Produção combinada de energia elétrica através das fontes renováveis hidroelétrica e eólica

Joana Rita Preto Fialho

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil

Engenharia Civil

Orientadores:

Prof. Doutor António Bento Franco

Prof.ª Doutora Maria Manuela Portela Correia dos Santos Ramos da Silva

Júri

Presidente: Prof. Doutor Rodrigo De Almada Cardoso Proença de Oliveira

Orientador: Prof. Doutor António Bento Franco

Vogais: Prof.ª Doutora Helena Margarida Machado da Silva Ramos

Janeiro 2018

Agradecimentos

Ao Professor António Bento Franco pela participação ativa em todo o trabalho desenvolvido e pela simpatia e positivismos transmitidos e à co-orientadora Manuela Portela pelo conhecimento transmitido.

À Doutora Ana Estanqueiro e à Engenheira Ana Rita Machado do LNEG, pela cooperação e disponibilização dos dados utilizados na presente dissertação.

Aos meus amigos de sempre, Ricardo, Edna, Isabel, Diogo, Huguito, Marília e à casa do pilar em geral, e aos meus motores na reta final Vera, Andreia e Eliane, entre muitos outros que vivem no meu coração.

Aos meus pais, Helena e José Francisco, ao meu mano, João, à minha priminha, Leonor, à minha tia, Toinha e finalmente aos meus avozinhos Maria e Inácio que sempre me desejaram saúde e sorte.

Obrigada.

Resumo

O rápido crescimento que se tem vindo a sentir no campo das energias renováveis, mais propriamente no caso das eólicas e os problemas que estas enfrentam, fruto da intermitência do recurso natural, instigou o presente estudo a apresentar uma solução de armazenamento por bombagem, capaz de equilibrar a energia elétrica e contribuir para controlo da voltagem e frequência na rede incentivando o aumento da penetração da geração eólica na mesma.

A presente dissertação propõe um aproveitamento hidroelétrico que integra um sistema de armazenamento por bombagem, a operar de acordo com as condições meteorológicas e climatológicas de Portugal continental, de modo a colmatar a variabilidade da produção de energia dum parque eólico próximo.

Numa primeira fase foi realizada o pré-dimensionamento da barragem, dos órgãos e circuito hidráulico e da central hidroelétrica e de bombagem. Na segunda fase foi realizado uma simulação computacional do aproveitamento hidroelétrico-eólico em sistema fechado (sem ligação à rede nacional) para oito cenários de estudo.

Para o perfil de consumo estipulado, os resultados obtidos, para além de alegarem a indispensabilidade duma unidade convencional (UC) de apoio demonstraram que, para o cenário mais favorável, a contribuição anual da UC no fornecimento de energia é de 12%, ocupando a produção hidroelétrica 33 % e eólica e 55% da maquia. Ainda neste cenário, a energia anualmente armazenada atingiu os 94 % da energia eólica destinada a armazenamento, valor este superior ao critério de aceitabilidade de 85%, definidos para o caso de estudo.

Palavras-chave: aproveitamento hidroelétrico-eólico, sistema de armazenamento por bombagem, mini-hídrica

Abstract

The fast growing of new renewable energies such as wind energy and its issues in terms of the intermittency of natural resource inspired this work to present a hydro pumped storage (HPS) solution in a close grid, as a way of overcoming that obstacle, by increasing the wind penetration levels, providing balance power and helping to control the grid voltage and frequency.

Similarly, to many hydro pumped storage systems that have been proposed on islands, this paper proposes a HPS facility according to Portugal meteorological and hydrological conditions. This facility would therefore integrate the energy generation of a nearby wind farm.

The first step was to conceive a preliminary design consisting of a concrete level dam and its associated hydraulic structures, as well as of a hydraulic circuit connected to a pumping and turbine stations. The next step was to develop the enterprise model was lastly, 8 cases studies were simulated.

For a given demand curve, the results indicated that in addition to the conventional power station being indispensable, its annual contribution is 12% of the energy demand, in the most favorable case, with hydropower and wind generation contributing 33% and 55 %, correspondingly. Also, in this scenario, the annual energy stored can achieve 94 % of the wind energy leftover, more than the 85% establish as threshold

Keywords: Wind-hydro power plant, pumped hydro energy storage system, small hydro

Índice

1 INTRODUÇÃO 1

1.1 ENQUADRAMENTO DO TEMA 1
1.2 ENERGIAS EÓLICA E HIDROELÉTRICA EM PORTUGAL CONTINENTAL 2
1.3 OBJETIVOS E ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO 5

2 EXEMPLO DE PROJETOS COM ARMAZENAMENTO POR BOMBAGEM 6

2.1 INTRODUÇÃO 6
2.2 ALQUEVA II 6
2.3 ILHA GREGA DE ICÁRIA 7
2.4 CANÁRIAS I 8
2.5 CANÁRIAS II 9

3 CASO DE ESTUDO 11

3.1 LOCALIZAÇÃO E IMPLANTAÇÃO 11
3.2 DESCRIÇÃO GERAL DO APROVEITAMENTO 12
3.3 ESTUDOS HIDROLÓGICOS 13
3.3.1 Considerações gerais 13
3.3.2 Características fisiográficas 14
3.3.3 Caudal de ponta de cheia 16
3.3.4 Série de Escoamento em Regime Natural 19
3.3.5 Série Mensal de Caudais Evaporados 22
3.3.6 Série Mensal de Caudais Ecológicos 25

4 PRÉ-DIMENSIONAMENTO DA BARRAGEM, ÓRGÃOS HIDRÁULICOS E CENTRAL HIDROELÉTRICA E DE BOMBAGEM 26

4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS 26
4.2 CARACTERÍSTICAS DA BARRAGEM 26
4.3 DESCARREGADOR DE CHEIAS 27
4.3.1 Considerações gerais 27
4.3.2 Dimensionamento 27
4.4 DESCARGA DE FUNDO 34
4.4.1 Considerações gerais 34
4.4.2 Dimensionamento 34
4.5 CIRCUITO HIDRÁULICO 37
4.5.1 Considerações gerais 37
4.5.2 Pré-dimensionamento da conduta 38
4.5.3 Estreitamento e alargamentos 38

4.5.4 Tomada de água da albufeira 39
4.5.5 Tomada de água da central de bombagem 40
4.5.6 Perdas de carga 41
4.5.7 Linha de energia 48
4.6 Central Hidroelétrica e de Bombagem 50
4.6.1 Considerações Iniciais 50
4.6.2 Edifício 51
4.6.3 Turbomáquinas 51

5 MODELO DO SISTEMA 54

5.1 Topologia do Sistema a Simular 54
5.2 Dados de Entrada do Modelo 55
5.3 Equações Utilizadas e Restrições à Exploração do Modelo 56
5.4 Resultados do Modelo 61

6 CENÁRIOS ESTUDADOS E ANÁLISE DE RESULTADOS 65

6.1 Definição dos Cenários 65
6.2 Análise de Resultados 65

7 CONCLUSÃO FUTUROS DESENVOLVIMENTOS 75

7.1 Conclusão 75
7.2 Futuros Desenvolvimentos 76

8 BIBLIOGRAFIA 78

9 ANEXO I

9.1 Anexo A – Geral I
9.2 Anexo B – Turbina Pelton Voith II
9.3 Anexo C – Bomba HPDM600-890-2D Sulzer III
9.4 Anexo D – Séries simuladas V
9.5 Anexo E – Peças Desenhadas VII

Lista de Quadros

Quadro 1.1 – Potência instalada acumulada, habitantes abastecidos e emissões de CO_2 evitadas – Portugal Continental, final de 2016. Adaptado de APREN (2016c) 4

Quadro 3.1 – Curva de volumes armazenados e de áreas inundáveis 15

Quadro 3.2 – Tempo de concentração (tc) segundo Temez, Kirpich e Giandotti 17

Quadro 3.3 – Parâmetros a e n da curva IDF para durações de 0,5 a 6 horas e de 6 a 24 horas, T=1000 anos (05T/01) 18

Quadro 3.4 – Parâmetros C, Cf e A da fórmula racional 19

Quadro 3.5 – Caudal de ponta cheia para tc segundo Temez Giandotti e Kirpich 19
Quadro 3.6 – Curva de duração média anual do caudal médio diário (estação hidrométrica de Vale do Trevo) 20
Quadro 3.7 – Caudal modular da bacia em estudo e do posto de Vale do Trevo 20
Quadro 3.8 – Insolação astronómica diária expressa em unidades de 12 h de um mês com 30 dias. Adaptado de QUINTELA (1996) 23
Quadro 3.9 – Evapotranspiração potencial mensal nos postos climatológicos de Bragança e Folgares 23
Quadro 3.10 – Evaporação mensal e caudal evaporado considerando a área de espelho de água referente ao NPA da albufeira 24
Quadro 3.11 – Caudal ecológico mensal 25
Quadro 4.1 – Características gerais da barragem e da albufeira 27
Quadro 4.2 – Coordenadas das circunferências que descrevem a soleira do descarregador a montante da crista 29
Quadro 4.3 – Pontos de apoio à construção da soleira do descarregador a montante da crista 29
Quadro 4.4 – Características do escoamento no salto esqui e raio de curvatura 30
Quadro 4.5 – Ângulos descritores da geometria do salto esqui 31
Quadro 4.6 – Geometria do canal do descarregador 32
Quadro 4.7 – Características do escoamento ao longo do canal sobre o corpo da barragem e altura dos muros guias 33
Quadro 4.8 – Peso dos sedimentos acumulados ao longo de 50 anos, volume morto e respetiva cota. 34
Quadro 4.9 – Carga hidráulica imediatamente a jusante da válvula (H_v) 36
Quadro 4.10 – Diâmetro adoptado no dimensionamento da válvula de cone fixo 36
Quadro 4.11 – Descarga de fundo, ângulo α adotado no estreitamento 36
Quadro 4.12 – Descarga de fundo, dimensões e velocidades da grelha e da comporta 37
Quadro 4.13 – Gama de velocidades máximas segundo o tipo de queda. Adaptado de RAMOS *et al.* (2000) 38
Quadro 4.14 – Diâmetro e espessura adotados na conduta de aço 38
Quadro 4.15 – Dimensionamento do alargamento e do estreitamento 39
Quadro 4.16 –Submergência mínima na tomada de água (S), Nme e cota da tomada de água da albufeira (C_{TOMAD}) 39
Quadro 4.17 – Caracterização da grelha (Tomada de água da abufeira) 39
Quadro 4.18 – Tomada de água da albufeira, velocidades na grelha e na comporta 40

Quadro 4.19 – Altura de aspiração adotada e parâmetros da equação (4.17) 41
Quadro 4.20 – Central de Bombagem, características da grelha 41
Quadro 4.21 – Central de Bombagem, dimensões e velocidades na grelha e na comporta 41
Quadro 4.22 – Caracteríticas das condutas e respetivas perdas de carga 42
Quadro 4.23 – Perda de carga na entrada 43
Quadro 4.24 – Perda de carga na grelha 44
Quadro 4.25 – Perda de carga na ranhura das comportas 45
Quadro 4.26 – Perda de carga nas transições de secção 45
Quadro 4.27 – Perda de carga na bifurcação 46
Quadro 4.28 – Características da junção simétrica 46
Quadro 4.29 – Perda de carga na junção simétrica 46
Quadro 4.30 – Perda de carga na válvula batente 46
Quadro 4.31 – Perda de carga no alargamento e no estreitamento 47
Quadro 4.32 – Perda de carga na saída da tomada de água para a albufeira 47
Quadro 4.33 – Perdas de carga nas curvas do circuito hidráulico 48
Quadro 4.34 – Modo Geração, perdas de carga e queda útil 48
Quadro 4.35 – Modo Geração, cota geométrica (z), altura piezométrica (P/γ), altura cinética ($U^2/2g$), carga total (H) 49
Quadro 4.36 – Modo Bombagem, perdas de carga e altura manométrica de elevação 49
Quadro 4.37 – Modo Bombagem, cota geométrica (z), altura piezométrica (P/γ), altura cinética ($U^2/2g$), carga total (H) 50
Quadro 4.38 – Resumo das caracteristicas da turbina Voith e das duas bombas Sulzer 53
Quadro 6.1 – Cenários estudados 65
Quadro 6.2 – Número de meses por ano de funcionamento do parque eólico, de acordo com as condições A, B e C para os cenários C1, C2 e C3 66
Quadro 6.3 – Valores anuais de consumo ($C_{ONS}{}^a$) e produção eólica ($E_{EOL}{}^a$) para os cenários C1, C2 e C3 66
Quadro 6.4 – Número de meses por ano que a UC e a HID operam, produção anual de energia na UC e na HID ($E_{UC}{}^a$ e $E_{HID}{}^a$, respetivamente) e valor da produção de ponta na UC (P_{UC}) 67
Quadro 6.5 – Energia eólica anualmente armazenada ($EA_{HID}{}^a$) e não armazenada ($EA_{HID}{}^a$) na albufeira sob a forma de energia potencial 71

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Tecnologias de armazenamento e eficiências associadas. Adaptado de IEA (2005) 2

Figura 1.2 – Energia elétrica consumida em Portugal continental e regiões autónomas entre 1999 e 2015 (APREN, 2016a) 3

Figura 1.3 – Balanço da produção de eletricidade e de trocas internacionais de Portugal continental (APREN,2016b) 3

Figura 1.4 – Localização dos parques eólicos em Portugal continental, 2016 (EEP, 2016) 4

Figura 2.1 – Plano do Alqueva I e II (RAMOS et al., 2014) 7

Figura 2.2 – Esquema do sistema WHPS em Ikaria (PAPAEFTHYMIOU et al. 2010) 8

Figura 2.3 – a) Esquema do sistema WHPS; b) Albufeira artificial em caldeira vulcânica (IHA, 2015) . 9

Figura 2.4 – Esquema do sistema WHPS em La Aldea, ilha Gran Canaria (PORTERO et al., 2015) . 10

Figura 3.1 – Localização do aproveitamento hidroelétrico-eólico (carta militar 142) 11

Figura 3.2 – Excerto da carta militar 142 com a localização do corpo da barragem e as três opções de traçado da conduta forçada 12

Figura 3.3 – Esquema conceptual do aproveitamento hidroelétrico-eólico 13

Figura 3.4 – Classificação dos cursos de água segundo Horton-Strahler 14

Figura 3.5 – Área de influencia dos 27 postos udográficos analisados por BRANDÃO *et al.,* (2001), retirado e adaptado de PORTELA (2007) 17

Figura 3.6 – Escoamento média anual (H) em Portugal continental. Retirado e adaptado da plataforma do SNIRH 20

Figura 3.7 – Estações meteorológicas e casos de estudo considerados em MARTINS (2016). Adaptado de MARTINS (2016) 24

Figura 4.1 – Soleira espessa do tipo WES com paramento vertical a montante. Geometria em função da carga de dimensionamento H_0 in CORPS OF ENGINEERS WES. Retirado de QUINTELA (1992) 28

Figura 4.2 – a) Trajetória do escoamento sobre a barragem retirado de VISCHER & HAGER (1998); b) Escoamento sobre o salto esqui. Retirado de VISCHER & HAGER (1995) 30

Figura 4.3 – Ábaco que relaciona o rácio αb /βb com o raio relativo Rb/tb em função da curvatura do salto esqui β_b. Retirado de VISCHER & HAGER (1998) 31

Figura 4.4 – Descarregador de cheias, canal convergente sobre o corpo da barragem e salto de esqui, a) Perfil; b) Alçado principal 33

Figura 4.5 – Produção de sedimentos em Portugal Continental. Adaptado de ROCHA (1998) 35

Figura 4.6 – Barras da grelha, adaptado de PINHEIRO (2006a) 39

Figura 4.7 – Vista em planta da tomada de água na albufeira, pormenor: ranhura das comportas. ... 45

Figura 4.8 – Bifurcação com $\theta=80^{o}$ 46

Figura 4.9 – a) Perdas de cargas localizadas em alargamentos e b) estreitamentos troncocónicos (Corps of Engineers, WES). Retirado de QUINTELA (1996) 47

Figura 4.10 – a) Planta da central hidroelétrica e de bombagem junto ao rio Douro b) Implantação da turbina 52

Figura 5.1 – Esquema alusivo à topologia do aproveitamento hidroelétrico-eólico com bombagem ... 54

Figura 5.2 – Subrotina CotaVolume com base na curva de volume armazenados 59

Figura 5.3 – Subrotina da curva de vazão do descarregador de cheia 59

Figura 5.4 – Fluxograma do modelo operacional do aproveitamento hidroelétrico-eólico (Parte 1) 60

Figura 6.1 – Séries anuais de produção de energia na UC (UC_i) em seis dos oito subcenários estudados 68

Figura 6.2 – Séries anuais de energia éolica armazenada (valores positivos) e produzida na HID (valores negativos) (E_{HIDi}) em seis dos oito subcenários estudados 69

Figura 6.3 – Percentagens anuais de energia produzida segundo as três fontes geradoras (hidroelétrica, eólica, UC) em seis dos oito cenários estudados 70

Figura 6.4 – Variação anual do nível na albufeira (N_i) em seis dos oito cenários estudados 73

Lista de Gráficos

Gráfico 3.1 – Curva hipsométrica da bacia hidrográfica 15

Gráfico 3.2 – Curva de volumes armazenados 16

Gráfico 3.3 – Curva de áreas inundáveis 16

Gráfico 3.4 – Curva duração média anual Vale do Trevo (08O/01H) 21

Gráfico 3.5 – Série cronológica dos caudais médios diários na bacia hidrográfica apurados a partir dos registos da estação hidrométrica de Vale do Trevo (08O/01H) 21

Gráfico 3.6 – Curva duração média anual bacia hidrográfica 21

Gráfico 3.7 – Série anual representativa dos caudais médios diários afetos à bacia hidrográfica (Qnat) 22

Gráfico 4.1 – Curva de vazão do descarregador de cheias 28

Gráfico 5.1 – Série anual de produção eólica duma turbina (P_{EOL}= 2,05 MW) 56

Gráfico 5.2 – Série anual adimensionalizada do consumo de energia 56

Gráfico 5.3 – Série temporal da variação do nível de água na albufeira (N_i) 62

Gráfico 5.4 – Séries temporais de produção eólica (E_{EOLi}) e consumo (C_{ONSi}) 62

Gráfico 5.5 – Série temporal Z, resultante da diferença, hora a hora, entre a série de produção eólica e de consumo, potência mínima que a turbina é capaz de gerar (Ptmin) e potência mímima a que a bomba opera (Pbmin) 63

Gráfico 5.6 – a); b) Série temporal de energia armazenada (valores positivos) e produzida (valores negativos) pela HID; c) Série temporal de produção de energia na UC. 63

Lista de Símbolos e Acrónimos

A	Área (m^2)
ALB	Albufeira
B	Largura da abertura do descarregador de cheias (m)
Bfinal	Largura do salto esqui (m)
C	Coeficiente de escoamento superficial / Coeficiente que depende do ângulo de aproximação do escoamento ao plano da entrada da tomada de água (-)
$C_{EOL}{}^{a}$	Parcela do consumo diretamente abastecida pelo parque eólico (GWh)
Cf	Coeficiente de ajusto (-)
$C_{FALTA}{}^{a}$	Parcela do consumo anual que o parque eólico não consegue satisfazer (GWh)
C_{FUNDO}	Cota de soleira da descarga de fundo (m)
$C_{ONS}{}^{a}$	Consumo anual (GWh)
C_{ONSi}	Série de consumo anual (MW)
C_P	Pico de consumo (MW)
C_{TOMAD}	Cota de soleira da tomada de água na albufeira (m)
CV	Curva de vazão
C_v	Coeficiente de vazão do descarregador de cheias / coeficiente de vazão da válvula da descarga de fundo (-)
$C_{valvula}$	Cota do eixo da válvula do descarregador de fundo (m)
D	Diâmetro (m)
$EA_{HID}{}^{a}$	Energia eólica anualmente armazenada na albufeira sob a forma de energia potencial (GWh)
Eb	Energia consumida pela bombagem (MWh)
$E_{EOL}{}^{a}$	Energia anual produzida pelo parque eólico (GWh)
E_{EOLi}	Série de produção anual eólica (MW)
$E_{HID}{}^{a}$	Energia anualmente produzida pela central hidroelétrica e de bombagem (GWh)
E_{HIDi}	Série anual de armazenamento/produção hidroelétrica (MW)
ENA_{HID}	Série de energia eólica não armazenada (MW)
$ENA_{HID}{}^{a}$	Energia eólica anualmente não armazenada na albufeira (GWh)
Et	Energia gerada pela turbina (MWh)
$E_{UC}{}^{a}$	Energia anual produzida da UC (GWh)
E_{UCi}	Série de produção anual da unidade convencional (MW)

EV	Evaporação mensal (mm/mês)
EVTp	Evapotranspiração potencial mensal (mm/mês)
EVTp’	Evapotranspiração potencial num dado mês (mm/mês)
Fr	Número de Froude (-)
I	Intensidade de precipitação (mm/h)
IDF	Curva Intensidade-Duração-Frequência
I_T	Índice térmico anual (-)
J	Perda de carga unitária de Manning-Strickler (m/m)
H	Carga hidráulica (m)
H_u	Queda útil do sistema de geração (m)
H_m	Altura manométrica de elevação do sistema de bombagem (m)
$\bar{H}$	Escoamento médio (mm)
HID	Central hidroelétrica e de bombagem
HPS	Hydro-Pumped Storage
ΔH	Perda de carga (m)
H_0	Carga hidráulica imediatamente a montante do descarregador (m)
K	Coeficiente de perda de carga singular (-)
Ks	Coeficiente da fórmula de Manning-Strickler ($m^{1/3}. s^{-1}$)
L	Comprimento duma conduta/curso de água [L]
L_{CANAL}	Largura do canal do descarregador de cheias (m)
M	Valor marginal definido como o volume entre o NPA e o nível 10 cm abaixo do nível de NPA (m^3)
N_i	Série da variação anual do nível na albufeira (m)
Nfinal	Nível da água na albufeira no final do ano de exploração (m)
NMC	Nível máximo de cheia (m)
Nme	Nível mínimo de exploração (m)
NMorto	Nível respeitante ao volume morto (m)
NPA	Nível pleno de armazenamento (m)
NPSH	Carga absoluta útil na aspiração (m)
P	Potência (MW) / Perímetro [L]
Pb_i	Série da potência consumida pela bombagem que origina Qb_i (MW)
Pbmax	Potência instalada no sistema de bombagem (MW)
Pbmin	Potência mínima consumida pelo sistema de bombagem (MW)

PE	Curva em perfil
P_{EOL}	Potência instalada num parque eólico (MW)
PL	Curva em planta
Pt_i	Série da potência resultante de turbinar Qt_i (MW)
Ptmax	Potência hidroelétrica instalada (MW)
Ptmin	Potência mínima produzida pela hidroelétrica (MW)
P_{UC}	Produção de ponta na unidade convencional (MW)
Q	Caudal (m^3/s)
Qb_i	Série de caudal bombado (m^3/s);
$Qdesc_i$	Série de caudal descarregado (m^3/s);
$Qeco_i$	Série de caudal ecológico (m^3/s)
$Qesc_i$	Série de caudal em regime natural (m^3/s)
$Qevap_i$	Série de caudal evaporado (m^3/s)
Qmod	Caudal modular (m^3/s)
Qt_i	Série de caudal turbinado (m^3/s);
Q_0	Caudal de ponta de cheia (m^3/s)
R	Raio (m)
R_b	Raio curvatura do sato esqui (m)
S	Submergência mínima (m)
S_e	Produção de sedimentos ($ton/km^2/ano$)
$S_{ed\ t}$	Produção de sedimentos na albufeira durante t anos (ton/km^2)
Sm	Declive médio do curso principal duma bacia hidrográfica (%)
T	Temperatura (ºC) / Tempo de retorno (anos)
U	Velocidade média da secção (m/s)
UC	Unidade convencional a diesel
USBR	Units States Bareau of Reclamation
V	Volume (m^3)
V_i	Série da variação anual do volume na albufeira (m^3);
VMorto	Volume morto (m^3)
VNPA	Volume lido na curva de vazão que corresponde a um dado NPA (m^3)
WES	Waterways Experiment Station

WHPS	Wind-Hydro-Pumped Storage
Z	Série resultante da diferença entre E_{EOLi} e C_{ONSi} (MW)
a	Expoente do método de Thornthwaite (-)
f	Fator corretivo (-) / folga (m)
g	Aceleração gravítica (m^2/s)
h	Altura (m)
h_{muro}	Altura dos muros guias (m)
hm	Altura média da bacia hidrográfica (m)
hs	Altura de aspiração (m)
hs_{max}	Altura máxima de aspiração (m)
i	Índice de tempo (-)
n	Velocidade de rotação (rpm)
patm	Pressão atmosférica (Pa)
q	Caudal por largura ($m^3/s/m$)
t	Altura escoamento / espessura duma conduta de aço (m)
tc	Tempo de concentração (min)
t_v	Tensão de saturação do vapor de água (Pa)
v	Velocidade (m/s)
z	Cota (m)
zmin	Altitude na secção de referência (m)
zmed	Altitude média da bacia hidrográfica (m)

Alfabeto Grego

α	Ângulo (º) / Coeficiente de Coriolis (-)
α_b	Ângulo terminal da curvatura do salto esqui (º)
α_j	Ângulo do jato (º)
α_0	Ângulo que o paramento de jusante da barragem faz com a horizontal (º)
β_b	Curvatura do salto esqui
ϒ	Peso volúmico (kg/m^3);
η	Rendimento (-)
θ	Ângulo (º)
ρ	Massa volúmica (kg/m^3)

1 Introdução

1.1 Enquadramento do Tema

Na década de 1970, assistiu-se a uma crise nos combustíveis fósseis devido ao aumento vertiginoso nos preços do barril de petróleo, consequência de guerras e revoluções a decorrer nos países exportadores. As maiores indústrias do mundo foram obrigadas a conter as produções devido aos problemas no abastecimento de combustíveis fósseis, tendo este acontecimento levado à estagnação económica de muitos países. Consequentemente com o crescimento da população e o alargamento da rede de elétrica, materializou-se a ideia da independência energética dos combustíveis fósseis, como um ponto chave no desenvolvimento económico de um país, reforçando-se assim o investimento nas centrais hidroelétricas e nos geradores eólicos ainda pouco desenvolvidos até à data, quando comparados com o desenvolvimento das centrais hidroelétricas que datam do século XIX. No entanto, foi preciso mais 10 anos para que a questão da utilização de energias renováveis espelhasse as preocupações ambientais, que hoje fazem parte duma visão de sustentabilidade (HAU, 2013).

Neste sentido, em 1997 foi assinado Protocolo de Quioto, sendo este o primeiro tratado jurídico internacional que pretende limitar as emissões quantificadas de gases com efeito de estufa dos países desenvolvidos com o intuito de reduzir o aquecimento global e, principalmente, reduzir o consumo de combustíveis fosseis, através da promoção de novas estratégias energéticas que passam pelo incentivo à exploração de fontes de energia renováveis.

Atualmente, as tecnologias utilizadas nas centrais hidroelétricas, de biomassa e geotérmica são tecnologias largamente exploradas e altamente maduras, quando comparado com as emergentes fontes de energia renovável, como é o caso da energia solar, eólica e das marés.

O rápido crescimento verificado nos últimos anos no campo das eólica a par com a diminuição dos custos associados a estas, fazem da energia eólica a fonte de energia renovável emergente com maior importância num horizonte temporal próximo. Devido ao ciclo natural do recurso, a geração eólica levanta problemas relativos à intermitência de energia entregue à rede. Problemas estes que podem ser mitigados através: da integração em rede; da distribuição geográfica dos geradores eólios; da aplicação de métodos específicos de agregação dos geradores; ou do melhoramento das técnicas de previsão que permitem melhorar a previsão da produção eólica, reduzindo por consequência os elementos imprevisíveis na flutuação natural do recurso, mas que no entanto não conseguem dar resposta à imprevisibilidade residual nem à variabilidade genérica (que inclui os períodos onde não existe vento para produzir energia) (IEA, 2005).

Numa rede isolada, como é o caso das ilhas, não é possível fazer trocas de energia com o exterior. É neste âmbito que o conceito de armazenamento de energia toma uma importância acrescida no equilíbrio entre a produção eólica e o consumo.

De entre outras formas de armazenamento, apresentam-se o(s)/as:

- Armazenamento por bombagem;
- Armazenamento de ar comprimido;
- Volantes de inércia;
- Baterias convencionais.

As centrais hidroelétricas têm um papel importante no equilíbrio da rede elétrica. As vantagens desta tecnologia residem na rapidez de resposta, na grande capacidade de armazenamento (100 MW) (IEA, 2005) e nos custos operacionais relativamente baixos. De um modo genérico, as unidades de produção hidroelétricas com armazenamento por bombagem visam a acumulação de energia em forma de energia potencial, passível de ser turbinada, gerando energia quando requerido.

O armazenamento de ar comprimido possui uma capacidade de armazenamento que ronda os 50 MW (IEA, 2005), e é feito, tipicamente, numa estrutura geológica subterrânea, nomeadamente em minas de carvão desmanteladas ou cavernas salinas. O objetivo é acumular energia sob a forma de ar comprimido em períodos de baixos consumos e libertá-la em períodos de grande consumo. Por oposição ao armazenamento em larga escala, encontram-se os volantes de inércia e alguns tipos de baterias direcionados para dar resposta a flutuações de curto prazo (menos de 1 min). Estas formas de armazenamento promovem a minimização dos problemas relacionados com a qualidade da energia entregue à rede, no entanto, são conhecidas pela sua diminuta capacidade de armazenamento, cerca de 1 kW, característica esta, também comum às baterias convencionais.

Em todas as tecnologias apresentadas, durante a conversão de energia de um tipo para o outro, existem perdas de energia inerente ao processo. A eficiência deste processo e a capacidade de armazenamento de cada tecnologia, apresentada anteriormente, encontram-se descriminada na Figura 1.1 (IEA, 2005).

Tecnologia	**Eficiência – ciclo (%)**	**Típica Capacidade**
Armazenamento por bombagem	~80	>100 MW - >1000 MW
Armazenamento de ar comprimido	~75	>50 MW - >100 MW
Volantes de inércia	~90	>1 MW - > 50 MW
Baterias convencionais	~50 - ~90	>1 MW - >10 MW

Figura 1.1 – Tecnologias de armazenamento e eficiências associadas. Adaptado de IEA (2005)

1.2 Energias Eólica e Hidroelétrica em Portugal Continental

Fruto da assinatura do protocolo de Quioto (1997) e das constantes metas provenientes da legislação comunitária (Diretiva 2009/28/CE), Portugal tem concentrado a sua estratégia energética nas energias renováveis. Segundo os dados da Associação Portuguesa de Energias Renováveis (APREN), (Figura 1.2) a produção de energia renovável, nos últimos anos, tem ganho terreno face ao saldo de energia importada e à produção de energia nas centrais térmicas (APREN, 2016a).

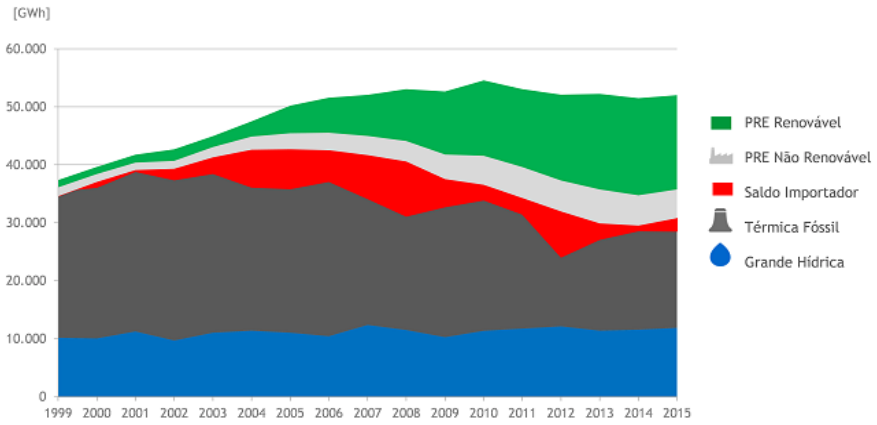


Figura 1.2 – Energia elétrica consumida em Portugal continental e regiões autónomas entre 1999 e 2015 (APREN, 2016a)

Observando a Figura 1.3 a eletricidade gerada no ano de 2016, via energia renováveis, foi quantificada em 32 TWh (centrais hidroelétricas responsáveis por 16,6 TWh e a as eólicas 12,2 TWh), valor este superior aos quase 24 TWh de origem fóssil. No que diz respeito ao saldo de energia importado e exportado, verifica-se um balanço positivo de 4,1 TWh que constitui uma inversão das tendências, face aos últimos anos. Neste mesmo ano, a eletricidade de origem renovável foi suficiente, por si só, na supressão das necessidades energéticas do continente durante 11130 horas ou seja 1,5 meses. (APREN, 2016b).

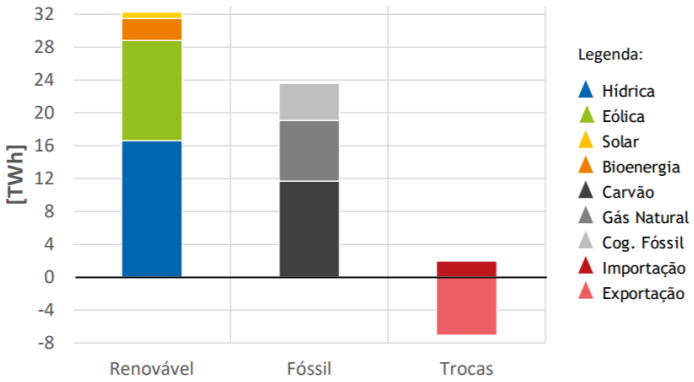


Figura 1.3 – Balanço da produção de eletricidade e de trocas internacionais de Portugal continental (APREN,2016b)

Segundo TROEN & PETERSON (1989), apesar do potencial eólico em Portugal continental, quando comparado com as regiões do norte da Europa, em particular a Escócia e o litoral da Irlanda e parte da Dinamarca, ser inferior, a exploração deste tipo de energia renovável é considerada viável. Em termos geográficos, segundo a APREN, as zonas mais favorecidas com recurso eólico são o litoral oeste, a zona centro e as regiões do interior norte como se pode observar pela dispersão dos parques eólicos em Portugal continental no final do ano de 2016, na Figura 1.4.

No ano 2000 a potência eólica instalada em Portugal continental não ultrapassava os 250 MW tendo atingido em 2016, os 5239 MW. Face a 2015, o ano de 2016 trouxe um acréscimo, no sector das

eólicas, de 236 MW instalados, dos quais 146 MW correspondem ao parque eólico do Douro Sul, no distrito de Viseu (APREN, 2016b; E2P, 2015).

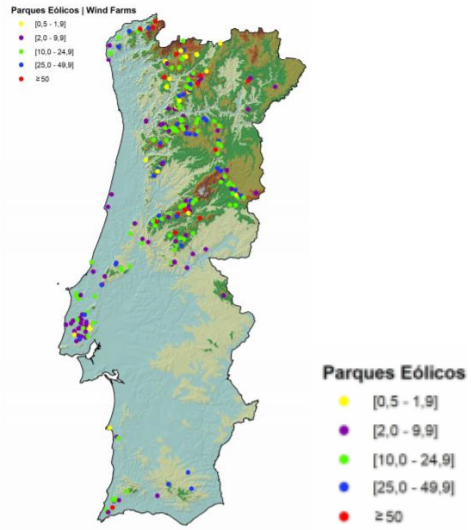


Figura 1.4 – Localização dos parques eólicos em Portugal continental, 2016 (EEP, 2016)

Por oposição ao sector das eólicas, as centrais hidroelétricas estão extremamente enraizadas em Portugal. A primeira central hidroelétrica entrou em funcionamento em 1894, no rio Corgo, junto a Vila Real, com uma potência instalada de 160 HP (117,7 kW). A partir de 1950, iniciou-se a construção das grandes centrais hidroelétricas, entre elas, Venda Nova, Castelo do Bode, Cabril, Picote e Miranda, que surgiram na sequência do processo de eletrificação, que o país tinha vindo a desenvolver nas últimas décadas (REN, 2002). Atualmente verifica-se que as alterações que têm sido feitas incidiram, principalmente, no reforço de potência das hidroelétricas existentes. Em 2015 a potência instalada em Portugal em termos das hidroelétricas era cerca de 5 420 MW (APREN, 2016c), tendo em 2016 entrado em funcionamento o projeto do Baixo Sabor (189 MW) que inclui um sistema de armazenamento por bombagem. Já em 2017, entrarão em funcionamento mais dois aproveitamentos do mesmo tipo, a hidroelétrica da Foz Tua (270 MW) e o reforço de potência da Venda Nova III (2x390 MW) (EDP, 2017).

A Quadro 1.1 resume, para cada sector (eólica e hídrica), a potência instalada acumulada, o número de habitantes que este valor de potência é capaz de abastecer e as emissões de CO_2 que, por consequência, serão evitadas.

Quadro 1.1 – Potência instalada acumulada, habitantes abastecidos e emissões de CO_2 evitadas – Portugal Continental, final de 2016. Adaptado de APREN (2016c)

Tipo Geração (2015)	Potencia instalada acumulada (MW)	Habitantes abastecidos (-)	Emissões evitadas (CO_2) (ton)
Eólica	4937	8867900	4109619
Hídrica	5420	6926410	3209881

1.3 Objetivos e Organização da Dissertação

O objetivo geral da presente dissertação é a conceção ao nível preliminar de um aproveitamento combinado hidroelétrico-eólico de produção de energia com armazenamento por bombagem. A conceção compreende unicamente a componente hídrica, tendo sido os dados do parque eólico fictício fornecidos pelo Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG).

Os objetivos parciais são os seguintes:

- Análise de exemplos de projetos com armazenamento por bombagem já existentes;
- Descrição do caso de estudo e escolha do local para implantação da obra;
- Realização de estudos hidrológicos para o local da barragem;
- Pré-dimensionamento da barragem e órgão anexos, do circuito hidráulico e da central hidroelétrica e de bombagem;
- Desenvolvimento dum modelo computacional para simulação da exploração do aproveitamento combinado;
- Exploração do modelo para diferentes cenários e análise dos resultados.

A dissertação encontra-se estruturada em 8 capítulos:

No Capítulo 2, apresentam-se quatro exemplos de aproveitamentos hidroelétricos que utilizam um sistema de armazenamento por bombagem, três deles a par com exploração eólica e um aproveitamento hidroelétrico com armazenamento por bombagem em território português.

No Capítulo 3, elabora-se uma breve descrição do caso de estudo, descrevem-se os critérios tidos em conta na implantação da barragem, caracterização em termos fisiográficos, da bacia hidrográfica, e apresentam-se os estudos hidrológicos elaborados no sentido de: apurar o caudal de ponta de cheia gerado na bacia hidrográfica, caracterizar o regime natural de escoamentos; quantificar o fenómeno da evaporação associada à albufeira; e estipular uma série de caudais ecológicos.

No Capítulo 5, procede-se: à caracterização e pré-dimensionamento dos órgãos da barragem, nomeadamente do descarregador de cheias, da descarga de fundo e das tomadas de água; à conceção do circuito hidráulico; e à implantação da central hidroelétrica e de bombagem.

No Capítulo 6 define-se o modelo de exploração do aproveitamento hidroelétrico-eólico e no Capítulo 7 faz-se a análise dos resultados dos diferentes cenários simulados no modelo.

Este estudo é composto pelo presente relatório e pelas peças desenhadas expostas no Anexo E.

2 Exemplo de Projetos com Armazenamento por Bombagem

2.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentados quatro projetos. O primeiro descreve um sistema exclusivamente pensado para armazenamento por bombagem, em Portugal continental, daqui em diante designado HPS (Hydro-Pumped Storage), os restantes três compreendem um sistema de armazenamento por bombagem associado a um parque eólico, designado WHPS (Wind-Hydro-Pumped Storage), localizados na ilha grega de Icária e no arquipélago das Canárias.

2.2 Alqueva II

Em Portugal continental esteve em curso a amplificação do projeto Alqueva, designado Alqueva II, que pretende tirar partido das duas albufeiras, implantadas no rio Guadiana, a albufeira do Alqueva com uma capacidade de 4150 hm^3, e a do Pedrogão com 72 hm^3, através da instalação duma segunda central hidroelétrica com duas turbinas Francis reversíveis com uma potência total instalada de 260 MW. Com o objetivo de regular a rede elétrica, a central é responsável por armazenar energia em períodos de baixo consumo e produzir energia quando existe consumos de ponta. Considerando que o Alqueva I regula o caudal afluente, a hidroelétrica do Alqueva II funciona no ciclo puramente reversível que bomba o mesmo volume de água turbinado. O volume usado neste processo depende, do nível da água no reservatório a montante (Alqueva), do mês do ano, do caudal afluente e das tarifas energéticas.

Através das simulações levadas a cabo, considerou-se que em média a queda a que o Alqueva II opera é cerca de 64,5 m, que se traduz num nível médio na albufeira do Alqueva de 147 m e num nível da água na albufeira do Pedrogão de 82,5 m equivalente a metade da capacidade de armazenamento. Para a queda em questão, cada turbina é capaz de processar um caudal de 192 m^3/s em modo geração (Qt) e 162 m^3/s em modo bombagem (Qb) que corresponde a um rácio Qt/Qb=1,19.

A política de exploração apresentada dá enfase à necessidade de armazenamento em períodos de baixo consumo como o caso do fim-de-semana e 2ª feira de manhã (ao todo, 33 hora em bombagem e 4 horas em turbinagem), que levam ao esvaziamento do Pedrogão durante esse mesmo período. Ao longo da semana a albufeira do Pedrógão vai enchendo gradualmente (8 horas a turbinar e 6 horas a bombar por dia) até atingir à meia noite de 6ª feira o nível de pleno armazenamento.

A instalação do Alqueva II padece de limitações em termos de geração elétrica, consequência da capacidade de armazenamento limitado do Pedrógão, que impedem o aumento de potência instalada no Alqueva II. O possível aumento de potência passaria, então, pela ampliação da capacidade da albufeira do Pedrogão, por forma a bombar e turbinar maiores volumes de água (RAMOS et al., 2014)

RAMOS et al., 2014, concluíram que o caso de estudo apresenta várias vantagens como por exemplo, a capacidade de gerar lucro, a possibilidade de armazenar energia e compensar as flutuações de energia entregue à rede e a flexibilidade e rapidez de arranque. Esta amplificação contribui por ano com cerca de 381 GWh, que corresponde a 4% da energia hidroelétrica produzida em Portugal, o suficiente para satisfazer o conjunto dos consumos dos concelhos de Évora, Beja, Portel, Moura e Vidigueira (EDP, 2013).

A Figura 2.1 apresenta o esquema em planta das centrais hidroelétricas I e II do Alqueva, descriminando os elementos que as constituem.

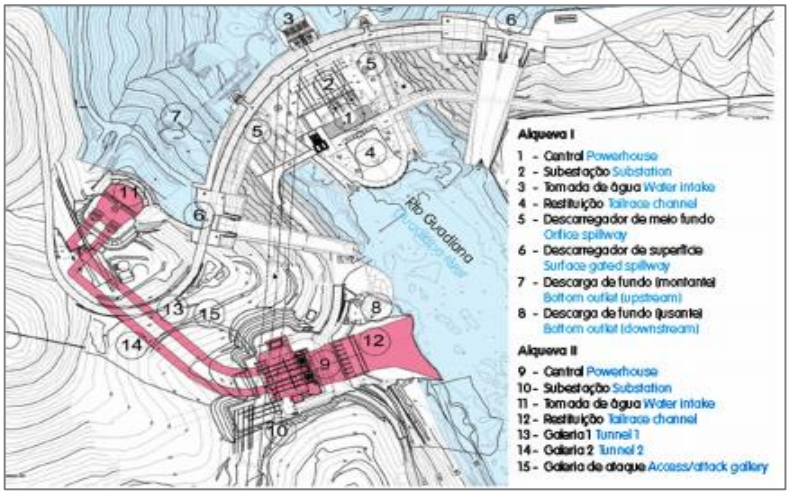


Figura 2.1 – Plano do Alqueva I e II (RAMOS et al., 2014)

2.3 Ilha grega de Icária

A uma menor escala comparado com o empreendimento do Alqueva I e II, PAPAEFTHYMIOU *et al.* (2010), para o caso da ilha grega de Icária, propõem a implantação de um sistema HPS por forma a ultrapassar as limitações inerentes ao parque eólico instalado e a quantificar o nível de penetração de energia eólica na rede.

O sistema WHPS é constituído pelo parque eólico com uma capacidade total instalada de 1835 kW, um reservatório, já existente, em Pezi (V=900 000m^3), atualmente usado para irrigação e abastecimento de água e dois novos reservatórios, o primeiro em Kato Proespera (a montante) e o segundo em Proespera (a jusante) cada um com uma capacidade de armazenamento de 80 000 m^3. Estes últimos, são dedicados exclusivamente a operações de armazenamento por bombagem e estão ligados por duas condutas forçadas de forma a que a bombagem e a geração sejam realizadas em circuitos separados.

As centrais hidroelétricas estão equipadas com turbinas Pelton, duas delas em Kato Proespera (2x1,55 MW) e uma última em Proespera (1x1,05 MW), de modo a ser possível explorar o excesso de água de Kato Proespera e de Pezi, como se pode verificar através da Figura 2.2.

O sistema WHPS, para além do modelo do aproveitamento contempla, ainda, a instalação de painéis fotovoltaicos com uma potência instalada de 1040 kW e uma unidade convencional (APS) a combustível fóssil com 15,85 MW. O consumo de ponta foi estimado em 9 MW com um fator de carga de 42%.

PAPAEFTHYMIOU *et al.* (2010), consideraram sete cenários de exploração, o primeiro abarca o parque eólico excluindo o sistema HPS e os restantes seis contemplam um sistema WHPS segundo três diferentes condições hidrológicas (período seco, médio e húmido) conjugados com dois diferentes regimes de geração eólica. No primeiro cenário verificou-se que o nível de penetração ronda os 17%, ao passo que para os restantes cenários, o nível de penetração varia entre 18% e 36% dependendo das condições hidrológicas e das características do vento, podendo, até, atingir os 50% anualmente. Concluiu-se que o sistema HPS proposto, além de promover a diminuição do consumo de combustíveis fósseis, garante a fiabilidade no abastecimento da ilha, descartando a hipótese da implementação duma nova central térmica, para além da já existente (Figura 2.2).

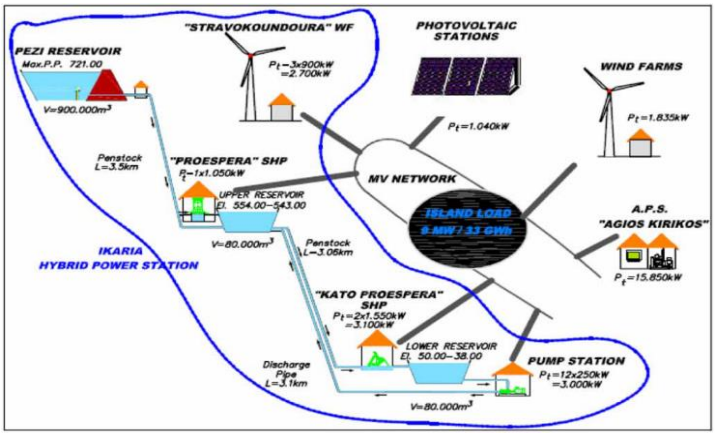


Figura 2.2 – Esquema do sistema WHPS em Ikaria (PAPAEFTHYMIOU et al. 2010)

2.4 Canárias I

Em 2014, entrou em funcionamento o sistema WHPS, composta por cinco aerogeradores com uma potência total instalada de 11,5 MW, suportados por um sistema de armazenamento por bombagem (HPS), que pretende dar resposta a um consumo de ponta de 7,5 MW. O sistema HPS é constituído por duas albufeiras, a primeira a montante situada numa caldeira vulcânica cuja capacidade é de 379 634 m^3, e segunda, artificial, com uma capacidade de armazenamento de 150 000 m^3. As albufeiras estão ligadas por dois sistemas de condutas, com 800 mm (circuito de bombagem) e 1000 mm (circuito de geração) de diâmetro. O circuito de condutas perfaz um total de 3 km, dos quais 330 m são em túnel escavado.

A central hidroelétrica está equipada com quatro turbinas Pelton de 2,83 MW (11,3 MW ao todo), enquanto que a potência total instalada na central de bombagem é de 6 MW, divida por duas bombas de 1,5 MW e seis de 500 KW. A queda bruta associada ao empreendimento ronda os 655 m e o caudal

de projeto é de 2 m^3/s. O aproveitamento WHPS anualmente cobre 30,6 GWh dos 47 GWh de consumo anual da ilha, o que leva a diminuição das emissões de CO_2 seja cerca de 22000 ton por ano.

Para além dos impactos ambientais inerentes a este tipo de empreendimentos, menciona-se ainda a vantagem económica, dado que o preço da energia convencional (0,242 €/kWh) é bastante superior ao preço da energia via produção eólica (0,072 €/kWh) (HYDROWORLD, 2012).

a) b)

Figura 2.3 – a) Esquema do sistema WHPS; b) Albufeira artificial em caldeira vulcânica (IHA, 2015)

2.5 Canárias II

As ilhas canarias são conhecidas pelo forte potencial eólico e solar. Por oposição, o potencial hídrico é diminuto devido às baixas reservas de água doce existentes na ilha. Neste sentido, vários sistemas HPS têm sido propostos que visam, não só, a operarem de acordo com as reservas de água doce disponíveis, mas também com a água salgada previamente dessalinizada. PORTERA et al. (2015), no entanto, propõem a conceção de um sistema HPS, localizado junto à costa da ilha Gran Canária, que pressupõem a utilização direta da água salgada, de modo a promover o aumento da penetração da geração eólica e a regularização da energia eólica entregue à rede elétrica.

Em traços gerais, o aproveitamento hidroelétrico é constituído por um reservatório a montante (V=9 206 278 m^3) ligado a uma conduta forçada, com 1600 mm de diâmetro, que se estende por 2 km até ao mar. A central hidroelétrica, à beira mar, opera de acordo com um caudal de projeto de 7,79 m^3/s e uma queda bruta de 175 m e está equipada com oito turbinas Francis reversíveis, que ao todo perfazem uma potência instalada de 16 MW (Figura 2.4).

Considerando um parque eólico compostos por turbinas de 2,3 MW, PORTERA *et al.* (2015) definem, no artigo, o número de turbinas eólicas a instalar que melhor se ajusta à capacidade da albufeira artificial e à curva anual de consumos do município La Aldea, com 9330 habitantes. O modelo do aproveitamento admite que na eventualidade do parque eólico não conseguir satisfazer o consumo, este último fica a cargo do aproveitamento hidroelétrico e/ou da rede. O excesso de energia eólica que não seja possível acumular, é injetado na rede e consumida fora do município de La Aldea.

PORTERA *et al.* (2015) concluíram que a potência a instalar no parque eólico que melhor se ajusta ao consumo e à capacidade da albufeira seria 20,7 MW, ou seja, nove turbinas eólicas.

A implementação do sistema WHPS traduzir-se-ia num aumento do nível de penetração de energia eólica de cerca de 29% que conduziria, também, a uma poupança de 7,68 M€/ano e a uma redução de 51786,4 ton de CO_2 emitidos para a atmosfera.

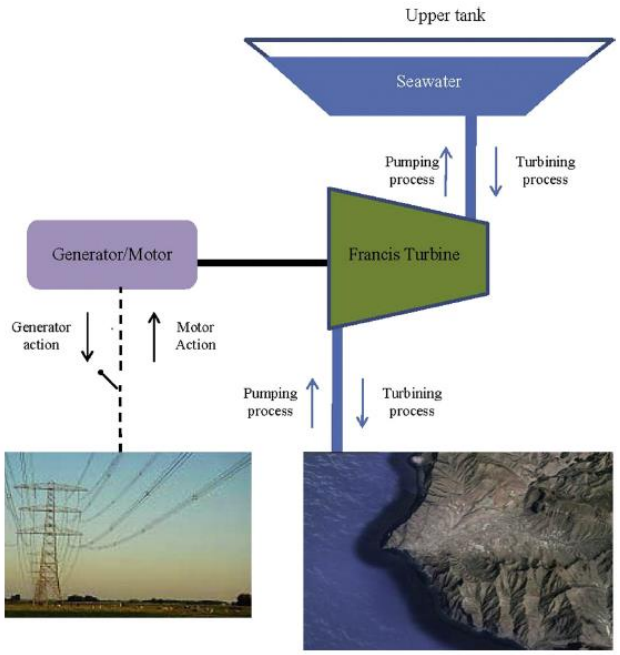


Figura 2.4 – Esquema do sistema WHPS em La Aldea, ilha Gran Canaria (PORTERO et al., 2015)

3 Caso de Estudo

3.1 Localização e Implantação

O local selecionado para a construção do aproveitamento combinado hidroelétrico-eólico, situa-se no concelho Espada à Cinta, distrito de Bragança, em Portugal continental (Figura 3.1). As informações respeitantes à topografia do terreno foram retiradas da carta militar 142 à escala 1:25 000.

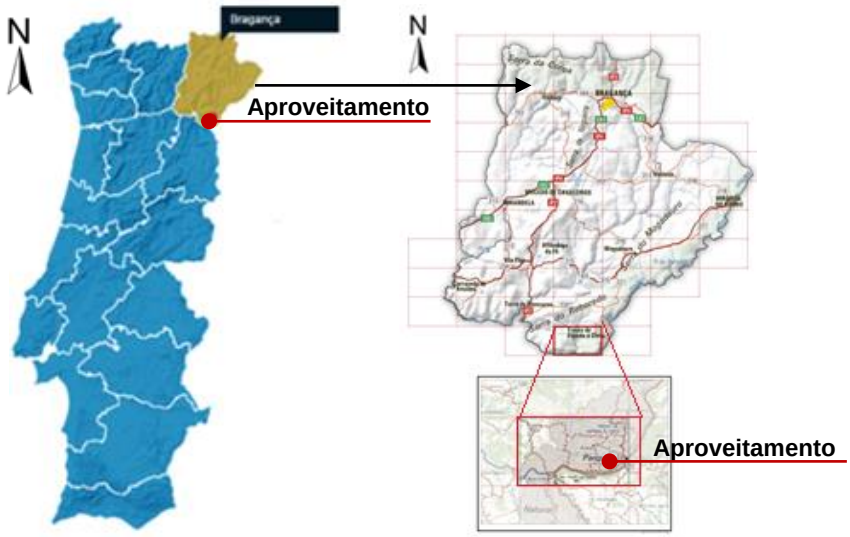


Figura 3.1 – Localização do aproveitamento hidroelétrico-eólico (carta militar 142)

Numa primeira instância, estudou-se na carta militar 142, uma série de possíveis localizações para a albufeira e selecionou-se a localização que melhor cumpre com os seguintes critérios:

- Minimização do comprimento longitudinal do corpo da barragem;
- Minimização da distância entre a futura albufeira e a central hidroelétrica;
- Capacidade de armazenamento da albufeira a dimensionar na ordem dos 1000 000 m^3.

Após a seleção da área reservada à albufeira e a definição do eixo do corpo da barragem, traçaram-se três possíveis eixos para a conduta que ligará a albufeira à central hidroelétrica e de bombagem localizada na margem do rio Douro. De entre as três opções selecionou-se o traçado a), uma vez que, de todos, é o que detém o menor comprimento (Figura 3.3). Em geral, a escolha do traçado da conduta depende de outros fatores como as características geológicas, geotécnicas e consequentemente as escavações geradas, que não foram avaliados no caso de estudo.

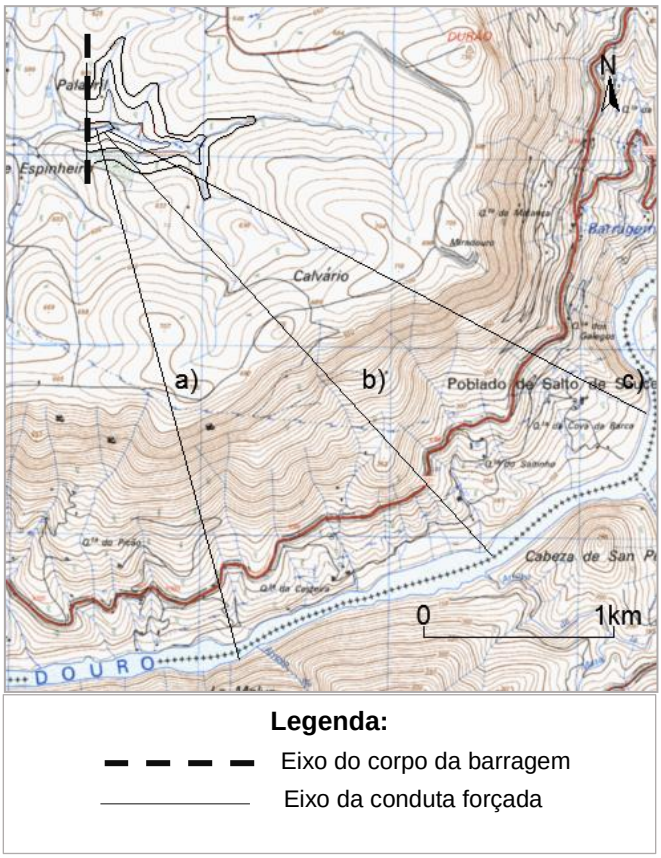


Figura 3.2 – Excerto da carta militar 142 com a localização do corpo da barragem e as três opções de traçado da conduta forçada

3.2 Descrição Geral do Aproveitamento

A produção eólica possui uma variabilidade inerente ao recurso natural, o vento. Esta variabilidade produz uma flutuação da energia entregue à rede, que não se coaduna, por vezes, com o perfil de consumo. Nesse sentido, uma das políticas seguidas em parques eólicos bastante grandes, por vezes, implicam a paragem das turbinas eólicas em fases de excesso de produção, o que se traduz num desperdício de recurso renovável.

A variabilidade do recurso pode-se expressar em diversas escalas temporárias, tais como a uma escala sazonal e a uma escala a nível diário e horário com perfis de produção maioritariamente diurnos ou noturnos dependendo dos locais de instalação do parque eólico.

Neste sentido, a presente dissertação propõe a implementação duma central hidroelétrica associada a um sistema de armazenamento por bombagem capaz de colmatar, em grande parte, a variabilidade da produção dum parque eólica fictício, isto é, de garantir, de grosso modo, o fornecimento de energia à população caso a produção eólica seja inferior ao consumo e armazenar o excedente de energia quando a produção eólica supera o consumo.

Estes tipos de sistemas são compostos, geralmente, por dois reservatórios um a montante e outro a jusante, uma central hidroelétrica e de bombagem (turbina + bomba), e um circuito hidráulico que

conecta os dois reservatórios à central. A albufeira a montante foi concebida, exclusivamente, para a regularização da produção eólica. Em alternativa, fez-se do Rio Douro o "reservatório de jusante", necessário ao aproveitamento. Entre a albufeira e o Rio Douro existem trocas de caudais, em ambos os sentidos consoante a operação a efetuar (bombagem/geração). Caso exista excesso de energia eólica, a bomba começa a operar no sentido, de elevar caudal do rio até à albufeira a montante, caso contrário é dada a ordem para a central entrar em modo de geração, turbinado caudal proveniente da albufeira e produzindo, assim, energia.

Foi ainda incluído uma unidade convencional de apoio capaz de fazer face às restrições inerentes ao aproveitamento hidroelétrico-eólico como: a disponibilidade de água; os limites técnicos de funcionamento das turbomáquinas; e às flutuações imprevistas da produção eólica e do próprio consumo em si.

Para além dos fluxos de caudal bombado e turbinado, a albufeira possui uma dinâmica própria, nomeadamente em termos de caudais efluentes (caudal ecológico, caudal evaporado, caudal descarregado) e afluente (caudal em regime natural) que devem ser contabilizados.

A Figura 3.1 pretende ilustrar o funcionamento do aproveitamento combinado hidroelétrico-eólico.

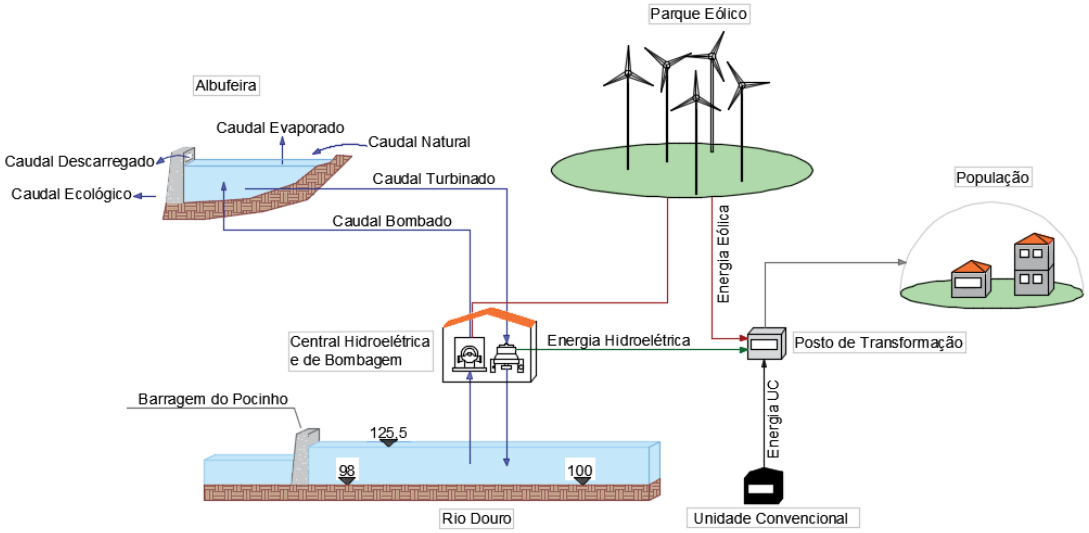


Figura 3.3 – Esquema conceptual do aproveitamento hidroelétrico-eólico

3.3 Estudos Hidrológicos

3.3.1 Considerações gerais

O estudo hidrológico, efetuado na bacia hidrográfica onde se enquadra a albufeira a dimensionar, tem como objetivos o apuramento do caudal de ponta de cheia na secção de referência da bacia, do regime de escoamentos naturais, da série mensal de caudais correspondente ao fenómeno da evaporação e da série mensal de caudais ecológicos que a barragem escoa para jusante.

3.3.2 Características fisiográficas

De acordo com HIPÓLITO & VAZ (2011), as características fisiográficas podem ser agrupadas segundo as características geométricas da bacia, como o tamanho, o relevo, o declive, a orientação e a rede fluvial de drenagem, e as características físicas, como a geologia, o tipo e uso de solos, no qual se inclui o tipo de cobertura vegetal e ocupação humana.

Pretende-se neste capítulo caracterizar a bacia hidrográfica, nomeadamente o seu sistema de drenagem, através da ordenação dos cursos de água, e o relevo, por meio do estabelecimento da curva hipsométrica, da altitude mediana e do declive médio do curso principal de água, bem como estabelecer as curvas de volume armazenado e de áreas inundáveis.

A bacia hidrográfica, delineada a negro na Figura 3.4, ocupa uma área (A_b) de aproximadamente de 3 km^2, sendo o seu perímetro de cerca de 7,9 km. Recorrendo ao critério de ordenação dos cursos de água de Horton-Strahler, classificou-se o curso de água principal como de ordem 3, detentor de 2,1 km de comprimento (L_{cp}) que se desenvolve desde a cota 690 m até à cota 566 m, com uma inclinação média (Sm) de 5,75 %.

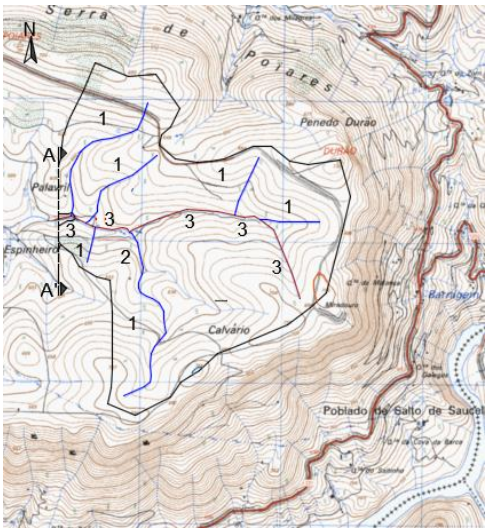


Figura 3.4 – Classificação dos cursos de água segundo Horton-Strahler

A curva Hipsométrica tem como objetivo a representação gráfica do relevo médio da bacia e traduz a variação da área da mesma, em planta, segundo a cota do terreno. A altitude mediana da bacia é obtida através da curva hipsométrica e traduz a altitude a que correspondente 50% da área da bacia. No Gráfico 3.1, observa-se a curva hipsométrica para a bacia em estudo, correspondendo à altitude mediana a cota 651 m.

A altura média da bacia (hm) é a diferença entre a atitude média (zmed) na bacia, calculada com base na equação (3.2) e altitude na secção de referência (zmin), estabelecida à cota 566 m (Gráfico 3.1). Através da equação (3.1) obteve-se uma hm de 81,5 m.

$$hm = zmed - zmin \tag{3.1}$$

$$zmed = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} \bar{z}_i A_i}{A_b} \tag{3.2}$$

$\bar{z}_i$ e A_i, são, respectivamente a altiude média e a área entre duas curvas de nível consecutivas, A_b a área da bacia e n o número de curvas de nível que atravessam a bacia.

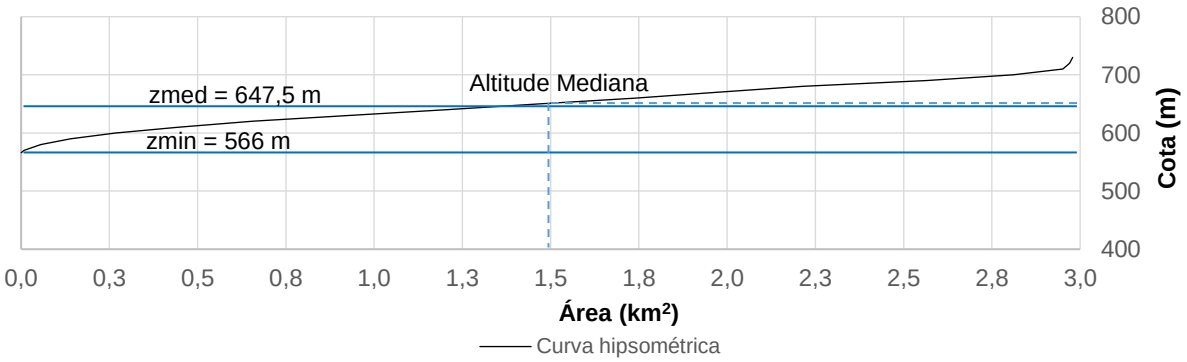


Gráfico 3.1 – Curva hipsométrica da bacia hidrográfica

A curva de volumes armazenados e a curva de áreas inundáveis que caracterizam a albufeira podem ser observadas nos Gráficos 3.2 e 3.3 respetivamente, estando os valores utilizados para a elaboração das mesmas expostos na Quadro 3.1.

Quadro 3.1 – Curva de volumes armazenados e de áreas inundáveis

Cota (m)	Volumes Armazenados (m^3)	Áreas Inundáveis (m^2)
566	0	0
570	11733	8800
580	301331	55900
590	1249652	140100
600	3251800	267100
610	6768653	443700
620	12236908	656900
630	20134788	930600
640	30788082	1206000
650	44135185	1467700

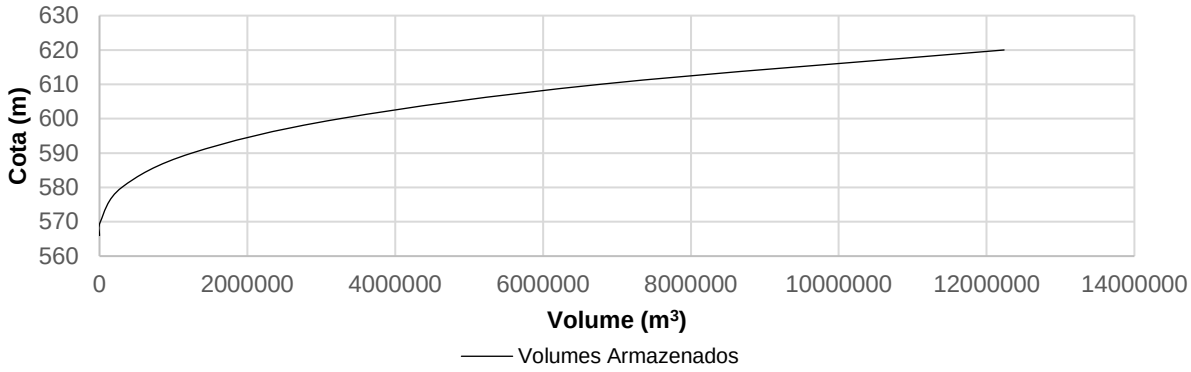


Gráfico 3.2 – Curva de volumes armazenados

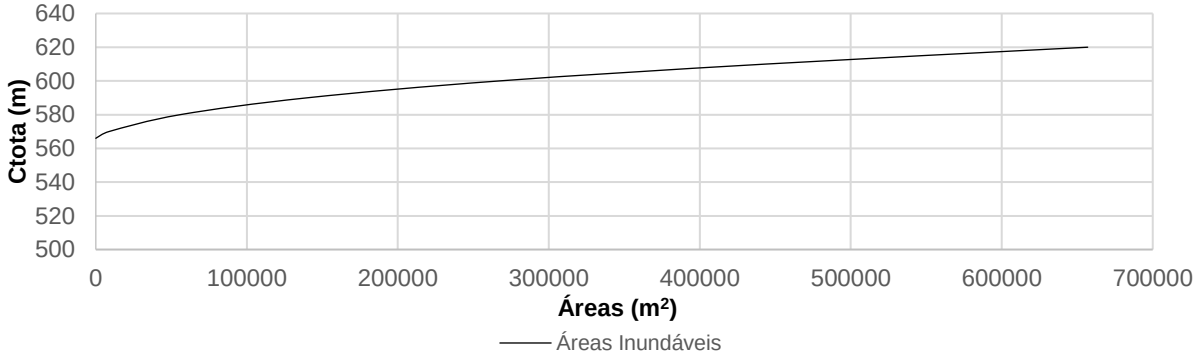


Gráfico 3.3 – Curva de áreas inundáveis

3.3.3 Caudal de ponta de cheia

Através da aplicação da fórmula racional, pretende-se calcular o caudal de ponta de cheia gerado na bacia hidrográfica. Este depende, de entre outros fatores, da intensidade média de precipitação, sendo esta dada pela curva intensidade-duração-frequência (IDF) para uma duração de precipitação igual ao tempo de concentração para um período de retorno T.

De acordo com o Anexo I do Capítulo VI Portaria n.º 847/93 de 10 de Outubro, uma barragem de betão com altura compreendida entre 15 e 50 m possui um risco elevado/significativo e, portanto, o respetivo período de retorno (T) na cheia de projeto deverá ser de 1000 anos.

O tempo de concentração na secção de controlo (secção AA' da Figura 3.4) corresponde ao tempo necessária para que uma gota de água que caia no ponto hidraulicamente mais afastado da bacia chegue à secção de controlo. Após este intervalo de tempo, toda a precipitação que tenha caído sobre a bacia contribui para o escoamento superficial. O tempo de concentração pode ser obtido através das seguintes expressões:

Fórmula de Temez (1978):

$$t_c = 0{,}3\left(\frac{L}{Sm^{0{,}25}}\right)^{0{,}76} \quad (3.3)$$

Fórmula de Giandotti (1953):

$$t_c = \frac{4\sqrt{A} + 1{,}5L}{0{,}8\sqrt{hm}} \tag{3.4}$$

Fórmula de Kirpich (1940):

$$t_c = 0{,}0663 \frac{L^{0{,}77}}{Sm^{0{,}385}} \tag{3.5}$$

sendo:

tc	Tempo de concentração (min)
L	Comprimento do curso de água principal (km)
Sm	Declive médio do curso principal da bacia hidrográfica (-)
hm	Altura média da bacia hidrográfica (m)
A	Área da bacia hidrográfica (km^2)

Através das fórmulas apresentadas em (3.3) (3.4) e (3.5), foram obtidos os tempos de concentração apresentados na Quadro 3.2.

Quadro 3.2 – Tempo de concentração (tc) segundo Temez, Kirpich e Giandotti

tc	Temez	Giandotti	Kirpich
minutos	30	84	22

Figura 3.5 – Área de influencia dos 27 postos udográficos analisados por BRANDÃO *et al.,* (2001), retirado e adaptado de PORTELA (2007)

Brandão *et al*. (2001) estipulou para um conjunto de 27 posto udográficos, em todo o Portugal continental, as correspondentes curvas IDF (ver Figura 3.5), verifica-se que a bacia hidrográfica em estudo, pertence à área de influência do posto udográfico de Miranda do Douro (05T/01).

A intensidade dada pela curva IDF proposta por BRANDÃO *et al*. (2001), para o posto udográfico de Miranda do Douro é descrita de acordo com:

$$I = at^n \tag{3.6}$$

sendo, I a intensidade em mm/h, t a duração da precipitação em minutos e a e n os parâmetros da Quadro 3.3.

Quadro 3.3 – Parâmetros a e n da curva IDF para durações de 0,5 a 6 horas e de 6 a 24 horas, T=1000 anos (05T/01)

Duração entre 0,5 e 6 horas	**a**	**n**
	1747,1	-0,865

A obra de LENCASTRE (1992) propõe a possível aplicação de forma satisfatória da fórmula racional (3.7) no cálculo do caudal de ponta de cheia em bacias hidrográficas com dimensões inferior 25 km^2, validando assim a aplicação desta na bacia hidrográfica onde se insere a albufeira.

$$Q = C_f CIA \tag{3.7}$$

sendo,

- Q Caudal de ponta de cheia (m^3/s)
- C_f Coeficiente de ajuste (-)
- C Coeficiente de escoamento superficial (-)
- I Intensidade de precipitação (mm/h)
- A Área da bacia hidrográfica (km^2)

O coeficiente C está associada às perdas de precipitação relacionadas com a retenção e detenção superficial, a infiltração e armazenamento em leitos. Este coeficiente pode ser assim considerado como um atenuador do efeito dos caudais na bacia e, portanto, extremamente ligado ao tipo de solo, ao seu uso, ao declive da bacia hidrográfica e ao tempo de retorno. O coeficiente C Quadrodo por CHOW *et al*. (1988), no Anexo A, Figura 1, foi estipulado estritamente para períodos de retorno de 10 a 500 anos. Não obstante, o critério de projeto trata-se de T igual a 1000 anos. Seguindo uma abordagem simplificativa, considerou-se o coeficiente C, para um período de retorno de 100 anos e para um solo de cultivo com um declive médio entre 2 e 7%, que multiplicado por um coeficiente de ajuste, C_f, dará origem a um caudal de ponta de cheia para um T de 1000 anos mais realista.

WRIGHT-MCLAUGHLIN (1969) propõem alguns valores para coeficiente de ajuste em função do tempo de retorno que, no entanto, não incluem um valor de C_f para o tempo de retorno igual a 1000 anos (Anexo A, Figura 2). Como tal, adotou-se no presente estudo C_f, respeitante a um T de 100 anos (Quadro 3.4).

Quadro 3.4 – Parâmetros C, Cf e A da fórmula racional

$C_{f\ (T=100)}$ (-)	$C_{(T=100)}$ (-)	A (km^2)
1,25	0,51	3,00

Observando os vários caudais de ponta de cheia da Quadro 3.5 concluiu-se que um menor tempo de concentração contribui para a geração dum caudal de ponta de cheia mais elevado, como seria expectável. Tomando uma postura mais conservativa, adotou-se o caudal de 65 m^3/s, dado pela fórmula de Kirpich, como caudal de ponta de cheia.

Quadro 3.5 – Caudal de ponta cheia para tc segundo Temez Giandotti e Kirpich

	Temez	Giandotti	Kirpich
tc (min)	30,00	84,00	22,00
I (mm/h)	51,97	37,64	122,24
Q (m^3/s)	28,00	20,00	65,00

3.3.4 Série de Escoamento em Regime Natural

Devido à falta de informação referente ao regime diário de escoamento natural na bacia hidrográfica em estudo, aplicou-se uma das equações propostas pelo modelo regional de transposição (3.8) que permite obter esta informação a partir da curva adimensional duma bacia hidrográfica que apresente semelhante escoamento anual ($\overline{H}$) e que esteja geograficamente próxima da bacia em estudo.

Recorrendo à plataforma do SNIRH, recolheu-se, então, o registo dos caudais médios diários da estação hidrométrica de Vale Trevo (08O/01H). Os registos contêm no total 18625 valores de caudais médios diários entre os anos hidrológico de 1957/1958 e 2010/2011.

Observando a Figura 3.6 é possível aferir que tanto Vale do Trevo como a albufeira são caracterizados por alturas de escoamentos semelhantes (entre 301 e 400 mm) e que, portanto, é possível com base na amostra de caudais médios diários de Vale do Trevo, obter uma série de caudais médios diárias, relativos à bacia hidrográfica em estudo, através da seguinte expressão (PORTELA, 2013).

$$Qi_m = \frac{Qi_n}{Qmod_n} Qmod_m \tag{3.8}$$

em que, Qi_m é o caudal médio diário no dia i do curso de água m, Qi_n o caudal médio diário no dia i do curso de água n, $Qmod_m$ o caudal modular do curso de água m e $Qmod_n$ o caudal modular do curso de água n.

O caudal modular da bacia em estudo ($Qmod_m$) é dado pela média dos caudais médios diários ao longo do ano e, portanto, é passível de ser expresso pela seguinte fórmula:

$$Qmod_m = \frac{\overline{H} A_b}{3600 \times 24 \times 365} \tag{3.9}$$

onde, $\overline{H}$ é a altura do escoamento médio e A_b a área da bacia hidrográfica.

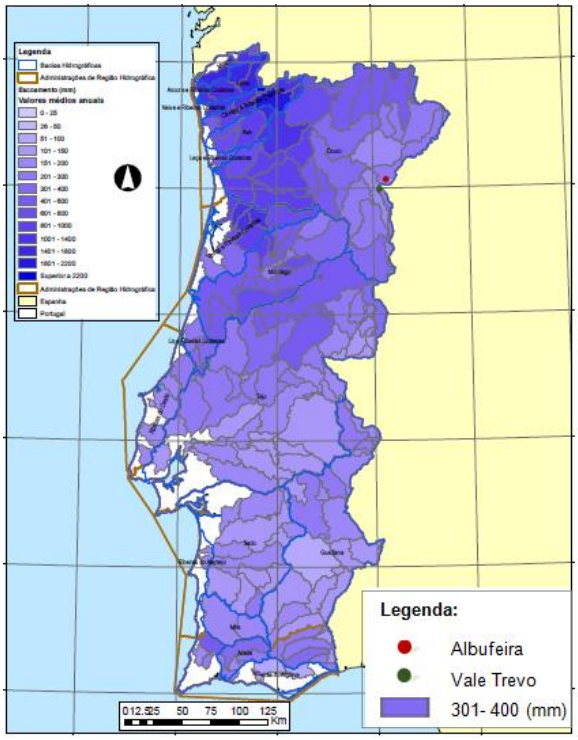


Figura 3.6 – Escoamento média anual ($\overline{H}$) em Portugal continental. Retirado e adaptado da plataforma do SNIRH

A curva de duração média anual da estação de Vale do Trevo (Gráfico 3.4) foi estabelecida por ordenação decrescente da amostra dos caudais médios diários, afetos à estação, e atribuição a cada caudal uma probabilidade de não excedência, F, exprimida numa escala de 365 dias (Quadro 3.6). O coeficiente entre o valor obtido através da integração da anterior curva de duração média anual e o número médio de dias no ano (365 dias), resulta no caudal modular ($Qmod_n$) do posto hidrométrico de Vale do Trevo.

Quadro 3.6 – Curva de duração média anual do caudal médio diário (estação hidrométrica de Vale do Trevo)

Q ordenado (m^3/s)	I (-)	F (i/18625)	Duração (365 x i/18625)
311,00	1	5,369E-05	0,020
231	2	1,074E-04	0,039
130	3	1,611E-04	0,059
89,8	4	2,148E-04	0,078
…	…	…	…
0	18625	1	365

Os valores dos caudais modulares de ambas as bacias e da altura de escoamento na bacia em estudo encontram-se na Quadro 3.7.

uadro 3.7 – Caudal modular da bacia em estudo e do posto de Vale do Trevo

$\overline{H}$ (mm)	A_b (km^2)	$Qmod_m$ (m^3/s)	$Qmod_n$ (m^3/s)
350,50	3,00	0,033	2,62

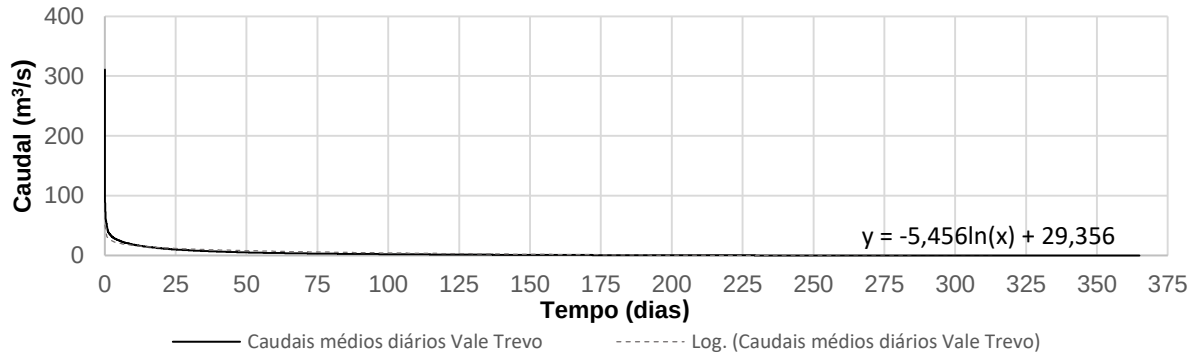


Gráfico 3.4 – Curva duração média anual Vale do Trevo (08O/01H)

O Gráfico 3.5 exibe a série cronológica dos caudais médios diários da bacia hidrográfica que, na sua grande maioria, são aproximadamente de 0,5 m³/s, à exceção de dois eventos extremos de 3,96 e 2,94 m³/s.

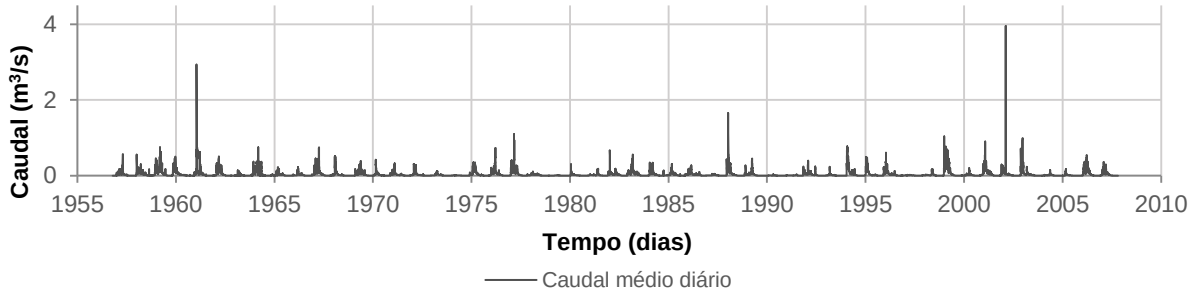


Gráfico 3.5 – Série cronológica dos caudais médios diários na bacia hidrográfica apurados a partir dos registos da estação hidrométrica de Vale do Trevo (08O/01H)

À semelhança do procedimento seguido para o estabelecimento da curva média anual dos caudais médios diários para o posto de Vale do Trevo, elaborou-se a curva duração média anual relativa à bacia hidrográfica em estudo (Gráfico 3.6).

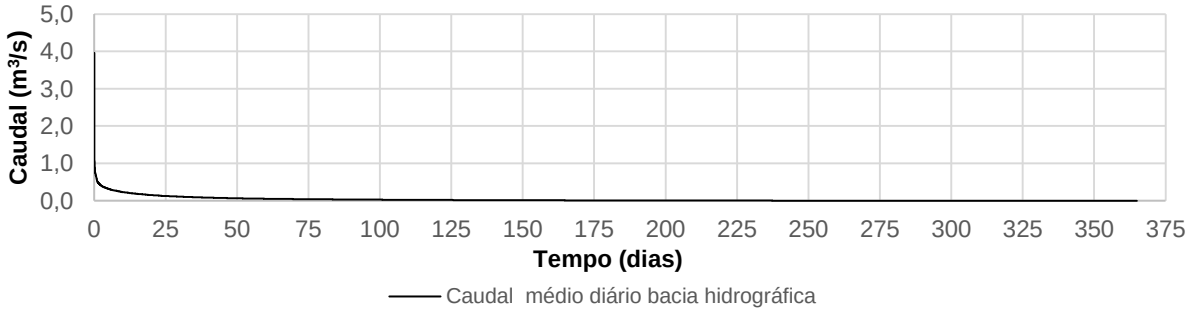


Gráfico 3.6 – Curva duração média anual bacia hidrográfica

Apesar de alguma variabilidade inter-anual inerente ao recurso hídrico, optou-se por utilizar no Capítulo 5 uma série resultante da média diária dos vários anos da amostra, que se assumiu ser representativo de um ano típico (Gráfico 3.7).

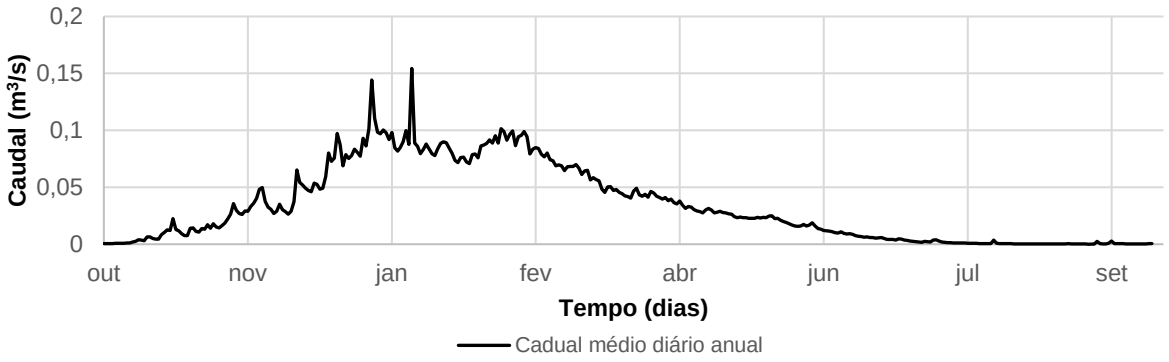


Gráfico 3.7 – Série anual representativa dos caudais médios diários afetos à bacia hidrográfica (Qnat)

3.3.5 Série Mensal de Caudais Evaporados

O fenómeno da evaporação em termos hidrológicos designa um fluxo de vapor de água através de um plano horizontal próximo da superfície da Terra, num determinado lugar por unidade de área do plano. Este fluxo depende da disponibilidade de água nessa superfície, da disponibilidade de energia para a mudança de estado termodinâmico da água, do movimento do ar e da sua capacidade de conter o vapor de água. A evaporação da água do solo, intercetada e transpirada pela vegetação é designada por evapotranspiração. Thornthwaite, em 1948 introduz a evapotranspiração potencial tendo como assunção base a constante disponibilidade de água no solo, necessária à vegetação (HIPÓLITO & VAZ, 2011).

Pretende-se, a partir do trabalho de MARTINS (2016) e da evapotranspiração potencial de Thornthwaite, obter os valores os caudais evaporados associados à albufeira do presente caso de estudo. A evapotranspiração potencial de Thornthwaite (3.10) descreve a evapotranspiração num mês com uma duração de 30 dias e que em cada dia a insolação astronímica é de 12 h.

$$EVTp = 16\left(10\frac{T}{I_T}\right)^a \tag{3.10}$$

onde:

EVTp	Evapotranspiração potencial mensal (mm)
T	Temperatura média mensal (ºC)
I_T	Índice térmico anual (-)
a	Expoente empírico dado por: $6{,}75\times10^{-7}{I_T}^3 - 7{,}71\times10^{-5}{I_T}^2 + 1{,}7912\times10^{-2}I_T \quad + 0{,}49239$

Tendo como base a temperatura média mensal, o índice térmico mensal (3.11) e o índice térmico anual (3.12) são dados por:

$$i_m = \left(\frac{T_m}{5}\right)^{1{,}514} \tag{3.11}$$

$$I_T = \sum_{m=1}^{12} i_m \quad (3.12)$$

A evapotranspiração potencial num dado mês, EVTp', descrita na expressão (3.13), obteve-se aplicando um fator corretivo f, expresso em (3.14) ao valor EVTp, que por sua vez depende da insolação astronómica diária do local ($N_{/12}$) e do número de dias do mês (N_d) em questão.

$$EVTp' = fEVTp \quad (3.13)$$

em que:

$$f = \frac{N_{/12} N_d}{30} \quad (3.14)$$

A insolação astronómica, na albufeira, para cada mês $N_{/12}$**,** dadas as coordenadas da povoação mais próxima (Poiares - 41° 3′ 26″ N, 6° 51′ 30″ W), encontra-se na Quadro 3.8.

Quadro 3.8 – Insolação astronómica diária expressa em unidades de 12 h de um mês com 30 dias. Adaptado de QUINTELA (1996)

Mês	**Out**	**Nov**	**Dez**	**Jan**	**Fev**	**Mar**	**Abr**	**Mai**	**Jun**	**Jul**	**Ago**	**Set**
$N_{/12}$ (41°)	0,96	0,82	0,8	0,83	0,83	1,03	1,11	1,25	1,26	1,27	1,19	1,04

Na recolha dos registos de temperatura média mensal do ar, teve-se em consideração os registos de temperatura com origem em duas fontes distintas, ambas geograficamente próximas do caso de estudo. O primeiro registo fornecido pelo IPMA entre 1971 e 2000, corresponde a Bragança, e o segundo obtido através da plataforma do SNIRH entre o ano 1944/19445 até 2015/2016 relativo a Folares.

Analisando o Quadro 3.9, verifica-se que os valores de evapotranspiração potencial mensal conseguidos através dos registos de temperatura no posto meteorológico de Folgares são ligeiramente superiores aos valores obtidos através da informação referente ao posto de Bragança. Como tal, adotou-se no presente caso de estudo os dados referentes a Folgares.

Quadro 3.9 – Evapotranspiração potencial mensal nos postos climatológicos de Bragança e Folgares

		Out	**Nov**	**Dez**	**Jan**	**Fev**	**Mar**	**Abr**	**Mai**	**Jun**	**Jul**	**Ago**	**Set**
Bragança	**Temp. média (°C)**	12,8	8,2	5,5	4,4	6,2	8,6	10,2	13,4	17,9	21,3	21,1	18,1
	EVTp'(mm/mês)	52,2	24,3	14,6	11,3	16	33,5	43,6	72,2	102,5	133,7	123,7	85,8
Folgares	**Temp. média (°C)**	13,8	8,8	5,5	4,5	5,9	8,5	11	13,9	18	21,7	21,3	18,5
	EVTp'(mm/mês)	56,5	25,7	13,9	11,1	14,3	31,9	46,8	74,2	102,0	136,1	124,4	87,3

MARTINS (2016) estabeleceu uma série de equações de regressão que relacionam e evapotranspiração num dado mês (EVTp') e evaporação mensal (EV) para os postos meteorológicos de EC8 a EC13 (Figura 3.7). Considerando a localização da albufeira, selecionou-se a equação linear (3.15) referente ao posto meteorológico de Oliveira do Hospital (EC13).

$$EV = 1{,}17EVTp' \tag{3.15}$$

Apesar da autora aplicar as equações das retas deduzidas a partir de determinados postos meteorológicos, a outros postos próximos, esta faz uma ressalva referente à aplicabilidade reduzida das equações fora da vizinhança dos primeiros, uma vez constatada a variabilidade espacial dos declives das retas deduzidas pela autora.

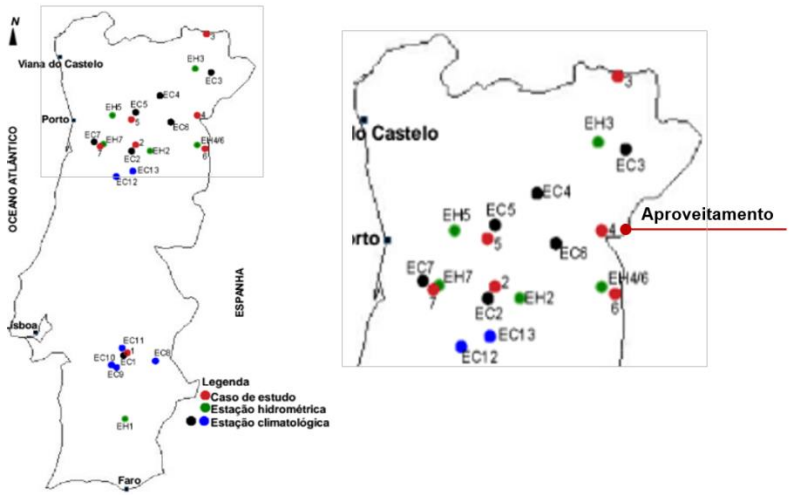


Figura 3.7 – Estações meteorológicas e casos de estudo considerados em MARTINS (2016). Adaptado de MARTINS (2016)

A série mensal de caudais evaporados ($Qevap_i$) resulta da multiplicação da evaporação mensal pela a área de espelho de água equivalente ao nível de pleno armazenamento estabelecido no Capítulo 4.

$$Qevap_i = A_{NPA}EV_i \tag{3.16}$$

O Quadro 3.10 contem as séries mensais de evapotranspiração potencial, de evaporação e de caudais evaporados.

Quadro 3.10 – Evaporação mensal e caudal evaporado considerando a área de espelho de água referente ao NPA da albufeira

Mês	ETVp' (mm)	EV (mm/mês)	Qevap (m³/mês)	Qevap (m³/s)
Out	56,5	66,1	6475,5	2,50E-03
Nov	25,7	30,1	2949,4	1,14E-03
Dez	13,9	16,3	1595,4	6,16E-04
Jan	11,1	12,9	1268,9	4,90E-04
Fev	14,3	16,7	1640,7	6,33E-04
Mar	31,9	37,3	3656,4	1,41E-03
Abr	46,8	54,8	5365,6	2,07E-03
Mai	74,2	86,9	8512,6	3,28E-03
Jun	102,0	119,3	11694,6	4,51E-03

Mês	ETVp' (mm)	EV (mm/mês)	Qevap (m^3/mês)	Qevap (m^3/s)
Jul	136,1	159,2	15602,9	6,02E-03
Ago	124,4	145,6	14264,1	5,50E-03
Set	87,3	102,1	10009,5	3,86E-03

3.3.6 Série Mensal de Caudais Ecológicos

Os caudais ecológicos são referidos no plano nacional da água de Portugal com os caudais mínimos a manter no curso de água, que permitam assegurar a conservação e manutenção dos ecossistemas aquáticos naturais, a produção das espécies com interesse desportivo ou comercial, assim como a conservação e manutenção dos ecossistemas ripícolas e dos aspetos estéticos da paisagem ou outros de interesse científico ou cultural (HÍPOLITO & VAZ, 2011).

No presente caso de estudo, assumiu-se que o caudal ecológico corresponde a 5% do caudal médio mensal em regime natural (Quadro 3.11).

Quadro 3.11 – Caudal ecológico mensal

Mês	Q eco (m^3/s)
Out	2,89E-04
Nov	1,28E-03
Dez	3,06E-03
Jan	4,64E-03
Fev	4,35E-03
Mar	3,10E-03
Abr	1,88E-03
Mai	1,15E-03
Jun	4,97E-04
Jul	1,16E-04
Ago	2,37E-05
Set	2,48E-05

4 Pré-dimensionamento da Barragem, Órgãos Hidráulicos e Central Hidroelétrica e de bombagem

4.1 Considerações Gerais

O pré-dimensionamento de barragens deve ter em conta as condições topográficas, geológicas e geotécnicas hidrológicas e ambientais do local, assim como ações a que a futura estrutura da barragem irá ser exposta. Na presente dissertação teve-se exclusivamente em consideração as condições topográficas e hidrológicas adotando-se uma abordagem simplificada no pré-dimensionamento do corpo da barragem.

Neste capítulo apresenta-se o pré-dimensionamento do corpo da barragem, dos órgãos hidráulicos (e.g. o descarregador de cheias, a descarga de fundo e a tomada de água na albufeira e o circuito hidráulico) e da central hidrelétrica e de bombagem.

As peças desenhas relativas à barragem e aos seus órgãos, ao circuito hidráulico e à central hidroelétrica e de bombagem encontram-se no Anexo E.

4.2 Características da Barragem

O caso de estudo apresenta uma barragem de betão de gravidade a ser implantada à cota de 566 m. Adotou-se uma barragem de perfil triangular, cujo o desenvolvimento se dá ao longo de 270,3 m, caracterizada por um paramento a montante vertical e por um, a jusante, com um declive de 1:0,85 (V:H).

O coroamento da barragem possui uma largura de 3 m definida de acordo com Regulamento de Segurança de Barragens (Portaria nº846/93) e abriga sobre si um tabuleiro com 5,5 m, permitindo uma via de trânsito de 4 m ladeada de passeios de ambos os lados com 0,75 m de largura.

A definição da altura da barragem está dependente do nível de pleno armazenamento, NPA, e do nível máximo de cheia, NMC. O NMC é dado pelo somatório do NPA e da carga hidráulica sobre o descarregador, $H_{0,}$ que irá ser estabelecida no Capítulo 4.3.

A cota de coroamento do corpo da barragem é, por fim, a soma do NMC e de uma dada folga que, segundo o Regulamento de Segurança de Barragens, deve ter em conta as características da

barragem, a sismicidade local e a amplitude das ondas geradas na albufeira por ação do vento. Uma vez que não foram efetuados estudos nessas áreas, considerou-se uma folga equivalente a 1,5 m.

A cota a que corresponde o volume morto, NMorto, e o nível mínimo de exploração, Nme, serão definidos no subcapítulo 4.4 e 4.5, pela ordem indicada.

O Quadro 4.1 resume as características gerais da barragem e da albufeira.

Quadro 4.1 – Características gerais da barragem e da albufeira

Tipo de barragem (-)	Betão
Cota implantação (m)	566
Nme (m)	575,5
NPA (m)	585
Capacidade máxima (m^3)	775 491
NMC (m)	587
Folga (m)	1,5
Cota coroamento (m)	588,5
Paramento Montante (-)	Vertical
Paramento Jusante (-)	1:0,85

4.3 Descarregador de Cheias

4.3.1 Considerações gerais

O descarregador de cheia trata-se de um órgão de segurança da barragem concebido para dar vazão ao excedente de água na albufeira. A escolha do tipo de descarregador e da sua geometria está dependente de fatores que condicionam no funcionamento do órgão hidráulico como o caudal de ponta de cheia, o tipo barragem em jogo e as condições topográficas do terreno onde a albufeira se insere.

Definiu-se para o presente caso de estudo, um descarregador de soleira espessa, tipo WES, cujo o canal convergente se encontra sobre o corpo da barragem de betão ladeado por muros guia e que termina num dissipador de energia, tipo salto esqui.

4.3.2 Dimensionamento

4.3.2.1 Dimensões do descarregador de cheias

A curva de vazão característica dum descarregador de soleira espessa tipo WES é dada pela fórmula (4.1), em que o coeficiente de vazão, C, é na ordem de 0,5.

$$Q_0 = C_v B \sqrt{2g} {H_0}^{3/2} \quad (4.1)$$

Considerando um caudal descarregado (Q_0) equivalente ao caudal de ponta de cheia (65 m^3/s), uma largura do descarregador (B) igual a 10 m e um coeficiente de vazão de 0,52 (C_v), a carga hidráulica (H_0) resultante foi de 2 m. O aumento do valor do coeficiente de vazão de 0,5 para 0,52 produz um

aumento de velocidade do escoamento sobre a soleira do descarregador que dará origem a pressões ligeiramente inferiores à atmosféricas.

O Gráfico 4.1 representa a curva de vazão do descarregador de cheias de acordo com as características apresentadas.

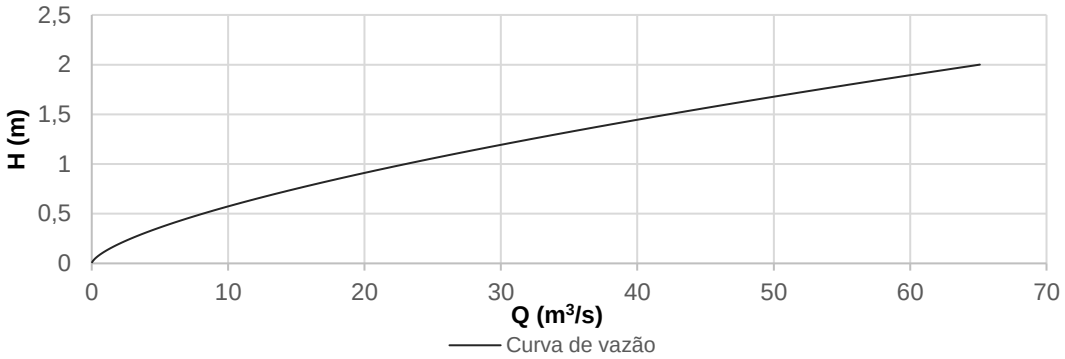


Gráfico 4.1 – Curva de vazão do descarregador de cheias

4.3.2.2 Soleira do descarregador de cheias

No dimensionamento do perfil da soleira pretende-se que se desenvolva pressões locais ao longo da soleira do descarregador iguais à pressão atmosférica, para o caudal de ponta de cheia, Q_0. Para tal, o perfil terá que coincidir com a face inferior da lâmina líquida na passagem de Q_0 sobre um descarregador de Bazin (QUINTELA, 1981).

A conceção da soleira do descarregador, segundo a Figura 4.1, garante as pressões anteriormente mencionadas e por consequência a aderência do escoamento à soleira do descarregador.

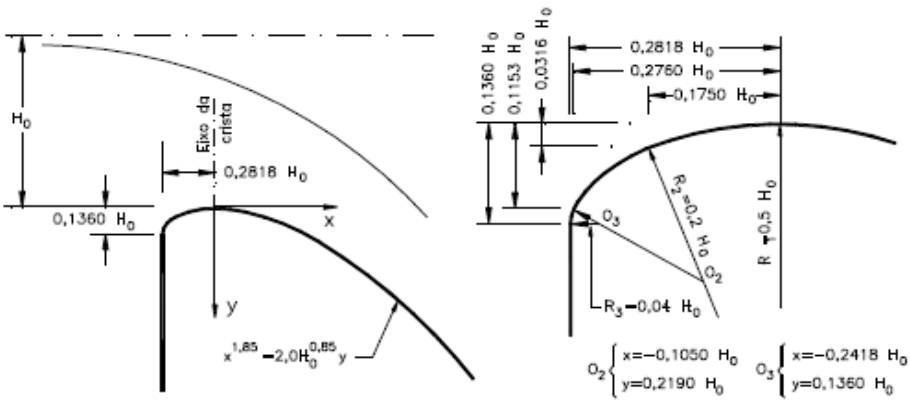


Figura 4.1 – Soleira espessa do tipo WES com paramento vertical a montante. Geometria em função da carga de dimensionamento H_0 in CORPS OF ENGINEERS WES. Retirado de QUINTELA (1992)

A construção da geometria da soleira do descarregador a montante da crista foi feita a partir do enquadramento de 3 arcos de circunferências, definidos no Quadro 4.2 em relação ao referencial da Figura 4.1 e de acordo com os pontos de apoio do Quadro 4.3.

Quadro 4.2 – Coordenadas das circunferências que descrevem a soleira do descarregador a montante da crista

Circunferência (-)	Coordenadas (x;y) (m)	Raio (m)
1	(0;1)	1,00
2	(-0,210; 0,438)	0,40
3	(-0,484; 0,272)	0,08

Quadro 4.3 – Pontos de apoio à construção da soleira do descarregador a montante da crista

H0 (m)	2,00
0,1360H0 (m)	0,272
0,2818H0 (m)	0,564
0,01153H0 (m)	0,231
0,0316H0 (m)	0,063
0,0267H0 (m)	0,552
0,175H0 (m)	0,350

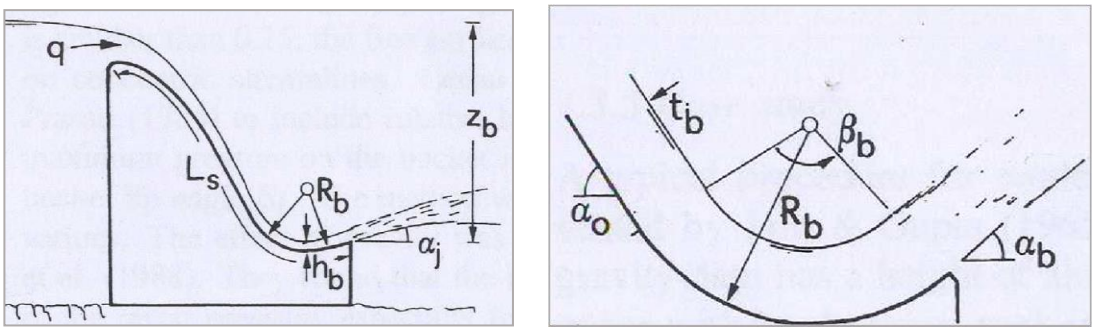
Os sucessivos pontos que descrevem a soleira do descarregador, a jusante da crista, são dados pela equação da curva (4.2). A curva termina quando o declive num determinado ponto de transição, iguala-se ao declive do paramento de jusante do corpo da barragem.

$$x^{1,85} - 2{H_0}^{0,85} y = 0 \qquad (4.2)$$

Os valores, x e y são as coordenadas segundo o referencial da Figura 4.1 e H_0 a carga hidráulica de dimensionamento.

4.3.2.3 Salto de esqui

Numa estrutura de dissipação tipo salto de esqui, a energia do escoamento é maioritariamente dissipada por jato. A estrutura de arranque do jato, em traços gerais, é composta por uma concavidade (Figuras 4.2).



a) b)

Figura 4.2 – a) Trajetória do escoamento sobre a barragem retirado de VISCHER & HAGER (1998); b) Escoamento sobre o salto esqui. Retirado de VISCHER & HAGER (1995)

O procedimento seguido no dimensionamento foi sugerido por VICHER & HAGER (1998), onde propõem a seguinte relação para o raio de curvatura do salto de esqui, estabelecida por Damle:

$$\frac{R_b}{t_b} = \sqrt{\left(\frac{H_1}{t_b}\right)} \tag{4.3}$$

em que:

- R_b Raio de curvatura do salto esqui (m);
- H_1 Carga hidráulica (m);
- t_b Altura do escoamento imediatamente antes da curvatura do salto de esqui (m).

onde H_1 é dada por:

$$H_1 = \frac{{U_1}^2}{2g}, \mathrm{U_1} = \mathrm{q/t_b} \tag{4.4}$$

cujos parâmetros são:

- H_1 Carga hidráulica na secção imediatamente a montante da estrutura de dissipação (m);
- U_1 Velocidade média na secção imediatamente a montante da estrutura de dissipação (ms^{-1});
- g Aceleração gravítica (ms^{-2});
- q Caudal por metro de largura ($m^3s^{-1}m$).

O Quadro 4.4 resume os parâmetros utilizados nas fórmulas (4.3) e (4.4) e apresenta o valor do raio de curvatura adotado (R_b).

Quadro 4.4 – Características do escoamento no salto esqui e raio de curvatura

Q (m^3/s)	**B (m)**	**q ($m^3/s/m$)**	**t_b (m)**	**U_1 (m/s)**	**H_1 (m)**	**R_b (m)**
65,00	5,00	13,00	1,13	11,50	6,75	2,76

No que toca aos ângulos descritos na Figura 4.4, VICHER & HAGER (1998) sugerem a equação (4.5) de Orlov (1974):

$$\alpha_j + \alpha_0 = \alpha_b \tag{4.5}$$

α_j é o ângulo do jato, α_0 o ângulo que paramento da barragem faz com a horizontal e α_b o ângulo terminal da curvatura do salto de esqui.

O ábaco da Figura 4.3 relaciona o rácio α_b/β_b com o raio relativo R_b/t_b, em função da curvatura do salto esqui β_b. Por forma a validar a utilização do ábaco deve ser verificada a expressão (4.6), que envolve o número de Froude na secção imediatamente antes da estrutura de dissipação.

$$Fr_0 = \frac{q}{(g t_b)^{1/2}} > 5\,(\sin\alpha_0)^{1/2} \Longmapsto 3{,}46 > 1{,}95 \tag{4.6}$$

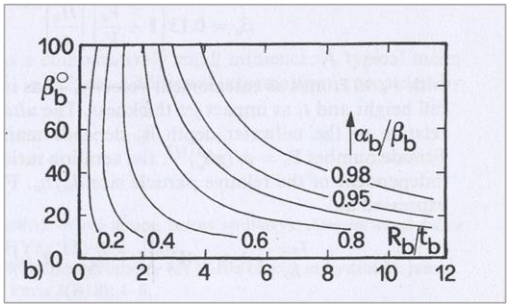


Figura 4.3 – Ábaco que relaciona o rácio αb /βb com o raio relativo Rb/tb em função da curvatura do salto esqui β_b. Retirado de VISCHER & HAGER (1998)

Para R_b/t_b de 2,44, considerou-se as curvas α_b/β_b 0,8 e 0,9 que correspondem, de grosso modo, a uma gama de valores β_b entre 80° a 100°. Assim, para uma relação de α_b/β_b de 0,85 e Rb/t_b de 2,44 obteve-se para β_b um valor aproximadamente de 95,7° (Quadro 4.5). A configuração final do salto esqui encontra-se representada na Figura 4.4 a).

Quadro 4.5 – Ângulos descritores da geometria do salto esqui

α_0 (º)	α_j (º)	α_b (º)	β_b (º)	R_b/t_b (-)	α_b/β_b (-)
58,39	30	81,34	95,7	2,44	0,85

A cota de soleira de arranque do jato deve ser suficientemente elevada em relação à cota de implantação do corpo da barragem, de modo a direcionar o jato para longe o quanto baste da estrutura de dissipação. No presente estudo considerou-se uma a cota de soleira de arranque do jato 3 m acima da cota de implantação da barragem.

4.3.2.4 Canal convergente e muros guia

Ao longo do canal sobre o paramento de jusante da barragem, dá-se um estreitamento desde a crista do descarregador até ao órgão de dissipação de energia. A geometria do estreitamento depende da condição (4.7) que assegura que a energia específica do escoamento, que se desenvolve no canal, seja sempre superior à energia específica crítica ao longo do desenvolvimento do convergente, de

modo a que não ocorra o ressalto (PINHEIRO, 2006b). Sendo, F_{rj} o número de Froude na secção de jusante do canal, o ângulo α que a lateral do canal faz com a vertical é dado por:

$$\alpha \leq \tan^{-1} \frac{1}{3Fr_j} \quad (4.7)$$

No Quadro 4.6 encontram-se os valores necessários à definição da geometria do canal, em que B é a largura inicial e B_{final} a largura final do canal e o valor de α adotado face ao valor de α exigido pela condição (4.7)

Quadro 4.6 – Geometria do canal do descarregador

Fr_j (-)	**α (rad)**	**α_{adopt} (rad)**	**B (m)**	**B_{final} (m)**
1,388	0,236	0,116	10,00	5,00

O procedimento adotado para o dimensionamento do canal encontra-se explicado nos seguintes itens:

- Conceção dum canal com secção retangular constante;
- Aplicação da fórmula (4.8) para obtenção da altura de escoamento (h) a jusante;
- Obtenção do Fr_j na secção terminal desse canal, isto é, na secção imediatamente a montante órgão de dissipação (à cota de 569 m);
- Obtenção do valor limite de α (0,236 rad) segundo a inequação (4.7);
- Seleção do ângulo α_{adopt} (que corresponde ao afunilamento do canal com uma largura inicial, B, igual a 10 m e que termina com uma largura a jusante, $B_{final,}$ igual a 5 m);
- Recálculo do Fr para altura do escoamento a jusante, para a nova geometria do canal e validação da inequação (4.7)

As sucessivas alturas de escoamento ao longo do canal foram encontradas através da equação (4.8) que advém do Teorema de Bernoulli para escoamentos permanentes e que, neste caso exclui as perdas de energia provenientes do efeito de atrito no canal.

$$H = z + hcos\alpha_o + \frac{q^2}{2gh^2} \; ; \quad (4.8)$$

onde:

H Carga hidráulica a montante do descarregador de cheias (m);

z Cota (m);

h Altura do escoamento (m);

q Caudal por metro de largura ($m^3s^{-1}m^{-1}$);

g Aceleração gravítica (m^2s^{-1}).

A altura dos muros guia é o somatório da altura do escoamento e da folga (f) calculada a partir da fórmula (4.9). Sendo, v a velocidade média do escoamento (m/s), e h a altura do escoamento (m), a folga (f) dos muros guias (m) descrita como:

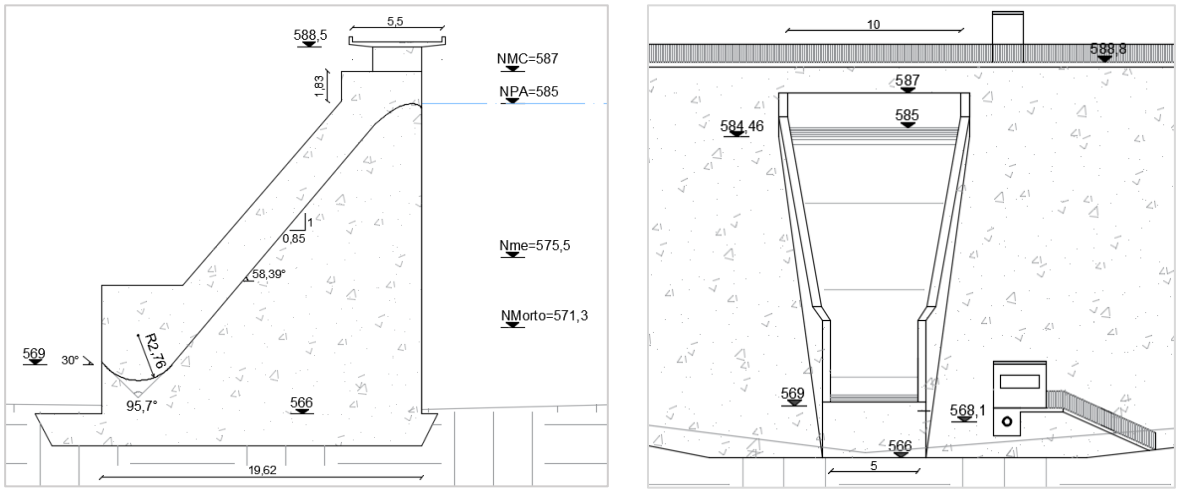
$$f = 0{,}6 + 0{,}0372v\sqrt[3]{h} \quad (4.9)$$

As características do escoamento ao longo do canal sobre o corpo da barragem e a altura estabelecida para os muros guias que o ladeiam estão expostas no Quadro 4.7.

Quadro 4.7 – Características do escoamento ao longo do canal sobre o corpo da barragem e altura dos muros guias

L_{Canal} (m)	q ($m^3/s/m$)	z (m)	h (m)	v (m/s)	f (m)	h_{muro} (m)	$h_{muro\ adopt}$ (m)
10,00	6,50	584	1,68	3,86	0,77	2,45	2,5
9,20	7,07	582	1,24	5,68	0,83	2,07	2,5
8,56	7,59	580	1,09	6,95	0,87	1,96	2,5
7,92	8,21	578	1,03	7,10	0,90	1,93	2,5
7,26	8,95	576	1,01	8,91	0,93	1,93	2,5
6,62	9,82	574	1,01	9,73	0,96	1,97	2,5
5,97	10,89	572	1,04	10,48	1,00	2,03	2,5
5,32	12,22	570	1,09	11,17	1,03	2,12	2,5
5,00	13,00	569	1,13	11,50	1,05	2,18	2,5

O canal convergente sobre o corpo da barragem pode ser observado na Figura 4.4.



a) b)

Figura 4.4 – Descarregador de cheias, canal convergente sobre o corpo da barragem e salto de esqui, a) Perfil; b) Alçado principal

4.4 Descarga de Fundo

4.4.1 Considerações gerais

A descarga de fundo tem como funções o esvaziamento da albufeira, o controlo do nível da água durante o enchimento da albufeira e a remoção de sedimentos acumulados na albufeira. Este órgão hidráulico é composto por uma conduta metálica que atravessa o corpo da barragem, munida duma grelha e duma comporta plana de segurança à entrada, e termina num estreitamento que liga a conduta e a válvula de cone fixo. Assumiu-se no presente caso de estudo, que o leito recebe o jato da válvula sem sofrer erosão.

Pretende-se identificar, no próximo subcapítulo, a quantidade de sedimentos acumulados para um determinado período de funcionamento da albufeira e calcular o respetivo volume equivalente, por forma: a definir a cota de implementação da descarga de fundo, a geometria do estreitamento e as dimensões da grelha e da comporta; e selecionar a válvula de cone fixo.

4.4.2 Dimensionamento

4.4.2.1 Cota relativa ao volume morto (NMorto)

Com base na Figura 4.5, verificou-se que a produção de sedimentos (S_e) na bacia hidrográfica encontra-se dentro do intervalo de 300 a 400 ton/km^2/ano. Considerando uma acumulação de sedimentos ao longo de T anos na albufeira, o peso dos sedimentos acumulados, expresso através da seguinte fórmula:

$$S_{ed_t} = S_e A_b T \tag{4.10}$$

onde, S_e é a média do intervalo anteriormente mencionado (350 ton/km^2/ano), A_b a área da bacia hidrográfica (3 km^2) e T de 50 anos.

Assumindo que os sedimentos que afluem à albufeira são maioritariamente constituídos por areia, cuja a densidade é 1,4 ton/m^3 (γ_{areia}), e que o peso dos sedimentos obtido pela fórmula (4.11) é 52500 ton, o volume ocupado pelos sedimentos, que corresponde ao chamado volume morto (VMorto), é de 37500 m^3. Segundo a curva de volumes armazenado (Gráfico 4.2), este último volume diz respeitante à cota de 571,3 m designada daqui em diante como NMorto (Quadro 4.8).

Quadro 4.8 – Peso dos sedimentos acumulados ao longo de 50 anos, volume morto e respetiva cota.

S_e (ton/km^2/ano)	$S_{ed\ 50}$ (ton)	γ_{areia} (ton/m^3)	VMorto (m^3)	NMorto (m)	$C_{FUNDO\ adopt}$ (m)
350	52500	1,4	37500	571,3	567

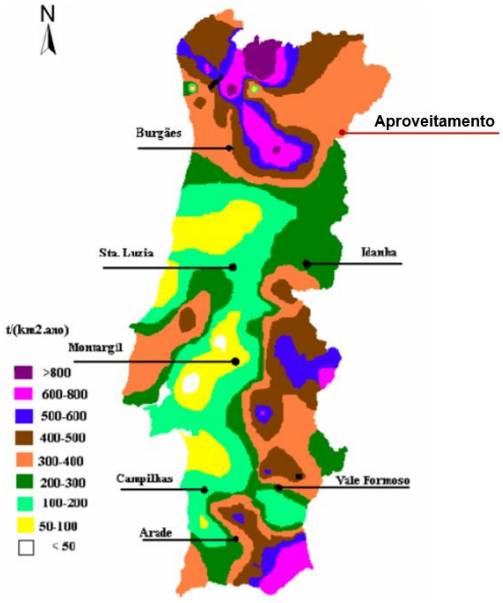


Figura 4.5 – Produção de sedimentos em Portugal Continental. Adaptado de ROCHA (1998)

4.4.2.2 Válvula de cone fixo

A lei de vazão da válvula de regularização é dada por:

$$Q = C_v A\sqrt{2gH_v} \tag{4.11}$$

em que:

- Q Caudal de vazão da descarga de fundo (m^3s^{-1});
- C_v Coeficiente de vazão da válvula, que depende do grau de abertura 0,83 dada pelo fabricante);
- A Área da secção transversal da válvula (m^2);
- g Aceleração gravítica (ms^{-2});
- H_v Carga hidráulica imediatamente a jusante da válvula (m).

A carga hidráulica imediatamente a jusante da válvula (H_v) é expressa pela equação (4.12), tendo-se ignorado as perdas de carga nas sigularidades (Quadro 4.9).

$$H_v = NPA - C_{valvula} - \sum_{i=1}^{n} \Delta H_i \tag{4.12}$$

cujos:

- NPA Nível de pleno armazenamento (m);
- $C_{valvula}$ Cota do eixo da válvula na secção de jusante (m);
- ΔH Perdas de carga contínuas e nas singulares (m);
- H_v Carga hidráulica imediatamente a jusante da válvula (m).

A perda de carga contínua é dada pela expressão (4.14)*:*

$$\Delta H = JL \tag{4.13}$$

cujos os parâmetros são L, o comprimento da conduta 19,11 m, e J, a perda de carga unitária calculada a partir da fórmula de Manning-Strickler, em que a constante de rugosidade Ks toma o valor 90 $m^{1/3}. s^{-1}$ para condutas de aço.

Quadro 4.9 – Carga hidráulica imediatamente a jusante da válvula (H_v)

H_v (m)	NPA (m)	$C_{valvula}$ (m)	ΔH (m)	A (m)
10,53	585,00	571,20	3,27	3,27

O caudal de vazão da descarga é dado pela razão entre o volume total da albufeira e o período de tempo necessário ao esvaziamento da mesma. Neste caso, estabeleceu-se um período igual a 7 dias para o esvaziamento, que gera caudal de 1,28 m^3/s. Optando-se, assim, por uma válvula cónica com 400 mm de diâmetro (Quadro 4.10). As dimensões da válvula de cone fixo estão descritas no Anexo A, Figura 3.

Quadro 4.10 – Diâmetro adoptado no dimensionamento da válvula de cone fixo

H_v (m)	Q (m^3/s)	C_v (-)	D (mm)	D_{adpt} (mm)
10,53	1,28	0,83	370	400

4.4.2.3 Conduta e estreitamento

Segundo o Decreto de lei nº409/93, capitulo IV artigo 13 que regulamenta o dimensionamento das barragens, o diâmetro da conduta não deve ser inferior a 700 mm, tendo-se por isso adotado, para o presente caso de estudo, uma conduta feita em aço detentora de 18,14 m de comprimento com 800 mm diâmetro (DN800).

A junção entre conduta de DN800 e a válvula de DN400 foi feita através dum estreitamento montante da válvula. O ângulo α que caracteriza o estreitamento não deve exceder a relação (4.14), por forma a que se possam minimizar a perda de carga e a cavitação que podem ocorrer durante a evacuação do escoamento (BUREC, 1987).

$$tan\ \alpha = \frac{\sqrt{gD}}{v} \tag{4.14}$$

onde, α, o ângulo que as paredes do cone de redução fazem com a horizontal, g, a aceleração gravítica e D, a média do diâmetro inicial e final da transição e v a média das velocidades no início e no fim da transição. O cone de redução adotado desenvolve-se ao longo de 0,6 m e possui um α igual a 20° (Quadro 4.11).

Quadro 4.11 – Descarga de fundo, ângulo α adotado no estreitamento

L (m)	$v_{média}$ (m/s)	$D_{médio}$ (mm)	α (°)	$α_{adopt}$ (°)
0,6	6,38	600	20,8	20

4.4.2.4 Grelha e comporta

As grelhas são normalmente painéis metálicos que controlam a entrada de detritos no circuito hidráulico. Cabe a estas evitar que se danifiquem componentes do circuito hidráulico como válvulas, filtros, bombas e turbinas.

Tendo em conta as velocidades máximas admissíveis na grelha e na comporta, o Quadro 4.12 refere as dimensões destas componentes e as velocidades nelas obtidas.

Quadro 4.12 – Descarga de fundo, dimensões e velocidades da grelha e da comporta

Componentes	Dimensões (m^2)	Velocidade (m/s)	Velocidade Máxima (m/s)
Grelha móvel	1,5x1,5	0,57	1
Comporta	1,0x1,0	1,28	1,5 a 2

4.5 Circuito Hidráulico

4.5.1 Considerações gerais

O escoamento no circuito dá-se maioritariamente através dum troço comum. A montante da central hidroelétrica e de bombagem (HID) este troço bifurca em dois circuitos secundários afetos às turbomáquinas. As componentes do circuito que integram as operações de geração hidroelétrica são: a tomada de água na albufeira; o sistema de condutas, que inclui o troço comum e o ramal da turbina; e a estrutura de restituição. No caso das operações de bombagem, estas são: as tomadas de água no rio; o sistema de condutas que inclui o troço comum e os ramais das bombas; e a tomada de água na albufeira.

Dadas as condições topográficas do terreno, o primeiro trecho, com um declive de 1%, desenvolve-se, desde a cota de soleira da tomada de água, ao longo de um túnel escavado, com aproximadamente 1,70 km, até à cota de 555,47 m onde ocorre uma curva em perfil, prolongando-se até à central hidroelétrica e de bombagem a céu aberto.

A tomada de água na albufeira encontra-se munida, à entrada, de uma grelha seguida e duma comporta plana ligada a um servomotor por uma haste metálica. Devido ao desenvolvimento de variações de pressão que causam a vibração da comporta colocou-se uma conduta de arejamento de 200 mm por forma a minimizar este efeito. Após a conduta de arejamento encontra-se uma segunda comporta plana e uma transição de secção retangular para secção circular sucedida duma junta de desmontagem. A conduta que integra a tomada de água é feita em aço com 1400 mm de diâmetro.

É possível ter acesso à junta de desmontagem através de uma torre acessível com 23,77 m de altura, ligada à margem sul da albufeira através dum passadiço que se estende ao longo de cerca de 73 m.

A captação de água no rio é feita através de quatro tomadas de água que integram o edifício da central de bombagem, cada uma capaz de aspirar 0,75 m^3/s de caudal. Dado que cada bomba possui dois bocais de aspiração, as tomadas de água estão ligadas duas a duas a cada bomba. A tomada de

água é composta à entrada por uma grelha e uma comporta seguida duma transição de secção quadrada para circular. O primeiro trecho da tomada de água, em betão, desemboca num segundo em aço de igual diâmetro (DN600), que por sua vez se encontra diretamente ligada à bomba.

Nas peças desenhadas nº 69418-EP-CON.001, 69418-EP-HID.001 e 69418-EP-CON.002 do Anexo E é possível observar o desenvolvimento da conduta forçada em perfil e em planta.

4.5.2 Pré-dimensionamento da conduta

A escolha do diâmetro da conduta foi feita de acordo com a queda bruta e a gama de velocidades de escoamento máximas praticáveis que lhe estão associadas. Ramos *et al*. (2000) refere uma janela de valores empíricos, baseados em casos reais, para as velocidades máximas do escoamento na conduta (Quadro 4.13). Apesar da queda que caracteriza os empreendimentos ser considerada alta, estabeleceu-se para o caso de estudo uma velocidade máxima de 2 m/s, no sentido de minimizar as pressões internas que se fazem sentir aquando do golpe de ariete, e ainda, manter uma margem de segurança em caso do aumento inusitado do caudal escoado.

Quadro 4.13 – Gama de velocidades máximas segundo o tipo de queda. Adaptado de RAMOS *et al.* (2000)

Queda (-)	Velocidade (m/s)
Baixa	2 - 3
Média	3 - 4
Alta	4 - 5

Com base na potência da turbina, calculada no subcapítulo 4.6, definiu-se um caudal de dimensionamento 3 m^3/s que se escoa a uma velocidade média do escoamento de 2 m/s, o que requer uma conduta de 1400 mm de diâmetro.

Quanto à espessura da conduta, esta deve obedecer a uma espessura mínima, de modo a evitar o efeito das subpressões causadas pelo vácuo. Assim a espessura mínima, t, para uma conduta de aço de diâmetro D, deve validar a seguinte inequação (RAMOS et al., 2000):

$$\frac{t}{D} \geq 8{,}5 \times 10^{-3} \qquad (4.15)$$

A espessura e o diâmetro adotados para a conduta, assim como a velocidade média do escoamento dentro dela encontram-se no Quadro 4.14.

Quadro 4.14 – Diâmetro e espessura adotados na conduta de aço

v (m/s)	D (mm)	t (mm)	t_{adpt} (mm)
2	1400	11,76	12

4.5.3 Estreitamento e alargamentos

À semelhante do dimensionamento do estreitamento da descarga de fundo, estipulou-se um ângulo, α_{adopt}, inferior ao ângulo, α, obtido pela fórmula (4.15) e definiu-se as dimensões dos troços troncocónicos (Quadro 4.15).

Quadro 4.15 – Dimensionamento do alargamento e do estreitamento

Troncocónicos	Q (m^3/s)	$D_{médio}$ (m)	$v_{média}$ (m)	α (º)	$α_{adopt}$ (º)	L (m)
Alarg. (DN600-DN1000)	1,5	0,8	4,56	32	10	1,13
Estre. (DN1400-DN800)	3	1,1	6,8	28	10	1,70

4.5.4 Tomada de água da albufeira

No dimensionamento da tomada de água deve ser verificada a submergência mínima (4.16), de modo a evitar a ocorrência de vórtices que arrastem partículas flutuantes para dentro da tomada de água (PINHEIRO, 2006b).

$$\frac{S}{D} \geq \frac{1}{2} + C\frac{v}{\sqrt{gD}} \quad (4.16)$$

O nível mínimo de exploração, Nme, corresponde, então, à soma da cota de soleira da tomada de água, C_{TOMAD}, da submergência mínima, S, e do diâmetro da conduta, D (Quadro 4.16).

Quadro 4.16 –Submergência mínima na tomada de água (S), Nme e cota da tomada de água da albufeira (C_{TOMAD})

C (-)	Q (m^3/s)	D (mm)	v (m/s)	S (m)	C_{TOMAD} (m)	Nme (m)
2,2	3	1400	2,55	2,3	571,8	575,5

A tomada de água encontra-se definida no âmbito do desenho nº 69418-EP-TOM.001, Anexo E, sendo esta constituída por uma:

– Grelha

Em que, e é a espessura das barras, b a dimensão da secção transversal das barras no sentido do escoamento (b=5e), a o espaçamento entre elas que não deve ser inferior a 0,04 a 0,05 m, Figura 4.8 (PINHEIRO, 2006).

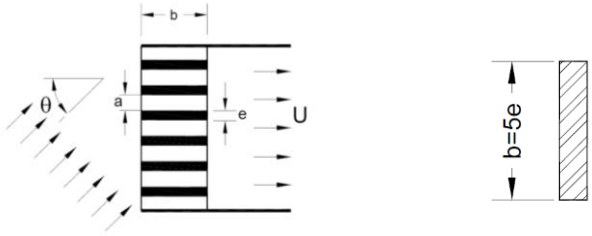


Figura 4.6 – Barras da grelha, adaptado de PINHEIRO (2006a)

As dimensões da grelha estão expostas no Quadro 4.17.

Quadro 4.17 – Caracterização da grelha (Tomada de água da abufeira)

Dimensões (m^2)	a (m)	b (m)	e (m)	φ (º)
1,8 x 1,8	0,1	0,1	0,02	90

– Comporta, espessura de 0,3 m e dimensão de 1,4x1,4 m^2;

– Comporta, espessura de 0,2 m e dimensão de 1,4x1,4 m^2;

– Conduta de arejamento DN 200;

– Transição quadrangular (1,4x 1,4 m^2) para circular (DN 1400);

– Junta de desmontagem;

– Conduta aço DN 1400 com 7,89 m de comprimento;

– Torre de acesso com uma área em planta de 4,3 m^2.

O Quadro 4.18 contem as velocidades obtidas na grelha e na comporta, face às velocidades máximas admissíveis.

Quadro 4.18 – Tomada de água da albufeira, velocidades na grelha e na comporta

Componentes	Velocidade (m/s)	Velocidade máxima (m/s)
Grelha Móvel	0,93	1
Comporta	1,53	1,5 a 2

4.5.5 Tomada de água da central de bombagem

A cota de implantação da tomada de água na central de bombagem depende das características da bomba que se pretende instalar, nomeadamente, da altura de aspiração máxima da bomba (hs_{max}) que através da equação 4.17 se relaciona com a carga absoluta útil de aspiração exigida pela própria bomba, NPSH (exigido pela bomba).

$$NPSH(exigida\ pela\ bomba) \leq NPSH(disponível) = \frac{Patm}{\gamma} + hs + \Delta H - \frac{tv}{\gamma} \qquad (4.17)$$

$$NPSH(exigida\ pela\ bomba) = \frac{Patm}{\gamma} + hs_{max} + \Delta H - \frac{tv}{\gamma}$$

onde,

Patm	Pressão atmosférica (Pa) a 20 ºC;
γ	Peso volúmico (kg/m^3);
ΔH	Perda de carga na conduta entre o reservatório de alimentação e a secção do flange de aspiração (m);
tv	Pressão de saturação do vapor de água a 20 ºC (Pa);
hs_{max}	Altura de aspiração máxima (m);
NPSH (disponível)	Carga absoluta útil na aspiração (m);

A perda de carga (ΔH), na equação (4.17), contempla as perdas de carga nas singularidades, nomeadamente, na entrada, na grelha, na transição quadrangular para circular, e nas curvas PE.13 e PE.14 (em perfil) e as perdas de carga contínuas na conduta de betão e de aço. No subcapítulo 4.5.6 encontra-se discretizadas as parcelas que compõem a ΔH. A altura de aspiração máxima (hs_{max}), medida desde do centro do eixo da bomba até ao nível da superfície, encontra-se no Quadro 4.19, assim como os parâmetros da equação (4.17) necessários ao seu cálculo.

Quadro 4.19 – Altura de aspiração adotada e parâmetros da equação (4.17)

NPSH (exigido pela bomba) (m)	**P_{atm}/γ (m)**	**tv/γ (m)**	**ΔH (m)**	**hs_{max} (m)**	**hs_{adopt} (m)**
20,00	10,33	0,237	0,48	9,43	10,50

A estrutura de captação de água é feita através de quatro tomadas de água colocadas no Rio Douro, todas à cota de entrada de 117,19 m, definidas no âmbito do desenho nº 69418-EP-HID.001, Anexo E. Cada tomada de água é constituída por uma:

- Grelha cujas dimensões se encontram no Quadro 4.20;
- Comporta, com 0,1 m de espessura e 1x1 m^2 de área;
- Transição quadrangular (0,6x 0,6 m^2) para circular (DN 600);
- Conduta betão DN 600, com 9,27 m de comprimento;
- Conduta aço DN 600, com 2,15 m de comprimento.

Quadro 4.20 – Central de Bombagem, características da grelha

A (m^2)	**a (m)**	**b =5e (m)**	**e (m)**	**φ (º)**
1x1	0,1	0,1	0,02	71

A verificação da admissibilidade das velocidades praticadas na comporta e na grelha podem ser vistas no Quadro 4.21.

Quadro 4.21 – Central de Bombagem, dimensões e velocidades na grelha e na comporta

Componentes	**Dimensões (m^2)**	**Velocidade (m/s)**	**Velocidade máxima (m/s)**
Grelha Móvel	1x1	0,75	1
Comporta	1x1	1,75	1,5 a 2

4.5.6 Perdas de carga

As perdas de carga no sistema podem distinguir-se entre contínuas e localizadas. As perdas de carga contínuas, J, foram definidas recorrendo à fórmula empírica de Manning-Strickler (4.18). Em geral, o sistema de condutas é maioritariamente constituído por condutas de aço cuja a constante de rugosidade é Ks=90 $m^{1/3}. s^{-1}$, à exceção da tomada de água do sistema de bombagem que é feita em betão, Ks=75 $m^{1/3}. s^{-1}$

$$Q = Ks\, SR^{2/3} J^{1/2} \qquad (4.18)$$

cujos os parâmetros são:

- Q Caudal escoado ($m^3 s^{-1}$);
- Ks Coeficiente que depende da rugosidade do material da conduta (-);
- S Área da secção tra,nsversal da conduta (m^2);
- R Raio hidráulico (m)
- J Perda de carga ($m^{1/3} s^{-1}$).

As perdas de carga localizadas foram calculadas recorrendo à equação (4.19). A maioria dos valores selecionados para o coeficiente K foram retirados de LENCASTRE (1983).

$$\Delta H_L = K \frac{U^2}{2g} \quad (4.19)$$

onde:

ΔH_L Perda de carga localizada (m);
K Coeficiente de perda de carga singular (-);
U Velocidade média na secção transversal da conduta (ms^{-1}).

A perda de caga contínua ao longo das condutas foi definida com base na dimensão da conduta, no material em que foi feita e no caudal escoado. As peças desenhadas nº 69418-CON-001, 69418-HID-001 e 69418-HID-002, no Anexo E, apresentam os ramais descriminados no Quadro 4.22.

Quadro 4.22 – Caracteríticas das condutas e respetivas perdas de carga

Ramais	Designação	Q (m^3/s)	D (m)	L (m)	Ks ($m^{1/3}s^{-1}$)	J (-)	ΔH (m)
Comuns	L.1	3,0	1,4	1705,9	90	0,0008	1,287
	L.2	3,0	1,4	91,30	90	0,0008	0,069
	L.3	3	1,4	91,50	90	0,0008	0,069
	L.4	3	1,4	190,65	90	0,0008	0,144
	L.5	3	1,4	125,70	90	0,0008	0,095
	L.6	3	1,4	141,53	90	0,0008	0,107
	L.7	3	1,4	288,48	90	0,0008	0,218
	L.8	3	1,4	88,30	90	0,0008	0,067
	L.9	3	1,4	70,00	90	0,0008	0,053
	L.10	3	1,4	23,52	90	0,0008	0,018
Bombagem	L.11	3	1,0	21,79	90	0,0045	0,099
	L.12 (x2)	1,5	1,0	17,77	90	0,0011	0,040
	L.13 (x2)	1,5	0,6	3,00	90	0,0173	0,104
	L.14 (x4)	0,75	0,6	2,15	90	0,0043	0,037
	L.15 (x4)	0,75	0,6	9,27	75	0,0062	0,231
Geração	L.16	3	1,4	19,83	90	0,0008	0,015
	L.17	0,8	0,8	10,86	90	0,0011	0,012

As perdas de carga verificadas no circuito hidráulico associadas à **operação de geração** referem-se à(s)/ao:

- Entrada
- Grelha
- Ranhura da comporta (x2)
- Transição quadrangular para circular

} Tomada água – Albufeira

– Bifurcação
– Válvula esférica
– Estreitamento
– Curvas

Circuito Hidráulico – Geração

No que se refere circuito hidráulica, a **operar em modo bombagem,** as perdas de carga dizem respeito aos seguintes elementos:

– Entrada (x4)
– Grelha (x4)
– Transição quadrangular par a circular (x4)
– Válvula esférica (x2)
– Válvula de retenção (x2)

Tomada água – C. de bombagem

– Alargamento (x2)
– Junção (soma dos ramais)
– Bifurcação

Circuito Hidráulico – Bombagem

– Transição de circular para quadrangular
– Saída
– Curvas

Tomada água – Albufeira (Saída)

a) Entrada

Segundo LENCASTRE (1996), no caso de entradas arredondadas e bem desenhadas, K varia entre 0,01 e 0,05, tendo-se adotado, para este efeito, o valor intermédio de 0,03. O Quadro 4.23 contem os valores referentes à perda de carga associada à entrada da tomada de água da albufeira (ALB) e da central hidroelétrica e de bombagem (HID).

Quadro 4.23 – Perda de carga na entrada

Entrada (-)	**K (-)**	**Q (m^3/s)**	**A1 (m^2)**	**U1 (m/s)**	**ΔH (m)**
ALB	0,03	3,0	1,8x1,8	0,93	$1,31x10^{-4}$
HID	0,03	0,75	1,0x1,0	0,75	$8,6x10^{-4}$

b) Grelha

No cálculo da perda de carga na grelha considerou-se uma grelha normal à corrente, cujo o K é definido pela seguinte expressão:

$$\mathrm{K} = K_d K_f p^{1,6} f\left(\frac{b}{a}\right) \sin\theta \tag{4.20}$$

em que:

$$f\left(\frac{b}{a}\right) = 8 + 2{,}3\left(\frac{b}{a}\right) + 2{,}4\left(\frac{a}{b}\right) \tag{4.21}$$

e,

Kd Coeficiente de deposito, assumindo um limpador automático moderno (-);
Kf Coeficiente de forma da secção transversal da grelha, neste caso retangular alongada (-);
p Relação entre a área obstruída pela grelha e a área total, varia entre 6% e 16% (-);
a Espaço livre entre as grelhas (m);
e Espessura das barras da grelha (m);
b Dimensão da secção transversal das barras no sentido do escoamento (m);
φ Ângulo da grelha com a horizontal (rad).

Os valores dos parâmetros anteriormente mencionados e a perda de carga na grelha estão detalhados no Quadro 4.24.

Quadro 4.24 – Perda de carga na grelha

Grelha (-)	Kd (-)	Kf (-)	f(b/a) (-)	P (-)	φ (º)	K (-)	A (m^2)	U (m/s)	ΔH (m)
ALB	1,2	0,51	12,7	0,1	90	0,195	1,8x1,8	0,93	0,044
HID	1,2	0,51	12,7	0,1	71	0,185	1,0x1,0	0,44	0,010

c) Ranhura das Comportas

A perda de carga na ranhura depende de quatro elementos, l a largura no sentido do escoamento, b, o comprimento no sentido normal ao escoamento, p a profundidade e θ o ângulo da parede de jusante com a horizontal. Existem 3 classificações de ranhuras, curtas, medias e longas que dependem da relação l/p. Assim para o caso de estudo tem-se:

$$\lambda = \frac{l}{p} = \frac{0{,}2}{0{,}1} = 2 < 4 \quad \text{Ranhura curta} \tag{4.22}$$

Neste caso K é dado por:

$$K = \left(\frac{\eta^{1,8} - 1}{\eta^{-1,8} + 1}\right)^2 \sin\theta \tag{4.23}$$

Em que η se expressa como:

$$\eta = \frac{A + 0{,}25pb}{A} \quad \mathrm{A} = \text{área da comporta} \tag{4.24}$$

A Figura 4.7 apresenta a vista em planta da tomada de água na albufeira.

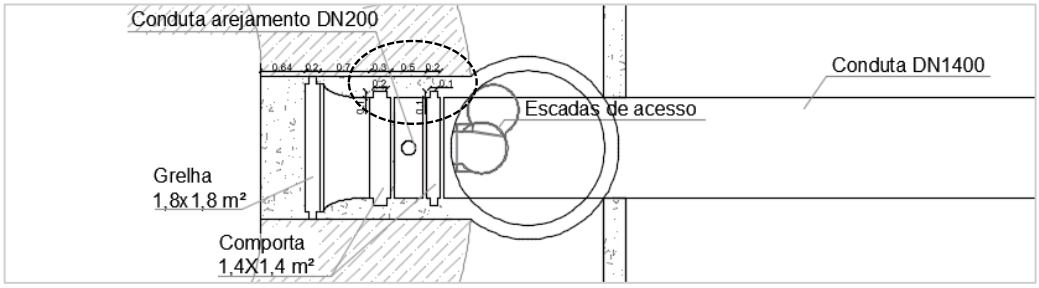


Figura 4.7 – Vista em planta da tomada de água na albufeira, pormenor: ranhura das comportas.

A perda de carga associada à ranhura da primeira comporta de espessura encontra-se no Quadro 4.25. Por simplificação considerou-se a perda de carga na ranhura da segunda comporta de igual valor à da primeira.

Quadro 4.25 – Perda de carga na ranhura das comportas

l (m)	p (m)	A (m^2)	η (-)	θ (º)	K (-)	U (m/s)	ΔH (m)
0,20	0,10	1,4x1,4	1,003	90,00	$1,29x10^{-3}$	1,95	$2,5x10^{-4}$

d) Transição

A perde de carga na transição de secção quadrangular (Q) para circular (C) e vice-versa é dada pela expressão (4.25), adotando-se um coeficiente de perda de carga que difere consoante o sentido do escoamento. O Quadro 4.26 expõe as três perdas de cargas nas transições, sendo as duas primeiras referentes às tomadas de água da albufeira (ALB) e da central hidroelétrica e de bombagem (HID) e a terceira referente à tomada de água na albufeira em modo bombagem.

$$\Delta H = K \frac{U2^2 - U1^2}{2g} \quad (4.25)$$

Quadro 4.26 – Perda de carga nas transições de secção

Transição	D (mm)	K (-)	A1 (m^2)	A2 (m^2)	U1 (m/s)	U2 (m/s)	ΔH (m)
Q-C (ALB)	1400	0,1	1,96	1,54	1,53	1,95	0,007
C-Q (ALB)	1400	0,2	1,96	1,54	1,53	1,94	0,015
Q-C (HID)	600	0,1	0,36	0,28	2,08	2,65	0,014

e) Bifurcação

A bifurcação trata-se duma separação com concordância, em que o fluxo escoa pode escoar da secção S3 para S2 e de S1 para S3 e cuja a razão entre as velocidades nos ramais (U2/U3 e U1/U3) podem ser zero, uma vez que nunca há escoamento, em simultâneo, nos ramais S2 e S1. Por exemplo se existir escoamento no sentido S3-S2, o caudal no ramal S1 é zero e vice-versa. As secções são todas iguais, portanto S1=S3=S2 e a perda de carga AH1-3 é igual AH3-2 (Quadro 4.27).

Quadro 4.27 – Perda de carga na bifurcação

ΔH3-2 (m)	K2-3 (-)	D3 (m)	Q3 (m^3/s)	U3 (m/s)	U2/U3 (-)
0,190	1,0	1,4	3,0	1,95	0

f) Junção

Para a junção simétrica com concordância existente no circuito das bombas (Figura 4.8), adotou-se uma perda de carga que corresponde a uma junção sem concordância em que S1=S3, θ=60º e AH1-3 é igual AH2-3. O Quadro 4.28 contem as dimensões e características da junção e o Quadro 4.29 a solução adotada para a perda de carga nessa mesma junção.

Quadro 4.28 – Características da junção simétrica

D2 (m)	D3 (m)	S2 (m^2)	S3 (m^3/s)	Q2 (m^3/s)	Q3 (m3/s)	Q2/Q3 (-)	S2/S3 (-)	θ (º)
1,0	1,4	0,79	1,54	1,5	3,0	0,50	0,51	80

Quadro 4.29 – Perda de carga na junção simétrica

Q2/Q3 (-)	S2/S3 (-)	θ (º)	U3 (m/s)	K2-3 (-)	ΔH1-3 (m)	ΔH2-3 (m)
0,6	0,4	60	1,95	0,45	0,090	0,090

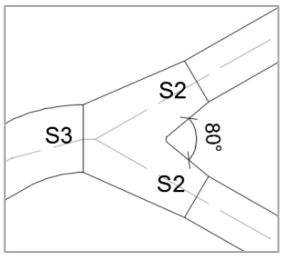


Figura 4.8 – Bifurcação com θ=80º

g) Válvula Esférica

Devido à fisionomia da válvula esféricas, as perdas de carga que lhe estão associadas são tão diminutas que se considerou, neste caso, uma perda de carga igual a zero.

h) Válvula de Retenção de Batente

A válvula de batente encontra-se a jusante da instalação de cada bomba e evita que exista escoamento no sentido contrário ao induzido pela bomba. Para a perda de carga na válvula considerou-se um K igual a 0,6 (Quadro 4.30).

Quadro 4.30 – Perda de carga na válvula batente

K (-)	Q (m^3/s)	D (m)	A (m^2)	U (m/s)	ΔH (m)
0,6	1,5	0,6	0,28	5,31	0,862

i) Alargamentos e estreitamentos troncocónicos

O circuito hidráulico incorpora 3 peças que permitem a transição entre os diâmetros das condutas (um estreitamento a montante da entrada da turbina e um alargamento a jusante de cada bomba). As perdas de carga das transições descriminadas foram calculadas de acordo com os ábacos da Figura 4.9 e encontram-se no Quadro 4.31.

Quadro 4.31 – Perda de carga no alargamento e no estreitamento

Troncocónicos	D (mm)	K (-)	A1 (m^2)	U1 (m/s)	ΔH (m)	D2/D1 (-)	θ (º)
Alarg.	600-1000	0,15	0,283	5,30	0,215	1,67	10
Estre.	1400-800	0,025	1,54	1,95	0,005	1,75	10

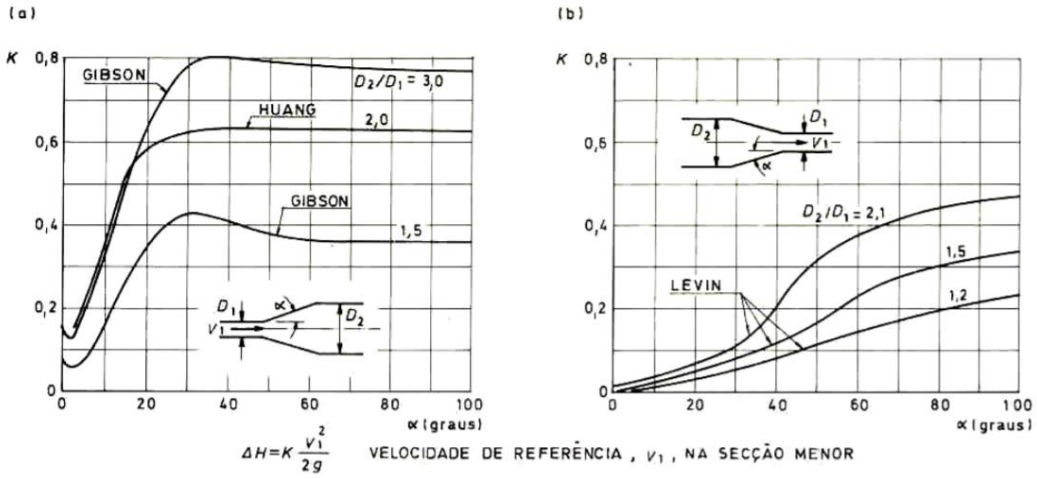


Figura 4.9 – a) Perdas de cargas localizadas em alargamentos e b) estreitamentos troncocónicos (Corps of Engineers, WES). Retirado de QUINTELA (1996)

a) Saída

A perda de carga na à saída do escoamento da tomada de água para a albufeira (em modo bombagem) é definida por um K igual a 1 (Quadro 4.32).

Quadro 4.32 – Perda de carga na saída da tomada de água para a albufeira

K (-)	Q (m^3/s)	A (m^2)	U (m/s)	ΔH (m)
1,0	3,0	1,8x1,8	0,93	0,044

b) Curvas

As perdas de carga associadas às curvas do circuito hidráulico foram calculadas com base no ábaco em LENCASTRE (1983) para curvas com ângulos diferentes de 90º, tubos lisos e $Re \approx 2,25 \times 10^5$.

O Quadro 4.33 resume as características das curvas do traçado e as respetivas perdas de carga.

Quadro 4.33 – Perdas de carga nas curvas do circuito hidráulico

Curvas	Designação	Q (m^3/s)	D (m)	θ (º)	R (m)	R/D (-)	K (-)	U1 (m/s)	ΔH (m)
Comuns	PE.1	3	1,4	38	4,03	2,88	0,075	1,95	0,015
	PE.2	3	1,4	4	-	-	0,001	1,95	1,9E-04
	PE.3	3	1,4	3	-	-	0,001	1,95	1,9E-04
	PE.4	3	1,4	3	-	-	0,001	1,95	1,9E-04
	PE.5	3	1,4	11	-	-	0,003	1,95	4,8E-04
	PE.6	3	1,4	5	-	-	0,001	1,95	1,9E-04
	PE.7	3	1,4	3	-	-	0,002	1,95	3,9E-04
	PE.8	3	1,4	7	-	-	0,0015	1,95	0,002
Comuns	PE.9	3	1,4	38	3,80	2,71	0,075	1,95	0,015
	PE.10	3	1,4	47	3,42	2,44	0,090	1,95	0,017
Bombagem	PE.11 x2	1,5	1	90	3,00	3,00	0,013	1,91	0,005
	PE.12 x2	1,5	1	90	3,00	3,00	0,013	1,91	0,005
	PE.13 x4	0,75	0,6	21	1,67	2,78	0,04	2,65	0,057
	PE.14 x4	0,75	0,6	21	1,67	2,78	0,04	2,65	0,057
	PL.1	3	1,4	30	3,00	2,14	0,065	1,95	0,013
	PL.2X2	1,5	1	30	3,00	3,00	0,065	1,91	0,024
R – Raio afeto à curva; PE – Curva em perfil; PL – Curva em planta									

4.5.7 Linha de energia

A queda útil afeta à operação de geração é dada pela equação (426).

$$H_u = z_m - z_j - \Delta H_C - \Delta H_L \quad (4.26)$$

Em que, z_m é o nível do reservatório a montante, z_j, a cota dos injetores, ΔH_C, as perdas de carga nas singularidades e ΔH_L as perdas de carga contínuas. O Quadro 4.34 sumariza as perdas de carga associadas ao circuito de geração, indicando, também, a queda útil (H_u) resultante da equação (4.26),

Quadro 4.34 – Modo Geração, perdas de carga e queda útil

Componentes	K (-)	ΔH (m)
Entrada	0,030	$1{,}31 \times 10^{-3}$
Grelha Móvel	0,195	0,044
Ranhuras das Comportas	$1{,}29 \times 10^{-3}$	5×10^{-4}
Transição Quadrangular para Circular	0,100	0,007
Bifurcação	1,000	0,194
Válvula Esférica	0,000	0,000
Estreitamento	0,025	0,005
Curvas	-	$5{,}01 \times 10^{-2}$
Contínua	-	2,152

Queda Útil	
ΔH total (m)	2,45
z_m (m)	585,0
z_j (m)	127,5
H_u (m)	455,04

Considerando duas secções (secção 1 e secção 2) da conduta forçada em que a carga é H1 e H2, a diferença entre elas corresponde ao somatório das perdas de cargas entre as duas secções (4.27).

$$H1 = H2 + \sum_{i=1}^{n}\left(\Delta H_{C_i} + \Delta H_{L_i}\right) \quad (4.27)$$

O Quadro 4.35 descreve resumidamente os pontos necessários ao traçado da linha de energia, que pode ser visualizada na peça desenhada nº 69418-EP-LE.001, do Anexo E.

Quadro 4.35 – Modo Geração, cota geométrica (z), altura piezométrica (P/γ), altura cinética ($U^2/2g$), carga total (H)

Secção	ΔH_L (m)	ΔH_C (m)	z (m)	$U^2/2g$ (m)	P/γ relativa (m)	H (m)
1	0,059	0,006	572,5	0,19	12,24	584,94
2	0,015	1,281	555,47	0,19	27,98	583,64
3	0,234	0,853	127,5	0,19	454,86	582,55
4	0,000	0,012	127,5	1,82	453,22	582,54

A altura manométrica de elevação (Hm) afeta à operação de bombagem é dada pela equação (4.28).

$$H_m = z_m - z_j + \Delta H_C + \Delta H_L \quad (4.28)$$

As perdas de carga e a Hm resultante da equação (4.28) podem ser consultadas no Quadro 4.36.

Quadro 4.36 – Modo Bombagem, perdas de carga e altura manométrica de elevação

Componentes	K (-)	ΔH (m)
Entrada	0,030	0,003
Grelha Móvel	0,185	0,040
Transição Quadrangular para Circular	0,100	0,055
Válvula Esférica	0,000	0,000
Válvula Retenção	0,600	1,723
Junção	0,450	0,174
Bifurcação	1,000	0,194
Alargamento	0,150	0,431
Transição Circular para Quadrangular	0,200	0,015
Ranhura das Comportas	$1{,}29 \times 10^{-3}$	5×10^{-4}

Componentes	K (-)	ΔH (m)
Saída	1	0,044
Curvas	-	0,211
Contínua	-	2,554
Altura de Elevação		
ΔH total (m)	5,44	
z_m (m)	125,5	
z_j (m)	585,0	
H_m (m)	464,95	

A linha de energia na fase de bombagem encontra-se traçada na peça desenhada nº 69418-EP-LE.002, do Anexo E, em que os pontos de apoio ao traçado da linha de energia estão definidos no Quadro 4.37.

Quadro 4.37 – Modo Bombagem, cota geométrica (z), altura piezométrica (P/γ), altura cinética ($U^2/2g$), carga total (H)

Secção	ΔH_L(m)	ΔH_C(m)	z(m)	$U^2/2g$ (m)	P/γ relativa (m)	H (m)
6’	0,214	0,268	115	0,36	9,66	125,02
6	2,154	0,104	127,5	0,19	462,28	589,97
5	0,034	0,040	127,5	1,91	458,30	587,71
4	0,187	0,016	127,5	0,19	459,94	587,64
3	0,229	0,838	127,5	0,19	459,74	587,43
2	0,015	1,281	555,47	0,19	30,70	586,37
1	0,065	0,006	572,5	0,19	12,38	585,07

Verificou-se que a linha de energia traçada em ambas as operações (bombagem e geração) nunca se encontra abaixo da cota da conduta e, portanto, nunca se desenvolvem no interior das condutas pressões negativas prejudiciais o escoamento.

4.6 Central Hidroelétrica e de Bombagem

4.6.1 Considerações Iniciais

Devido à escassez de informação no que se refere ao nível da água e à batimetria do leito na zona do rio Douro onde se insere a central, foram tomadas as seguintes considerações com base nas características do empreendimento do Pocinho (MELO & GOMES ,1992):

- O nível da água do rio na zona a explorar equivale ao NPA do Pocinho, 125,5 m;
- O talvegue do rio na zona de exploração está cotado a 100 m, ou seja, a 2 m acima da cota de fundo (98 m) junto à barragem do Pocinho.

A central hidroelétrica e de bombagem (HID) e as turbomáquinas podem ser observadas nas peças nº 69418-EP-HID.001 e nº 69418-EP-HID.002, do Anexo E.

4.6.2 Edifício

A HID é composta por duas alas, ala oeste destinada à instalação da turbina e a ala este das bombas (Figura 4.10 a). A primeira ocupa uma área de 179,29 m^2 em planta e é constituída por um único piso pavimentado à cota de 129,3 m cujo pé direito foi definido como sendo 8,8 m devido às dimensões da turbina a instalar. A turbina encontra-se parcialmente embutida na laje do pavimento e está situada imediatamente acima da estrutura de restituição, por forma a que a diferença entre a cota da superfície da água na estrutura de restituição e o eixo da roda da turbina seja de 2 m (Figura 4.10 b).

A ala este abrange uma área em planta de 313,3 m^2 e é formada por 2 pisos inferiores, cujos pés direitos perfazem 3 m e 15,36 m. Pavimentado à cota 129,3 m, encontra-se o piso 0 que inclui, entre outras coisas, sala de reuniões, a sala de comando, o gabinete de apoio e dá acesso a equipamentos de manobra das grelhas e das comportas que constituem as quatro tomadas de água. O piso -1, à cota de 113,6 m, dá acesso às bombas e aos equipamentos inerentes aos seus funcionamentos. Ambas as alas estão equipadas com pontes rolantes para movimentação do equipamento pesado.

4.6.3 Turbomáquinas

Dado a elevada queda bruta e o caudal de projecto que caracterizam o empreendimento considerou-se uma central equipada com turbina de ação e duas bombas centrífugas, utilizadas em centrais com quedas elevadas.

A turbina selecionada para o aproveitamento trata-se de uma turbina Pelton de eixo vertical, caracterizada por uma velocidade de rotação de 750 rpm e um rendimento de 85% que opera de acordo com uma queda útil de 455,05 m e um caudal de 3 m^3/s. A turbina é constituída por 4 injetores que induzem um jato de alta velocidade contra as pás da roda da turbina ligada ao eixo da turbina, por sua vez conectado ao gerador.

A abertura do jato que incide nas pás da roda é passível de ser regulado devido à existência de uma agulha capaz de controlar o obturador. Cada injetor possui um deflector, que é responsável pelo desvio do jato, conferindo à operação de fecho, melhor controlo em termos da velocidade da roda e das sobrepressões sofridas nas condutas. A água deflectida nas pás da roda cai sobre uma estrutura de restituição paralelepipédica implantada à cota de 123,5 m e cujas dimensões são 10,35 x 2,6 x 2,8 m^3. A jusante da estrutura encontra-se uma grelha móvel que previne a entrada de detritos de maior dimensão. A turbina Pelton foi desenhada segundo as indicações fornecidas pelo fabricante, Voith, que podem ser vistas no Anexo B.

As bombas centrifugas são do tipo HPDM600-890-2d, de eixo horizontal, do fabricante suíço *Sulze*r, e operam em consonância com uma altura de elevação de 464,95 m, bombado, cada uma, um caudal de 1,5 m^3/s, ou seja, metade do caudal de projeto. Cada bomba possui dois bocais de aspiração

de 600 mm de diâmetro, e um bocal de descarga, também ele de 600 mm. As bombas são caracterizadas por uma velocidade de rotação de 1500 rpm e por um rendimento de 86,2 %. Em termos de andares, as bombas são de andares múltiplos, uma vez que apresentam dois propulsores.

A movimentação do propulsor, induzida pela rotação do eixo, cria uma zona de vácuo no centro deste que provocando a sucção do fluido, desde a estrutura da tomada de água até ao centro do propulsor, transferindo-o para a periferia, onde existe aumento de pressão e por consequência um aumento de energia cinética no fluido. No Anexo C, é possível observar um esquema mais detalhado da configuração das bombas adotada e ainda as suas curvas características.

A instalação das bombas depende da altura máxima de aspiração, dada pela fórmula (4.18) do subcapítulo 4.5.5, diretamente ligada ao fenómeno de cavitação no interior da bomba.

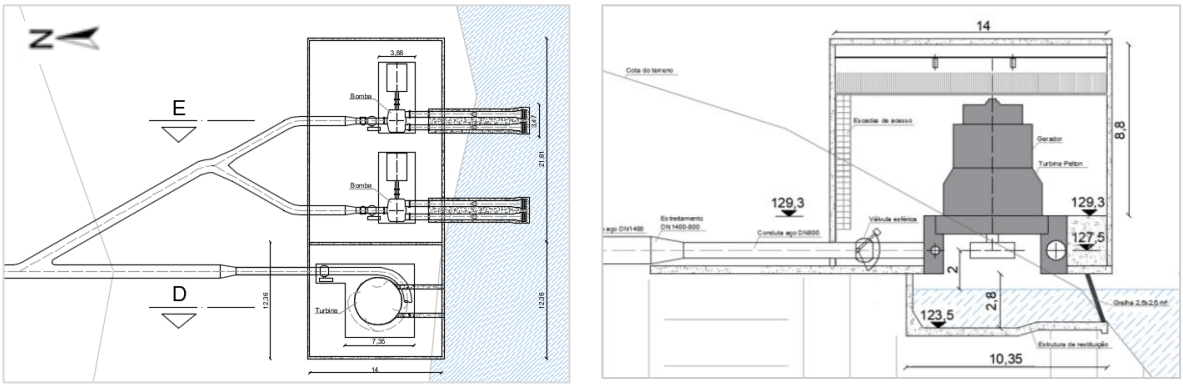
A jusante de cada bomba e a montante da turbina colocou-se uma válvula esférica, e ainda no caso das bombas uma segunda válvula, esta de retenção de forma a promover o escoamento numa só direção.

Dados os valores de caudal, de queda útil e de altura de elevação expostos no Quadro 4.38 e considerando os rendimentos, fornecido pelos fabricantes, a potência da turbina é dada pela equação (4.29) e das bombas pela equação (4.30).

$$Pt = \gamma Q H_u \eta_t \tag{4.29}$$

$$Pb = \gamma Q H_m / \eta_b \tag{4.30}$$

Pt/Pb é a potência da turbomáquina, ηt/ηb o rendimento turbina/bomba, H_u/H_m a queda útil/altura de elevação, Q o caudal de projeto e γ o peso volúmico da água.



a) b)

Figura 4.10 – a) Planta da central hidroelétrica e de bombagem junto ao rio Douro b) Implantação da turbina

O Quadro 4.38 sintetiza as características da turbina e das bombas selecionadas para integrar a central.

Quadro 4.38 – Resumo das caracteristicas da turbina Voith e das duas bombas Sulzer

Turbina Pelton	Queda útil H_u (m)	455,05
	Rendimento ηt (%)	85
	Caudal (m^3/s)	3
	Velocidade de rotação n (rpm)	7500
	Potência (MW)	11,27
	Cota do eixo (m)	127,5
	Diâmetro do bocal (m)	0,8
	Orientação do eixo (-)	vertical
	Nº de Injetores (-)	4
	Diâmetro da roda (m)	1,3
Bomba Centrífuga	Altura de elevação H_m (m)	464,95
	Rendimento ηb (%)	86,2
	Caudal (m^3/s)	1,5
	Velocidade de rotação n (rpm)	1500
	Diâmetro do bocal de descarga (m)	0,6
	Diâmetro do bocal de sucção (m)	0,6
	Andares (-)	2
	Potência (MW)	7,93
	NPSH (m)	20
	Cota do eixo (m)	115
	Nº de bocais de sucção (-)	2
	Orientação do eixo (-)	horizontal

5 Modelo do Sistema

5.1 Topologia do Sistema a Simular

O sistema de geração de energia elétrica consiste em três tipos de unidades de produção: um parque eólico; uma unidade convencional a diesel (UC) e um aproveitamento hidroelétrico. A prioridade no fornecimento de energia elétrica é dada à geração eólica tendo como fonte auxiliar a geração hidroelétrica e em último caso a UC. A exploração do parque eólico é coordenada com a do aproveitamento na medida em que a resultante da diferença entre a produção eólica e consumo, é comunicado à central hidroelétrica e de bombagem (HID) que é responsável pelo armazenamento no caso de existir excesso de energia eólica, gerando um fluxo de caudais que entram na albufeira ou pela produção de energia em caso de défice no fornecimento do consumo, gerando fluxos de caudais que saem da albufeira. Na eventualidade de existirem limitações técnicas que condicionam as operações de geração hidroelétrica, a UC é responsável pelo fornecimento do consumo. A UC deve ter uma potência instalada tal de forma que consiga, isoladamente, satisfazer o consumo. O parque eólico e a unidade convencional não serão alvo de dimensionamento na presente dissertação.

O comportamento da albufeira enquanto reservatório que possui caudais afluentes e efluentes é dada pela a equação da continuidade (5.1) sendo estes caudais das seguintes naturezas: caudal descarregado, caudal ecológico, caudal natural, caudal evaporado, caudal turbinado e caudal bombado.

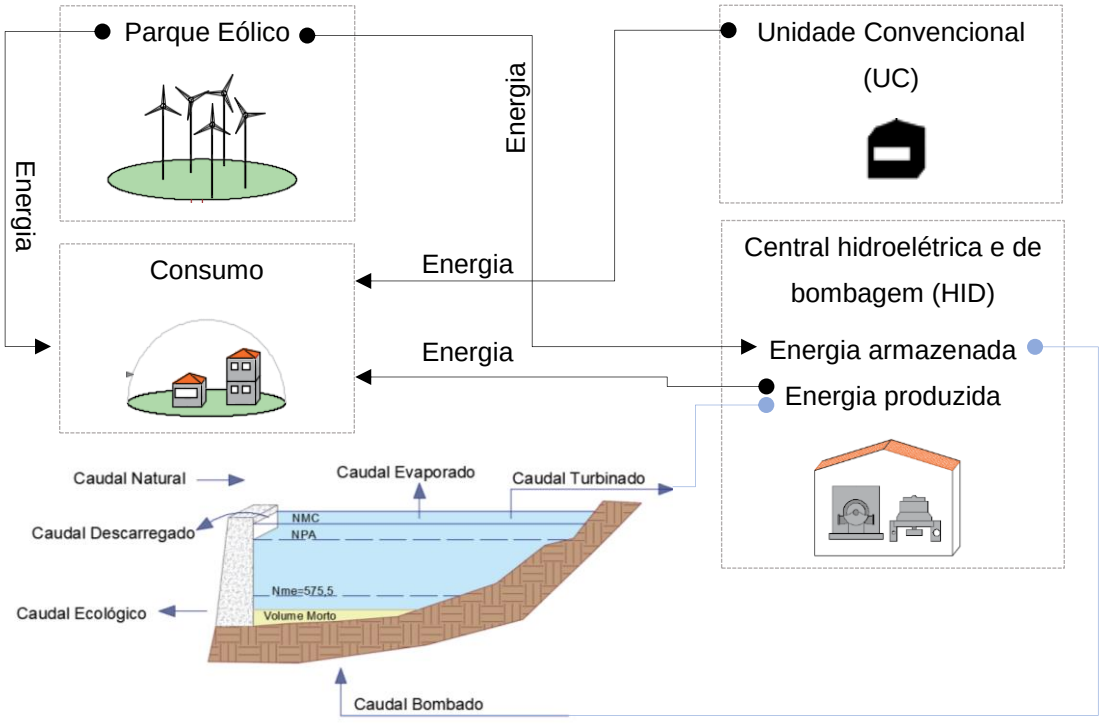


Figura 5.1 – Esquema alusivo à topologia do aproveitamento hidroelétrico-eólico com bombagem

De modo geral, dir-se-á que ocorreu uma falha no aproveitamento hidroelétrico-eólico se nem o parque eólico nem o aproveitamento hidroelétrico conseguirem cumprir com o fornecimento de energia exigido pela rede, sendo a responsabilidade do abastecimento delegada à unidade convencional. A falha pode ter origem no facto do caudal a turbinar ser inferior ao caudal mínimo passível de ser turbinado, ou ser devida ao incumprimento do volume mínimo na albufeira (Nme). O número de falhas corresponde diretamente ao número de horas que a UC opera.

A simulação de cada cenário possui uma duração dum ano hidrológico com 365 dias, caracterizada por um passo de cálculo horário. Assume-se que o nível da albufeira no início da simulação (1 de outubro) encontra-se no nível de pleno armazenamento (NPA).

O modelo foi concebido na linguagem de programação do *Excel* (VBA) e os resultados do modelo analisados também no *Excel.*

5.2 Dados de Entrada do Modelo

Aos dados de entrada do modelo possuem as seguintes designações:

$Qesc_i$	Série diária de caudal em regime natural (m^3/s)
$Qeco_i$	Série mensal de caudal ecológico (m^3/s)
$Qevap_i$	Série mensal de caudal evaporado (m^3/s)
E_{EOLi}	Série anual de produção de energia eólica (MW)
C_{ONSi}	Série anual de consumo (MW)
NPA	Nível de pleno armazenamento (m)
VNPA	Capacidade da albufeira (m^3)
CV	Curva de volumes armazenados da albufeira (Nível-Volume, Subcapítulo 5.2)

A série anual de escoamentos em regime natural ($Qesc_i$), a série mensal de caudais ecológico ($Qeco_i$) o e a série de caudais mensais que resulta do fenómeno da evaporação ($Qevap_i$) foram definidas no Capítulo 3.

A série de produção de energia eólica (E_{EOLi}), trata-se de uma série sintética horária sem correspondência direta a nenhuma localização geográfica específica, mas capaz de ser aplicada em Portugal continental. Esta série representa a produção, num ano típico, duma turbina eólica de 2,05 MW de potência nominal a uma altura de 80 m. À semelhança da série de produção eólica, a série de consumo (C_{ONSi}) também ela é representativa dum ano típico, mas adimensionalizada pelo valor do consumo de ponta. Ambas as séries foram cedidas pela Dr. Ana Estanqueiro e pela Eng. Ana Rita Machado do Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG). A série temporal representativa da produção anual de uma turbina eólica de 2,05 MW e a série adimensional de consumo encontram-se nos Gráficos 5.1 e 5.2.

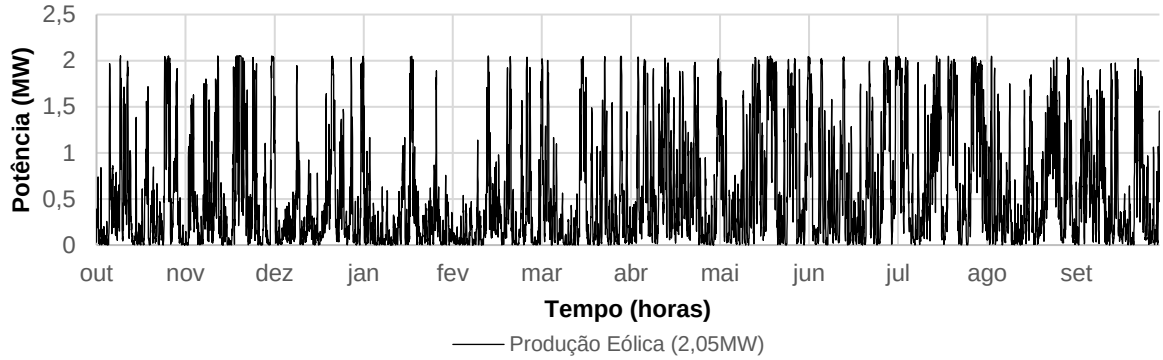


Gráfico 5.1 – Série anual de produção eólica duma turbina (P_{EOL}= 2,05 MW)

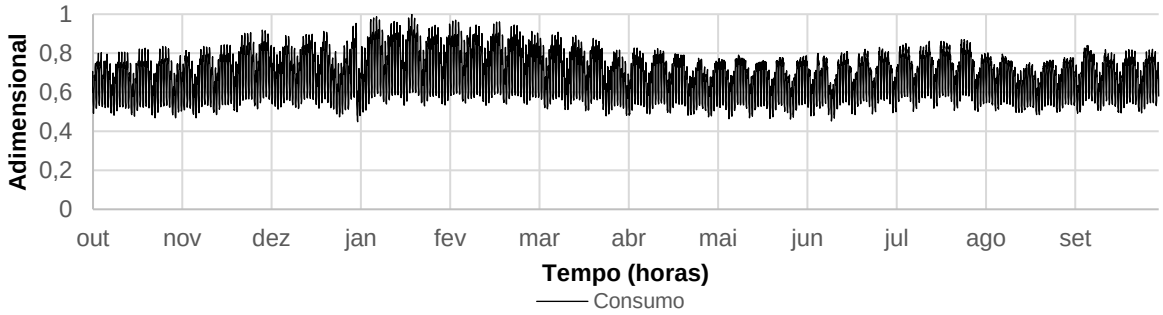


Gráfico 5.2 – Série anual adimensionalizada do consumo de energia

Devido há existência de várias condicionantes tais como, o efeito de esteira, a influência do relevo e de obstáculos, as perdas nas linhas internas do parque, entre outras, que influenciam o valor da potência efetivamente entregue à rede, considerou-se no presente estudo 90% da produção eólica.

5.3 Equações Utilizadas e Restrições à Exploração do Modelo

A dinâmica de entrada e saída de caudal na albufeira é dada pela equação da continuidade (5.1), que pode ser descrita em função do volume na albufeira no instante i+1 sob a forma da equação de diferenças finitas (5.2).

$$\frac{dV}{dt} = Qa + Qe \tag{5.1}$$

$$V_{i+1} = V_i + \left(\frac{Qa_i + Qa_{i+1}}{2} - \frac{Qe_i + Qe_{i+1}}{2}\right)\Delta t \tag{5.2}$$

Em que, Qa é o caudal afluente à albufeira, Qe o caudal efluente à albufeira, V_i o volume no instante i, V_{i+1} o volume no instante i+1 e Δt Intervalo de tempo.

Diferenciando as parcelas afluentes e efluentes:

$$V_i = V_{i-1} + (A + \mathrm{B} - \mathrm{C} - \mathrm{D} - \mathrm{E} - \mathrm{F})\,\Delta t \tag{5.2}$$

$$A = \frac{Qesc_i + Qesc_{i-1}}{2};\ B = \frac{Qb_i + Qb_{i-1}}{2};\ C = \frac{Qeco_i + Qeco_{i-1}}{2};$$

$$D = \frac{Qevap_i + Qevap_{i-1}}{2};\ E = \frac{Qdesc_i + Qdesc_{i-1}}{2};\ F = \frac{Qt_i + Qt_{i-1}}{2}$$

Sendo, Qesc, o caudal em regime natural, Qb, o caudal bombado, Qeco, o caudal ecológico, Qevap, o caudal evaporado, Qdesc, o caudal descarregado e Qt, o caudal turbinado. Os caudais turbinados e bombados (Qt e Qb) e as potências (Pt e Pb) relacionam-se através das fórmulas (5.1) e (6.2), respetivamente, do Capítulo 6, e onde se admite que os rendimentos ɳt e ɳb são constantes e iguais a 0,85 e a 0,862 pela ordem indicada. Os valores do rendimento foram fornecidos pelos fabricantes das bombas (Sulzer) e da turbina (Voith).

$$Pt(t) = \gamma Qt(t) H_u \eta_t \quad (4.29)$$

$$Pb(t) = \gamma Qb(t) H_m / \eta_b \quad (4.30)$$

As energias armazenada e produzida a cada instante, t, são dadas por:

$$Eb(t) = Pb(t)\Delta t \quad (5.3)$$

$$Et(t) = Pt(t)\Delta t \quad (5.4)$$

A resposta do modelo está dependente de existirem restrições técnicas relacionadas com as limitações que advêm do funcionamento da HID, nomeadamente quanto à gama de caudais que a turbina e a bomba permitem processar (Equações 5.6 e 5.7), que podem levar a que a HID não produza energia ou só produza parcialmente, ou que a HID não bombe completamente ou parcialmente o excedente proveniente da eólica. Adicionalmente, e tendo em conta que a albufeira é um reservatório artificial limitado, existem condicionantes, em termos do volume na albufeira, que podem inibir as operações de geração e bombagem. Nessas condições, caso a albufeira se encontre num nível próximo ou superior ao nível de pleno armazenamento (NPA), a operação de bombagem é cancelada (Eq. 5.8); já no caso da produção hidroelétrica esta só será possível se o nível de água na albufeira for superior ao nível mínimo de exploração (Nme) (Eq. 5.9). No que diz respeito às condições de exploração do Rio Douro, assume-se estar a extrair e a injetar caudal da albufeira do Pocinho e que em termos gerais o balanço de água é nulo.

Como mencionado anteriormente, em caso de falha a UC é responsável pelo fornecimento de energia.

Devido ao facto de não ser possível, nem conveniente, bombar e turbinar ao mesmo tempo, visto que as duas operações partilham dum trecho de conduta em comum, a restrição (5.5) é conceptual onde se apresenta as variáveis Ob_i e Ot_i que representam as operações bombar e turbinar, respetivamente. Estas apenas podem tomar os valores 1 (opera) ou zero (não opera).

$$Ob_i + Ot_i \leq 1 \tag{5.5}$$

As equações (5.6) e (5.7) definem as limitações técnicas da HID quanto à gama de caudais turbináveis e bombáveis. Esta gama é limitada superiormente pelo caudal de projeto e inferiormente por 15% desse valor, no caso das operações de bombagem (Qbmin), e 20% no caso das operações de geração (Qtmin). Estes limites correspondem, em termos de potências, a Pbmin (0,79 MW) e a Ptmin (2,27 MW), respetivamente (Fase 1 do fluxograma da Figura 5.4 Parte 1 e Parte 2)

$$0{,}6\ m^3/s\ \leq Qt_i(t) \leq 3\ m^3/s\ \Longmapsto 2{,}27\ MW \leq Pt_i(t) \leq 11{,}27\ MW \tag{5.6}$$

$$0{,}15\ m^3/s\ \leq Qb_i(t) \leq 3\ m^3/s\ \Longmapsto 0{,}79\ MW \leq Pb_i(t) \leq 15{,}86\ MW \tag{5.7}$$

As restrições representadas nas equações (5.8) e (5.9) são restrições técnicas que derivam da capacidade de armazenamento limitada da albufeira. O caudal bombado (Qb_i) é nulo, caso o volume na albufeira seja igual ou superior VNPA-M m^3. Em que VNPA é o volume correspondente ao nível de pleno armazenamento (NPA) e M é um valor marginal definido como o volume entre o NPA e o nível 10 cm abaixo do nível de NPA. O mesmo sucede para o caudal turbinado (Qt_i) caso o volume seja igual ou inferior ao volume relativo ao Nme, VNme. O caudal que fica "por bombar" considera-se, assim, energia não armazenada, ENA_{HID}, (Fase 2 do fluxograma da Figura 5.4 Parte 1 e Parte 2).

$$Qb_i = 0\ m^3/s, \quad se \quad V_i(t) > VNPA - M\ m^3 \tag{5.8}$$

$$Qt_i = 0\ m^3/s \quad se \quad V_i(t) < VNme\ m^3 \tag{5.9}$$

A equação (5.10) define a existência de caudal descarregado, diferente de zero, quando o volume na albufeira excede o volume correspondente ao NPA (VNPA).

$$Qdesc_i(t) \neq 0\ m^3/s \quad se \quad V_i(t) > VNPA\ m^3 \tag{5.10}$$

A definição do modelo está dependente de duas funções auxiliares (Figura 5.2 e 5.3), a primeira devolve uma cota N para um dado volume V, através de uma interpolação entre dois valores da curva de volumes armazenados, descrita no Gráfico 3.2, e a segunda retorna um caudal descarregado num passo de cálculo i, que exige como valores de iniciação, um volume V e um caudal descarregado (Qdesc), ambos referentes ao passo de cálculo i-1 e que através da condição $|Qdesci - QdescXi| < 0{,}001|$ da Figura 5.3, obriga Qdesc a cada incremento i, a convergir para o seu valor real.

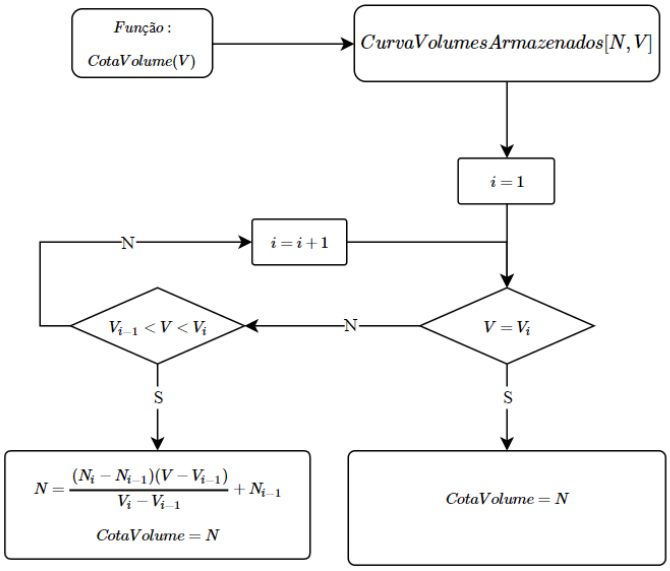


Figura 5.2 – Subrotina CotaVolume com base na curva de volume armazenados

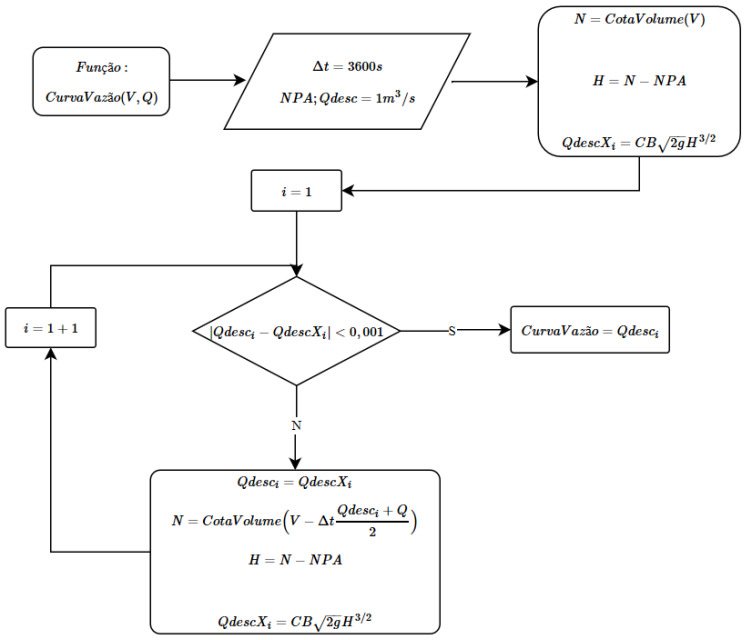


Figura 5.3 – Subrotina da curva de vazão do descarregador de cheia

A Figura 5.4 Parte 1 e Parte 2 descreve o fluxograma do procedimento computacional utilizado na definição do modelo operacional do funcionamento do aproveitamento hidroelétrico-eólico.

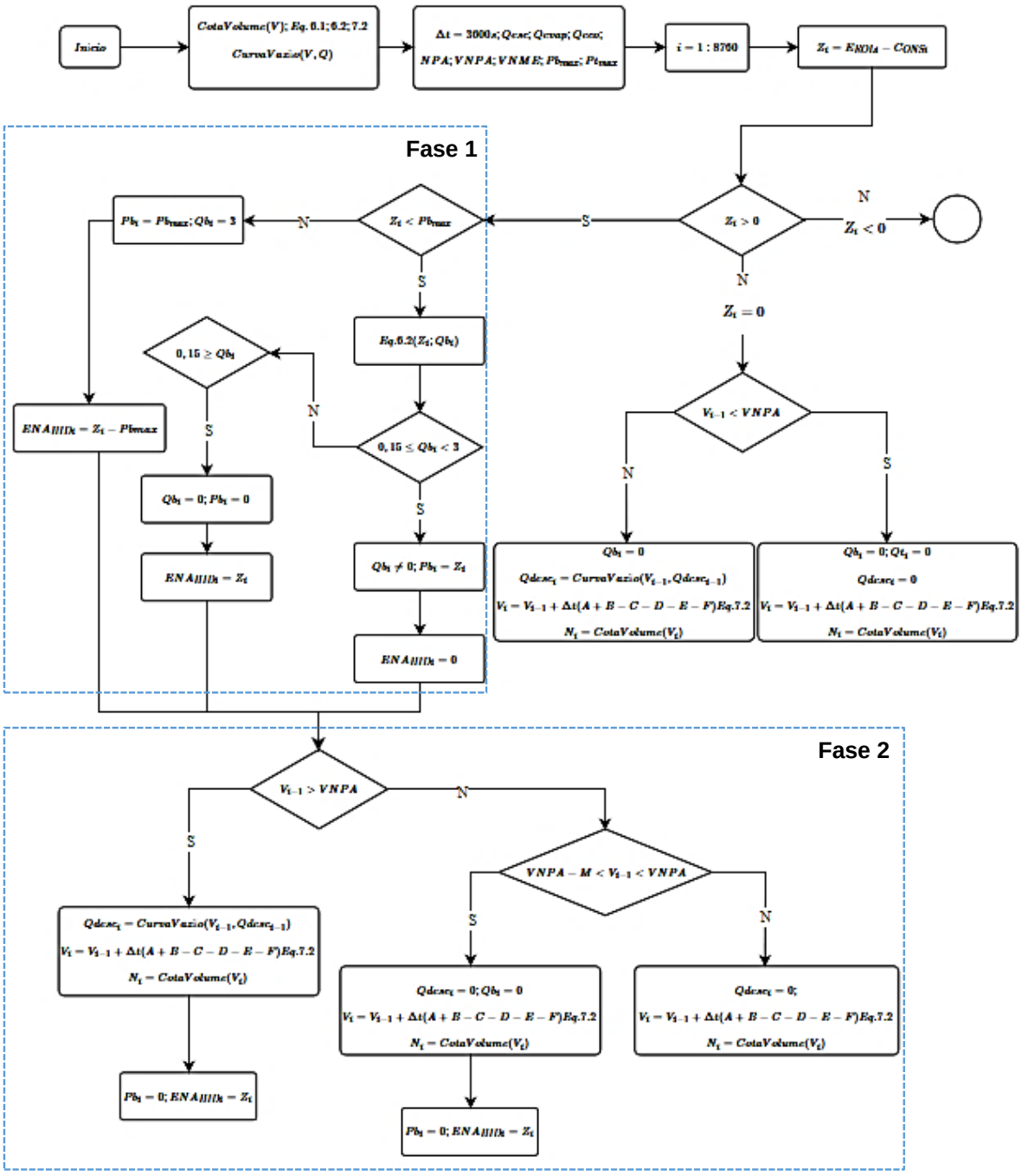


Figura 5.4 – Fluxograma do modelo operacional do aproveitamento hidroelétrico-eólico (Parte 1)

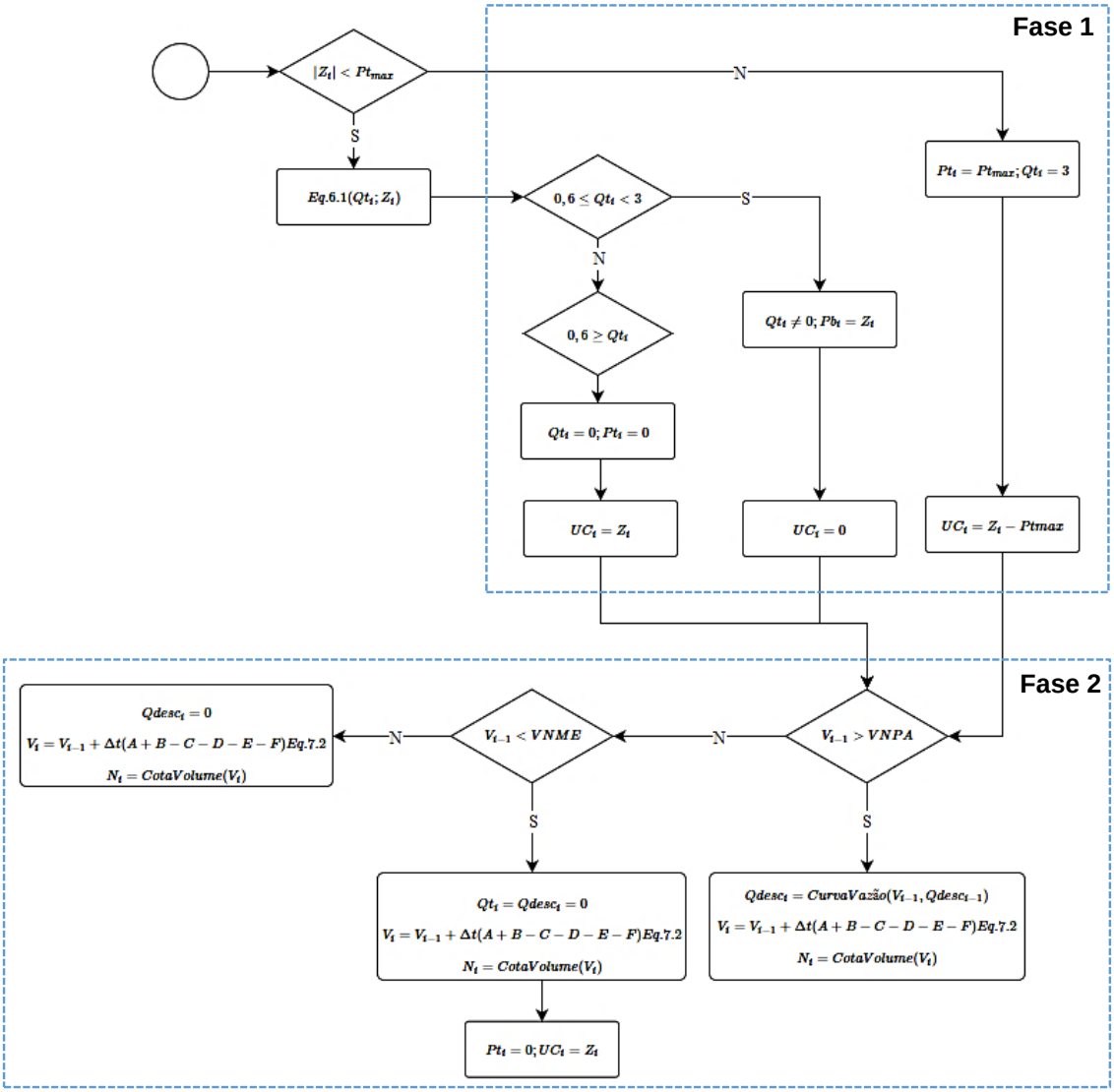


Figura 5.4 - Fluxograma do modelo operacional do aproveitamento hidroelétrico-eólico (Parte 2)

5.4 Resultados do Modelo

As séries e valores obtidos no modelo apresentam as seguintes designações:

$Qdesc_i$ Série anual de caudal descarregado (m^3/s);

Qb_i Série anual de caudal bombado (m^3/s);

Qt_i Série anual de caudal turbinado (m^3/s);

Pb_i Série anual da potência consumida pelas bombas (MW);

Pt_i Série anual da potência gerada pela turbina (MW).

V_i Série da variação anual do volume na albufeira (m^3);

N_i Série da variação anual do nível na albufeira (m);

E_{UCi} Série anual de produção da UC (MW);

E_{HIDi} Série anual de armazenamento/produção hidroelétrica (MW);

ENA_{HID} Série anual de energia eólica não armazenada na albufeira (MW);

A série E_{HIDi} corresponde à sobreposição das séries Pbi e Pt_i, em que valores positivos da série corresponde à energia eólica consumida, por tempo, pelas bombas (Pbi) e por consequência armazenada na albufeira sob a forma de energia potencial e os valores negativos representam a energia, por tempo, produzida pela turbina.

Por forma a esclarecer a leitura feita entre os dados de entrada e os resultados do modelo, selecionaram-se os primeiros 15 dias do mês de maio do subcenário C1.1 (subcapítulo 6.2), e destacaram-se as situações I (assinalada a negro) e II (assinalada a cinzento) entre dia 6 e 7 desse mesmo mês.

O Gráfico 5.3 mostra a variação do nível de água na albufeira (N_i) e o Gráfico 5.4 representa as séries de produção eólica (E_{EOLi}) e de consumo (C_{ONSi}).

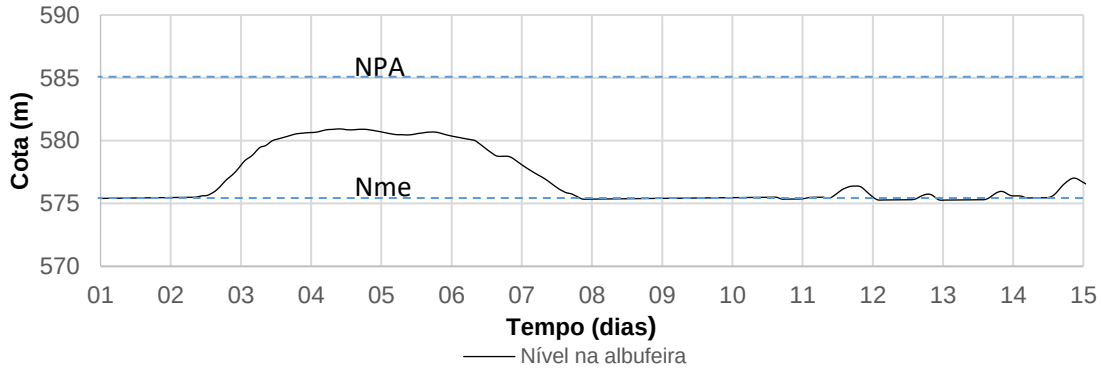


Gráfico 5.3 – Série temporal da variação do nível de água na albufeira (N_i)

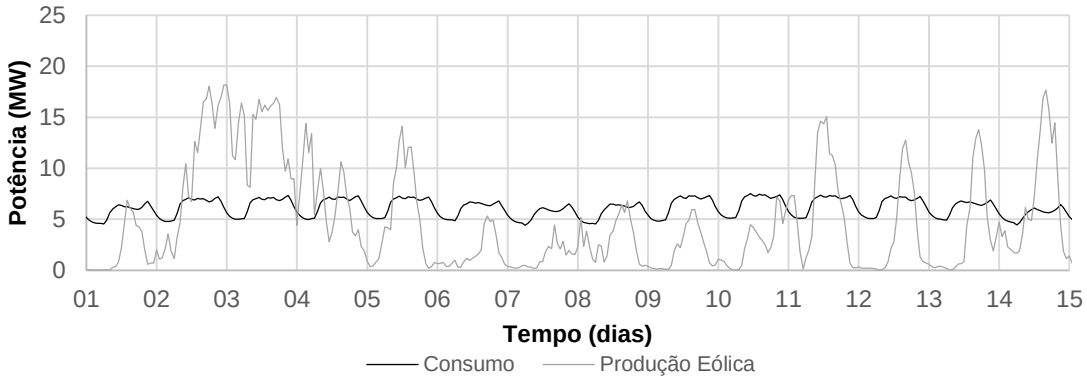


Gráfico 5.4 – Séries temporais de produção eólica (E_{EOLi}) e consumo (C_{ONSi})

Analisando, de um modo expedito, o Gráfico 5.4, verifica-se um excesso de produção eólica entre dia 2 e 4 que se reflete diretamente no aumento do nível na albufeira nesse mesmo período. Após esse intervalo tempo, a produção eólica começa a ser inferior ao consumo, provocando o decréscimo do nível na albufeira, acabando por esta atingir o Nme a dia 8. Por consequência a HID deixa de operar,

visto não existir recurso hídrico disponível para turbinar e o consumo é exclusivamente garantido pela eólica e pela UC (Gráficos 5.6).

O Gráfico 5.5 resulta da diferença entre a série de produção eólica e consumo, cujo os valores positivos representam o excedente de energia e os negativos o défice. Assinalado a tracejado, no mesmo gráfico, encontram-se, a negativo, a potência gerada pelo mínimo caudal passível de ser turbinado (Ptmin) e a positiva, a potência consumida para bombar o caudal mínimo (Pbmin).

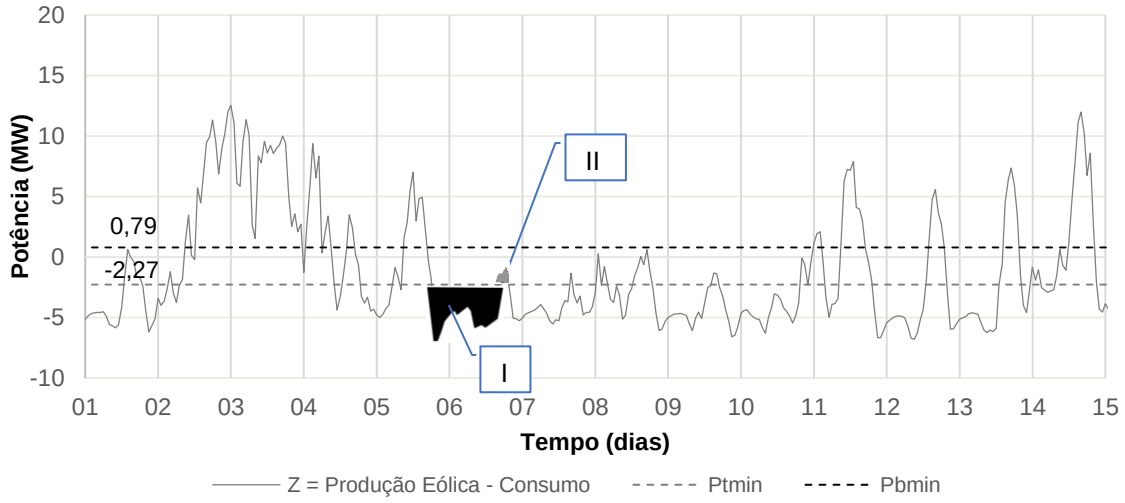


Gráfico 5.5 – Série temporal Z, resultante da diferença, hora a hora, entre a série de produção eólica e de consumo, potência mínima que a turbina é capaz de gerar (Ptmin) e potência mímima a que a bomba opera (Pbmin)

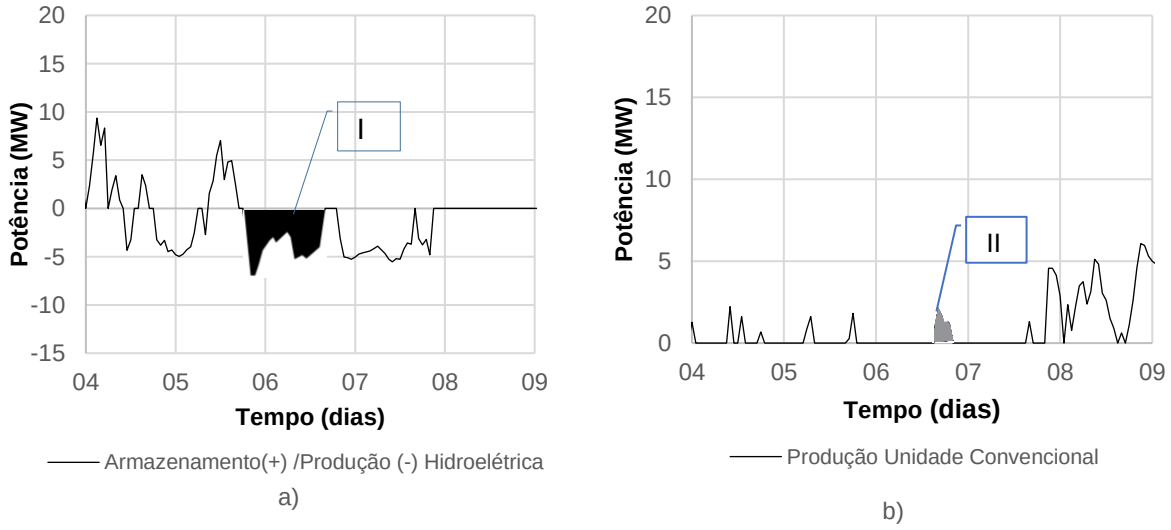


Gráfico 5.6 – a); b) Série temporal de energia armazenada (valores positivos) e produzida (valores negativos) pela HID; c) Série temporal de produção de energia na UC.

A título de exemplo, considere-se uma janela temporal em torno do dia 6, relativa aos Gráficos 5.5 e 5.6. A situação I assinalada a negro, no Gráfico 5.5, a existência de défice no fornecimento de energia por parte da eólica, tendo-se observado no Gráfico 5.6 a) que este défice foi assegurado pela geração

hidroelétrica. Não obstante, no final de dia 6 (situação II assinalada a cinza) apesar de existir disponibilidade de recurso para turbinar, como verificado no Gráfico 5.3, o valor da energia em défice é inferior a Ptmin e, portanto, o fornecimento tem de ser assegurado pela UC.

6 Cenários Estudados e Análise de Resultados

6.1 Definição dos Cenários

Estabelecida uma potência na central hidroelétrica de geração de 11,27 MW, definiram-se para os três cenários estudados: um consumo de ponta que rondasse os 95% da potência instalada na HID; e um parque eólico com uma potência instalada cerca de 2 a 3 vezes superior ao consumo de ponta.

O primeiro cenário contempla um parque eólico com uma potência instalada (P_{EOL}) de 20,5 MW e apresenta quatro subcenários relativos a quatro níveis de pleno armazenamento (NPA) entre 585 e 600 m. Nos dois últimos cenários, C2 e C3, definiu-se um parque eólico com 26,65 MW e 30,75 MW, respetivamente, considerando em cada, dois subcenários na condição do NPA equivalente a 585 e a 600 m. O consumo de ponta (P_C) é transversal a todos os cenários propostos e foi fixado em 9,5 MW.

O Quadro 6.1 inclui a definição dos subcenários conforme o NPA na albufeira e a sua capacidade (VNPA), o nível mínimo de exploração (Nme), a potência eólica instalada (P_{EOL}) e o consumo de ponta (P_C).

Quadro 6.1 – Cenários estudados

Cenários	**C1**				**C2**		**C3**	
Subcenários	**C1.1**	**C1.2**	**C1.3**	**C1.4**	**C2.1**	**C2.2**	**C3.1**	**C3.2**
VNPA (m^3)	775 491	1 249 652	2 250 726	3 251 800	775 491	3 251 800	775 491	3 251 800
NPA (m)	585	590	595	600	585	600	585	600
Nme (m)	575,5	575,5	575,5	575,5	575,5	575,5	575,5	575,5
P_{EOL} (MW)	20,5	20,5	20,5	20,5	26,65	26,65	30,75	30,75
P_C (MW)	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5

As séries temporais de produção de energia eólica e de consumo relativas aos cenários C1, C2 e C3 (Gráficos 1, 2 e 3 respetivamente) encontram-se no Anexo D, juntamente com as séries temporais da variação do nível de água na albufeira, de produção de energia na unidade convencional (UC) e de armazenamento/produção hidroelétrica resultantes dos subcenários simulados, C1.2 e C1.3, (Gráficos 4 a 9).

6.2 Análise de Resultados

Numa primeira fase da análise de resultados contabilizaram-se o número de horas, expressos em meses, em que o parque eólico assegurou totalmente o consumo, por forma a compreender com que frequência a central hidroelétrica e de bombagem (HID) e a unidade convencional (UC) são

requisitadas. Com base nos Gráficos 1, 2 e 3 do Anexo D, obtiveram-se: o número de meses em que parque eólico satisfez, por si só, o consumo e não produziu energia em excesso (situação A), o número de meses em que este satisfez o consumo e produziu excedente (situação B); e número de meses em que o parque não conseguiu satisfazer o consumo totalmente (situação C). Verificou-se que em todos os cenários, cerca de 2/3 do ano é pedido à HID e/ou à UC que abasteçam o consumo em conjunto com o parque eólico (Quadro 62).

Quadro 6.2 – Número de meses por ano de funcionamento do parque eólico, de acordo com as condições A, B e C para os cenários C1, C2 e C3

Cenários	A (meses)	B (meses)	C (meses)
C1	0	3,5	8,5
C2	0	4,2	7,8
C3	0	4,7	7,3

O Quadro 6.3 para cada cenário estudado sumariza os valores anuais de consumo (C_{ONS}^{a}) e de produção eólica (E_{EOL}^{a}), e descrimina as parcelas anuais: do consumo satisfeito diretamente pela eólica (C_{EOL}^{a}); da produção anual eólica que não é possível bombar devido ao limite superior de funcionamento da bomba (Z>Pbmax)[1] e do consumo que o parque eólico não consegue satisfazer (C_{FALTA}^{a}). Constatou-se que, à exceção do parque definido no cenário C1, os restantes parques geram picos de energia em excesso, destinados ao armazenamento, superiores ao limite técnico de funcionamento das bombas. Este excesso de energia que fica "por bombar" corresponde a 0,5 e 2,85 GWh ou seja cerca de 0,9 e 4%, no caso C2 e C3 respetivamente, da produção da energia anual produzida pelo parque eólico (E_{EOL}^{a}). Tais percentagens permitiram, inferir que os parques eólicos selecionados são compatíveis com as potências instaladas nas bombas, na medida que em que permitem o armazenamento de energia numa primeira instância.

Quadro 6.3 – Valores anuais de consumo (C_{ONS}^{a}) e produção eólica (E_{EOL}^{a}) para os cenários C1, C2 e C3

Cenários	P_{EOL} (MW)	C_{ONS}^{a} (GWh)	E_{EOL}^{a} (GWh)	C_{FALTA}^{a} (GWh)	C_{EOL}^{a} (GWh)	Z>Pbmax (GWh)
C1	20,50	56,70	43,40	28,50	28,2	0,00
C2	26,65	56,70	56,50	25,70	31,0	0,50
C3	30,75	56,70	65,20	23,70	33,0	2,85

A UC é responsável por colmatar as falhas de produção do sistema hidroelétrico-eólica na tentativa de satisfazer o consumo, que podem se dever ao facto: do nível de água na albufeira igualar o Nme (I); do pedido de potência à HID ser inferior à potência mínima do sistema de geração hidroelétrica - Ptmin

[1] Parcela da produção anual eólica que não foi consumida na bombagem (ENA_{HID}) (e que, por consequência, não foi armazenada na albufeira) devido ao limite superior de funcionamento das bombas. Ver fluxograma da Figura 5.4.

(II); ou ambas as razões (I) e (II). Em geral, o aumento tanto de potência eólica como o aumento do NPA na albufeira conduziram, à diminuição da produção de energia na UC e por consequência à diminuição do número de horas de funcionamento desta. Observando o Quadro 6.4, verificou-se que no primeiro subcenário (C1.1) a UC operou durante mais horas devido a (I) e que no último subcenário simulado (C3.2) a intervenção da UC no fornecimento de energia se deveu maioritariamente a (II).

O Quadro 6.4 resulta da avaliação dos gráficos da Figura 6.1 e 6.2 e dos Gráficos 4 a 7 do Anexo D.

Quadro 6.4 – Número de meses por ano que a UC e a HID operam, produção anual de energia na UC e na HID (E_{UC}^{a} e E_{HID}^{a}, respetivamente) e valor da produção de ponta na UC (P_{UC})

cenário	UC						HID	
	Tempo (meses)				P_{UC} (MW)	E_{UC}^{a} (GWh)	Tempo (meses)	E_{HID}^{a} (GWh)
	(I)	(II)	(I) e (II)	Total				
C1.1	4,2	1,4	0,4	5,2	9,4	16,4	3,3	12,1
C1.2	4,0	1,4	0,4	5,0	9,4	15,6	3,6	12,9
C1.3	3,7	1,4	0,3	4,7	9,4	14,5	3,9	14,0
C1.4	3,4	1,4	0,3	4,4	9,4	13,5	4,1	15,0
C2.1	2,4	1,4	0,3	3,5	9,4	9,9	4,4	15,8
C2.2	1,5	1,4	0,1	2,7	9,1	7,1	5,1	18,6
C3.1	1,7	1,3	0,2	2,8	9,3	7,4	4,5	16,3
C3.2	0,9	1,3	0,1	2,1	9,0	4,6	5,2	19,1

As Figuras 6.1, representam as séries anuais de produção na UC de todos subcenários à exceção de C1.2 e C1.3. Aumentando sucessivamente a potência instalada no parque eólico (P_{EOL}) e fixando o NPA em 585 m, constatou-se que valor anual da produção (E_{UC}^{a}) diminuiu significativamente, mas que, no geral, a produção de energia na UC apresenta valores que superaram, frequentemente, o Ptmin (2,27 MW). Em contrapartida, os subcenários que contemplam um NPA de 600 m, demonstraram que os picos de produção de energia na UC concentram-se, maioritariamente, entre dezembro e abril (Figura 6.1).

Os valores da produção de ponta das séries UC_i, descritos no Quadro 6.4 como P_{UC}, não se afastaram significativamente da potência instalada na UC, estipulada previamente como sendo 9,5 MW. Comparando a Figura 6.1 e 6.3, verificam-se que picos de produção coincidiram, temporalmente, com um período de baixos rendimentos eólicos (Gráficos 1, 2 e 3 do Anexo D) e/ou de níveis na albufeira equivalentes ao Nme (Figura 6.4 e Quadro 6.4, situação I).

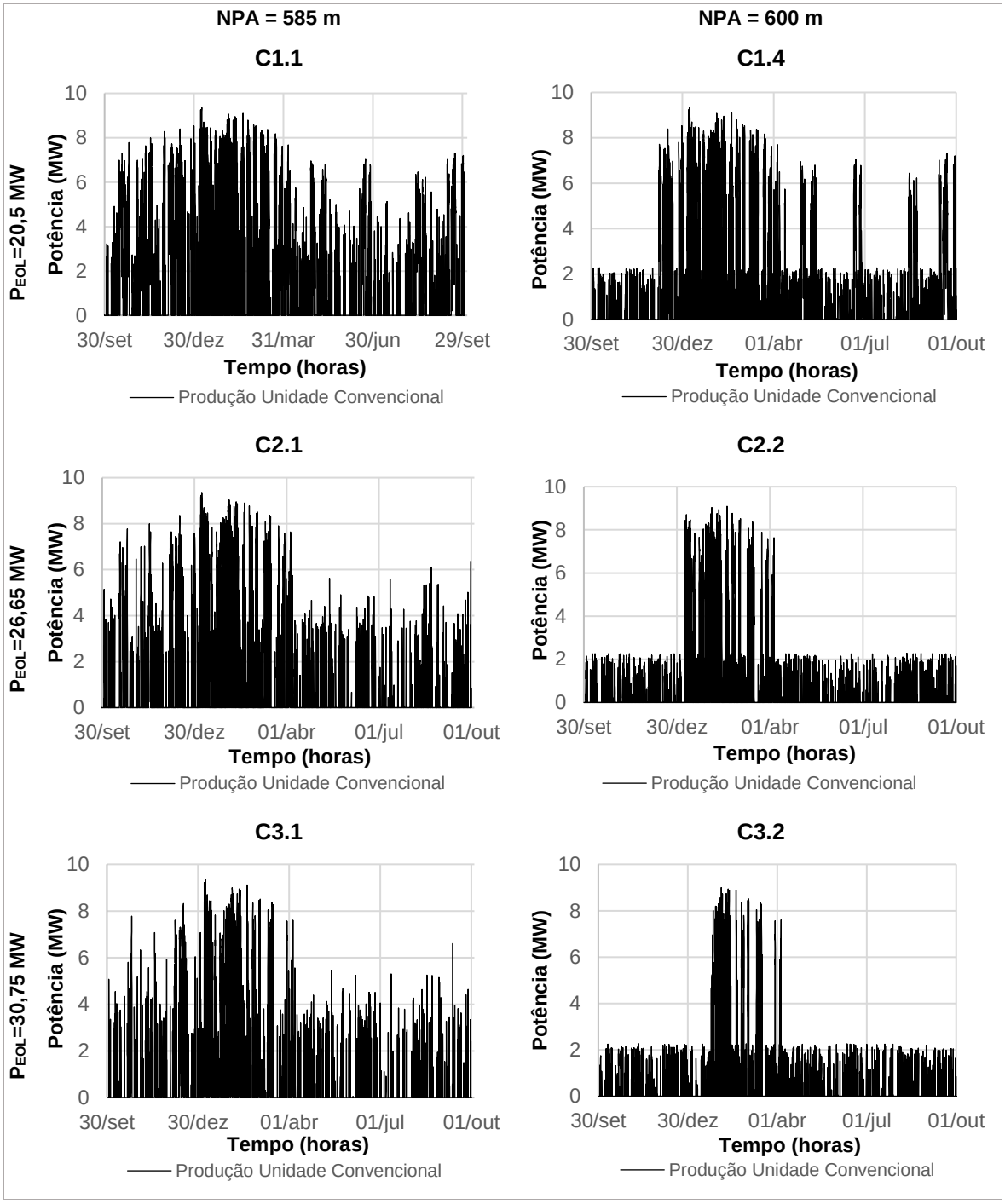


Figura 6.1 – Séries anuais de produção de energia na UC (UC_i) em seis dos oito subcenários estudados

A Figura 6.2 expõe as séries E_{HIDi} referentes a seis dos oito subcenários estudados, representativos do armazenamento de energia eólica na albufeira sob a forma de energia potencial e da produção de energia na central hidroelétrica e de bombagem.

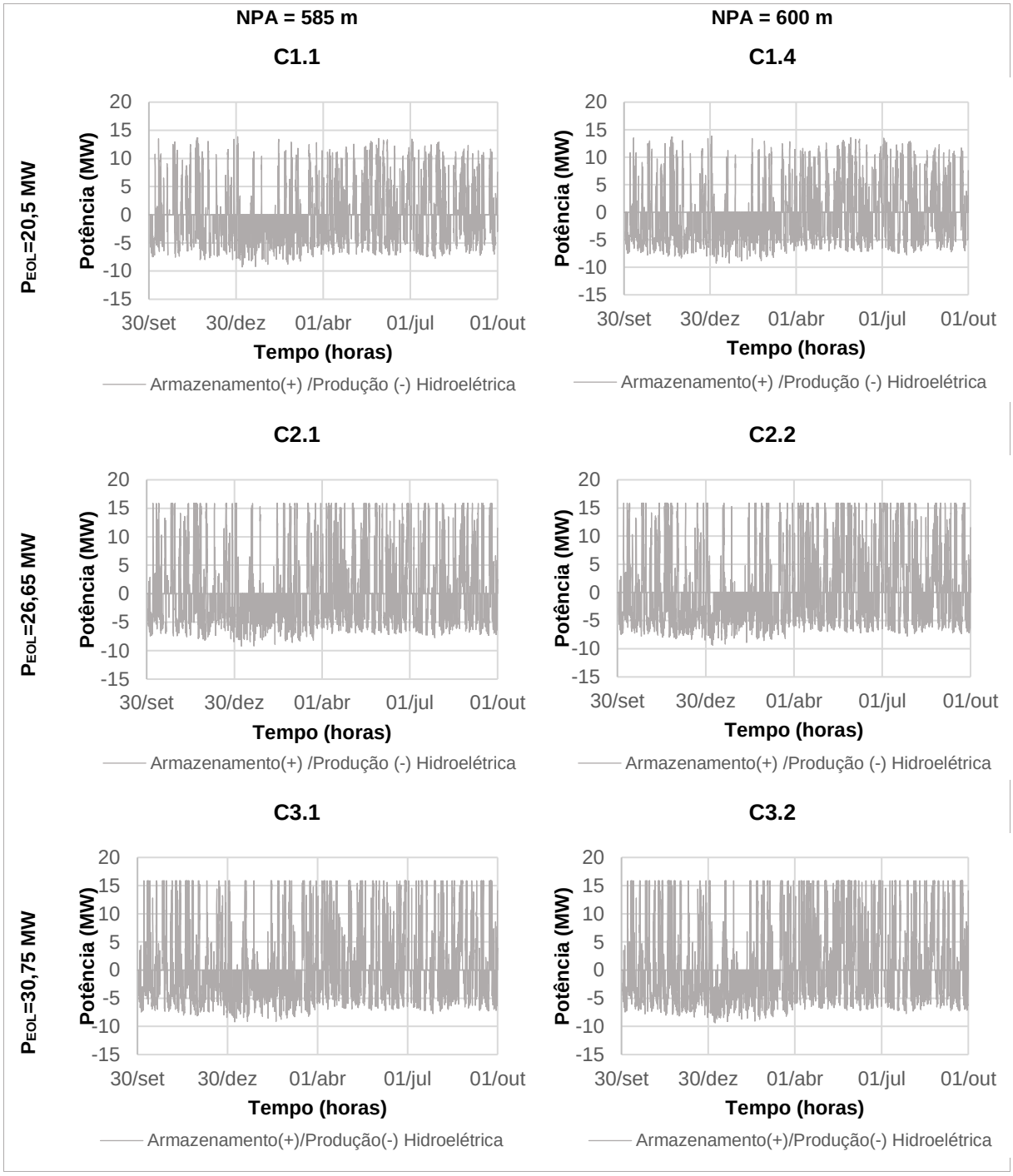


Figura 6.2 – Séries anuais de energia éolica armazenada (valores positivos) e produzida na HID (valores negativos) (E_{HIDi}) em seis dos oito subcenários estudados

Dando foco à produção hidroelétrica constatou-se que somente a partir de C1.4, a produção anual na HID supera a produção anual de energia na UC, à medida que se caminha do subcenário C1.1 para C3.2 (Quadro 6.4).

Os gráficos da Figura 6.3 apresentam, percentualmente, a produção anual de energia em seis dos oito subcenário simulados, de acordo com as três diferentes fontes geradoras (hidroelétrica, eólica e UC).

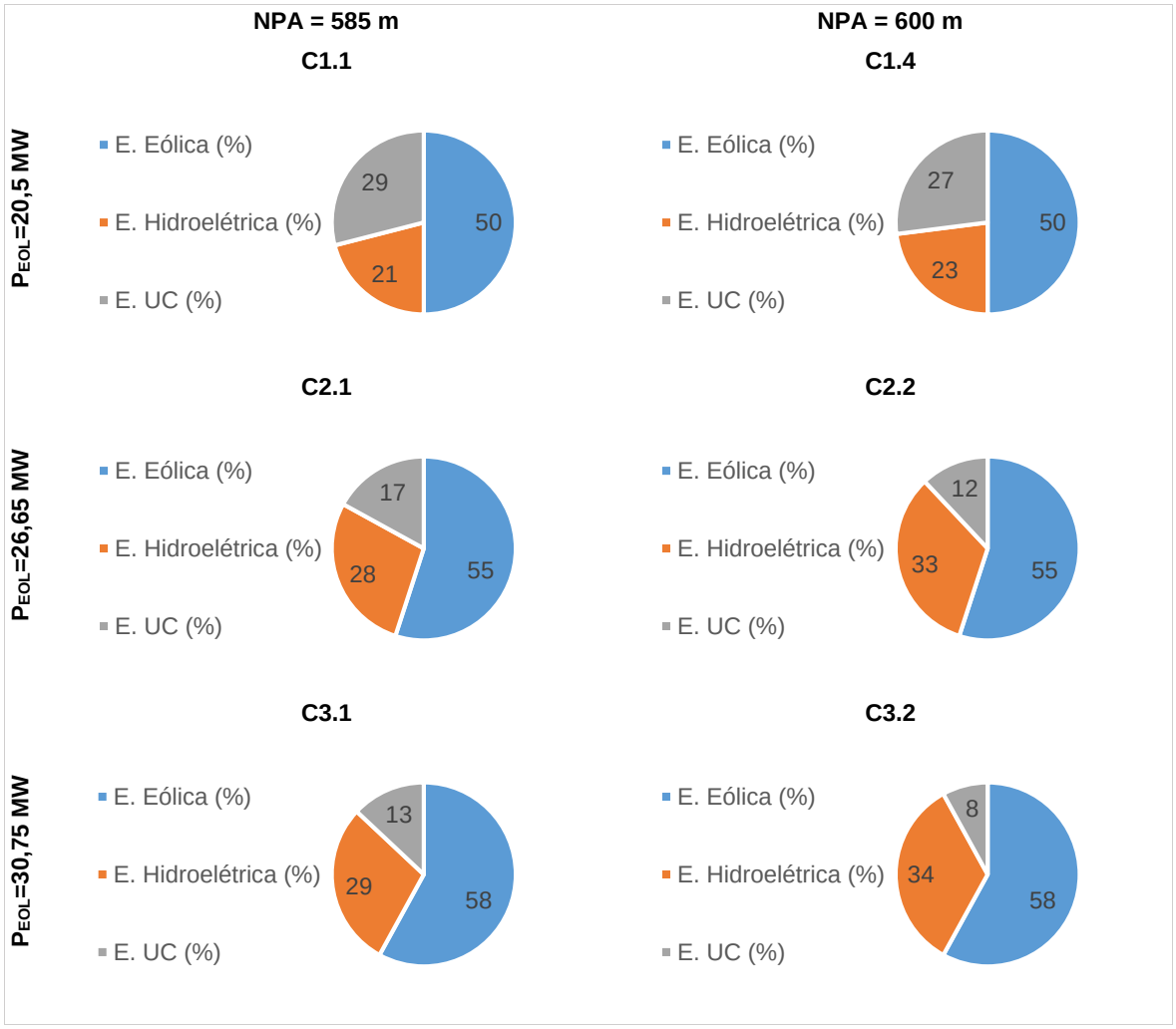


Figura 6.3 – Percentagens anuais de energia produzida segundo as três fontes geradoras (hidroelétrica, eólica, UC) em seis dos oito cenários estudados

Concluiu-se que no âmbito do cenário C1, os sucessivos aumentos do NPA têm pouco impacto em termos do aumento da produção hidroelétrica (subida de 21 para 23% da contribuição da HID) e que o aproveitamento combinado definido em C1, acarretou um tal número de falhas por parte do sistema hidroelétrico-eólica, que a UC, no balanço do ano, funcionou mais tempo e produziu mais energia que a HID. O que se opõe ao pretendido com a integração da geração hidroelétrico-eólica, considerando-se, assim, inviável o funcionamento do aproveitamento sob as condições do cenário C1 (Figura 6.1 – C1.1 e C1.4).

Comparados os subcenários C1.4 e C2.1, concluiu-se que existe uma diminuição da contribuição da UC de 27 para 17%, justificada pelo aumento da produção eólica anual em 5% que, por conseguinte, gera uma maior quantidade de energia, destinada ao armazenamento, passível de ser turbinado

posteriormente (levando ao aumento do contributo da HID). Situação semelhante foi observada quando confrontados os subcenários C2.2 e C3.1 (Figura6.3).

Apesar do número de meses de funcionamento da HID (4,4 meses) e da UC (3,5 meses) terem sido muito próximos, nas condições do subcenário C2.1, constatou-se existir uma diferença entre a produção anual hidroelétrica e da UC (a HID suprime 28 % do consumo e a UC 17%). Aquando do aumento do NPA da albufeira de 585 m (C2.1) para 600 m (C2.2), deu-se um aumento do volume suscetível de ser turbinado, que se traduziu em termos da contribuição da HID e da UC 33 e 12% e em termos de tempo de funcionamento das fontes geradoras em 5,1 e 2,7 meses, respetivamente (Quadro 6.4).

No âmbito do cenário C3 apurou-se, comparando os dois subcenários, que a representatividade da UC e da HID no consumo variava entre 13% e 8% e entre 29% e 34%, de acordo com a ordem indicada. Estes intervalos de valores, não sendo muito distantes dos obtidos nos subcenários C2.1 e C2.2, deveram-se principalmente ao aumento da contribuição da eólica para o consumo, 3% face a C2. Tanto no cenário C3 como no subcenário C2.2 verificou-se que a contribuição da UC fica abaixo do limite dos 15%, estabelecidos como aceitáveis (Figura 6.1). Em termos do número de meses, constatou-se que a HID operou anualmente entre 4,5 e 5,2 meses, enquanto que a UC entre 2,8 e 2,1 meses (Quadro 6.4).

O Quadro 6.6 descrimina: a energia eólica anual armazenada (EA_{HID}^{a}) e não armazenada (ENA_{HID}^{a}) na albufeira sob a forma de energia potencial, em termos absolutos e percentuais; e a parcela da energia não armazenada devido ao facto da albufeira ter atingido a capacidade máxima de armazenamento (N≥NPA).

Quadro 6.5 – Energia eólica anualmente armazenada (EA_{HID}^{a}) e não armazenada (EA_{HID}^{a}) na albufeira sob a forma de energia potencial

Subcenário	**EA_{HID}^{a} (GWh)**	**ENA_{HID}^{a} (Gwh)**	**EA_{HID}^{a} %**	**ENA_{HID}^{a} %**	
(-)	**(-)**	**Total**	**(-)**	**Total**	**N≥NPA**
C1.1	14,6	0,6	96%	4%	4%
C1.2	15,1	0,2	99%	1%	0%
C1.3	15,1	0,2	99%	1%	0%
C1.4	15,1	0,2	99%	1%	0%
C2.1	19,8	5,3	79%	21%	19%
C2.2	23,7	1,5	94%	6%	3%
C3.1	20,9	11,3	65%	35%	29%
C3.2	24,7	7,5	77%	23%	16%

Analisando o subcenário C1.1 da Figura 6.4, constatou-se que o esgotamento do recurso hídrico na albufeira dá-se muito rapidamente, ficando o fornecimento do consumo, quase exclusivamente, à mercê dos fluxos de volumes bombados gerados pelo excesso de energia eólica. À medida que o NPA

toma valores sucessivamente superiores – C1.2, C1.3 e C1.4 – o esgotamento da albufeira é retardado, mas não de um modo tal, que impeça a albufeira de permanecer uma significativa parte do ano no Nme (entre 4,2 a 3,4 meses do ano); por outro lado, existe sempre disponibilidade para acumular, sendo as percentagens anuais de recurso armazenado cerca de 100% (Quadro 6.5). Em termos gerais, no final dum ano de exploração, todas as simulações feitas conduziram a níveis na albufeira próximos do Nme (Figura 6.3 – C1.1 e C1.4 e Gráficos 8-C1.2 e 9-C1.3 do Anexo D). Situação esta nada conveniente tendo em conta o ano de exploração que se segue.

A variação do nível na albufeira nos subcenários C3.1 e C2.1 exibiu um perfil semelhante ao cenário C1.1 (Figura 6.4), no entanto constatou-se uma diminuição do número falhas por Nme (situação I do Quadro 6.4) que vão ocorrendo ao longo do ano.

Analogamente ao cenário C1, o subcenário C2.1 levou ao esgotamento da albufeira no final dum ano de exploração (Figura 6.4).

Em C2.2 e C3.2 verificou-se existir um período entre janeiro e abril, em que a albufeira se encontra praticamente no Nme. Período este, coincidente com a altura da maior contribuição da UC para o fornecimento de energia (Figura 6.1 e 6.4). À exceção desse período, a albufeira permaneceu acima do Nme, e a HID operou continuamente, ficando a UC, exclusivamente, responsável por colmatar as limitações técnicas do sistema de geração hídrico (situação II do Quadro 6.4). Observou-se no cenário C2 que a percentagem de energia anual acumulada (EA_{HID}^{a}) variou ente 78 e 94 %, por influência do aumento da capacidade da albufeira de C2.1 para C2.2 (Quadro 6.5). O mesmo se verificou quando contrapostos os subcenários C3.1 e C3.2.

Ambos os NPA definidos no cenário C3 apenas permitiram o armazenamento de 60 e 77% da energia eólica em excesso, abaixo do limite de aceitabilidade definido para o caso de estudo (85%), e que grande parte da energia não armazenada resultou de se exceder o NPA. Podendo ser esta a expressão da inadequabilidade do parque eólico em questão, face às capacidades de armazenamento escolhidas para a albufeira.

Tanto nos cenários C2 e C3 o aumento da capacidade da albufeira provocou o aumento da percentagem de energia armazenada (EA_{HID}) pois disponibilizou-se mais volume de água para armazenamento, como seria esperado.

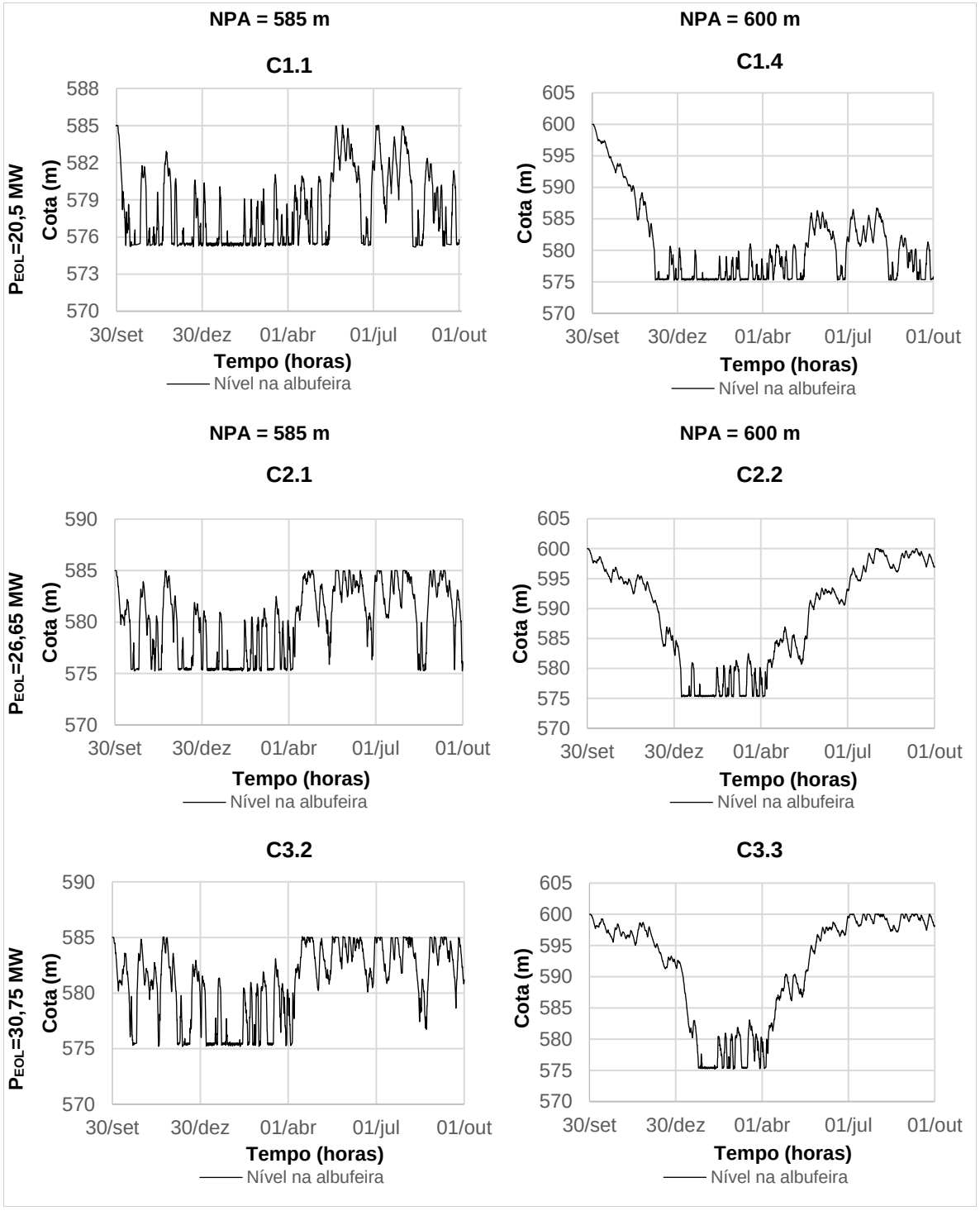


Figura 6.4 – Variação anual do nível na albufeira (N_i) em seis dos oito cenários estudados

Nos cenários C1 e C2, a produção eólica anual (E_{EOL}^{a}) foi inferior ao consumo anual (C_{ONS}^{a}), o que demonstrou que mesmo recorrendo, exclusivamente, ao processo de armazenamento por bombagem para acumular água e, por conseguinte, turbiná-la, precisar-se-ia sempre do apoio do uma outra fonte geradora para cobrir a totalidade do consumo (Quadro 6.3).

Por oposição, a produção eólica anual (E_{EOL}^{a}) em C3 excedeu o consumo anual (C_{ONS}^{a}), confirmando-se que, mesmo com excedente, não foi possível suprimir as falhas do sistema

hidroelétrico-eólica relacionadas com o esvaziamento da albufeira (N<Nme) (Quadro 6.4). Uma das razões apontada decorre do facto de existir um período de baixo rendimento eólico (Gráficos 1, 2 e 3 do Anexo D), de grosso modo, entre dezembro e abril, transversal a todos os cenários estipulados, que promoveu o esgotamento completo da albufeira. A segunda razão prende-se com o rendimento do ciclo bombagem-turbinagem, uma vez que existe uma diferença entre a potência instalada no sistema de geração (11,37 MW) e no sistema de bombagem (15,86 MW) da HID. Assim, o rendimento do ciclo é 70 %, levando, por consequência, a uma perda de energia de 30%.

Se, no limite, o objetivo fulcral fosse a redução da contribuição da UC e a maximização da contribuição eólica e hidroelétrica, então assumir-se-ia que o C3.3 seria a proposta mais vantajosa. No entanto, considerou-se o subcenário C2.2, o mais conveniente, dado que:

- O nível da albufeira no final do ano de exploração não atinge o Nme, ao contrário do C1 e C2.1;
- Cumpre o critério de 85% de energia armazenada requerida e em termos absolutos apresenta um menor valor de energia por armazenar, sendo $EA_{HID}{}^{a}$ no caso C3.2 um indicador que corrobora a desproporção entre o parque eólico e a capacidade da albufeira;
- C2.2 não difere significativamente de C3.2 em termos de produção anual hidroelétrica, e requer um parque eólico mais pequeno.

Caberia numa fase posterior a esta dissertação, entender as implicações económicas e ambientais dos subcenários C2.2 e C3.2 face ao aumento do número de turbinas eólicas de 13 para 15 e à diminuição da produção anual da UC entre C2.2 e C3.3 ($E_{UC}{}^{a}$) e averiguar a adequabilidade da capacidade da albufeira face aos subcenários em questão.

Em geral, os resultados obtidos indicaram que os sucessivos aumentos da potência instalada no parque eólico, poderão diminuir a contribuição da UC, como seria conveniente, no entanto isto significaria que o parque eólico com uma tal potência que necessitaria duma albufeira cada vez maior para acumular o excedente. Neste sentido, conclui-se que melhor forma de integrar a geração eólica seria, não o aumento de potência no parque eólico, mas sim o aumento da capacidade de armazenamento visto que nos cenários C2 e C3 boa parte da energia por armazenar deveu-se a limitações na capacidade da albufeira (Quadro 6.4). Em simultâneo, esta panorama permitiria que a UC apenas fosse responsável por cobrir as falhas relacionadas com os limites técnicos de funcionamento da turbina, o que por consequência, levaria à diminuição da sua potência instalada.

Quanto à composição do sistema de geração hidroelétrico, considerou-se que seria pertinente: o aumento do número de turbinas (que ao todo traduziriam a mesma potência instalada), dando possibilidade à HID de turbinar caudais inferiores ao caudal mínimo de funcionamento da atual turbina, diminuindo assim a contribuição da UC; e a aproximação, o quanto possível, da potência dos equipamentos de geração e bombagem, por forma a obter um rendimento do ciclo turbinar-bombar superior aos 70 % do atual aproveitamento, ou mesmo definir uma potência para o equipamento de geração superior à do equipamento de bombagem, como é o caso de Icária (subcapítulo 2.3).

7 Conclusão Futuros Desenvolvimentos

7.1 Conclusão

A presente dissertação dividiu-se em duas partes distintas. Numa primeira fase foi realizado o pré-dimensionamento da barragem, dos órgãos e circuito hidráulicos e da central hidroelétrica que integra um sistema de geração e armazenamento por bombagem (Turbina + Bomba). Na segunda fase foi realizado uma simulação computacional da exploração do aproveitamento hidroelétrico-eólico em sistema fechado (sem ligação à rede nacional). As unidade de produção de energia consideradas foram um parque eólico, uma central hidroelectrica e de bombagem (HID) e uma unidade convencional (UC) cuja finalidade é colmatar as fallhas do aproveitamento hidroelétrico-eólico.

O modelo de simulação da exploração do sistema desenvolvido tem em conta uma produção típica dum parque eólico, em ano médio, bem como um diagrama de consumo também em ano médio. A prioridade de produção é atribuída ao parque eólico. Caso esta seja insuficiente é substituida pela produção hidroelétrica e pela produção da unidade convecional, em sequência. Se houver energia eólica em excesso esta será consumida na bombagem para armazenameno de energia potencial.

Com base no estudo hidrológico efetuado, verificou-se que, dadas as características da linha de água selecionada para implantação da barragem, o escoamento em regime natural é diminuto, tornando pouco significativo o abastecimento natural da albufeira.

Os três cenários de estudo, subdivididos em oito, possuem como variáveis em análise a capacidade da albufeira (traduzido pelo NPA) e a potência instalada no parque eólico. (P_{EOL}). Com base na análise de resultados dos diferentes cenários constatou-se que, com o aumento da potência instalada no parque eólico, os episódios de esgotamento do recurso hídrico na albufeira vão sendo menos frequentes ao longo do ano, levando à diminuição do número de falhas do aproveitamento hidroelétrico -eólico. No entanto, essas falhas nunca são totalmente suprimidas, mesmo quando aumentada a capacidade de armazenamento da albufeira, tornando-se assim indispensável a utilização da unidade convencional (UC) como reforço ao fornecimento de energia.

No cenário C1 (P_{EOL}= 20,5 MW) considerou-se um parque cuja potência instalada é cerca do dobro do consumo de ponta, tendo-se verificado que não foi possível assegurar convenientemente o funcionamento do aproveitamento hidroelétrico-eólico, uma vez que grande parte do ano a albufeira permaneceu vazia e a participação da UC no abastecimento do consumo foi superior à participação HID. Nos cenários C2 (P_{EOL}= 26,65 MW) e C3 (P_{EOL}= 30,76 MW) apesar de se ter definido potências instaladas no parque eólico 2,8 e 3,2 vezes superiores ao consumo de ponta, inferiu-se que, mesmo nestas condições e considerando a situação em que a albufeira apresentou a maior capacidade de armazenamento, o esgotamento do recurso hídrico foi inevitável, ocorrendo sempre num período entre dezembro e abril, tendo em conta que o início da simulação ocorre a 1 de outubro. Neste período, constatou-se que, por norma, a produção eólica se encontra abaixo do consumo de energia, levando a

que a central hidrelétrica produzisse energia muitos meses seguidos, praticamente sem existir reposição dos volumes extraídos da albufeira.

Em termos globais a produção eólica contribuiu para o consumo anual 50, 55 e 58% dependendo do cenário, sendo que abastece diretamente o consumo em apenas 1/3 do ano. Nos restantes 2/3, o parque necessita do apoio da HID e/ou da UC, que no primeiro caso (C1) requer uma disponibilidade de recurso hídrico para produzir quase permanente ao longo do ano.

Em suma, dado que o cenário C1 (P_{EOL}= 20,5 MW) não se apresentou vantajoso, visto que a albufeira no final do ano se encontra no Nme, e o aumento da potência instalada no parque eólico, entre os cenários C2 (P_{EOL}= 26,65 MW) e C3 (P_{EOL}= 30,75 MW), não se refletiu significativamente no aumento da produção anual hidroelétrica, o cenário que melhor compromisso ofereceu, em termos da energia eólica anualmente armazenada, da energia anualmente produzida pela eólica e pela hidroelétrica e da energia anual não armazenada devido a P>Pbmax, foi o subcenário C2.2.

À luz do subcenário C2.2, aproveitamento hidroelétrico-eólico é composto por: 13 turbinas eólicas que ao todo representam uma capacidade instalada de 26,65 MW; uma albufeira com 3 251 800 m^3 de capacidade (equivalente ao um NPA de 600 m); uma central hidroelétrica cuja potência instalada na geração é de 11,37 MW e na bombagem 15 MW; e um circuito de condutas forçadas (DN1400) que se estende por 3 km.

7.2 Futuros Desenvolvimentos

No âmbito do estudo elaborado apontam-se algumas considerações no sentido de propor melhorias para o modelo desenvolvido:

- Definição do rendimento em função do caudal e potência segundo a curva características das turbomáquinas, por forma a obter valores de produção e armazenamento de energia mais realistas;
- Flexibilização do sistema de produção e bombagem através do aumento em número de turbomáquinas (turbinas e bombas), em conjunto com a diminuição da potência adjudicada a cada uma (como constatados nos empreendimentos de Icária e das Canárias), de modo a ser possível turbinar e bombar uma gama de caudais mais ampla;
- Análise das implicações da alteração do rácio entre a potência instalada de geração e de bombagem para valores superiores ou iguais a 1.

Relativamente ao sistema de armazenamento por bombagem e tendo como referência os empreendimentos que têm sido construidos em Portugal continental (Baixo Sabor, Alqueva II etc), a chave para a inclusão desta tecnologia está na integração em rede e na regulação da rede de distribuição elétrica. A primeira permite que inúmeras centrais controláveis (e.g. centrais hidroelétricas) confiram flexibilidade e redundância ao sistema, colmatando a variabilidade que advém da produção de energia de fontes como a eólica e a solar. A segunda tira partido de períodos de baixo consumo,

nos quais a tarifa energética é mais reduzida, procedendo-se nestes períodos à acumulação de energia para posterior venda em períodos de consumo de ponta, nos quais a tarifa é superior.

No que toca a desenvolvimentos futuros, sugere-se que cada cenário seja submetido a um estudo de viabilidade económica e ambiental que avalie a relação entre a dimensão do parque eólico e a capacidade da albufeira e os impactes ambientais, em termos de emissões de CO_2 evitadas que advêm da implementação do aproveitamento.

Dado que o paradigma energético de cada país/região pode ser muito variável, aceitar ou não um sistema de geração que opere nestas condições, pode ser uma solução viável dependendo do contexto em que se insere. Tomando o exemplo duma rede elétrica isolada duma ilha, em que o fornecimento de combustíveis fósseis seja de difícil acesso e/ou dispendioso, mesmo que o aproveitamento hidroelétrico-eólico não seja autossuficiente, a sua implementação é uma hipótese a considerar na diminuição do consumo de combustíveis fósseis.

8 Bibliografia

Artigos

BRANDÃO, C., RODRIGUES, R. & COSTA, J. P., Análise de fenómenos extremos. Precipitações intensas em Portugal Continental. Direcção dos Serviços de Recursos Hídricos, DSRH- INAG, Lisboa, 2010.

IEA, Variability of Wind Power and Other Renewables - Management options and strategies, 2005

IHA, International Hydropower Association, Hydropower status report, 2015

KALDELLIS, J. K., Stand-Alone and Hybrid Wind Energy Systems: Technology, Energy Storage and applications, 1st edition, CRC Press, 2010.

MARTINS, F. J. P., Dimensionamento Hidrológico e Hidráulico de Passagens Inferiores Rodoviárias para Águas Pluviais, Dissertação para obtenção de grau de Mestre em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade de Coimbra, 2000.

MARTINS, A., Quantificação do efeito da evaporação no dimensionamento da capacidade útil de albufeiras, Dissertação para obtenção de grau de Mestre em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, 2016.

PAPAEFTHYMIOU, S., KARAMANOU, E., PAPATHANASSIOU, S. & PAPADOPOULOS, M., A Wind-Hydro-Pumped Storage Station Leading to High RES Penetration in the Autonomous Island System of Ikaria, IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol. 1, 2010.

PINHEIRO, A. N., Tomadas de água em albufeiras, Texto de apoio à disciplina de Estruturas Hidráulicas, Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2006a.

PINHEIRO, A. N., Descarregador de cheias em canal de encosta, Texto de apoio à disciplina de Estruturas Hidráulicas, Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2006b.

PORTELA M.M., Folhas de apoio à disciplina de Modelação e Planeamento e Recursos Hídricos, 4º ano semestre 2007/2008, Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, 2007.

PORTELA M.M., Slides de apoio à disciplina de Hidrologia e Recursos Hídricos, p. 213 a 293, Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, 2013.

PORTELA, M. M. & HORA, G., Aplicação da fórmula racional à análise de cheias em Portugal Continental: valores do coeficiente C, In “Congresso da Água”, Porto, 2002.

PORTERO, U., VELÁZQUEZ, S. & CARTA, J. A., Sizing of a wind-hydro system using a reversible hydraulic facility with seawater. A case study in the Canary Islands, Energy Conversion and Management, Vol.106, 2015.

RAMOS, H. M., AMARAL, M. P., & COVAS, D. I. C., Pumped-storage Solution towards energy Efficiency and Sustainability: Portugal Contribution and Real Case Studies, Journal of Water Resource and Protection, Vol. 6, 2014.

ROCHA, J. S., Assoreamento das Albufeiras e o Ambiente, LNEC, Seminário Barragens e Ambiente, Porto,1998.

SILVA, M. A., Modelação e optimização do Funcionamento de uma Central Renovável Virtual, Dissertação para obtenção de grau de Mestre em Engenharia da Energia e Ambiente, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, 2016.

Livros

APREN, Anuário de 2016, 2016c.

BUREAU OF RECLAMATION (BUREC), Design of small dams, 3th edition, Water Resources Technical Publication, Washington, 1987.

CHOW, V. T., MAIDMENT, D. R. & MAYS, L. W., Applied Hydrology, 1988.

HAU, E., Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics,3th edition, London, Springer, 2013.

HIPÓLITO, J. R., & VAZ, A. C., Hidrologia e Recursos Hídricos, 1ª Edição, IST Press, Lisboa, 2011

LENCASTRE, A., Hidráulica geral, 1983.

LENCASTRE, A. & FRANCO, F.M., Lições de Hidrologia, Fundação FCT, Coimbra, 3ª Edição revista, 1992.

MELO, F. G. & GOMES, A. S., Large dams in Portugal, 1st edition, Portuguese National Committee on large dams, Lisbon, 1992.

QUINTELA, A. C., Hidráulica, 9º Edição, Fundação Calouste Gulbenkiam, 1996.

QUINTELA, A.C. Hidrologia e Recursos Hídricos, folhas de apoio, Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, 1996

RAMOS, H., ALMEIDA, A. B., PORTELA, M., & ALMEIDA, H. P., Guidelines for design of small hydropower plants, WREAN and DED, Belfast, North Ireland, 2000.

TROEN, I. & PETERSON, E. L., European Wind Atlas, Risø National Laboratory, Denmark, 1989.

VISCHER, D. L. & HAGER, W. H., Dam Hydraulics, 1ªEditiom, WILEY, Zurich, Switzerland, 1998.

VISCHER, D. L. & HAGER, W. H., Energy dissipators, hydraulic structures design manual." *IAHR, Balkema, Rotterdam, Netherlands*,1995.

Páginas Web

APREN, Produção de eletricidade por fonte (1999-2015), 2016a, http://www.apren.pt/pt/, consultado a 13/10/2016

APREN, Boletim Energia Renováveis, 2016b http://apren.pt/fotos/editor2/12_boletim_energias_renovaveis-dezembro.pdf consultado a 20/05/2017

EDP, EDP Duplica capacidade hidroelétrica do Alqueva, 2013, https://www.edp.pt/pt/media/noticias/2013/Pages/EDPduplicacapacidadehidroel%C3%A9tricadoAlqueva.aspx

EDP, Centros Produtores, http://www.a-nossa-energia.edp.pt/centros_produtores/, consultado a 14/07/2017

EDP, Reforço de potência do escalão de Alqueva, 2000, https://www.edp.pt/PT/sustentabilidade/EDPDocuments/V2_09RNTRefor%C3%A7odePot%C3%AAnciaAlquevaNovoMar08.pdf, consultado a 17/12/2016

EURELECTRIC, Hydropower supporting a power system in transition, Tecnical Report, 2015, http://www.eurelectric.org/events/2015/hydropower-supporting-a-power-system-in - transition/proceedings/, consultado a 16/09/2016

EEP, Parques Eólicos em Portugal, 2016, http://e2p.inegi.up.pt/relatorios/Portugal_Parques_Eolicos_2016.pdf, consultado a 6/06/2017

GLENFIELD, Free discharge valves, http://www.glenfield.co.uk/cgibin/CMSprod_search.cgi?action=product_search&category_id=50, consultado a 20/02/2017

HYDROWORLD, Creating a Hybrid Hydro-Wind System on a Spanish Island, 2012, http://www.hydroworld.com/articles/print/volume-20/issue-5/articles/pumped-storage/creating-a-hybrid-hydro-wind-system-on.html, consultado a 13/10/2016

ENDESA, El Hierro - Ejemplo de sostenibilidad, 2016, https://www.endesa.com/es/proyectos/a201610-el-hierro-renovable.html consultado a 13/10/2016

IGEOE, Carta militar 142, https://www.igeoe.pt/, consultada a 13/10/2016

IHA, Relatório status da hidroeletricidade, 2015, https://www.hydropower.org/2015-hydropower-status-report, consultado a 5/11/2016

REN, Hidroeléctricas em Portugal – Memoria e Desafio, 2002, http://www.centrodeinformacao.ren.pt/PT/publicacoes/PublicacoesGerais/Hidroelectricidade%20em%20Portugal%20-%20Mem%C3%B3ria %20e%20desafio.pdf, consultado a 5/9/2016

SNIRH, http://snirh.apambiente.pt/ consultado a 20/11/2016

Regulamentos consultados

Normas de Observação e Inspeção de Barragens. Anexo à portaria nº 847/93.

Regulamento de Segurança de Barragens Portaria nº846/93

9 Anexo

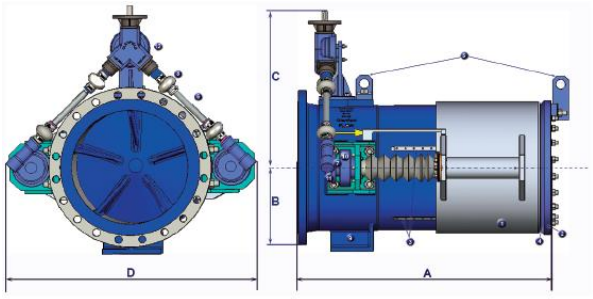
9.1 Anexo A – Geral

Tipo de ocupação	Período de retorno, T (anos)						
	2	5	10	25	50	100	500
Zona urbana							
Asfalto	0,73	0,77	0,81	0,86	0,90	0,95	1,00
Betão/telhados	0,75	0,80	0,88	0,88	0,92	0,97	1,00
Relvados							
Ocupando menos de 50% da área							
Declive de 0 a 2%	0,32	0,34	0,37	0,40	0,44	0,47	0,58
Declive de 2 a 7%	0,37	0,40	0,43	0,46	0,49	0,53	0,61
Declive superior a 7%	0,430	0,43	0,45	0,49	0,52	0,55	0,62
Ocupando de 50 a 75% da área							
Declive de 0 a 2%	0,25	0,28	0,30	0,34	0,37	0,41	0,53
Declive de 2 a 7%	0,33	0,36	0,38	0,42	0,45	0,49	0,58
Declive superior a 7%	0,37	0,40	0,42	0,46	0,49	0,53	0,60
Ocupando mais de 75% da área							
Declive de 0 a 2%	0,21	0,23	0,25	0,29	0,32	0,36	0,49
Declive de 2 a 7%	0,29	0,32	0,35	0,39	0,42	0,46	0,56
Declive superior a 7%	0,34	0,37	0,40	0,44	0,47	0,51	0,58
Zona não urbana							
Terreno cultivado							
Declive de 0 a 2%	0,31	0,34	0,36	0,40	0,43	0,47	0,57
Declive de 2 a 7%	0,35	0,38	0,41	0,44	0,48	0,51	0,60
Declive superior a 7%	0,39	0,42	0,44	0,48	0,51	0,54	0,61
Pastagem							
Declive de 0 a 2%	0,25	0,28	0,30	0,34	0,37	0,41	0,53
Declive de 2 a 7%	0,33	0,36	0,38	0,42	0,45	0,49	0,58
Declive superior a 7%	0,37	0,40	0,42	0,46	0,49	0,53	0,60
Floresta							
Declive de 0 a 2%	0,22	0,25	0,28	0,31	0,35	0,39	0,48
Declive de 2 a 7%	0,31	0,34	0,36	0,40	0,43	0,47	0,56
Declive superior a 7%	0,35	0,39	0,41	0,45	0,48	0,52	0,58

Figura 1 – Valores do coeficiente C da fórmula racional (in CHOW *et al* (1988). Retirado de PORTELA e HORA (2002)

Período de retorno, T (anos)	Coeficiente de ajustamento, C_f
25	1.10
50	1.20
100	1.25

Figura 2 – Coeficiente de ajustamento em função do período de retorno. In WRIGHT-MCLAUGHLIN (1969) extraído de MARTINS (2000)



Ref Nos.	DN	A	B	C	D	Approx. Weight
857-0200-11110000	200*	613	203	460	430	500
857-0300-11110000	300*	762	273	500	600	800
857-0400-11110000	400	1055	381	600	1060	1200

Figura 3 – Dimensões da válvula cónica do fabricante “Glenfield”

9.2 Anexo B – Turbina Pelton Voith

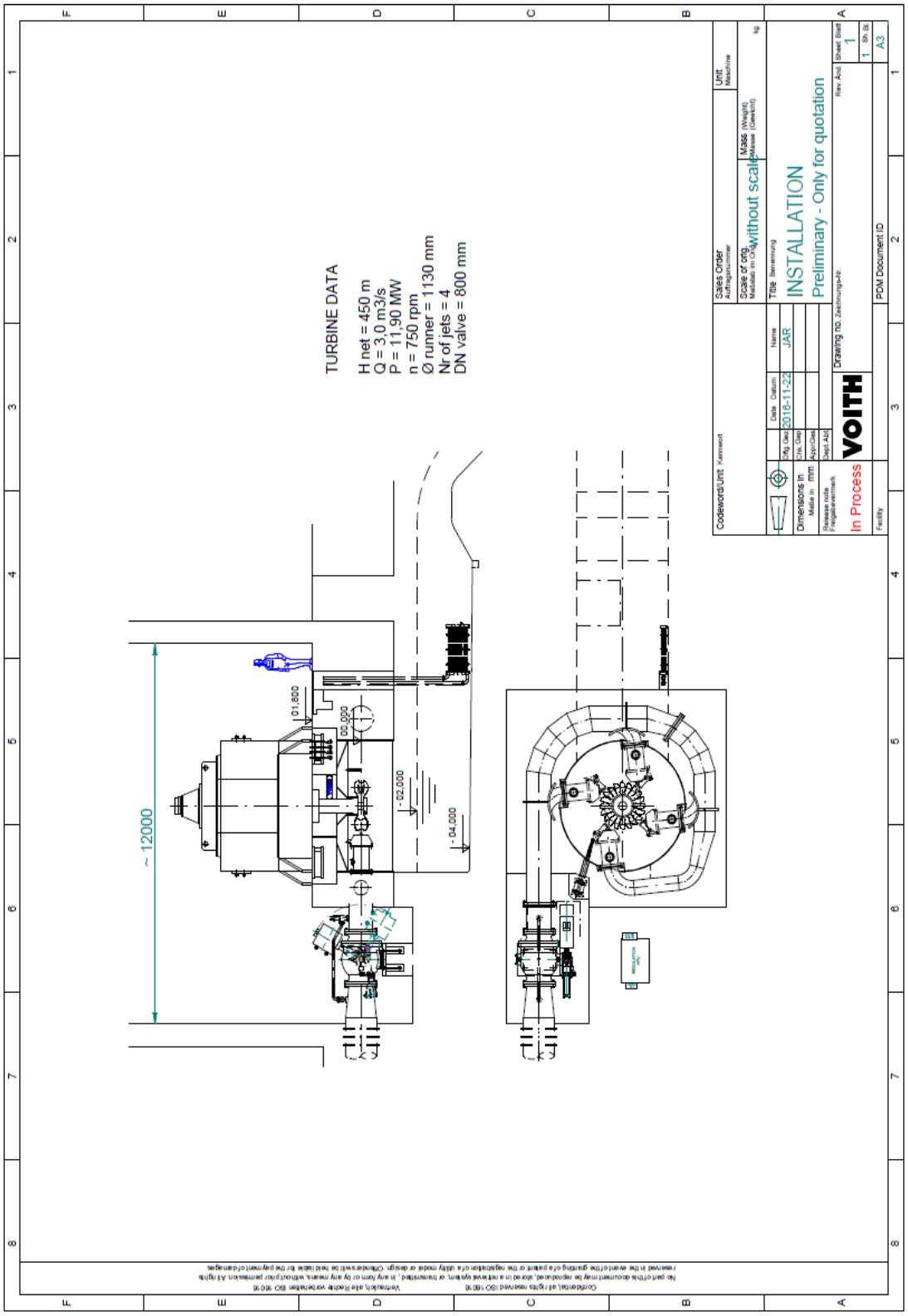


Figura 4 – Esboço preliminar da instalação da turbina pelton fornecido pela Voith

9.3 Anexo C – Bomba HPDM600-890-2d Sulzer

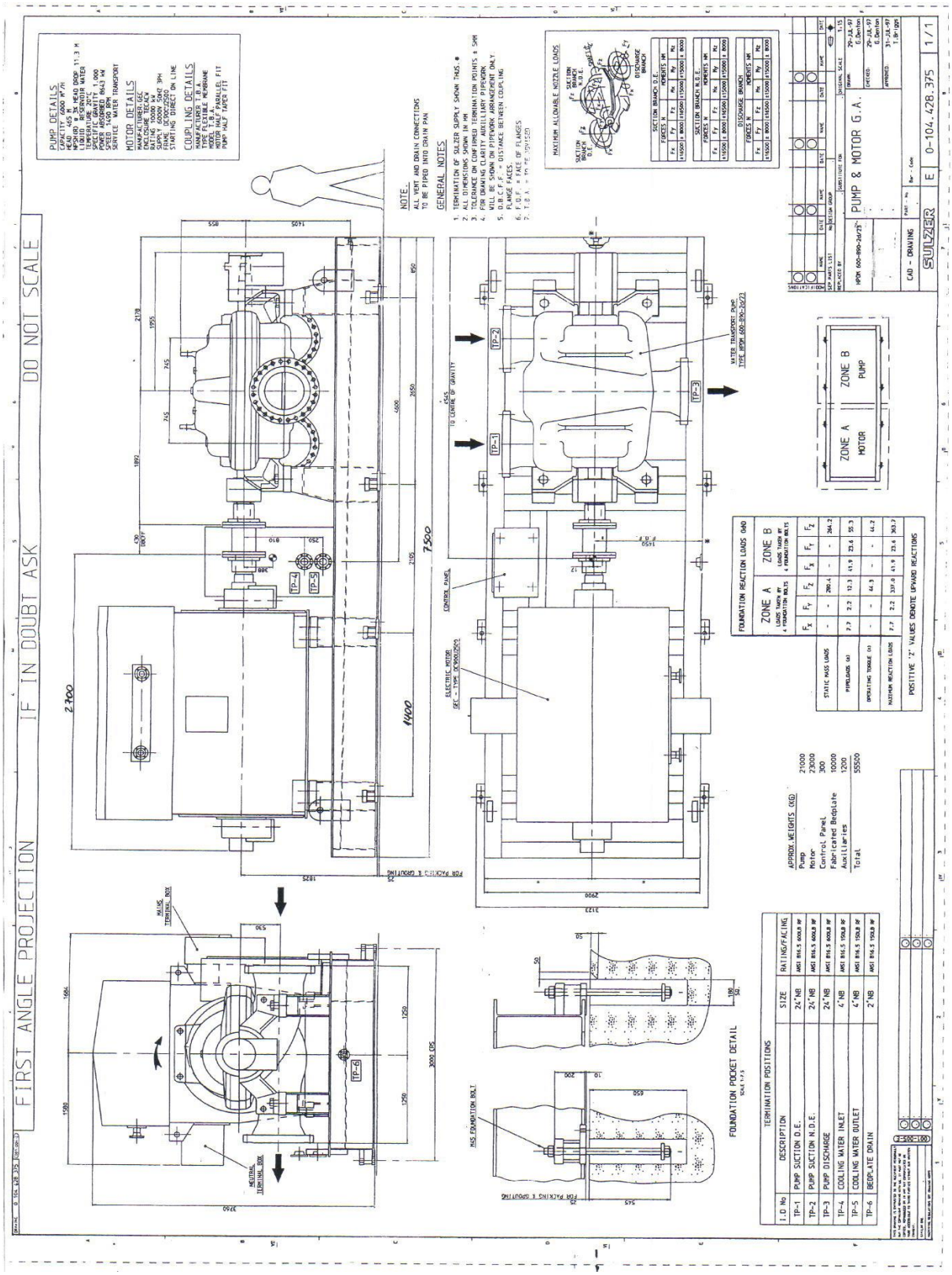


Figura 5 – Desenho técnico da bomba HPDM600-890-2d (Sulzer)

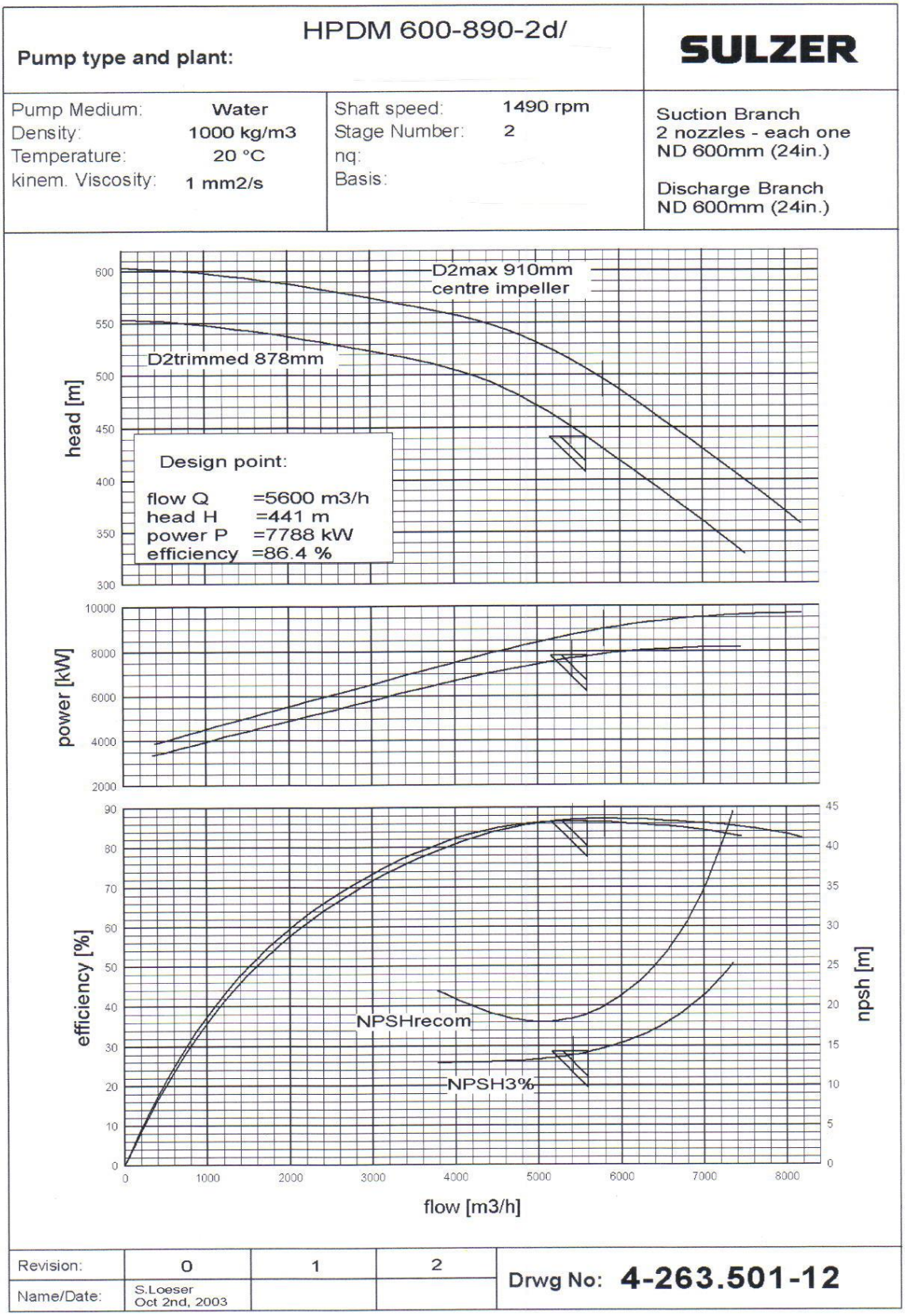


Figura 6 – Curvas características da bomba HPDM600-890-2d fornecidas pela Sulzer

9.4 Anexo D – Séries simuladas

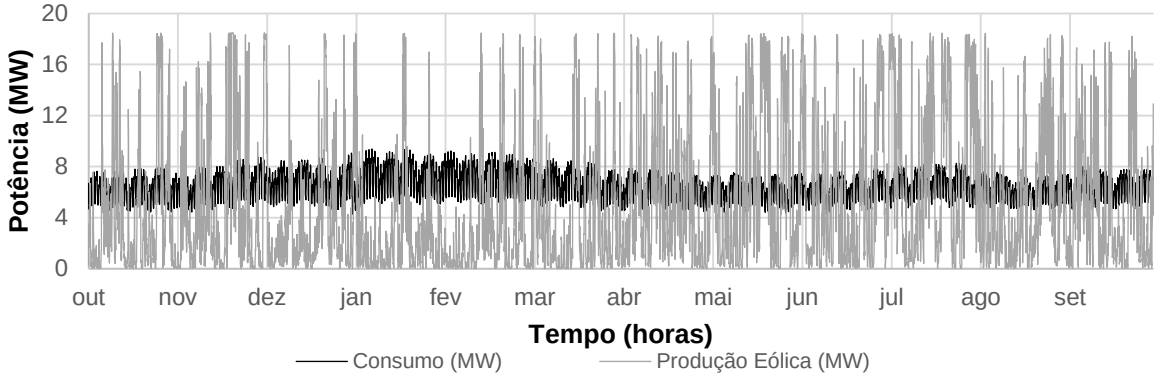


Gráfico 1 – Séries anuais de consumo e de produção eólica (C1)

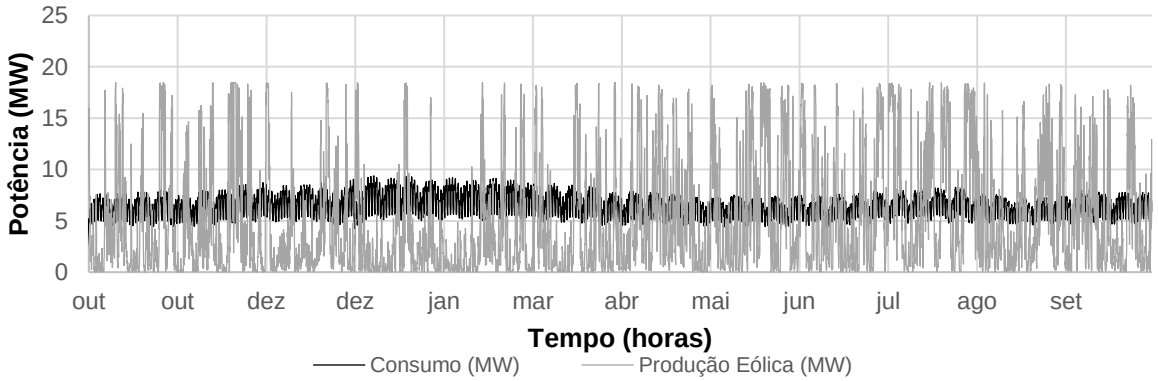


Gráfico 2 – Séries anuais de consumo e de produção eólica (C2)

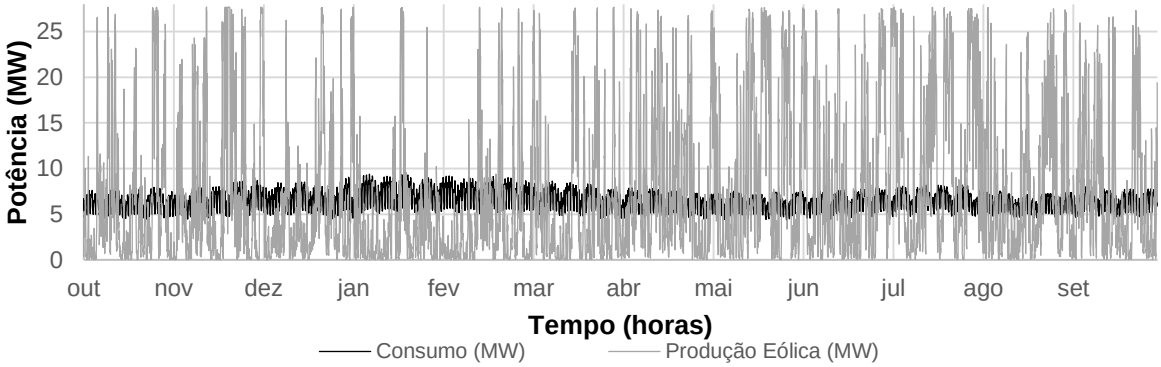


Gráfico 3 – Séries anuais de consumo e de produção eólica (C3)

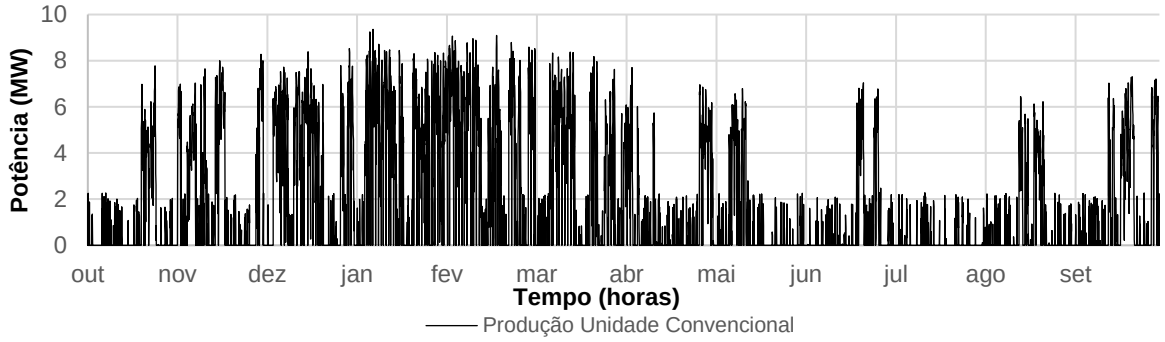


Gráfico 4 – Série anual de produção de energia na UC (C1.2)

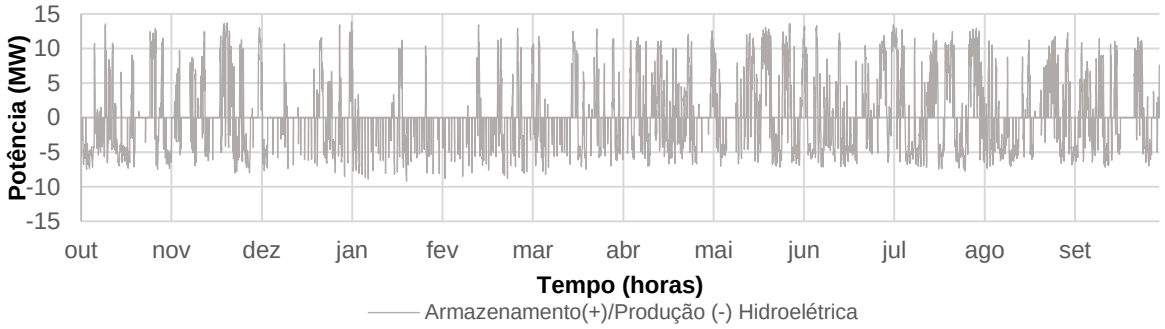


Gráfico 5 – Série anual de energia eólica armazenada (valores positivos) e energia produzida na HID (valores negativos) (C1.2)

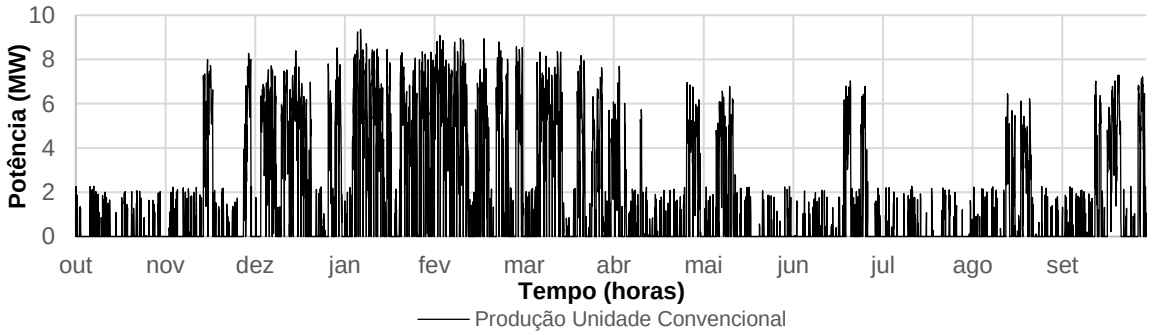


Gráfico 7– Série anual de produção de energia na UC (C1.3)

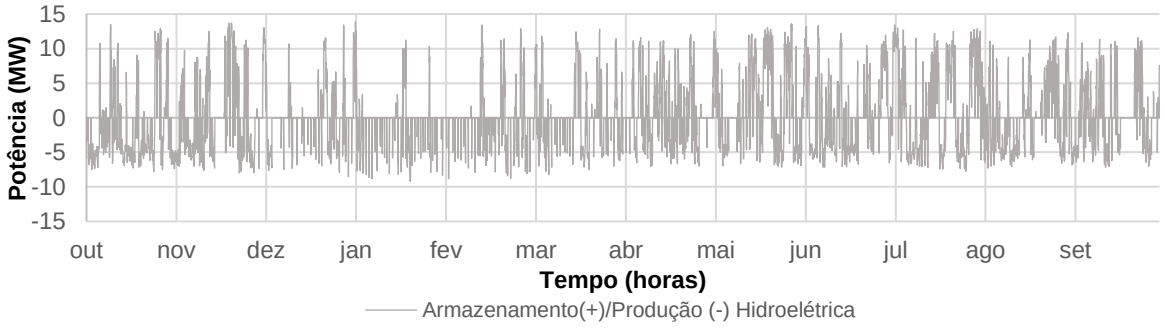


Gráfico 7 – Série anual de energia éolica armazenada (valores positivos) e energia produzida na HID (valores negativos) (C1.3)

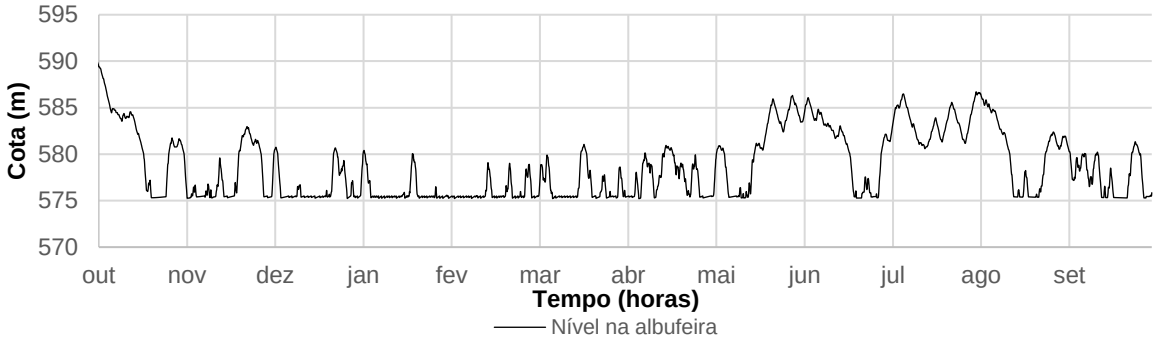


Gráfico 8 – Variação anual do nível na albufeira (C1.2)

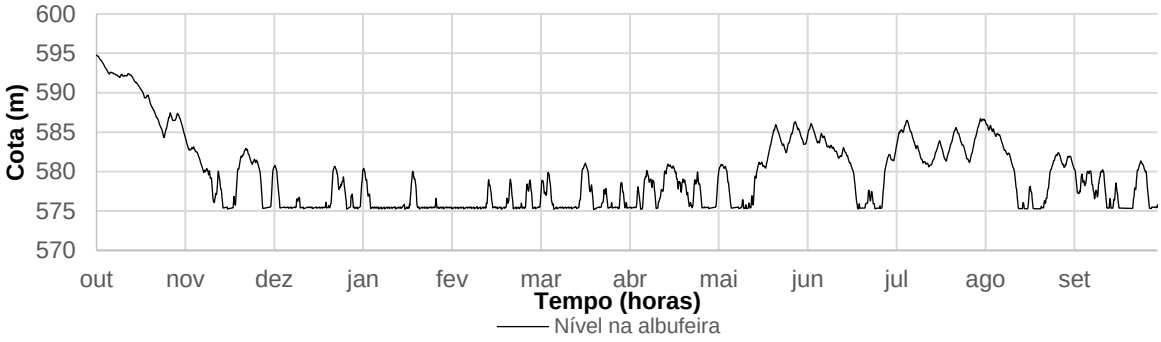
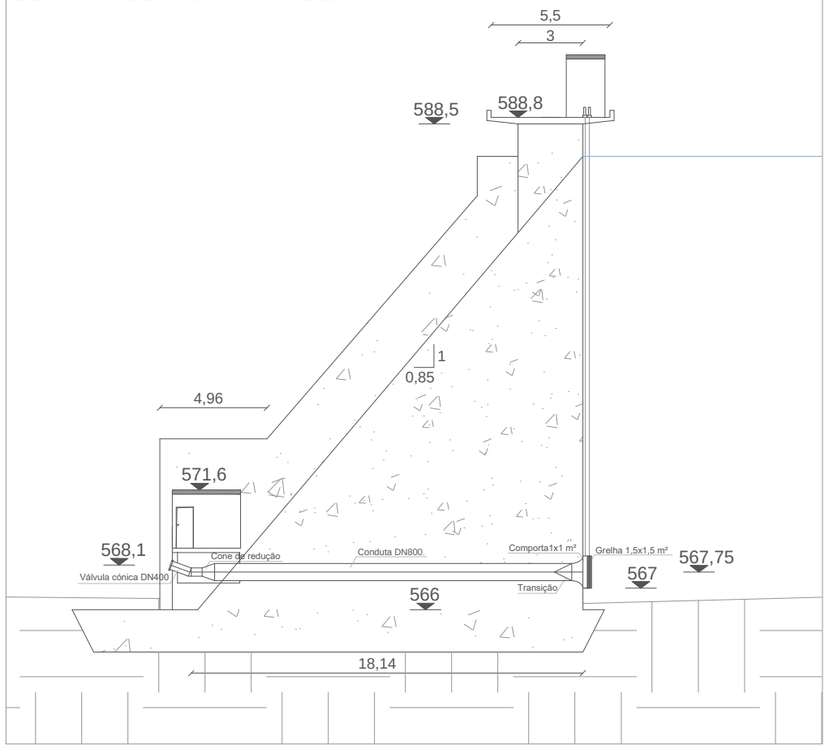


Gráfico 9 – Variação anual do nível na albufeira (C1.3)

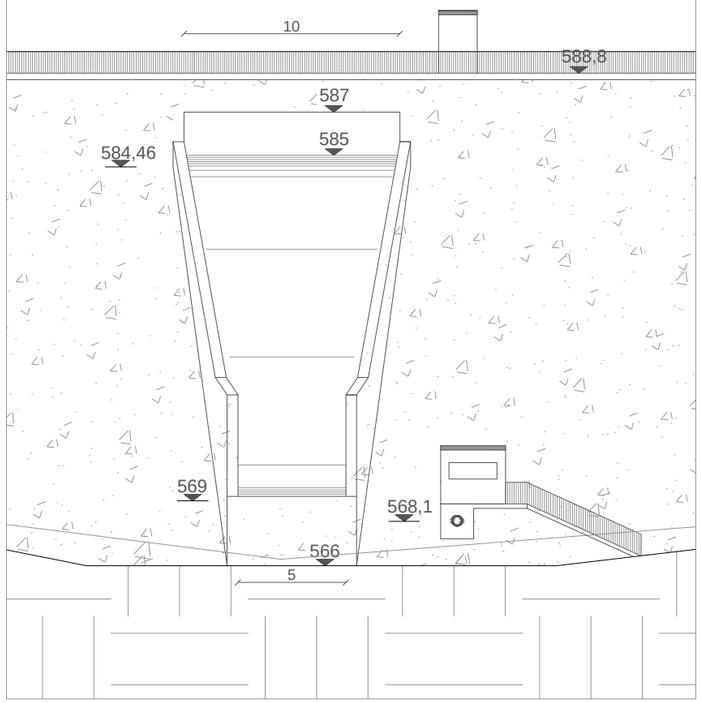
9.5 Anexo E – Peças Desenhadas

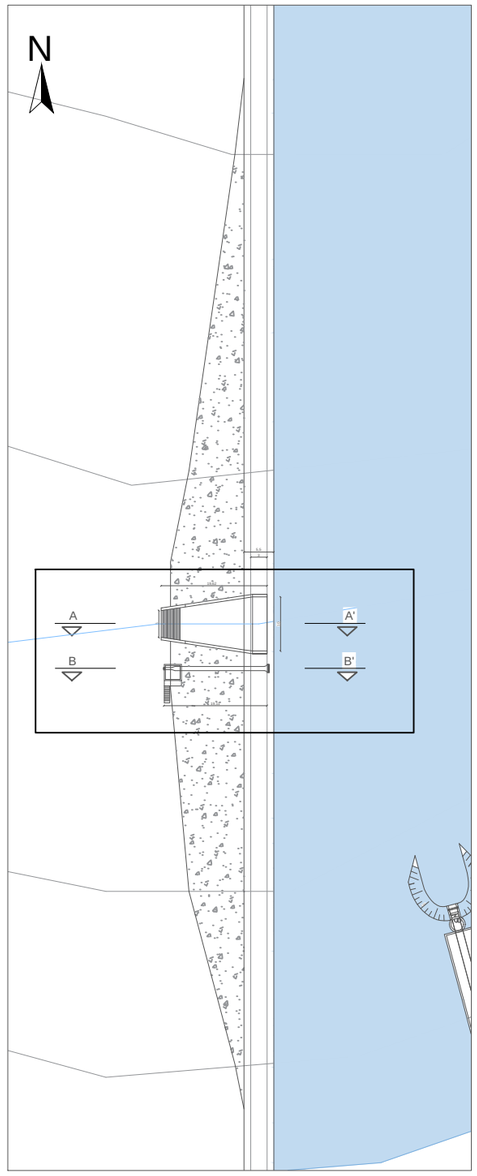
Descarregador de Cheia e Descarga de Fundo	69418-EP-DCF.001
Circuito Hidráulico	69418-EP-CON.001
Tomada de Água - Albufeira	69418-EP-TOM.001
Central Hidroelétrica e de Bombagem	69418-EP-HID.001 e 69418-EP-HID.002
Linhas de Energia	69418-EP-LE.001 e 69418-EP-LE.002

DESCARGA DE FUNDO - CORTE BB'



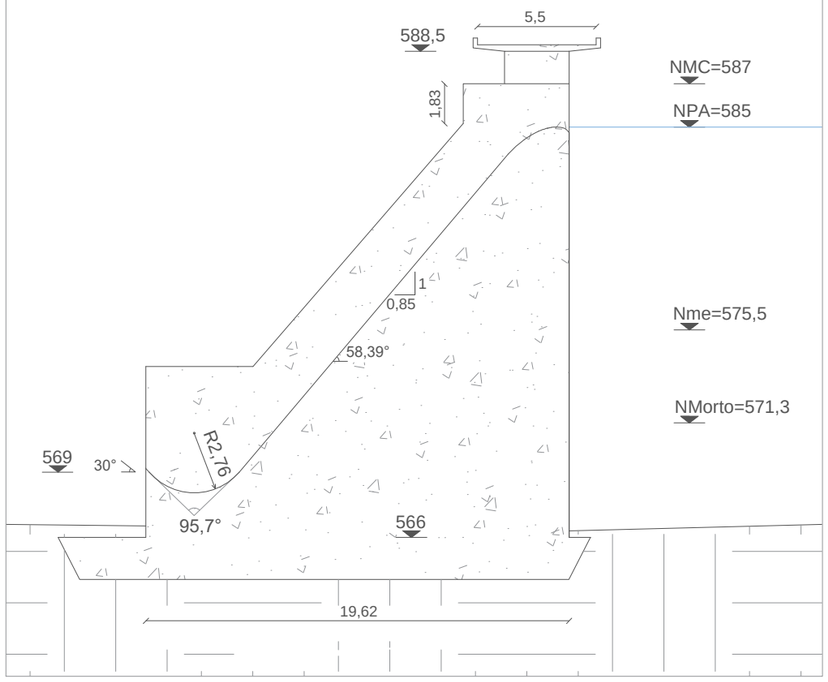
DESCARREGADOR DE CHEIAS - ALÇADO PRINCIPAL



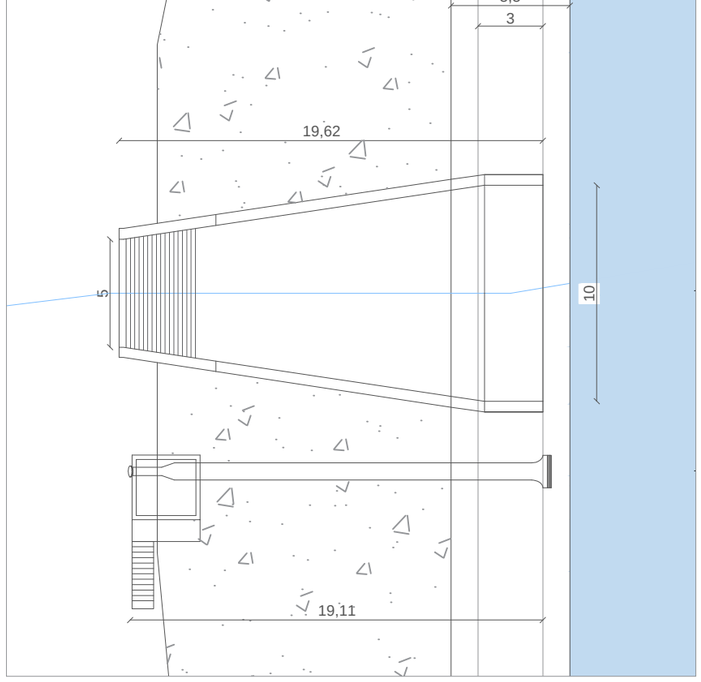


Escala 1:1000

PERFIL TIPO DA BARRAGEM - CORTE AA '



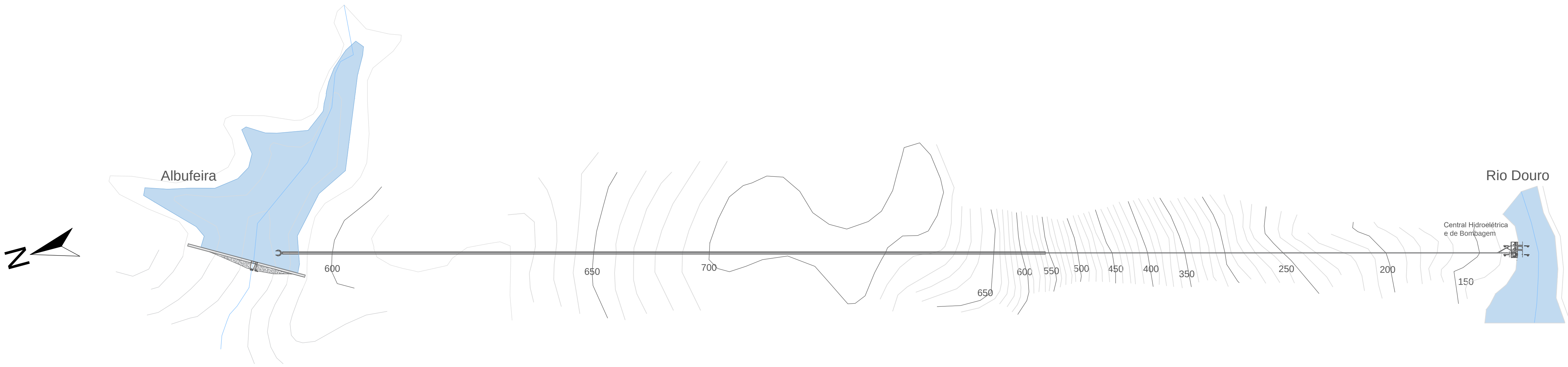
DESCARREGADOR DE CHEIAS - PLANTA

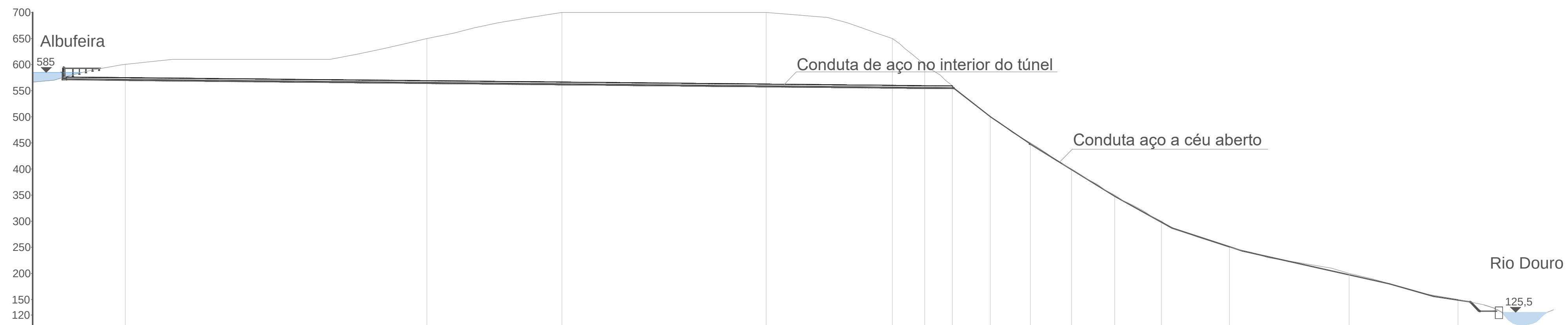


DISSERTAÇÃO	PRODUÇÃO COMBINADA DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DAS FONTES RENOVÁVEIS HIDROELÉTRICA E EÓLICA
ÂMBITO	DISSERTAÇÃO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENG. CIVIL
DESIGNAÇÃO	ESTUDO PRÉVIO DESCARREGADOR DE CHEIAS E DESCARGA DE FUNDO PLANTAS E CORTES

TÉCNICO LISBOA

PROJ.	JOANA PRETO FIALHO	ESCALAS: 1:250 OU INDICADAS	DESENHO Nº: 69418-EP-DCF.001
DES.	JOANA PRETO FIALHO		REVISÃO: -
		DATA: Dezembro 2017	





Trecho										
Designação	L.1	L.2	L.3	L.4	L.5	L.6	L.7	L.8	L.9	
Comprimento (m)	1705,9	91,30	91,50	190,65	125,70	141,53	288,48	88,30	70,00	
Inclinação (%)	1	78	68	62	55	33	22	28	15	
Material/Diâmetro (mm)	Aço DN1400	Aço DN1400								
Localização	Túnel	Superfície								

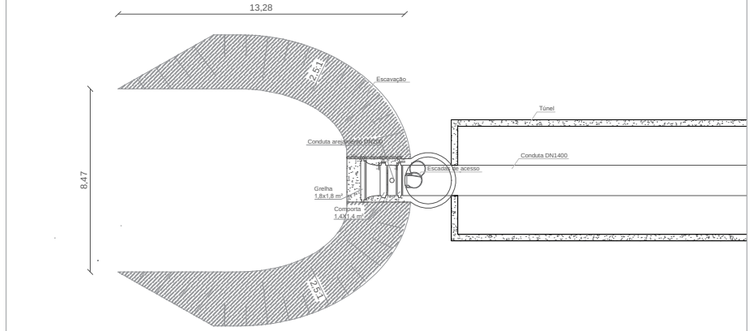
Curva									
Designação	PE.1	PE.2	PE.3	PE.4	PE.5	PE.6	PE.7	PE.8	PE.9
Ângulo (°)	38°	4°	3°	3°	11°	5°	3°	7°	38°

DISSERTAÇÃO	PRODUÇÃO COMBINADA DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DAS FONTES RENOVÁVEIS HIDROELÉTRICA E EÓLICA
ÂMBITO	DISSERTAÇÃO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENG. CIVIL
DESIGNAÇÃO	ESTUDO PRÉVIO CIRCUITO HIDRÁULICO PLANTA E PERFIL

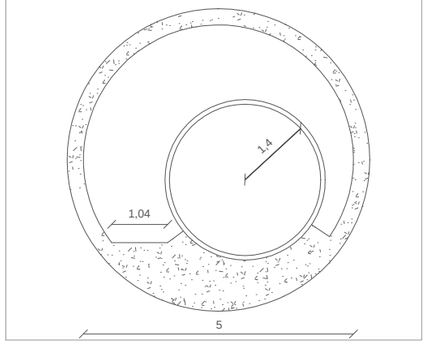
TÉCNICO LISBOA

		ESCALAS	DESENHO Nº	REVISÃO
PROJ.	JOANA PRETO FIALHO	1:1000 OU INDICADAS	69418-EP-CON.001	–
DES.	JOANA PRETO FIALHO		DATA Dezembro 2017	

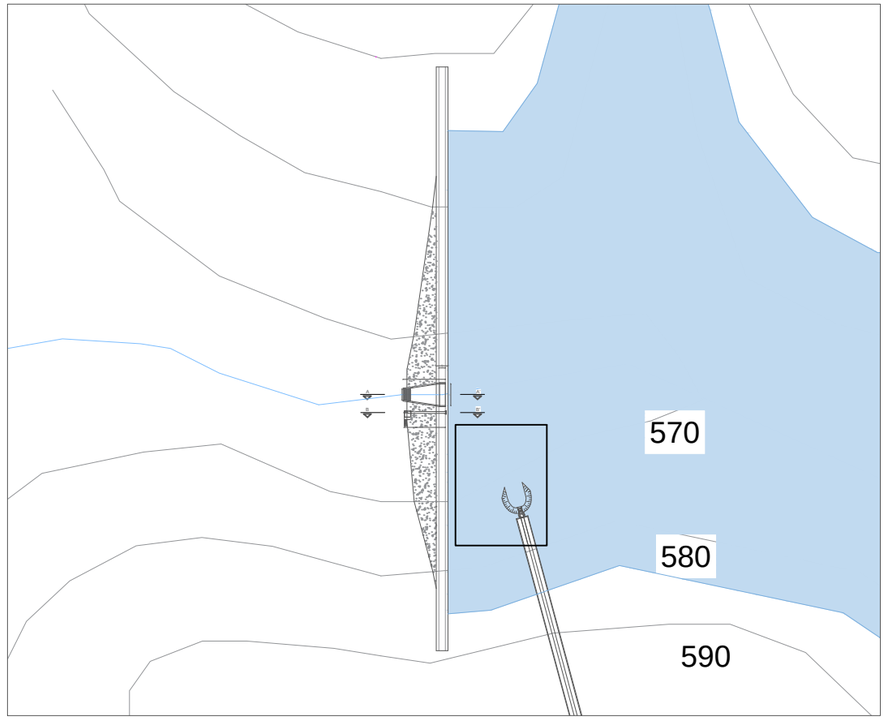
TOMADA DE ÁGUA - PLANTA



SECÇÃO CONDUTA - CORTE CC'

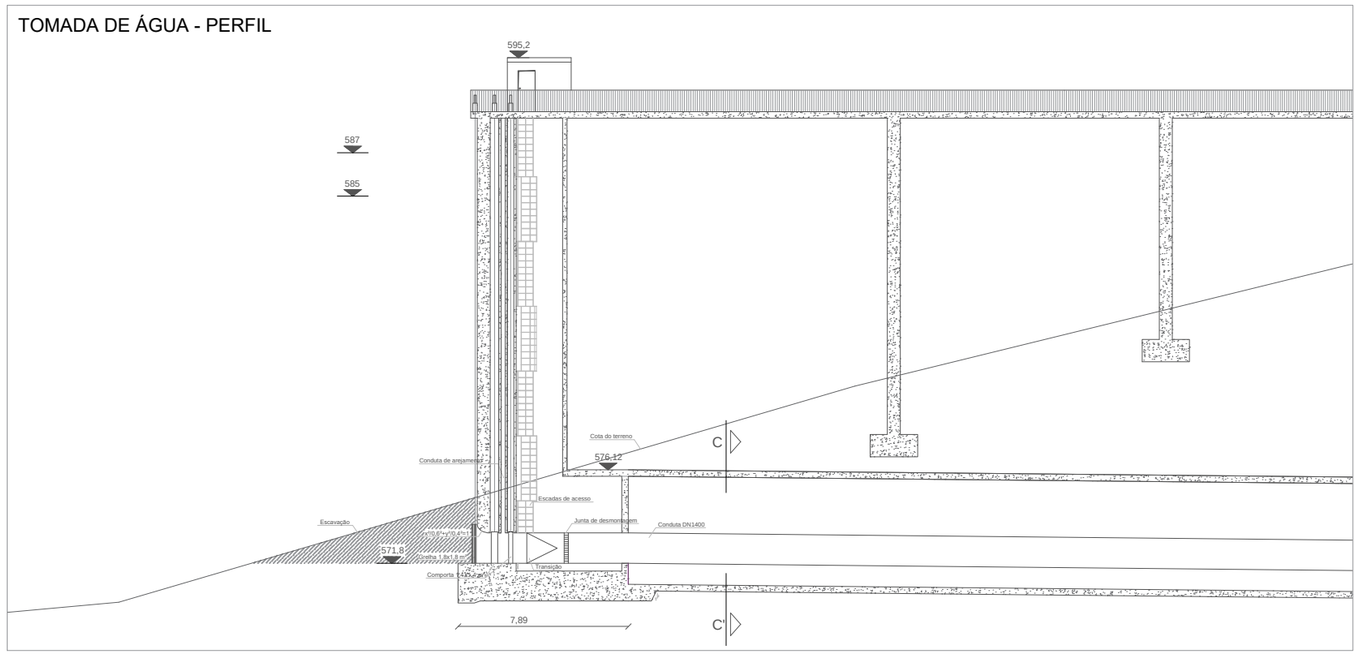


Escala 1:100



Escala 1:2500

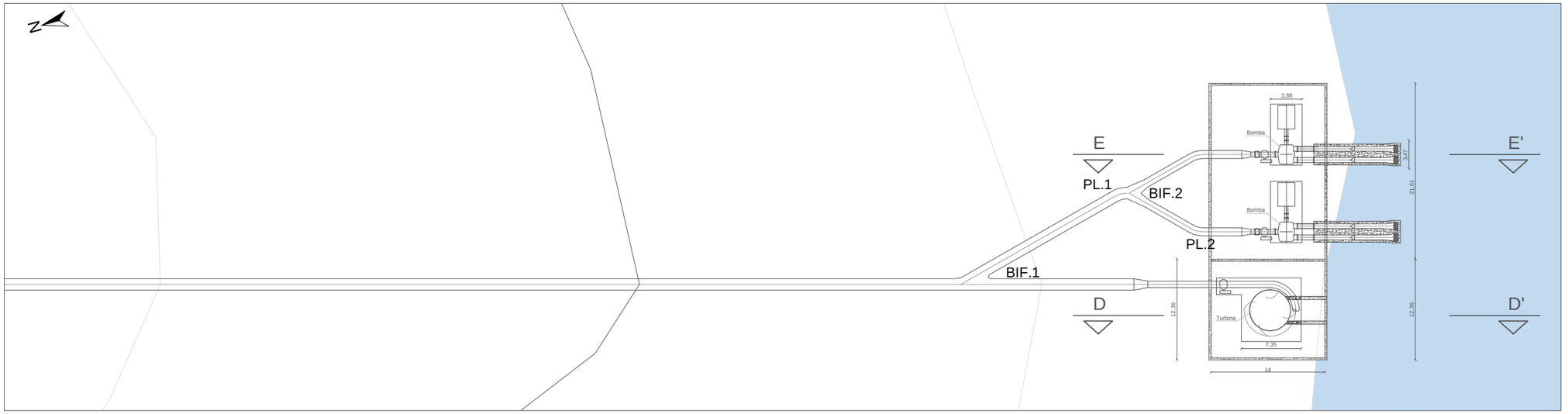
TOMADA DE ÁGUA - PERFIL



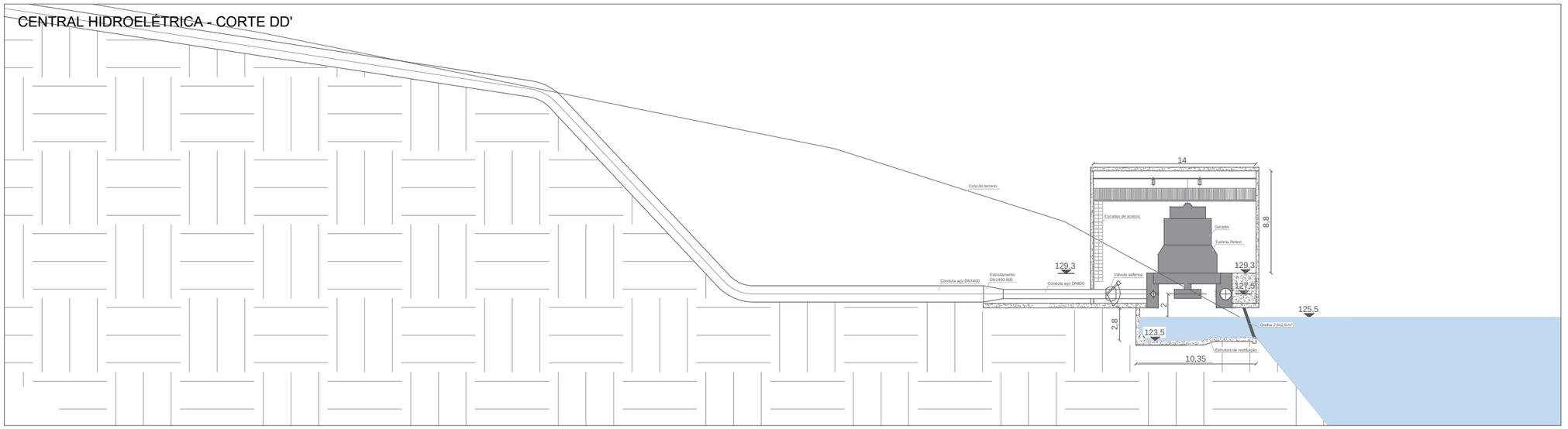
DISSERTAÇÃO	PRODUÇÃO COMBINADA DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DAS FONTES RENOVÁVEIS HIDROELÉTRICA E EÓLICA
ÂMBITO	DISSERTAÇÃO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENG. CIVIL
DESIGNAÇÃO	ESTUDO PRÉVIO TOMADA DE ÁGUA PLANTAS E CORTES

TÉCNICO LISBOA

		ESCALAS	DESENHO Nº	REVISÃO
PROJ.	JOANA PRETO FIALHO	1:250 OU INDICADAS	69418-EP-TOM.001	-
DES.	JOANA PRETO FIALHO		DATA Dezembro 2017	



Escala 1:125

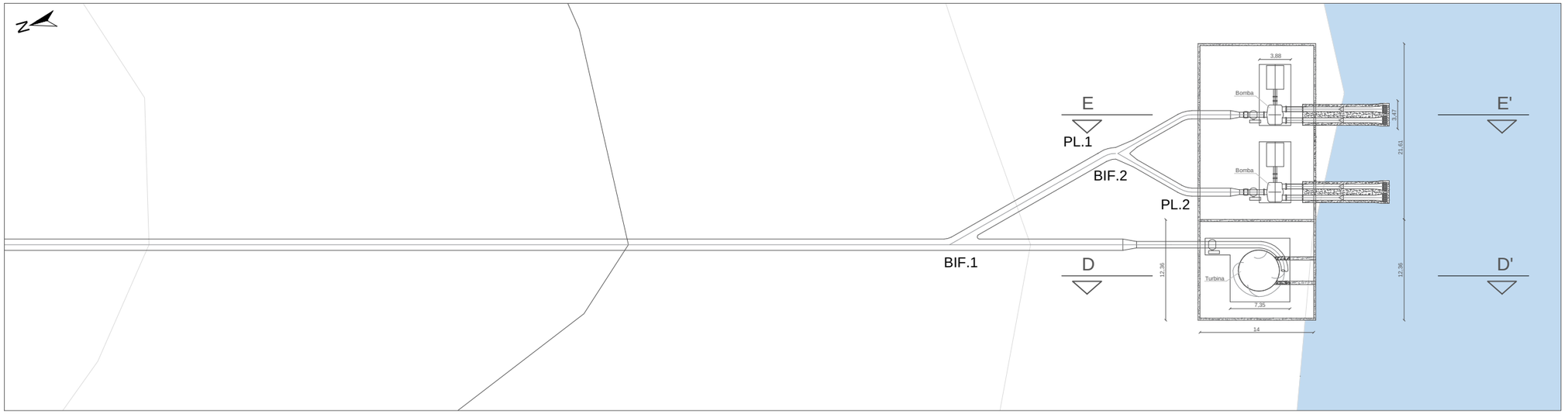


Trecho	Designação		L.10	L.16	L.17
	Comprimento (m)		23,52	19,83	10,86
	Diâmetro (mm)		1400	1400	800
	Inclinação (º)		69	0	
	Material		Aço		

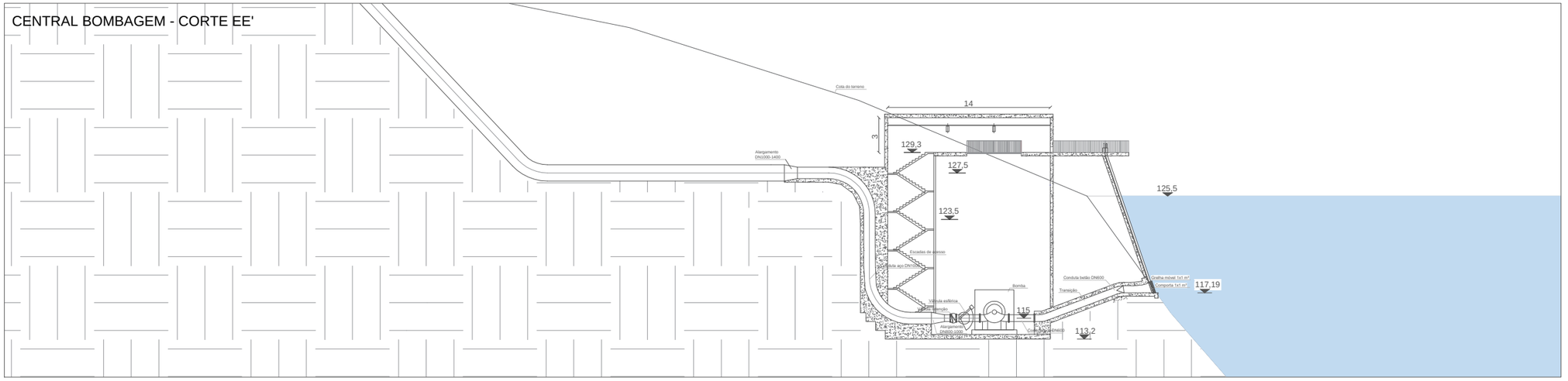
Curva	Designação	PE.9
	Ângulo (º)	38

DISSERTAÇÃO	PRODUÇÃO COMBINADA DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DAS FONTES RENOVÁVEIS HIDROELÉTRICA E EÓLICA
ÂMBITO	DISSERTAÇÃO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENG. CIVIL
DESIGNAÇÃO	ESTUDO PRÉVIO CENTRAL HIDROELÉTRICA PLANTA E CORTE

		ESCALAS	DESENHO Nº	REVISÃO
PROJ.	JOANA PRETO FIALHO	1:350 OU INDICADAS	69418-EP-HID.001	-
DES.	JOANA PRETO FIALHO		DATA Dezembro 2017	



Escala 1:125

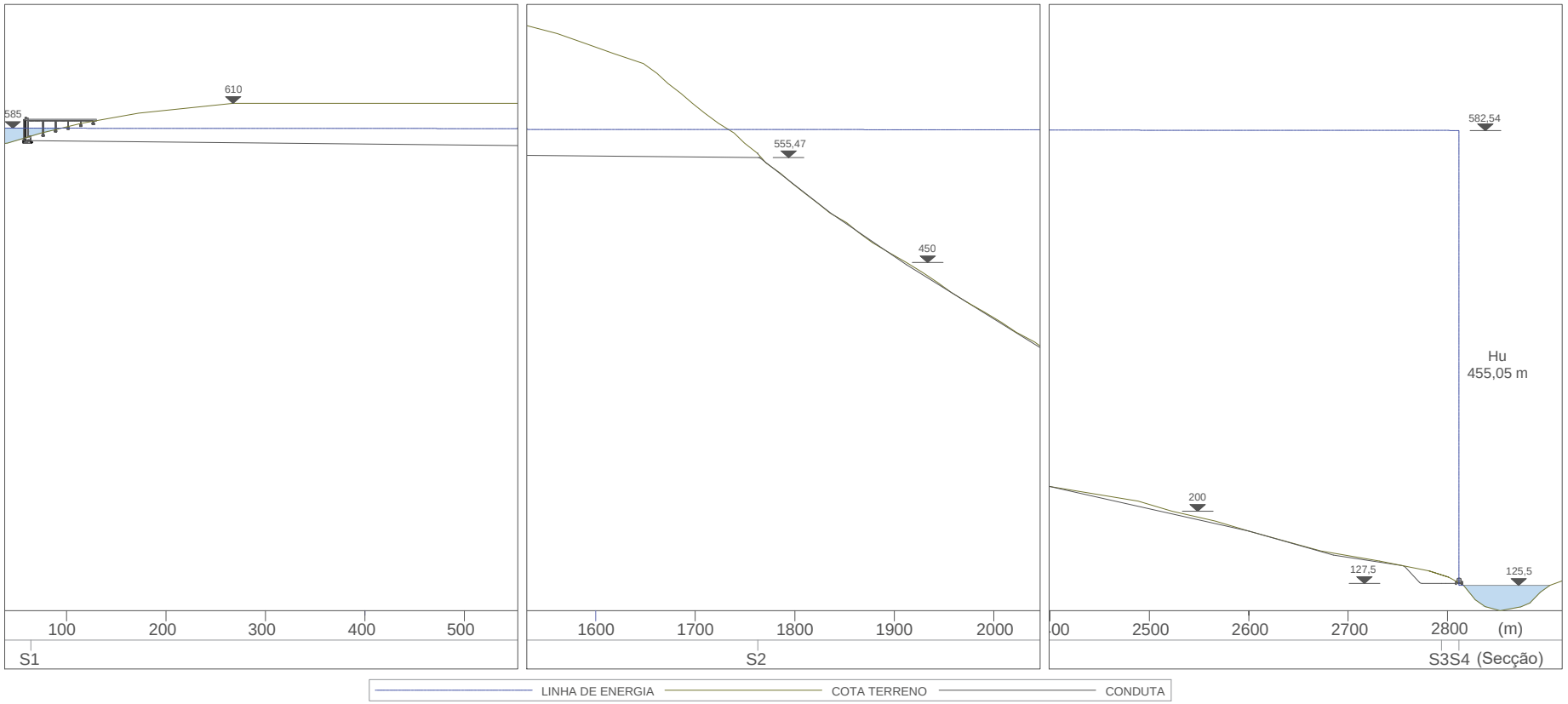


Trecho	Designação		L.10	L.11	L.12	L.13	L.14	L.15
	Comprimento (m)		23,52	21,79	27,16	2,3	2,15	9,27
	Diâmetro (mm)		1400	1400	1000	600	600	600
	Inclinação (º)		69	0	90	0	0	21
	Material	Aço						Betão

Curva	Designação	PL.1				PL.2					
	Ângulo (º)	30				30					
	Designação	PE.9	PE.10			PE.11	PE.12			PE.13	PE.14
	Ângulo (º)	38	47			90	90			21	21
Bifurcação (º)		BIF.1 - 30º				BIF.2- 45º					

DISSERTAÇÃO	PRODUÇÃO COMBINADA DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DAS FONTES RENOVÁVEIS HIDROELÉTRICA E EÓLICA
ÂMBITO	DISSERTAÇÃO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENG. CIVIL
DESIGNAÇÃO	ESTUDO PRÉVIO CENTRAL DE BOMBAGEM PLANTA E CORTE

		ESCALAS	DESENHO Nº	REVISÃO
PROJ.	JOANA PRETO FIALHO	1:350 OU INDICADAS	69418-EP-HID.002	-
DES.	JOANA PRETO FIALHO		DATA Dezembro 2017	

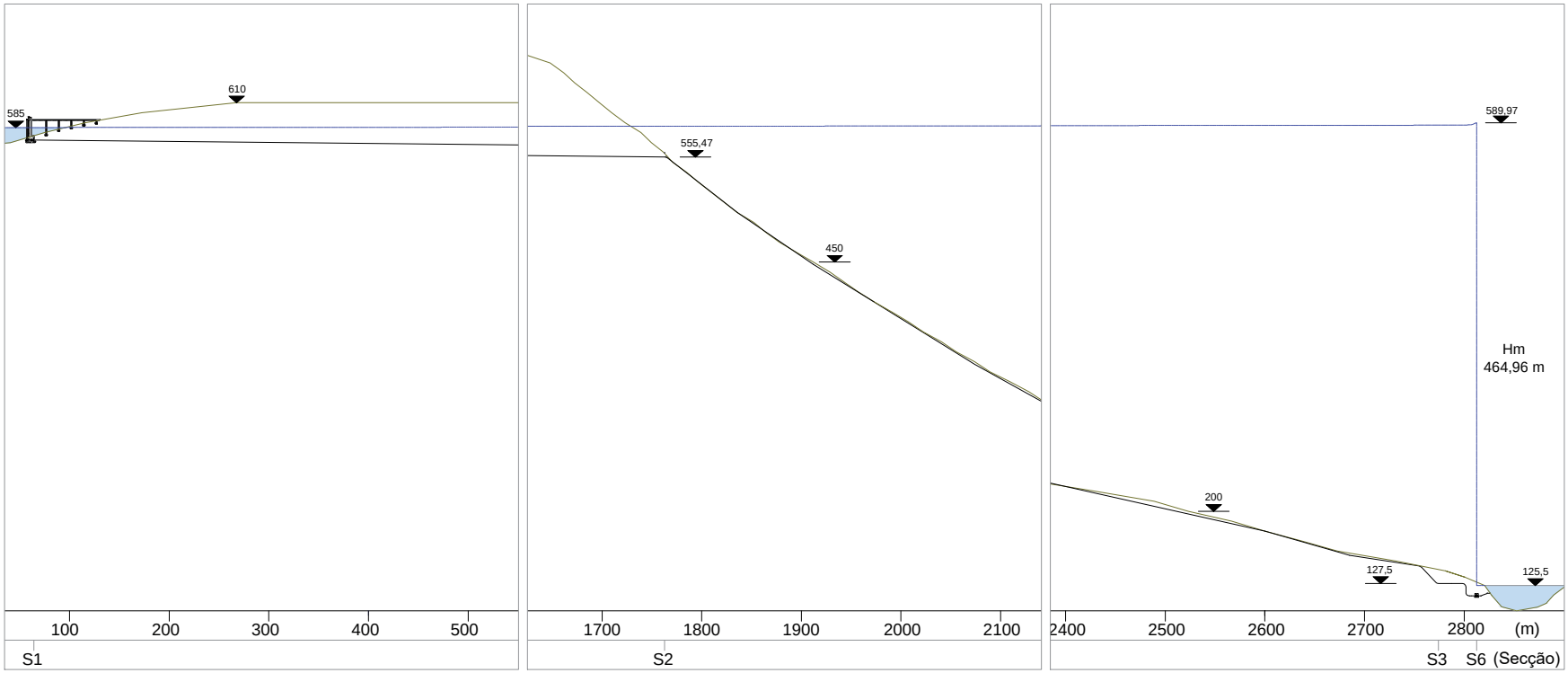


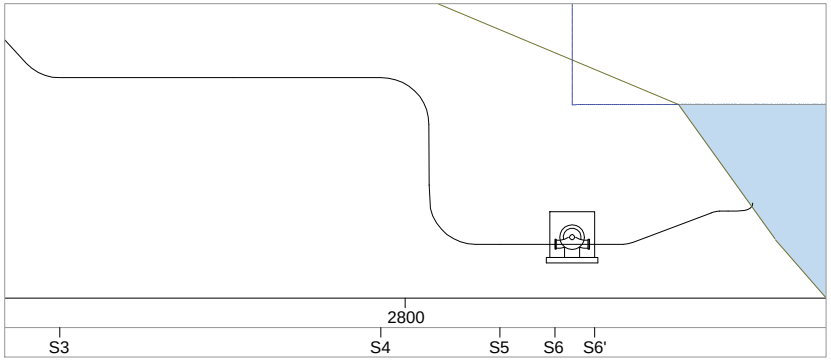
DISSERTAÇÃO	PRODUÇÃO COMBINADA DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DAS FONTES RENOVÁVEIS HIDROELÉTRICA E EÓLICA
ÂMBITO	DISSERTAÇÃO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENG. CIVIL
DESIGNAÇÃO	ESTUDO PRÉVIO LINHA DE ENERGIA – NA FASE DE GERAÇÃO HIDROELÉTRICA

TÉCNICO LISBOA

PROJ.	JOANA PRETO FIALHO	ESCALAS	DESENHO Nº
DES.	JOANA PRETO FIALHO	1:6002 OU INDICADAS	69418–EP–LE.001
			DATA Dezembro 2017

REVISÃO: –





Escala 1:125

DISSERTAÇÃO	PRODUÇÃO COMBINADA DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DAS FONTES RENOVÁVEIS HIDROELÉTRICA E EÓLICA
ÂMBITO	DISSERTAÇÃO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENG. CIVIL
DESIGNAÇÃO	ESTUDO PRÉVIO LINHA DE ENERGIA – NA FASE DE BOMBAGEM

TÉCNICO LISBOA

		ESCALAS	DESENHO Nº
PROJ.	JOANA PRETO FIALHO	1:6002 OU INDICADAS	69418-EP-LE.002
DES.	JOANA PRETO FIALHO		
		DATA Dezembro 2017	

REVISÃO: –