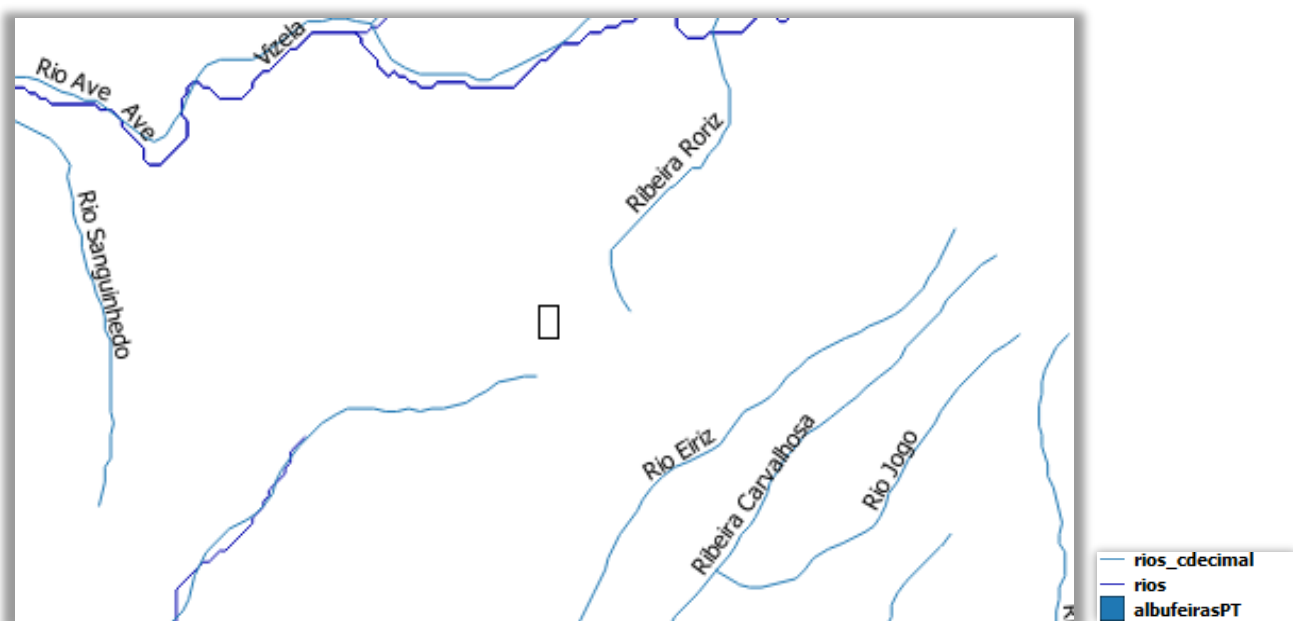


Figura A.58: Extrato do mapa da rede hidrográfica total e classificação decimal rede hidrográfica (Fonte: Atlas da Água)

O Centro Produtor de Santo Tirso localiza-se a cerca de 1 quilómetro do Rio Leça, a 1,2 quilómetros da Ribeira Roriz e 3,1 do Rio Vizela.



Figura A.59: Possíveis localizações do reservatório (Fonte: Google Earth)

Tabela A.28: Dados dos pontos para localização do reservatório

Pontos	Altitude (m)	Δh (m)	Distância à pedra (km)	Coordenadas	Tipo de reservatório
1	50	370	6	41°21'15.82''N 8°27'36.71''W	Inferior
2	45	375	9,6	41°22'03.45''N 8°29'50.44''W	Inferior
3	134	286	3	41°21'00.73''N 8°24'27.90''W	Inferior
4	54	366	9	41°22'22.72''N 8°28'53.32''W	Inferior
5	77	343	6,1	41°21'43.11''N 8°26'50.24''W	Inferior
6	148	272	6,7	41°17'36.17''N 8°27'48.00''W	Inferior
7	150	270	3,6	41°21'03.65''N 8°22'25.75''W	Inferior
8	112	308	4,9	41°21'24.02''N 8°21'29.58''W	Inferior

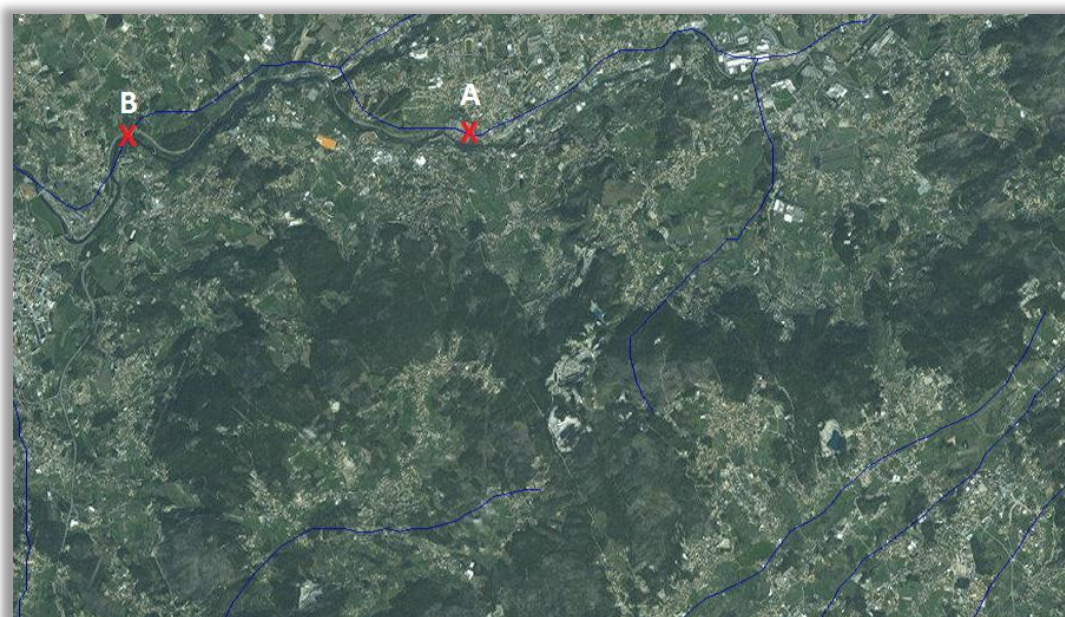


Figura A.60: Possíveis localizações de descarga nos cursos (Fonte: Atlas da Água)

Tabela A.29: Dados dos pontos de interseção dos cursos de água

Pontos	Altitude (m)	Δh (m)	Distância à pedreira (km)	Coordenadas
A	79	341	3,7	41°21'24.12''N 8°24'50.90''W
B	34	386	6,3	41°21'22.91''N 8°27'40.55''W

Tabela A.30: Dados pedreira

Nome	Pedreira da Coutada nº 2
Localização	Lugar de Cabanas – Monte Córdova Apart. 320 4825-264 Santo Tirso
Atividade	Ativa
Geologia	Granito
Área de escavação	45.620,34 m ²
Fosso	418.804,76 m ³
Observações	O fundo encontra-se coberto com água não sendo possível aferir a sua cota corretamente.

A.11. Tomar



Figura A.61: Pedreira de Tomar
(Fonte: Google Earth)

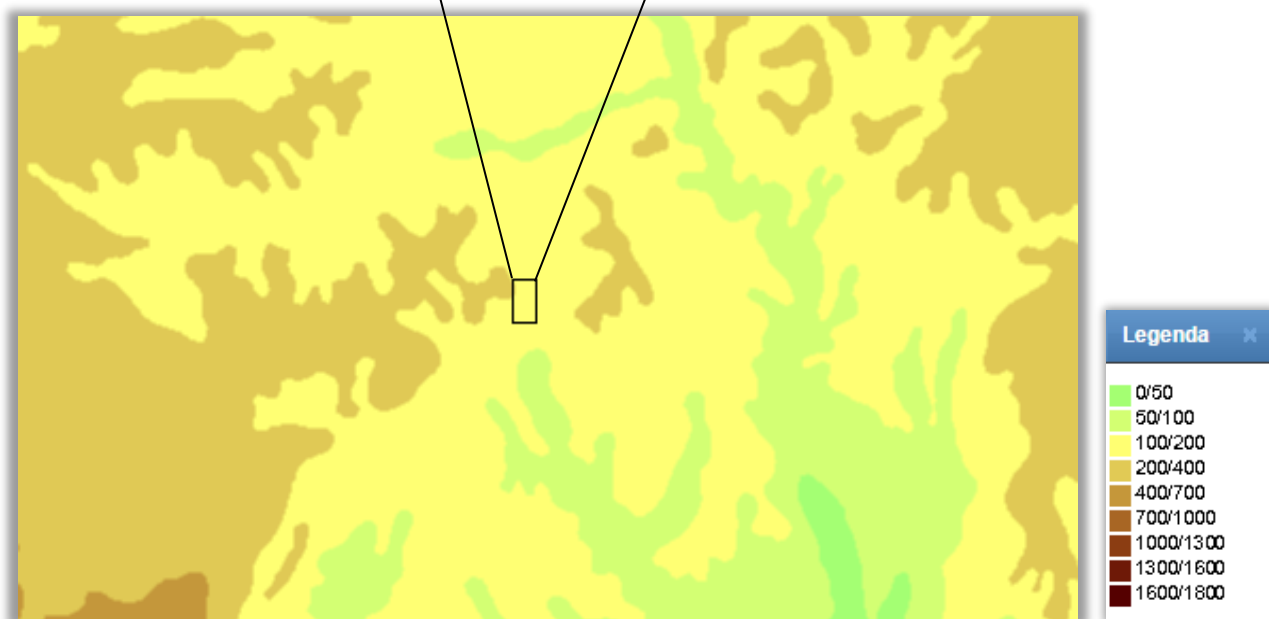


Figura A.62: Extrato do mapa hipsométrico (Classes) (Fonte: Atlas do Ambiente)

A Pedreira de Tomar encontra-se a uma altitude compreendida entre os 100 e os 200 metros.

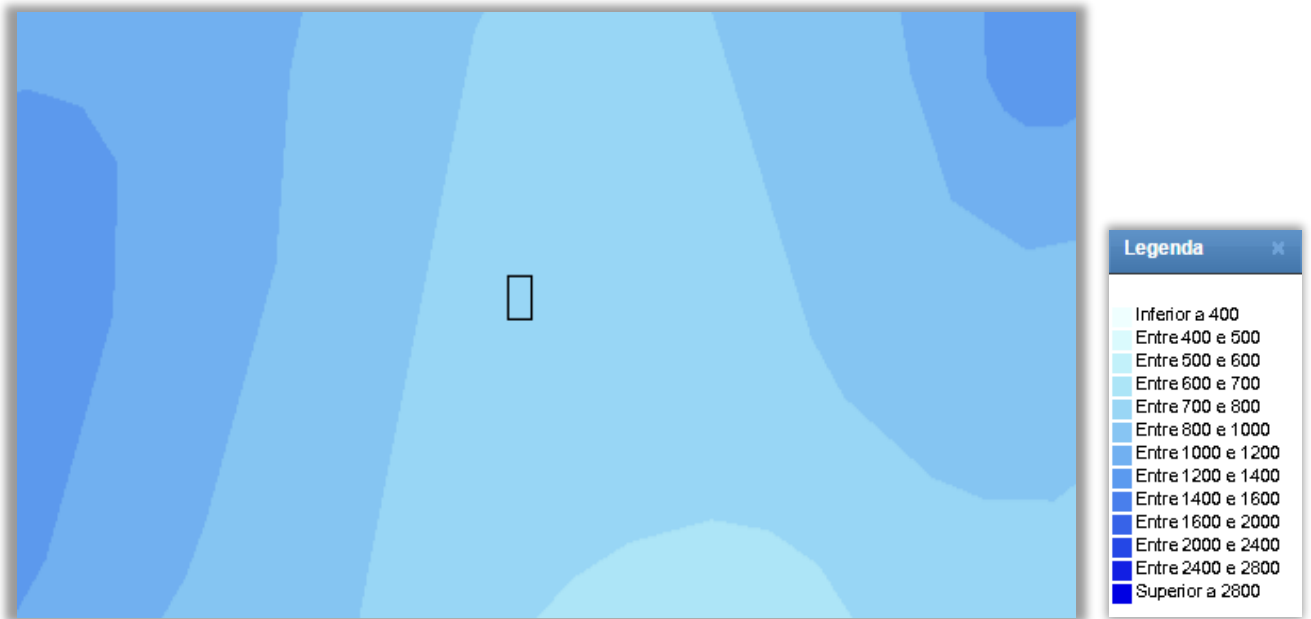


Figura A.63: Extrato do mapa da precipitação (Quantidade total) (Fonte: Atlas do Ambiente)

Na área envolvente à Pedreira de Tomar verifica-se que a precipitação ronda os 700 e 800 mm.

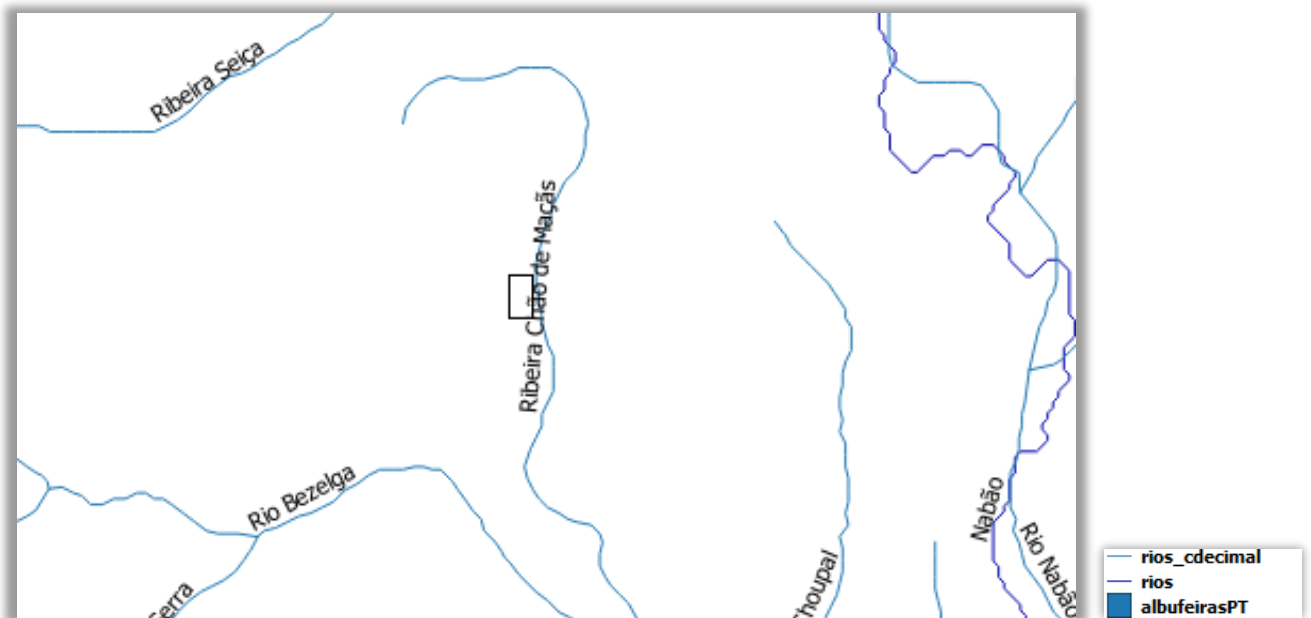


Figura A.64: Extrato do mapa da rede hidrográfica total e classificação decimal rede hidrográfica (Fonte: Atlas da Água)

O Centro Produtor de Tomar está localizado a aproximadamente 100 metros da Ribeira Chão de Maças e a cerca de 3 quilómetros do Rio Bezelga.

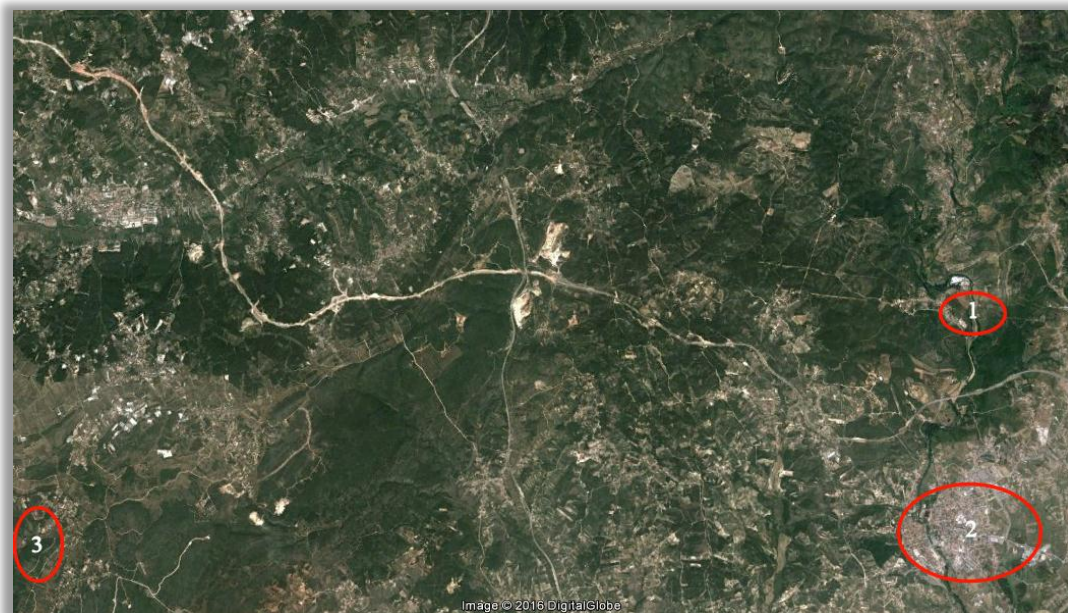


Figura A.65: Possíveis localizações do reservatório (Fonte: Google Earth)

Tabela A.31: Dados dos pontos para localização do reservatório

Pontos	Altitude (m)	Δh (m)	Distância à pedreira (km)	Coordenadas	Tipo de reservatório
1	80	60	7,9	39°38'23.67''N 8°24'07.20''W	Inferior
2	65	75	8,4	39°36'17.34''N 8°24'03.85''W	Inferior
3	253	-113	9,8	39°35'37.91''N 8°35'28.76''W	Superior

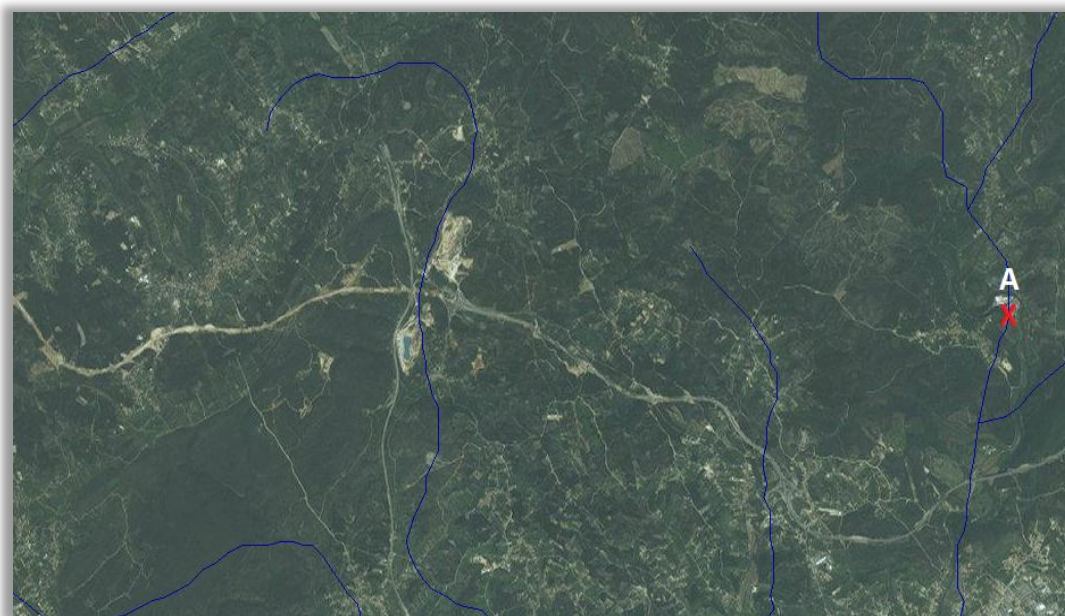


Figura A.66: Possíveis localizações de descarga nos cursos (Fonte: Atlas da Água)

Tabela A.32: Dados dos pontos de interseção dos cursos de água

Pontos	Altitude (m)	Δh (m)	Distância à pedreira (km)	Coordenadas
A	63	77	7,9	39°38'31.57''N 8°23'57.36''W

Tabela A.33: Dados pedreira

Nome	Pedreira Vale dos Ovos
Localização	Vale dos Ovos 2305-631 Sabacheira
Atividade	Interrupção
Geologia	Calcário
Área de escavação	102.229,74 m ²
Fosso	1.386.210,39 m ³

A.12. Tondela



Figura A.67: Pedreira de Tondela
(Fonte: Google Earth)



Figura A.68: Extrato do mapa hipsométrico (Classes) (Fonte: Atlas do Ambiente)

A Pedreira de Tondela localiza-se a uma altitude compreendida entre os 200 e os 700 metros, relativamente ao nível do mar.

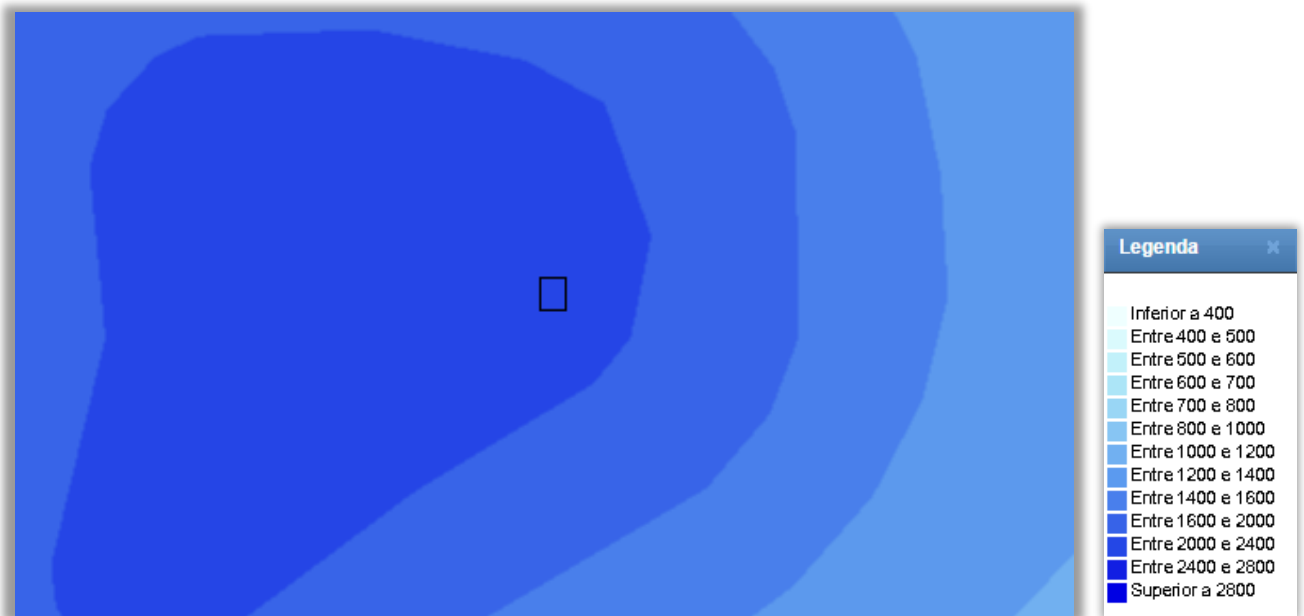


Figura A.69: Extrato do mapa da precipitação (Quantidade total) (Fonte: Atlas do Ambiente)

A precipitação na zona da Pedreira de Tondela ronda os 2.000 e os 2.400 mm, tal como é apresentado no mapa anterior.

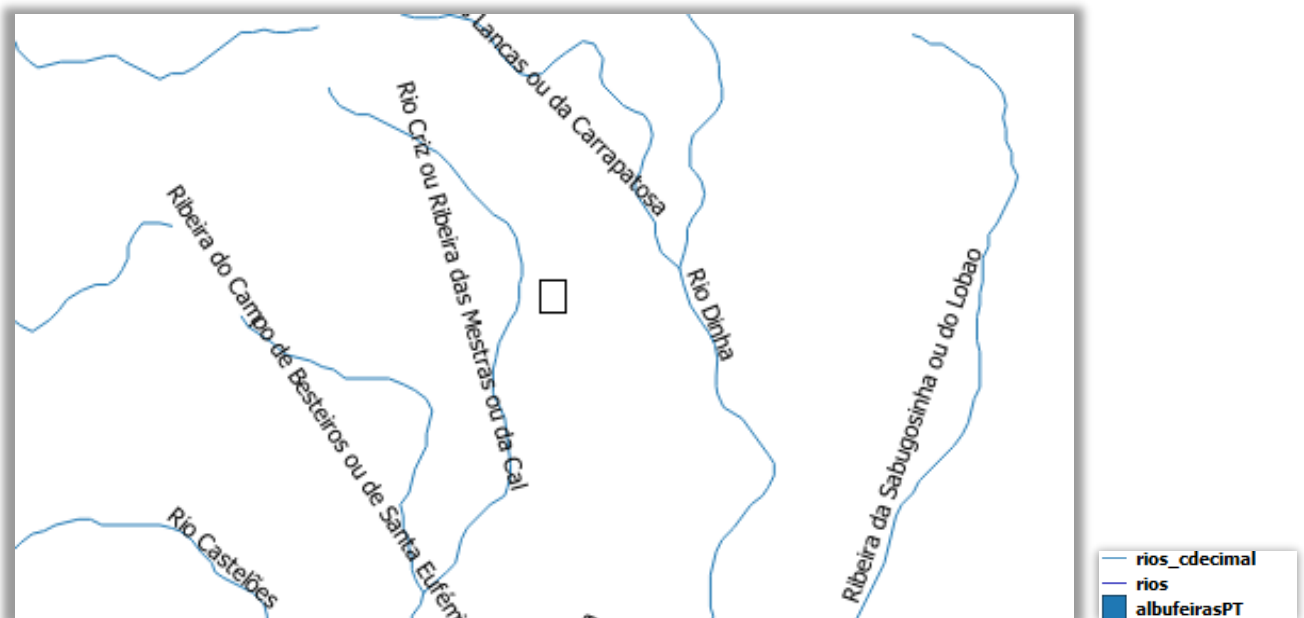


Figura A.70: Extrato do mapa da rede hidrográfica total e classificação decimal rede hidrográfica (Fonte: Atlas da Água)

O Centro Produtor de Tondela está localizado a cerca de 400 metros do Rio Criz, a 1,8 quilómetros da Ribeira das Lancas e a 2 quilómetros do Rio Dinha.

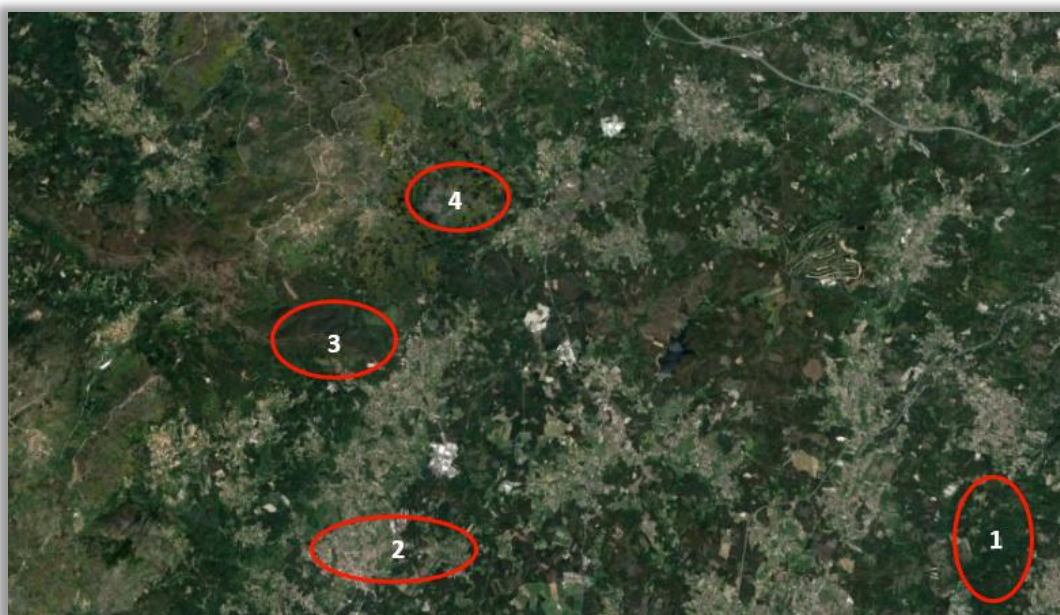


Figura A.71: Possíveis localizações do reservatório (Fonte: Google Earth)

Tabela A.34: Dados dos pontos para localização do reservatório

Pontos	Altitude (m)	Δh (m)	Distância à pedreira (km)	Coordenadas	Tipo de reservatório
1	256	94	9,2	40°33'33.43''N 7°59'55.73''W	Inferior
2	264	86	5,1	40°33'24.41''N 8°07'22.53''W	Inferior
3	650	-300	3,6	40°35'29.33''N 8°08'38.42''W	Superior
4	611	-261	2,5	40°36'49.70''N 8°07'11.63''W	Superior

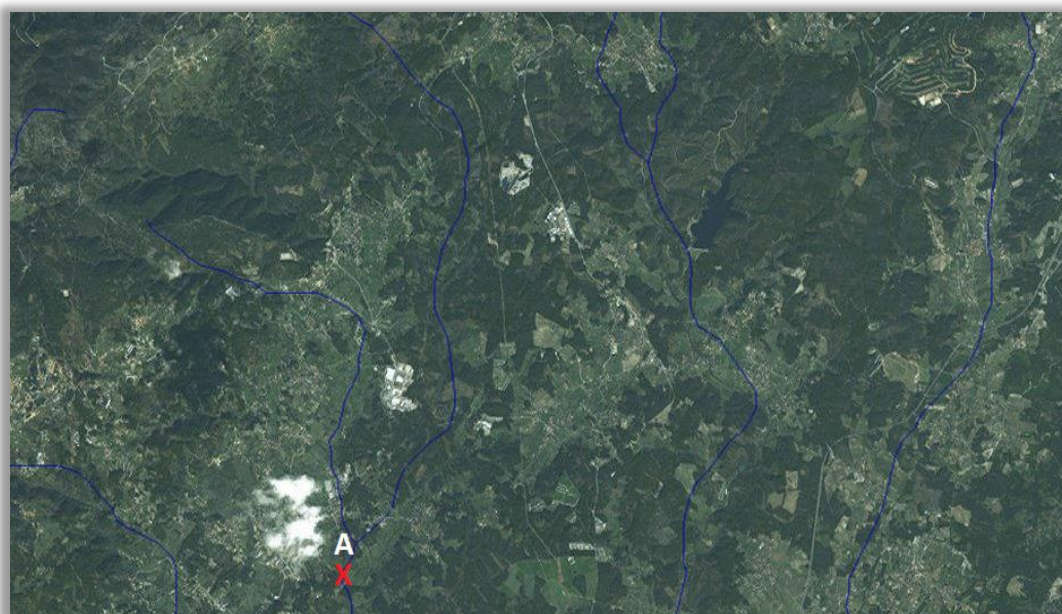


Figura A.72: Possíveis localizações de descarga nos cursos (Fonte: Atlas da Água)

Tabela A.35: Dados dos pontos de interseção dos cursos de água

Pontos	Altitude (m)	Δh (m)	Distância à pedreira (km)	Coordenadas
A	254	96	5,1	40°33'08.34''N 8°07'16.32''W

Tabela A.36: Dados pedreira

Nome	Pedreira Caramelo nº4
Localização	Apartado 148 3461-909 Tondela
Atividade	Ativa
Geologia	Granito
Área de escavação	Sem dados
Fosso	Sem dados
Área final exploração	132.886,71 m ²
Volume final exploração	10.321.105,74 m ³

A.13. Vila Flor (CAPSFIL)



Figura A.73: Pedreira de Vila Flor
(Fonte: Google Earth)

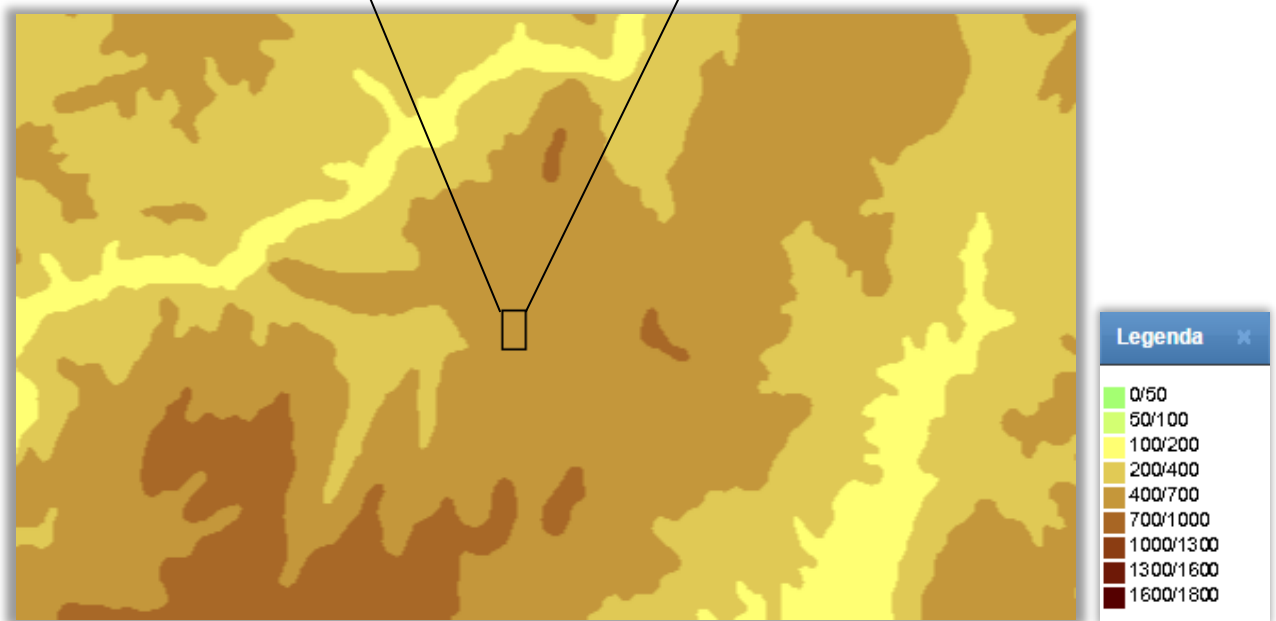


Figura A.74: Extrato do mapa hipsométrico (Classes) (Fonte: Atlas do Ambiente)

O Centro Produtor de Vila Flor está a uma altitude compreendida entre os 400 e 700 metros, tal como se confirma no mapa anterior.

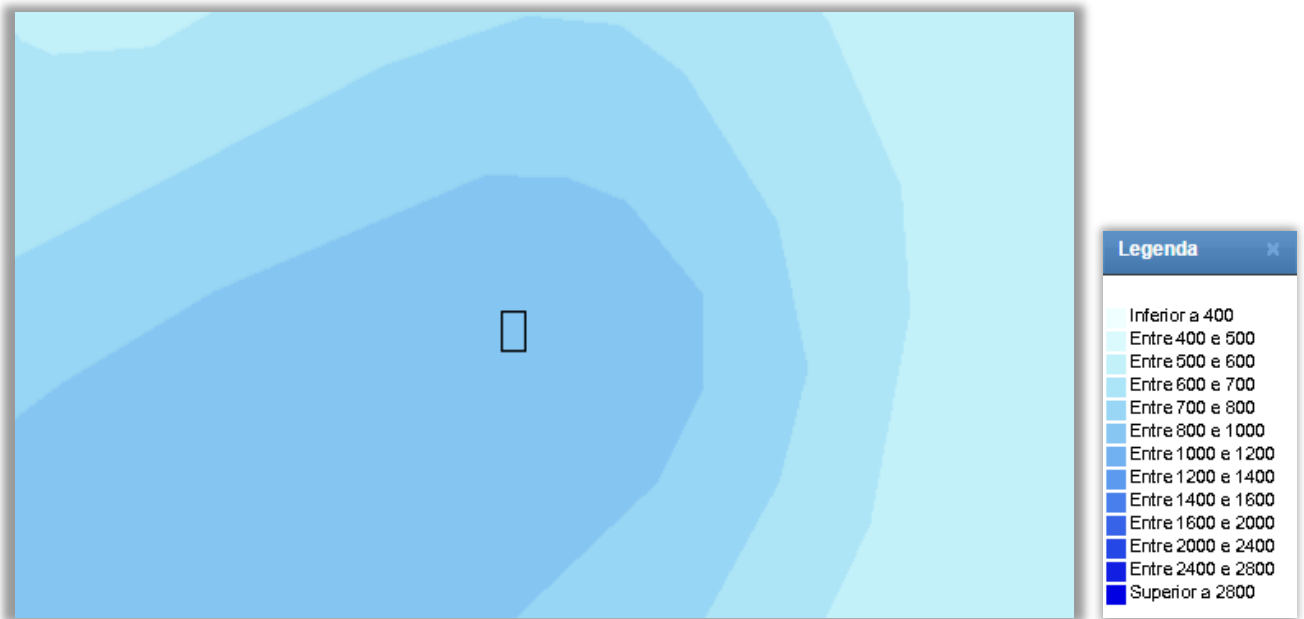


Figura A.75: Extrato do mapa da precipitação (Quantidade total) (Fonte: Atlas do Ambiente)

A Pedreira de Vila Flor está classificada numa escala de precipitação que ronda os 800 e os 1000 mm, com base no mapa anterior.

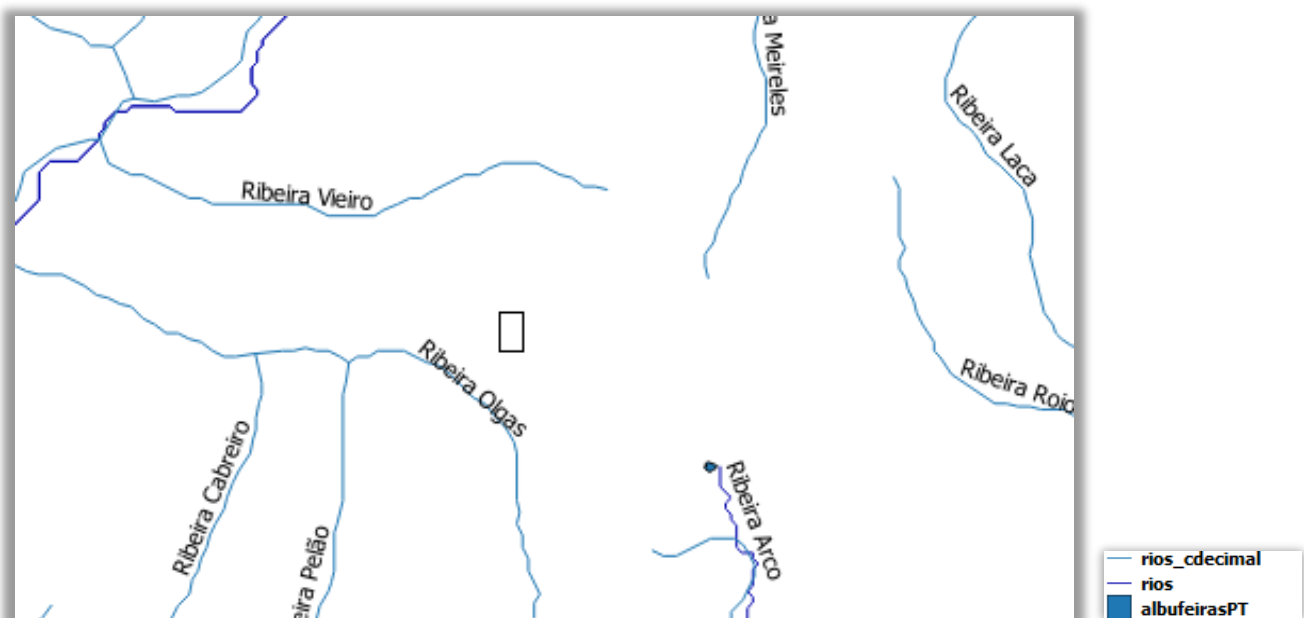


Figura A.76: Extrato do mapa da rede hidrográfica total e classificação decimal rede hidrográfica (Fonte: Atlas da Água)

A Pedreira de Vila Flor encontra-se a cerca de 1 quilómetro da Ribeira Olgas e a 1,9 da Ribeira Viveiro.

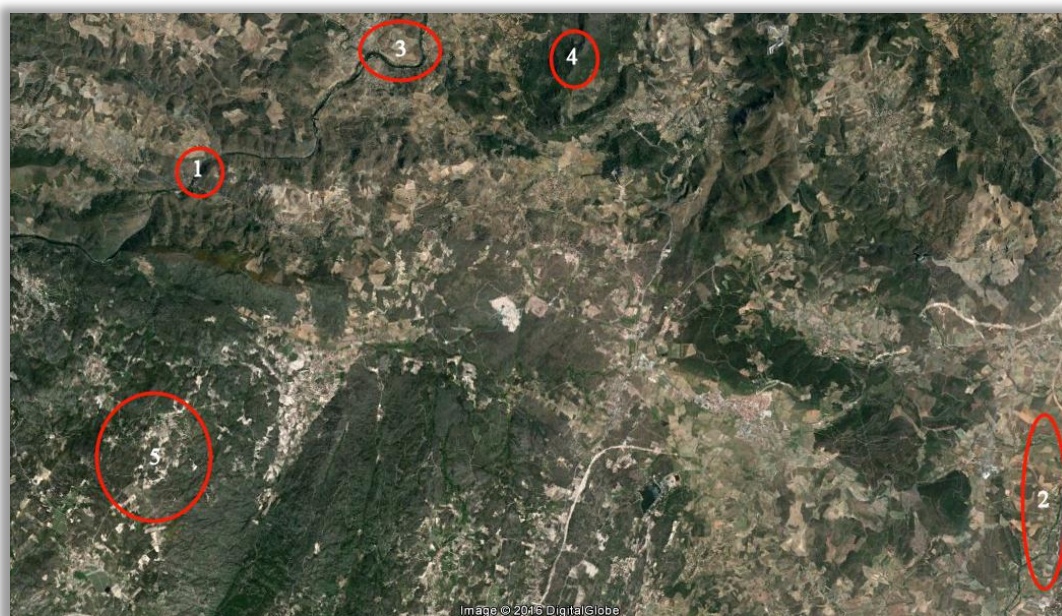


Figura A.77: Possíveis localizações do reservatório (Fonte: Google Earth)

Tabela A.37: Dados dos pontos para localização do reservatório

Pontos	Altitude (m)	Δh (m)	Distância à pedreira (km)	Coordenadas	Tipo de reservatório
1	182	368	6,2	41°20'51.24"N 7°16'41.17"W	Inferior
2	189	361	10	41°17'34.54"N 7°04'33.13"W	Inferior
3	248	302	5,6	41°22'00.17"N 7°13'39.09"W	Inferior
4	740	-190	4,7	41°21'51.93"N 7°11'35.21"W	Superior
5	737	-187	6,9	41°17'59.64"N 7°16'56.85"W	Superior

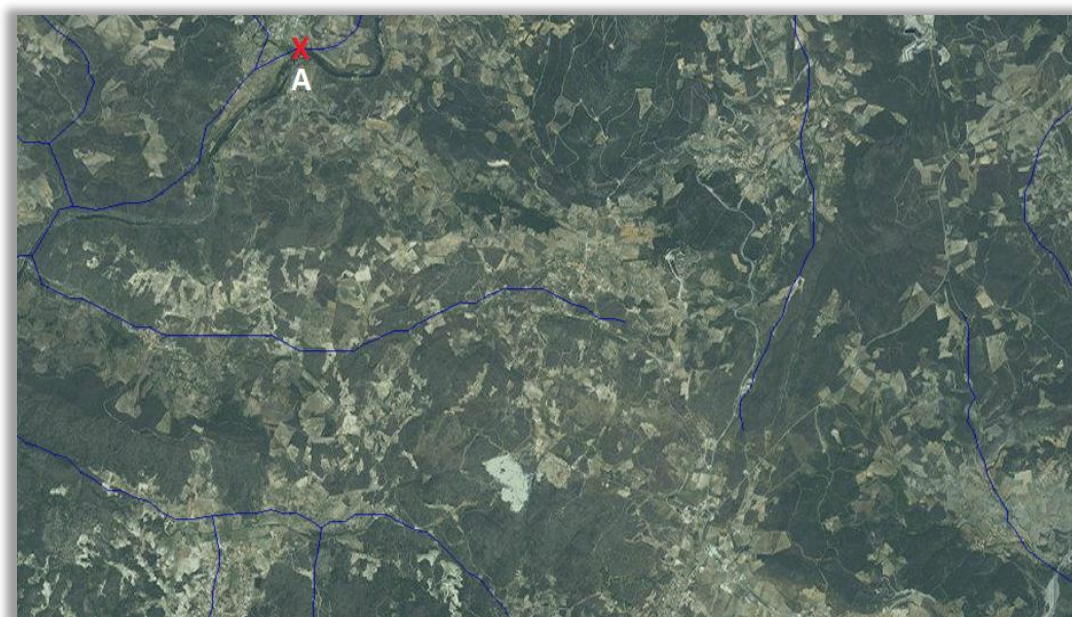


Figura A.78: Possíveis localizações de descarga nos cursos (Fonte: Atlas da Água)

Tabela A.38: Dados dos pontos de interseção dos cursos de água

Pontos	Altitude (m)	Δh (m)	Distância à pedreira (km)	Coordenadas
A	194	356	5,6	41°22'15.68''N 7°14'15.54''W

Tabela A.39: Dados pedreira

Nome	Pedreira Curva da Nogueira
Localização	Curva da Nogueira, Apartado 43 5360-909 Vila Flor
Atividade	Ativa
Geologia	Granito
Área de escavação	Sem dados
Fosso	Sem dados

A.14. Vila Franca de Xira



Figura A.79: Pedreira de Vila Franca de Xira
(Fonte: Google Earth)

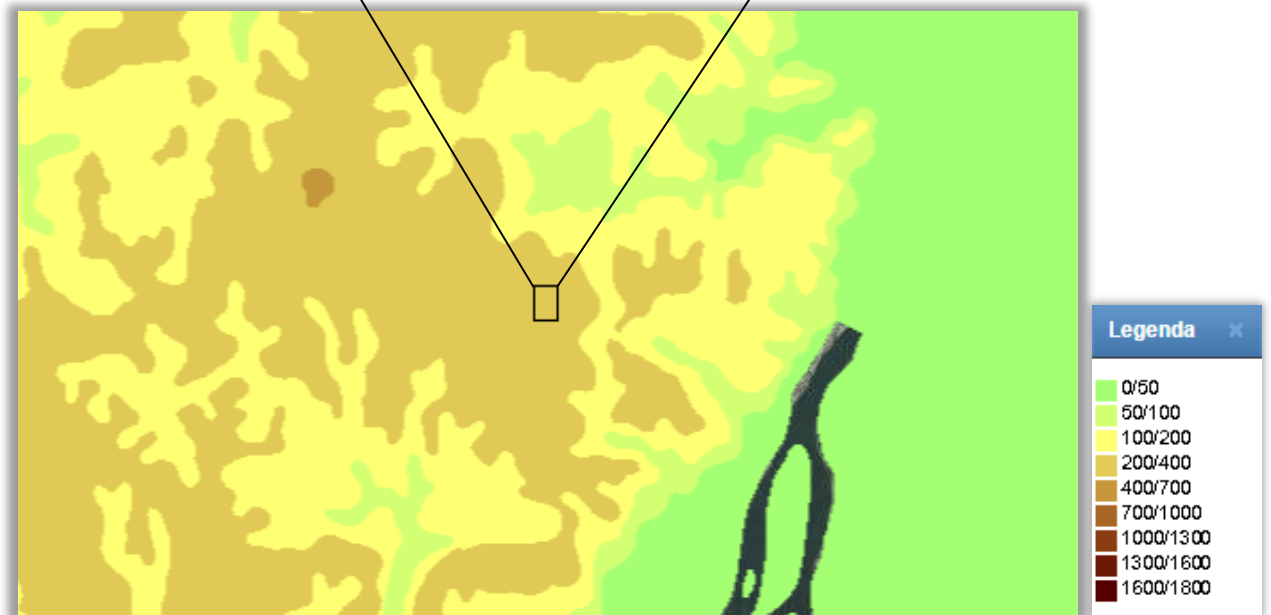


Figura A.80: Extrato do mapa hipsométrico (Classes) (Fonte: Atlas do Ambiente)

A Pedreira de Vila Franca de Xira está a uma altitude entre os 200 e os 400 metros de altitude, relativamente ao nível do mar.



Figura A.81: Extrato do mapa da precipitação (Quantidade total) (Fonte: Atlas do Ambiente)

A precipitação em Vila Franca de Xira, na zona onde se insere a pedra ronda os 600 a 700 mm.

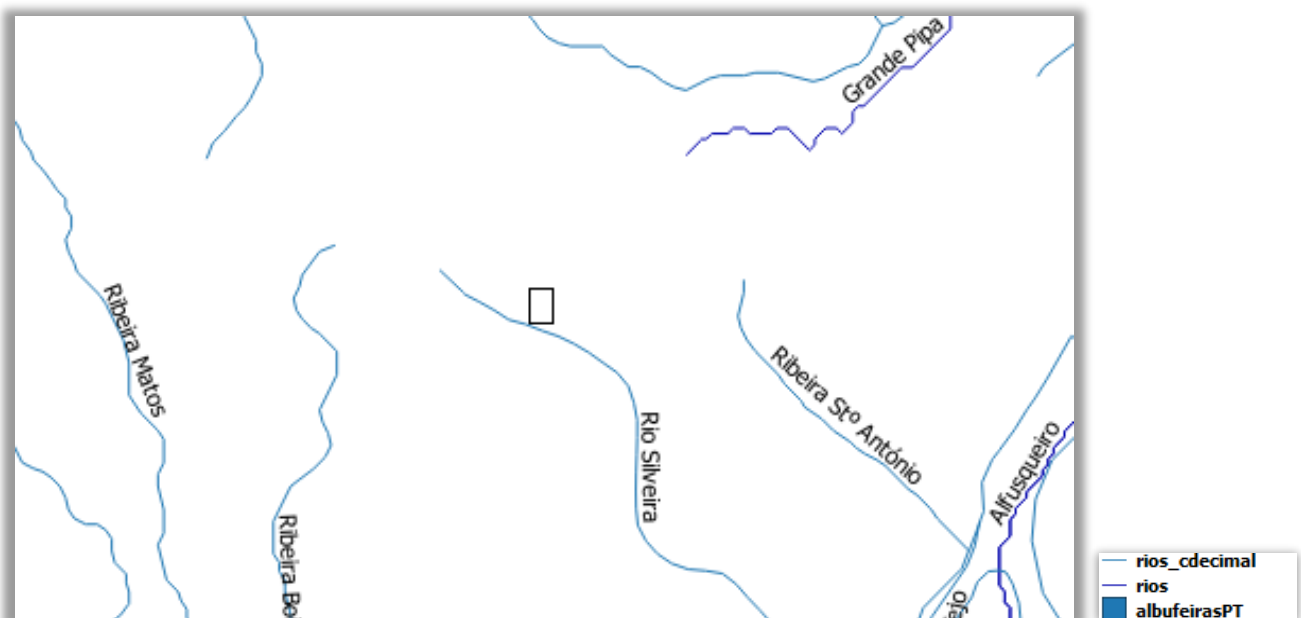


Figura A.82: Extrato do mapa da rede hidrográfica total e classificação decimal rede hidrográfica (Fonte: Atlas da Água)

O Centro Produtor de Vila Franca de Xira encontra-se a aproximadamente 50 metros do Rio Silveira, a 2,7 quilómetros da Ribeira de Stº António, a 3,3 quilómetros da Ribeira Boicão e a 7 quilómetros do Rio Tejo.

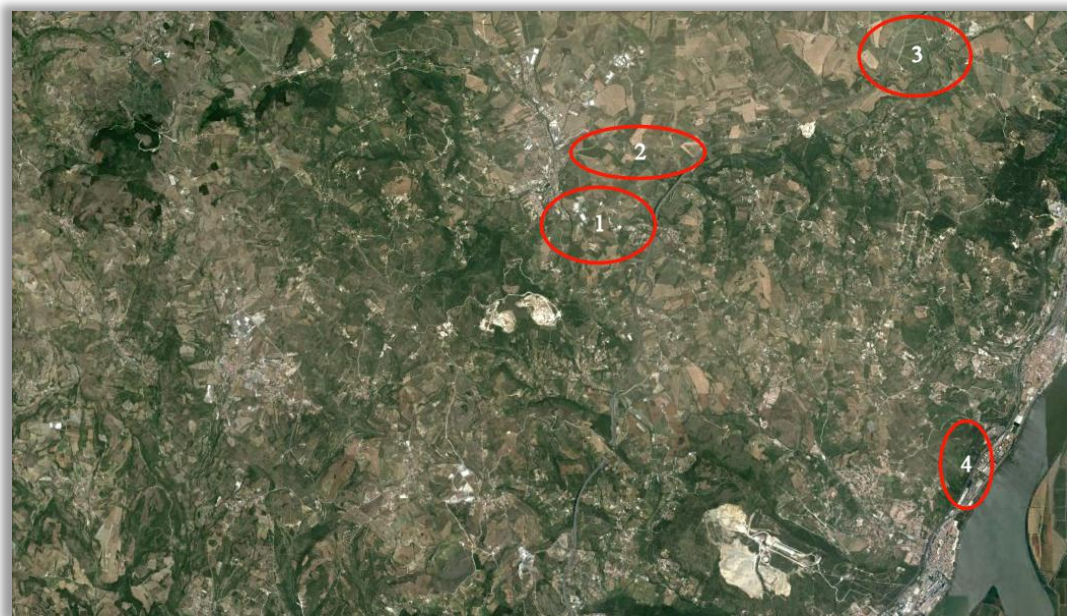


Figura A.83: Possíveis localizações do reservatório (Fonte: Google Earth)

Tabela A.40: Dados dos pontos para localização do reservatório

Pontos	Altitude (m)	Δh (m)	Distância à pedra (km)	Coordenadas	Tipo de reservatório
1	130	200	1,9	38°58'31.84''N 9°04'33.16''W	Inferior
2	75	255	2,7	38°59'14.87''N 9°03'54.25''W	Inferior
3	27	303	7,3	39°00'18.05''N 9°00'39.23''W	Inferior
4	50	280	7	38°56'17.57''N 9°00'18.31''W	Inferior

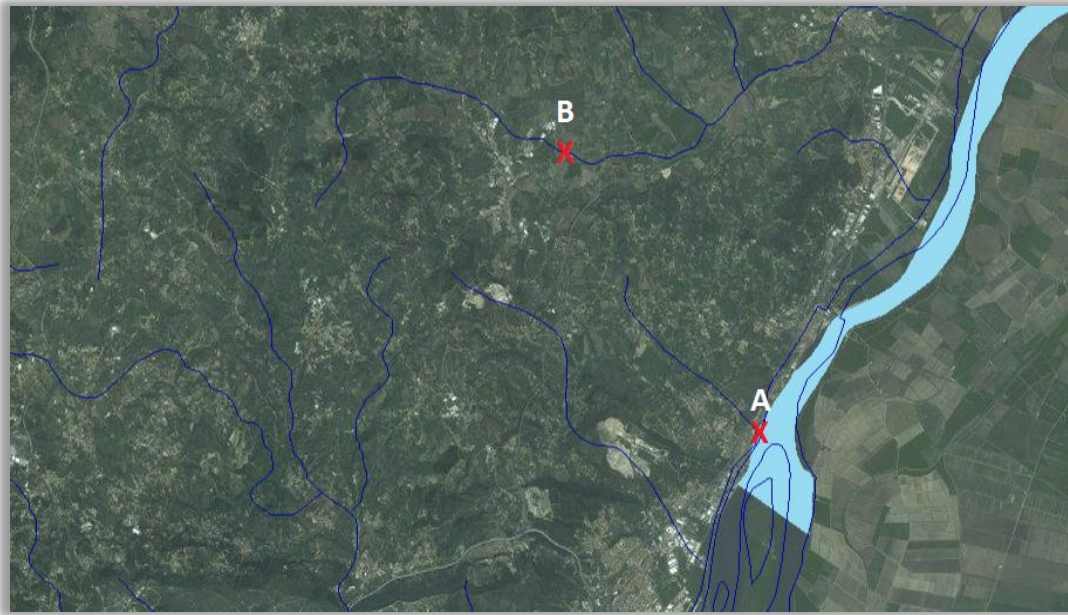


Figura A.84: Possíveis localizações de descarga nos cursos (Fonte: Atlas da Água)

Tabela A.41: Dados dos pontos de interseção dos cursos de água

Pontos	Altitude (m)	Δh (m)	Distância à pedreira (km)	Coordenadas
A	7	323	7,4	38°55'44.38''N 9°00'20.05''W
B	79	251	3,8	38°59'38.77''N 9°03'43.89''W

Tabela A.42: Dados pedreira

Nome	Pedreira São João dos Montes
Localização	Apartado 52 2630-999 Arruda dos Vinhos
Atividade	Não ativa
Geologia	Calcário
Área de escavação	83.833,86 m ²
Fosso	136.115,09 m ³
Observações	Não existe Plano de Lavra.

Apêndice B.

Os valores a seguir demonstrados tratam-se de médias anuais das velocidades do vento médias diárias para as estações meteorológicas de Escudeiros, Entre-os-Rios e Marco de Canaveses. Para informação original dos valores diários da velocidade do vento consultar:

- Escudeiros:

http://snirh.pt/snirh/_dadosbase/site/janela_verdados.php?sites=920685296&pars=490270858&tmin=01/01/2004&tmax=31/12/2009

-Entre-os-Rios:

http://snirh.pt/snirh/_dadosbase/site/janela_verdados.php?sites=920685286&pars=490270858&tmin=01/01/2007&tmax=31/12/2008

- Marco de Canaveses:

http://snirh.pt/snirh/_dadosbase/site/janela_verdados.php?sites=920685450&pars=490270858&tmin=01/01/2007&tmax=31/12/2009

Tabela B.1: Média da velocidade do vento media diária Escudeiros - Famalicão

Escudeiros (05G/05UG)	
Ano	Média da velocidade do vento média diária (m s ⁻¹)
2004	0,58
2005	0,60
2006	0,69
2007	0,66
2008	0,62
2009	0,60

Dados obtidos através do site <http://snirh.pt> em 09/09/2016

Tabela B.2: Média da velocidade do vento media diária Entre-os-Rios - Penafiel

Entre-os-Rios (07H/01UG)	
Ano	Média da velocidade do vento média diária (m s⁻¹)
2007	0,42
2008	0,40

Dados obtidos através do site <http://snirh.pt> em 09/09/2016

Tabela B.3: Média da velocidade do vento media diária Marco de Canaveses - Penafiel

Marco de Canaveses (06I/02UG)	
Ano	Média da velocidade do vento média diária (m s⁻¹)
2007	0,35
2008	0,33
2009	0,32

Dados obtidos através do site <http://snirh.pt> em 09/09/2016

Apêndice C.

Os gráficos seguintes foram obtidos através do OMIE e editados consoante o estudo em causa.

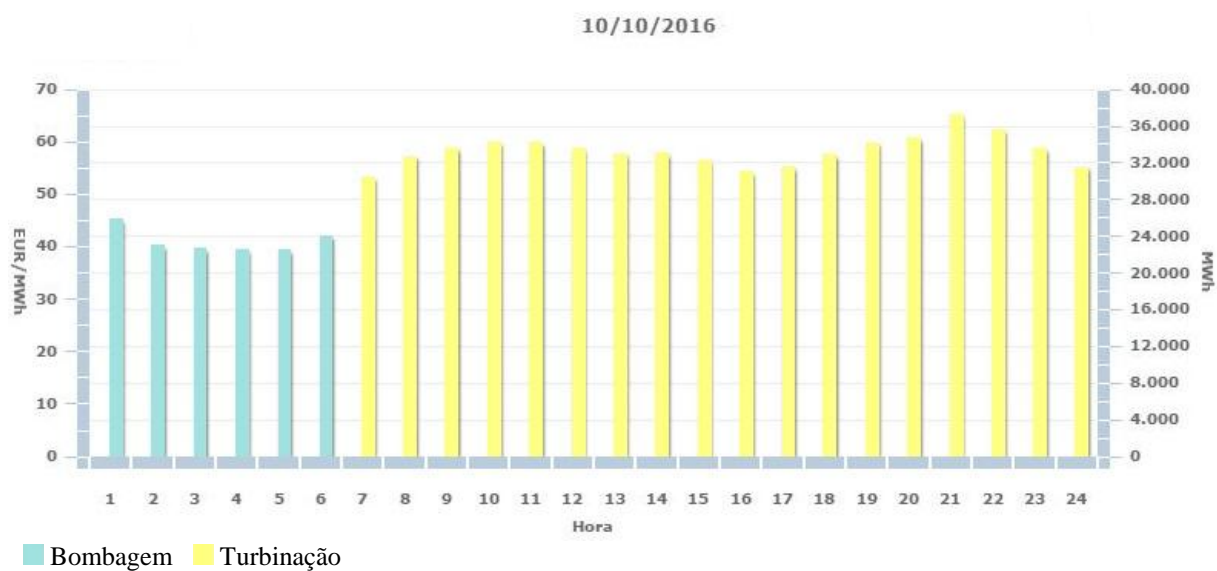


Figura C.1: Preço horário do mercado diário – 10/10/2016

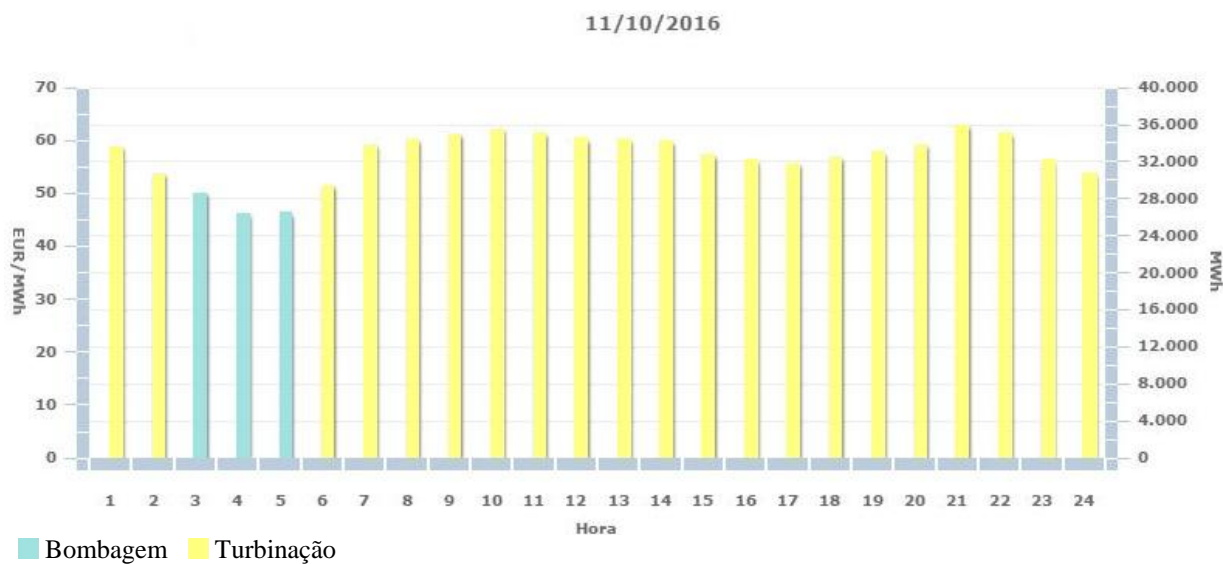


Figura C.2: Preço horário do mercado diário – 11/10/2016



Figura C.3: Preço horário do mercado diário – 12/10/2016

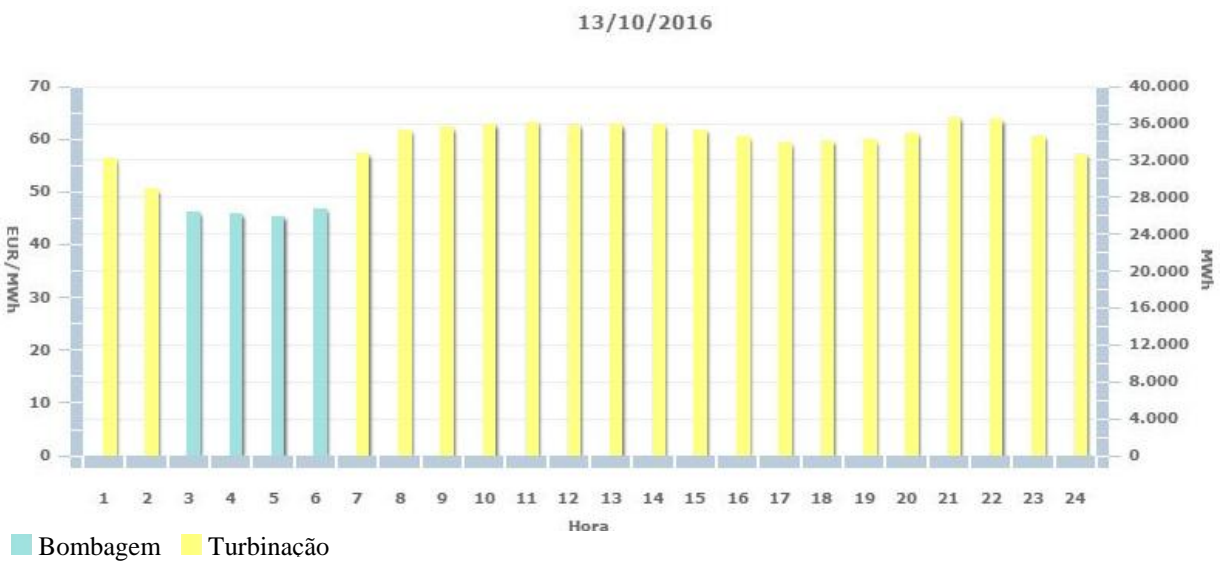


Figura C.4: Preço horário do mercado diário – 13/10/2016

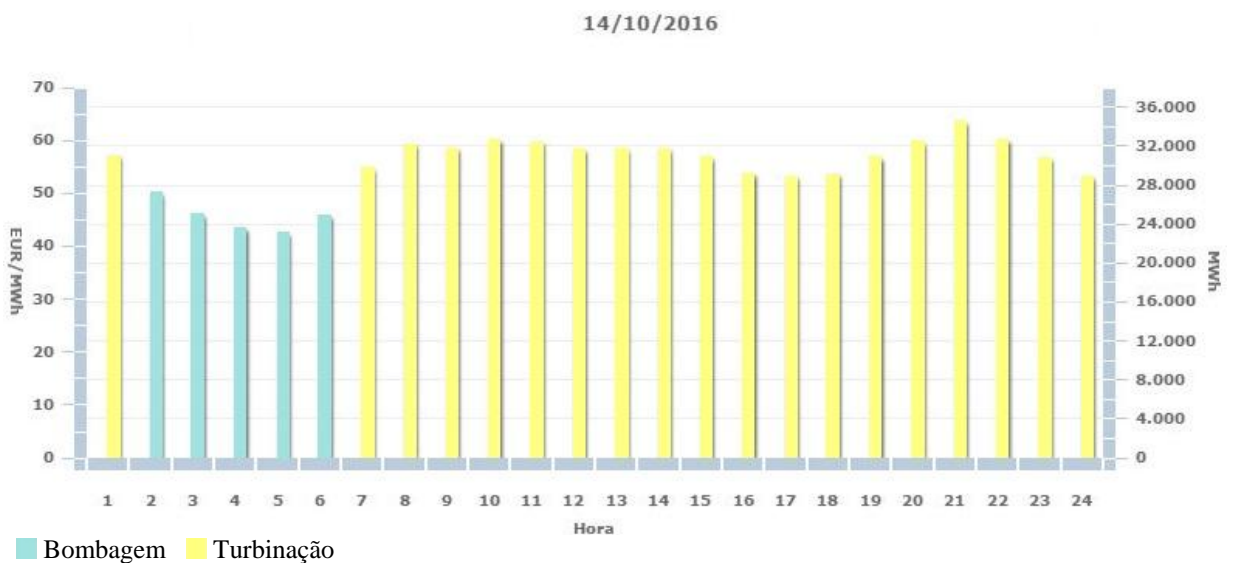


Figura C.5: Preço horário do mercado diário – 14/10/2016



Figura C.6: Preço horário do mercado diário – 15/10/2016

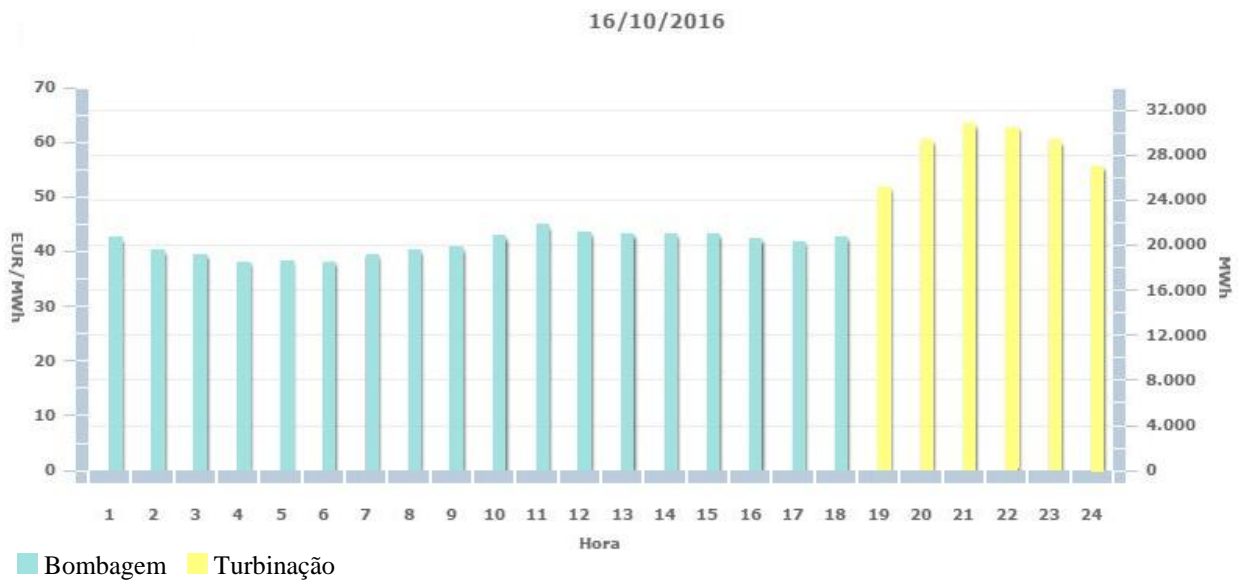


Figura C.7: Preço horário do mercado diário – 16/10/2016

Apêndice D.

Os gráficos seguintes foram obtidos através do OMIE e editados consoante o estudo em causa.

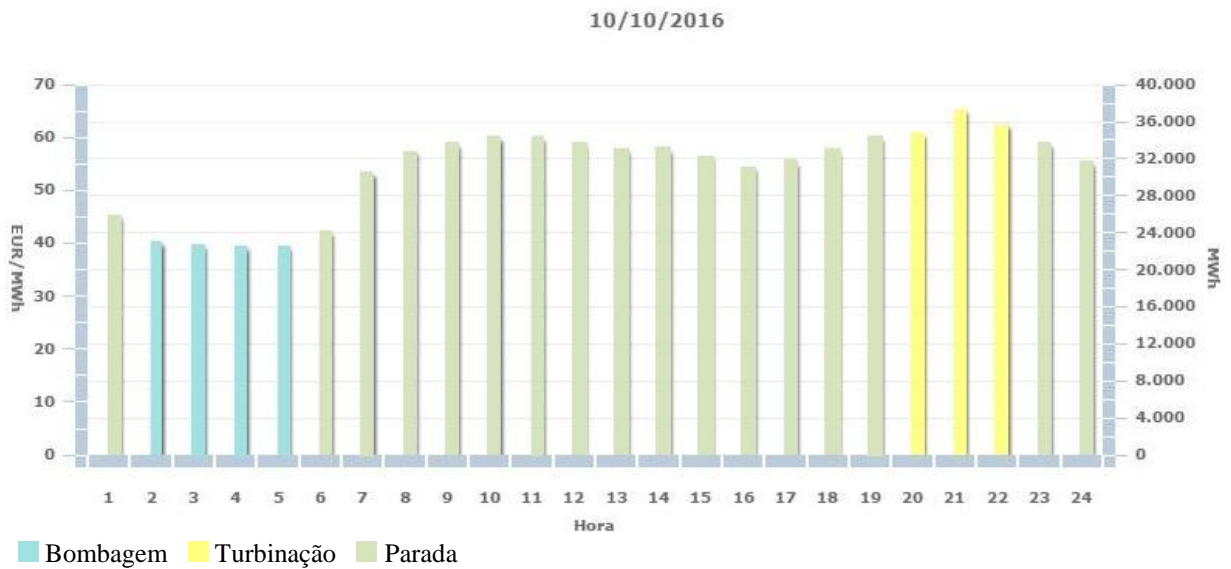


Figura D.1: Preço horário do mercado diário – 10/10/2016

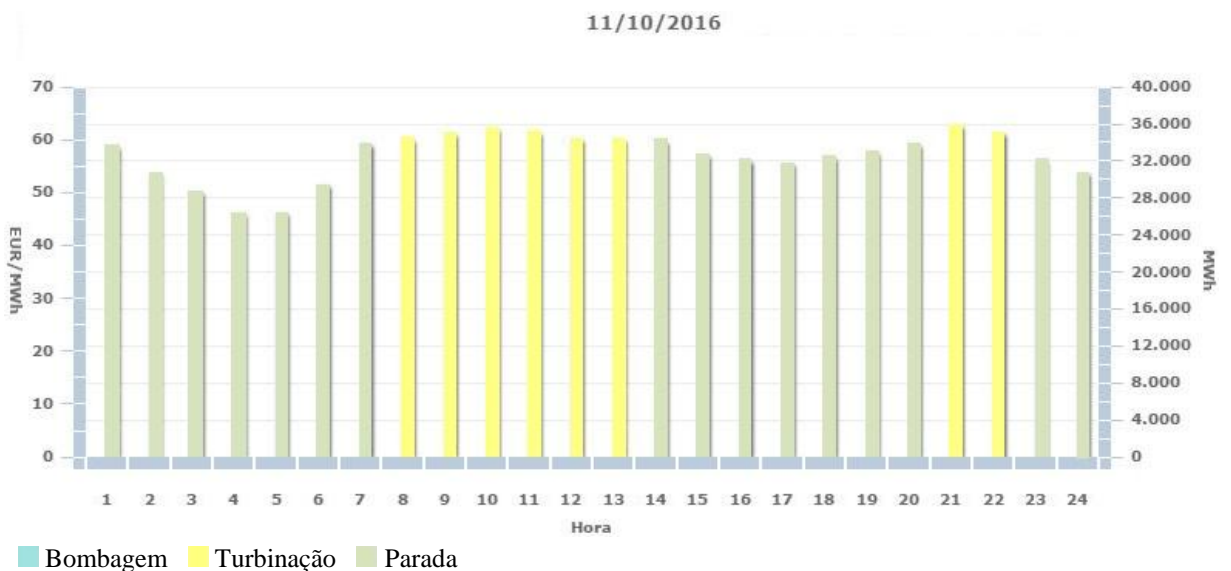


Figura D.2: Preço horário do mercado diário – 11/10/2016

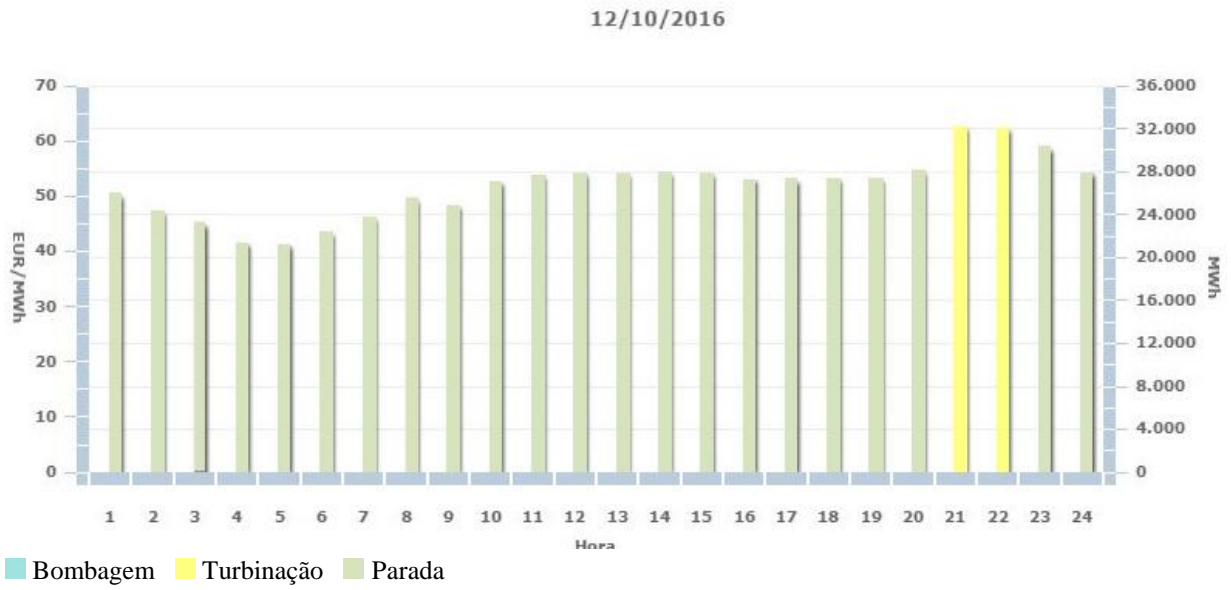


Figura D.3: Preço horário do mercado diário – 12/10/2016

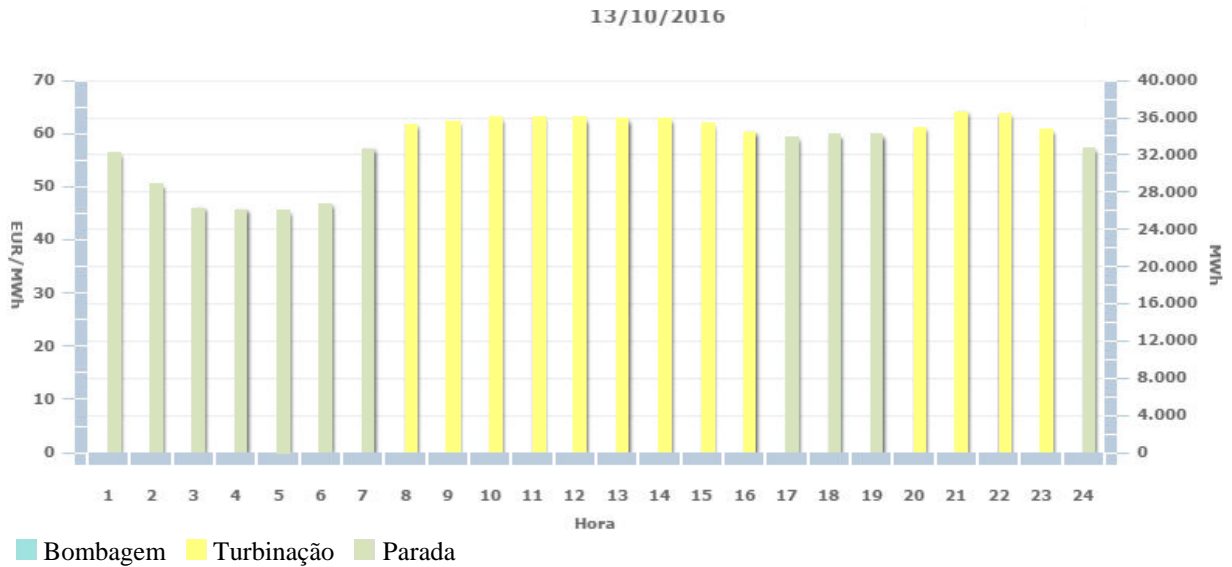


Figura D.4: Preço horário do mercado diário – 13/10/2016

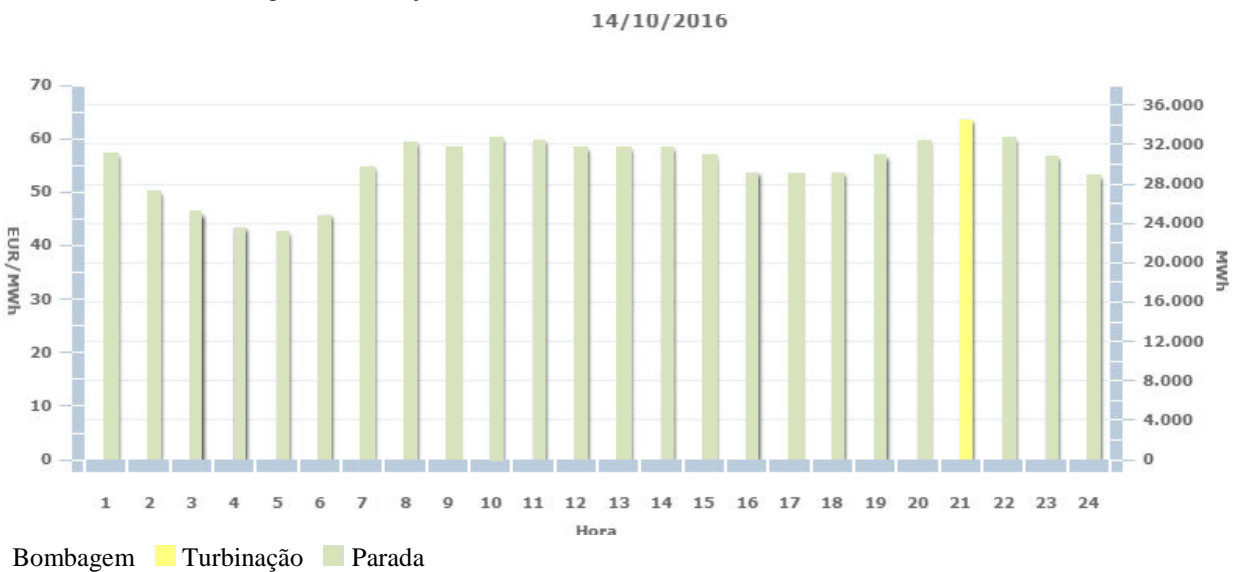


Figura D.5: Preço horário do mercado diário – 14/10/2016

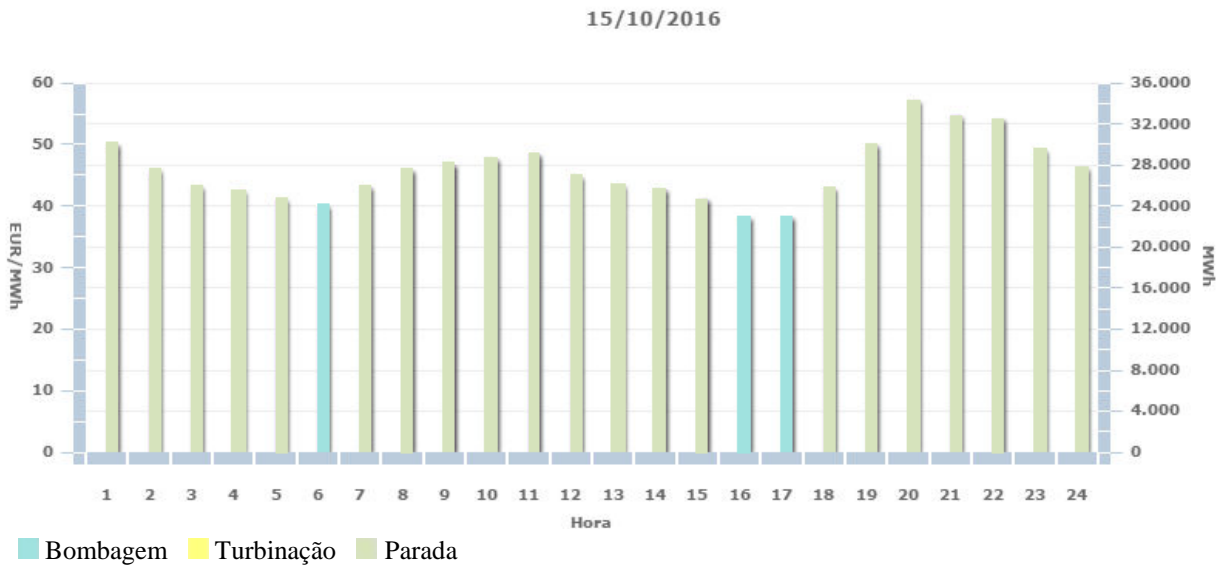


Figura D.6: Preço horário do mercado diário – 15/10/2016

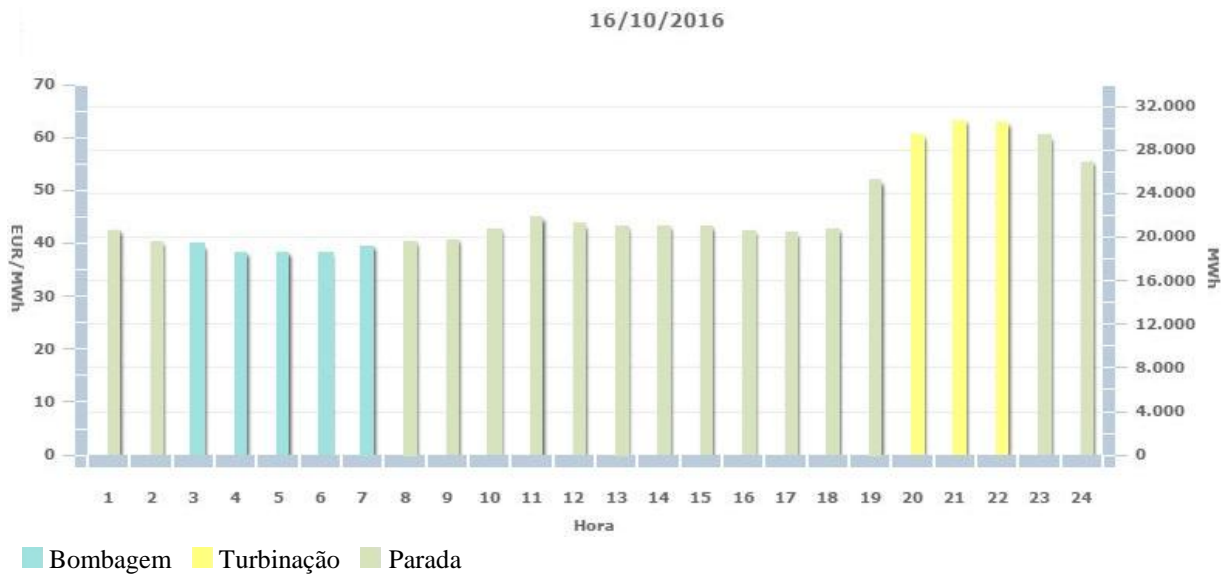


Figura D.7: Preço horário do mercado diário – 16/10/2016

Apêndice E.

Os valores a seguir demonstrados tratam-se de médias anuais das velocidades do vento horárias para a estação meteorológica de Escudeiros. Para informação original dos valores horários da velocidade do vento consultar:

- Escudeiros:

http://snirh.pt/snirh/dadosbase/site/janela_verdados.php?sites=920685296&pars=100750606&tmin=01/01/2003&tmax=31/12/2009

Tabela E.1: Média da velocidade do vento horária Escudeiros - Famalicão

Escudeiros (05G/05UG)	
Ano	Média da velocidade do vento horária (m s ⁻¹)
2003	0,58
2004	0,58
2005	0,60
2006	0,69
2007	0,66
2008	0,62
2009	0,60

Dados obtidos através do site <http://snirh.pt> em 08/10/2016

Anexos

Anexo I.

Tabela I - 1: Precipitação anual na estação meteorológica escudeiros – Famalicão

Escudeiros (05G/05UG)	
Data	Precipitação anual (mm)
01/10/1980 09:00	1309,1
01/10/1981 09:00	1536,6
01/10/1982 09:00	1852,1
01/10/1983 09:00	1575,3
01/10/1984 09:00	2050,3
01/10/1985 09:00	1851,7
01/10/1986 09:00	1449,6
01/10/1987 09:00	1982,3
01/10/1988 09:00	1001
01/10/1989 09:00	1494,5
01/10/1990 09:00	1642,7
01/10/1991 09:00	1174,9
01/10/1992 09:00	1303,6
01/10/1993 09:00	1931,6
01/10/1994 09:00	1574,3
01/10/1995 09:00	2034,2
01/10/1996 09:00	1626,1
01/10/1997 09:00	2134,8
01/10/1998 09:00	1156,2
01/10/1999 09:00	1640,7
01/10/2000 09:00	3140,6
01/10/2003 09:00	644,9
01/10/2004 09:00	245,1
01/10/2005 09:00	867,9
01/10/2006 09:00	900,3
01/10/2007 09:00	752,5

Dados obtidos através do site <http://snirh.pt> em 05/07/2016

Tabela I - 2: Precipitação Anual na Estação Meteorológica Marco de Canaveses – Penafiel

Marco de Canaveses (06I/02UG)			
Data	Precipitação anual (mm)	Data	Precipitação anual (mm)
01/10/1932 09:00	892,4	01/10/1973 09:00	1.469
01/10/1933 09:00	909,3	01/10/1974 09:00	917,3
01/10/1934 09:00	1.098,5	01/10/1975 09:00	768,6
01/10/1935 09:00	1.904,4	01/10/1976 09:00	1.996,8
01/10/1936 09:00	1.401,1	01/10/1977 09:00	1.712,8
01/10/1937 09:00	971,5	01/10/1978 09:00	1.656,4
01/10/1938 09:00	1.289,9	01/10/1979 09:00	1.097,4
01/10/1939 09:00	1.457,4	01/10/1980 09:00	986,2
01/10/1940 09:00	1.697,3	01/10/1981 09:00	1.135,2
01/10/1941 09:00	980	01/10/1982 09:00	1.240,4
01/10/1942 09:00	955,9	01/10/1983 09:00	1.013,4
01/10/1943 09:00	884,6	01/10/1984 09:00	1.001,1
01/10/1944 09:00	691,6	01/10/1985 09:00	1.239,4
01/10/1945 09:00	1.427,5	01/10/1986 09:00	979
01/10/1946 09:00	1.519,4	01/10/1987 09:00	1.504,6
01/10/1947 09:00	1.257,8	01/10/1988 09:00	802,7
01/10/1948 09:00	990,2	01/10/1989 09:00	1.006,2
01/10/1949 09:00	1.128,9	01/10/1990 09:00	1.045,3
01/10/1950 09:00	1.362,3	01/10/1991 09:00	913,5
01/10/1951 09:00	1.099,8	01/10/1992 09:00	1.120,1
01/10/1952 09:00	698,3	01/10/1993 09:00	1.235,2
01/10/1953 09:00	904,8	01/10/1994 09:00	1.151,4
01/10/1954 09:00	951	01/10/2007 09:00	725
01/10/1955 09:00	1.391,8	01/10/2008 09:00	358,4
01/10/1956 09:00	853,5		
01/10/1957 09:00	1.342		
01/10/1958 09:00	1.513,4		
01/10/1959 09:00	1.505,6		
01/10/1960 09:00	1.563,4		
01/10/1961 09:00	1.383		
01/10/1962 09:00	1.328,9		
01/10/1963 09:00	1.629,2		
01/10/1964 09:00	939,9		
01/10/1965 09:00	2.199,1		
01/10/1966 09:00	1.081,2		
01/10/1967 09:00	1.033,3		
01/10/1968 09:00	1.837,1		
01/10/1969 09:00	1.242,2		
01/10/1970 09:00	1.206,4		
01/10/1971 09:00	1.080,9		
01/10/1972 09:00	1.147,5		

Dados obtidos através do site <http://snirh.pt> em 05/07/2016

Tabela I - 3: Precipitação Anual na Estação Meteorológica Entre-os-Rios – Penafiel

Entre-os-Rios (07H/01UG)			
Data	Precipitação anual (mm)	Data	Precipitação anual (mm)
01/10/1913 09:00	967	01/10/1963 09:00	1.681,9
01/10/1914 09:00	1.730,8	01/10/1964 09:00	1.060,4
01/10/1915 09:00	1.294,8	01/10/1965 09:00	2.039,6
01/10/1916 09:00	1.276,8	01/10/1966 09:00	1.161,3
01/10/1917 09:00	380,2	01/10/1967 09:00	1.105,4
01/10/1918 09:00	981	01/10/1968 09:00	2.073,1
01/10/1920 09:00	571,4	01/10/1969 09:00	1.296,4
01/10/1923 09:00	1.415,3	01/10/1970 09:00	1.252
01/10/1924 09:00	1.354,7	01/10/1971 09:00	1.073
01/10/1932 09:00	948,8	01/10/1972 09:00	1.156,1
01/10/1933 09:00	933,23	01/10/1973 09:00	1.497,1
01/10/1934 09:00	1.142,3	01/10/1974 09:00	1.053
01/10/1935 09:00	2.070,6	01/10/1975 09:00	802,6
01/10/1936 09:00	1.427,7	01/10/1976 09:00	2.197,4
01/10/1937 09:00	1.075,8	01/10/1978 09:00	2.047,6
01/10/1938 09:00	1.487,8	01/10/1979 09:00	1.016,5
01/10/1939 09:00	1.538,8	01/10/1980 09:00	533
01/10/1940 09:00	2.050,2	01/10/1981 09:00	596
01/10/1941 09:00	1.097,2	01/10/1982 09:00	864,6
01/10/1942 09:00	1.055,4	01/10/1983 09:00	1.406,4
01/10/1943 09:00	847,7	01/10/1984 09:00	1.447,6
01/10/1944 09:00	702,7	01/10/1985 09:00	1.410,4
01/10/1945 09:00	1.273,8	01/10/1986 09:00	940,2
01/10/1946 09:00	1.424,6	01/10/1987 09:00	1.589
01/10/1947 09:00	874,8	01/10/1988 09:00	827,7
01/10/1948 09:00	652,2	01/10/1989 09:00	1.172,8
01/10/1949 09:00	829,1	01/10/1990 09:00	1.275,1
01/10/1950 09:00	1.337	01/10/1991 09:00	946,3
01/10/1951 09:00	1.192,7	01/10/1992 09:00	1.206,4
01/10/1952 09:00	872,8	01/10/1993 09:00	1.469,1
01/10/1953 09:00	1.069,6	01/10/1994 09:00	1.208,5
01/10/1954 09:00	957,2	01/10/1995 09:00	1.845,8
01/10/1955 09:00	642,3	01/10/1996 09:00	1.190
01/10/1956 09:00	537,2	01/10/1997 09:00	1.873,3
01/10/1957 09:00	560,9	01/10/1998 09:00	1.030
01/10/1958 09:00	500,3	01/10/1999 09:00	1.191,1
01/10/1959 09:00	535,7	01/10/2003 09:00	1.171
01/10/1961 09:00	1.327,4	01/10/2004 09:00	704
01/10/1962 09:00	1.381,8	01/10/2006 09:00	868,6
01/10/1963 09:00	1.681,9	01/10/2007 09:00	448,2
01/10/1964 09:00	1.060,4		

Dados obtidos através do site <http://snirh.pt> em 05/07/2016

