

## PROJECTO DA ESTAÇÃO ELEVATÓRIA PRINCIPAL DE PEDRÓGÃO, NA PERSPECTIVA DOS EQUIPAMENTOS

**Pedro SANTOS**

Eng.º Mecânico, COBA, Av. 5 de Outubro, 323, 1649-011 Lisboa, +351210125000, pgs@coba.pt

**Luís GUSMÃO**

Eng.º Mecânico, COBA, Av. 5 de Outubro, 323, 1649-011 Lisboa, +351210125000, l.gusmao@coba.pt

**António CAPELO**

Eng.º Agrónomo, COBA, Av. 5 de Outubro, 323, 1649-011 Lisboa, +351210125000, ajc@coba.pt

### RESUMO

A estação elevatória principal de Pedrógão faz parte do eixo principal do circuito hidráulico primário do sub-sistema de Pedrógão, que se encontra localizado na margem direita do Guadiana e que beneficia uma área total de cerca de 24 822 ha. Permite a adução de um caudal de 12,5 m<sup>3</sup>/s desde a albufeira da barragem de Pedrógão, com o pleno armazenamento à cota (84,80), até ao reservatório de regularização de Pedrógão, com o plano máximo de água à cota (256,00), através de uma conduta com 2,5 m de diâmetro e 2750 m de desenvolvimento. O reservatório tem um volume total de cerca de 132 000 m<sup>3</sup>.

A estação é equipada com seis grupos electrobomba, cada um com capacidade para um caudal de 2,083 m<sup>3</sup>/s, uma altura de elevação de 80 m e uma potência nominal de 2000 kW. A alimentação eléctrica é assegurada pela rede de média tensão a 60kV, estando prevista a construção de uma subestação. A potência total instalada ascende a 18 MVA.

A presente comunicação apresenta uma descrição da estação elevatória, abordando alguns dos aspectos mais relevantes relacionados com os seus equipamentos: a selecção do número e tipo de grupos de bombagem, a definição do sistema de regulação dos grupos, o estudo económico da conduta elevatória, a definição da implantação dos circuitos de aspiração e de compressão, a análise das condições de aspiração, o estudo dos regimes transitórios hidráulicos e a definição das instalações eléctricas.

**Palavras-chave:** estação, bombagem, conduta, reservatório, regulação.

## 1- LOCALIZAÇÃO E IMPLANTAÇÃO

A estação elevatória principal de Pedrógão faz parte do eixo principal do circuito hidráulico primário do sub-sistema de Pedrógão, que se encontra localizado na margem direita do Guadiana e que beneficia uma área total de cerca de 24 822 ha. Permite o transporte de água desde a albufeira criada pela barragem de Pedrógão – com o pleno armazenamento à cota (84,80) – até ao reservatório de regularização – com o plano máximo à cota (256,00).

A Figura 1 mostra a localização do sistema elevatório.

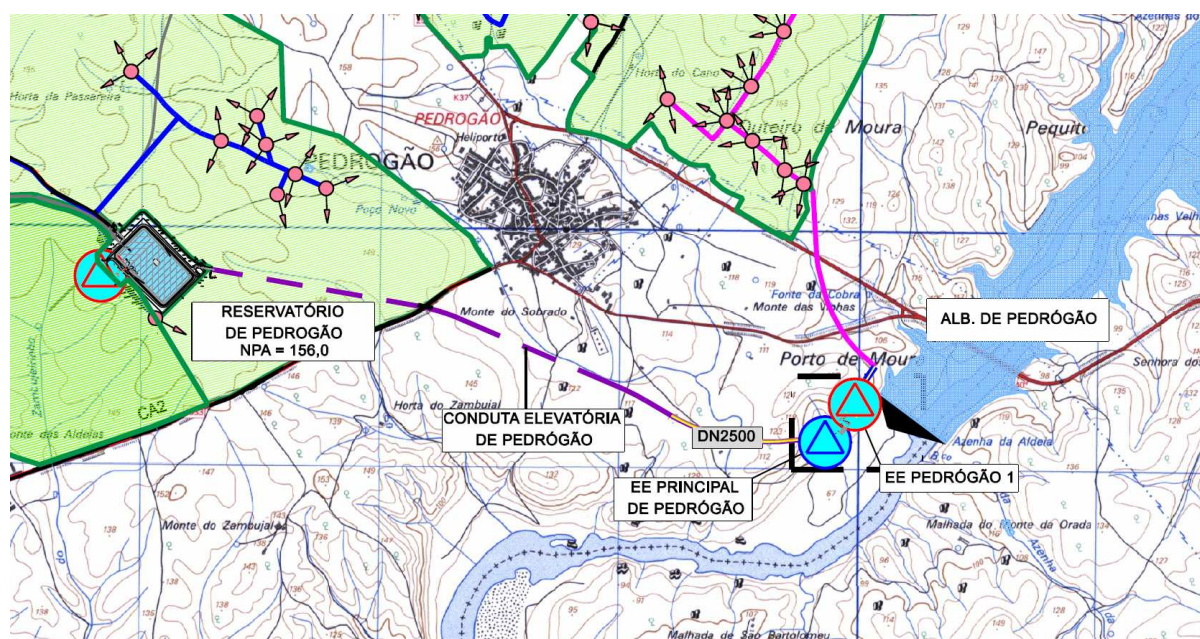


Figura 1 – Localização do sistema elevatório

A estação fica implantada numa plataforma sensivelmente à cota (81,0), ao abrigo da máxima cheia a jusante – cota (80,04), e ocupa uma área com dimensões máximas aproximadas de 93 m x 58 m, a sudoeste da barragem de Pedrógão.

O reservatório de regularização está localizado a 1,5 km a este da vila de Pedrógão e tem uma capacidade útil de armazenamento de cerca de 132 000 m<sup>3</sup>. É construído por modelação do terreno, em escavação e aterro, com geometria adaptada ao relevo natural.

Entre a estação e o reservatório desenvolve-se a conduta elevatória, com 2,5 m de diâmetro e cerca de 2750 m de comprimento.

Em linhas gerais, a estação é formada por um edifício principal, com dimensões em planta de 40,7 m x 19,5 m e altura de 18,0 m, pela sub-estação de 60 kV, que ocupa uma área de 24,0 m x 24,0 m, e pela plataforma dos reservatórios hidropneumáticos, com 30,4 m x 9,2 m.

Na Figura 2 pode ver-se a implantação geral da estação.

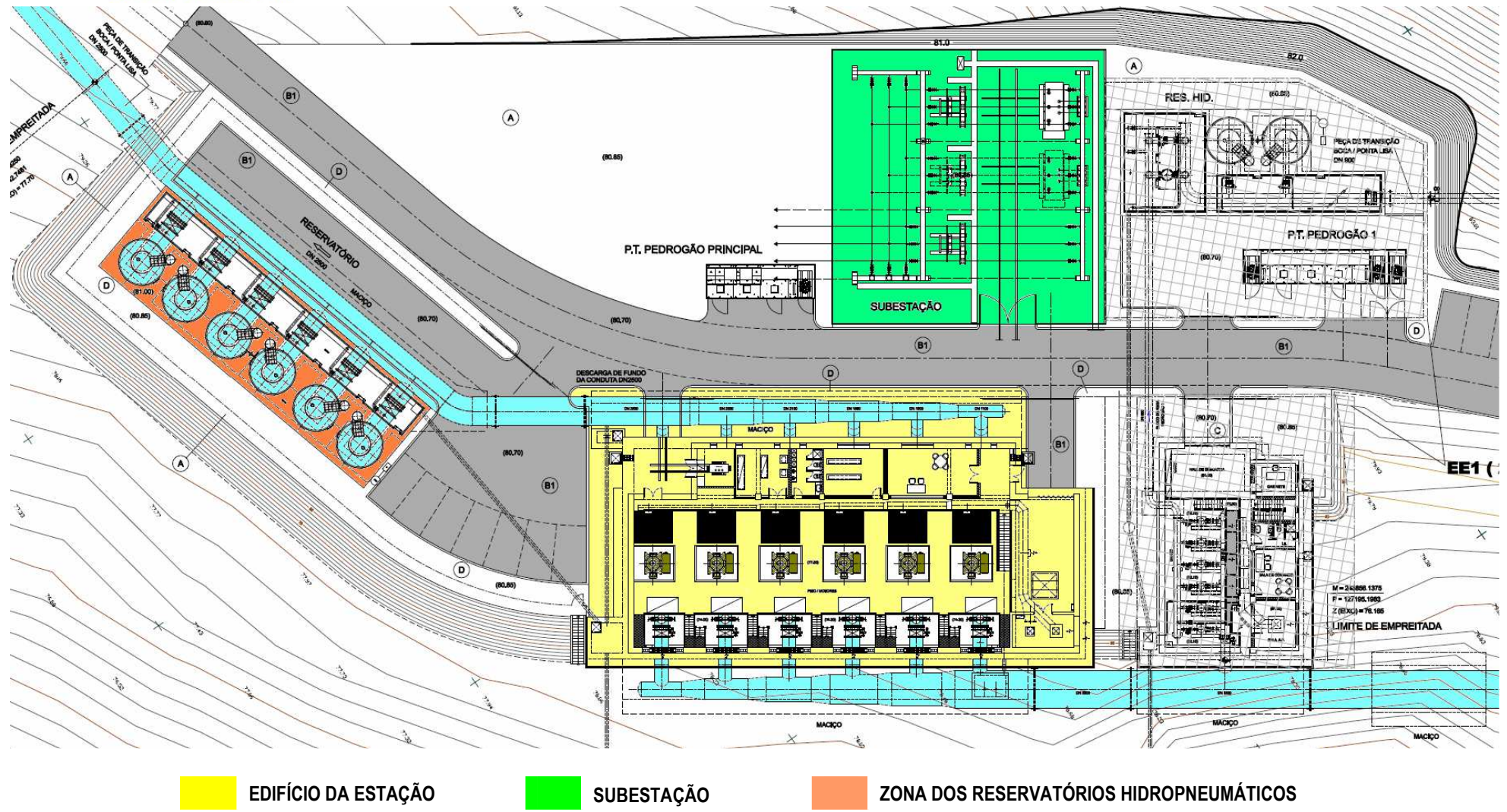


Figura 2 – Implantação geral da estação elevatória

## 2 - CAUDAL E DESNÍVEL

O sistema de bombagem tem capacidade para elevar um caudal máximo de 12,5 m<sup>3</sup>/s, sujeito aos seguintes níveis de água a montante e a jusante:

Níveis na albufeira de Pedrógão:

- nível mínimo de exploração (Nme): (79,00)
- nível de pleno armazenamento (NPA): (84,80)
- nível de máxima cheia (NMC): (91,80)

Níveis no reservatório de regularização de Pedrógão:

- nível máximo: (156,00)
- nível mínimo: (153,00)
- cota da soleira da estrutura de descarga: (153,80)

A altura geométrica de elevação, varia assim, entre os seguintes valores:

- altura geométrica máxima: 77,0 m
- altura geométrica média: 72,6 m
- altura geométrica mínima: 69,0 m
- altura geométrica mínima excepcional: 62,0 m

## 3 - CONDOTA ELEVATÓRIA

Tendo em conta os diâmetros e as pressões envolvidas, a opção recaiu em tubagem de betão com alma de aço que se considera tecnicamente adequada e economicamente competitiva face a outros materiais.

Para a selecção do diâmetro mais apropriado, procedeu-se a uma análise técnico-económica que envolveu a estimativa dos custos de investimento inicial para vários diâmetros, assim como os respectivos custos de exploração englobando os encargos de manutenção e as despesas com a energia.

Os pressupostos assumidos são os seguintes:

- Dado o caudal máximo de dimensionamento de 12,5 m<sup>3</sup>/s, foram analisados diâmetros entre 1,800 m e 3,250 m.
- Nos custos de investimento foram considerados os preços da tubagem de um fornecedor consultado e preços unitários de instalação de conduta em vala, em trabalhos similares.
- Para contabilização dos custos energéticos foi considerada a bombagem dos volumes de água necessários para satisfazer os consumos mensais em ano médio, que são reproduzidos no Quadro 1. Durante os primeiros anos os volumes consumidos não atingirão previsivelmente estes valores, no entanto, visto que a análise é efectuada para um espaço de tempo alargado, optou-se, por simplificação, por considerar aqueles volumes médios durante todo o período.

- As perdas de carga são as resultantes da fórmula de Manning-Strickler, com um coeficiente  $K_s$  de  $90 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ , acrescidas de 10% para ter em conta as perdas localizadas. Considerou-se uma altura geométrica média de 72,6 m.

Quadro 1 – Volumes mensais consumidos em ano médio

Mês	Volume consumido ( $\text{hm}^3$ )
Jan	0,11
Fev	0,18
Mar	5,58
Abr	9,48
Mai	17,35
Jun	25,28
Jul	37,14
Ago	27,32
Set	4,83
Out	1,01
Nov	0,22
Dez	0,01

- Na determinação dos custos anuais de manutenção, assumiu-se que estes correspondem a uma percentagem de 2% do investimento inicial.
- O custo total actualizado da conduta, para cada diâmetro, foi calculado para um período de vida útil de 50 anos, utilizando uma taxa de actualização de 4%, através da expressão:

$$C_{ta} = C_i + \sum_{i=1}^{50} \frac{(C_e + C_m)}{(1+t)^i} \quad (1)$$

em que:

- $C_{ta}$  – custo total actualizado;
- $C_i$  – Investimento inicial;
- $C_e$  – Custo anual de energia;
- $C_m$  – custo anual de manutenção;
- $t$  – taxa de actualização (4%)

No Quadro 2 são apresentados os valores dos custos obtidos para cada diâmetro da conduta.

Quadro 2 – Análise económica da conduta - custos obtidos

Diâmetro (m)	Investimento inicial	Custo anual de energia	Custo anual de manutenção	Custo total actualizado
1,800	3.884.267 €	3.609.721 €	77.685 €	83.097.806 €
2,000	4.634.354 €	3.249.996 €	92.687 €	76.442.489 €
2,150	5.110.331 €	3.097.321 €	102.207 €	73.843.167 €
<b>2,500</b>	6.799.486 €	2.918.052 €	135.990 €	<b>72.406.973 €</b>
2,800	8.156.721 €	2.852.225 €	163.134 €	72.933.232 €
3,000	9.588.567 €	2.827.815 €	191.771 €	74.455.874 €
3,250	11.296.152 €	2.808.745 €	225.923 €	76.487.460 €

Na Figura 3 estão representadas graficamente as curvas de evolução dos custos em função do diâmetro da conduta.

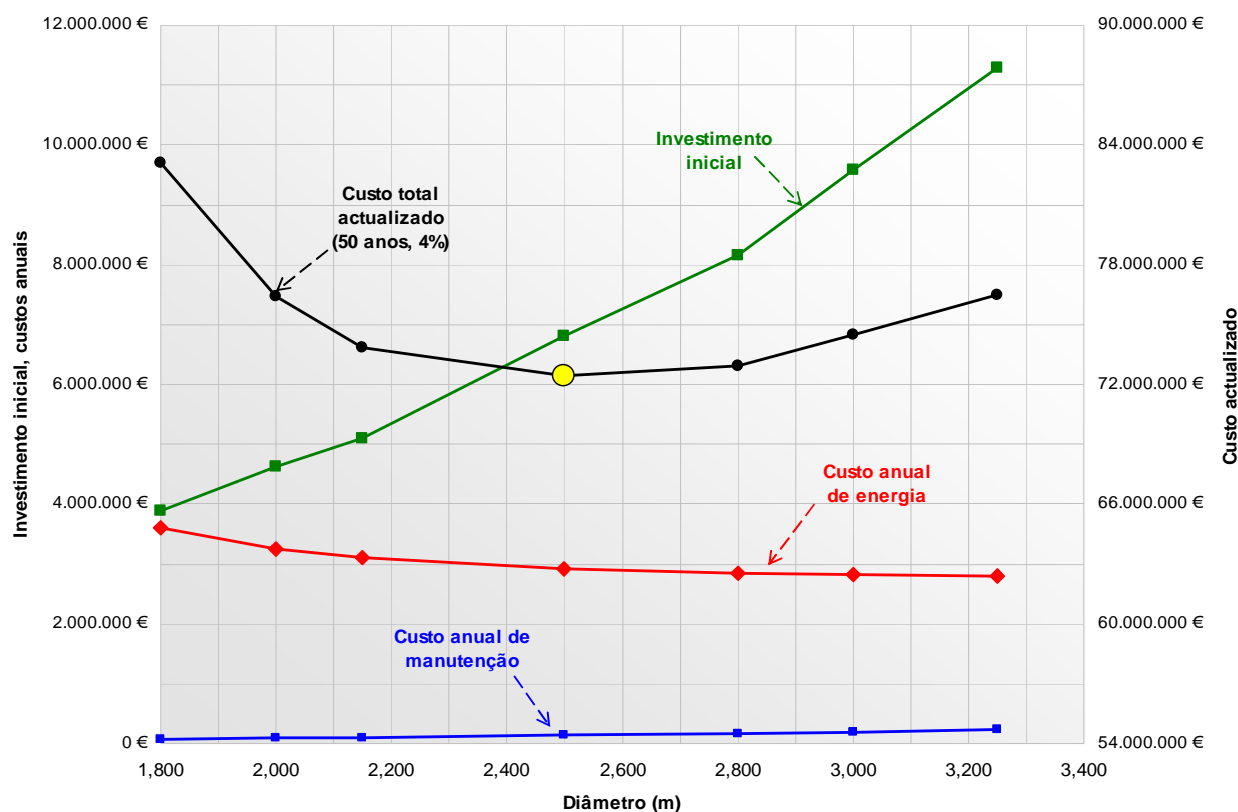


Figura 3 – Dimensionamento económico da conduta

A análise efectuada permitiu concluir que o diâmetro 2,500 m se revela globalmente mais vantajoso, ainda que com uma diferença pouco significativa para o 2,150 m (+1,98%) e o 2,800 m (+0,73%).

#### 4 - GRUPOS ELECTROBOMBA, ASPIRAÇÃO E COMPRESSÃO

A estação é equipada com seis grupos electrobomba, com caudal unitário de 2,083 m<sup>3</sup>/s, altura de elevação de 80 m e potência nominal unitária de 2000 kW.

Este número de unidades de bombagem resultou de uma análise comparativa que englobou soluções entre três e seis grupos e que evidenciou as vantagens desta opção:

- custos de investimento dos equipamentos mais reduzidos;
- maior predisposição para o faseamento da instalação – três grupos na primeira fase e outros três na segunda;
- possibilidade de montagem vertical dos grupos, reduzindo a área ocupada e a volumetria do edifício;
- maior número de fabricantes com capacidade de resposta.

As bombas são do tipo monocelular, com voluta bipartida axialmente e impulsor radial de dupla entrada, com eixo vertical. Trabalham à velocidade nominal de 750 r.p.m., possuem impulsor com diâmetro de 1050 mm, entrada e saída em linha com diâmetros de 900 mm e 800 mm, respectivamente, e com o eixo posicionado à cota (75,50).

Os motores de accionamento são eléctricos, trifásicos, com rotor em curto-circuito, com potência unitária de 2000 kW, alimentados a 11 kV. Dada a sua dimensão, são montados sobre uma laje superior de betão armado, 3,0 m acima da bomba.

A Figura 4 mostra um corte transversal do edifício.

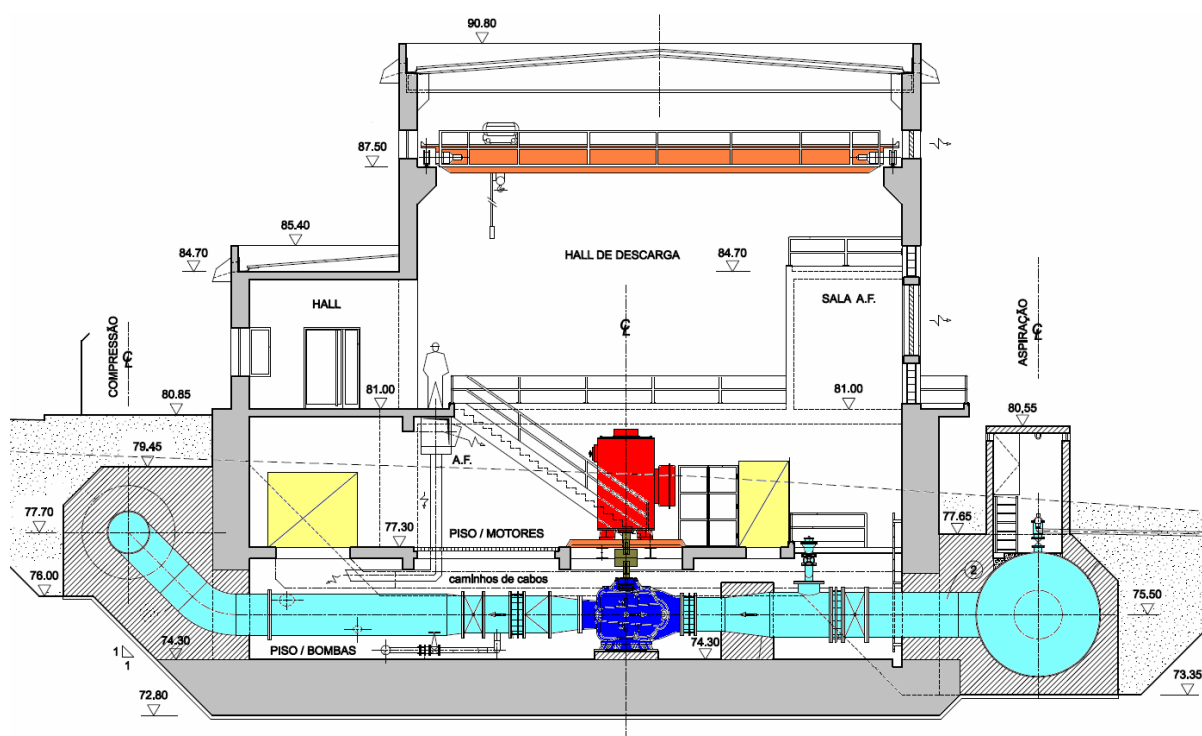


Figura 4 – Corte transversal do edifício

Os diâmetros seleccionados para as condutas dos circuitos hidráulicos conduzem a velocidades usuais neste tipo de instalações e são os seguintes:

- aspiração geral: DN 3,3 m ( $v = 1,5$  m/s)
- aspiração individual: DN 1,2 m ( $v = 1,8$  m/s)
- compressão individual: DN 1,0 m ( $v = 2,7$  m/s)
- compressão geral: DN 2,5 m ( $v = 2,5$  m/s)

## 5 - CURVAS DE FUNCIONAMENTO

Para a construção das curvas características da instalação foram consideradas as alturas geométricas referidas no capítulo 2 e as perdas de carga no circuito hidráulico, estimadas através das expressões:

- $\Delta h = 0,369 Q^2$ , para um grupo em serviço;
- $\Delta h = 0,136 Q^2$ , para dois grupos em serviço;
- $\Delta h = 0,085 Q^2$ , para três grupos em serviço;
- $\Delta h = 0,065 Q^2$ , para quatro grupos em serviço;
- $\Delta h = 0,055 Q^2$ , para cinco grupos em serviço;
- $\Delta h = 0,050 Q^2$ , para seis grupos em serviço.

A altura de elevação nominal das bombas foi fixada considerando a altura geométrica média entre a albufeira de Pedrógão e o reservatório e as perdas de carga no circuito hidráulico para o caudal máximo:

$$H = 72,6 + 7,8 = 80,4 \text{ m} \rightarrow H = 80 \text{ m}$$

A Figura 5 mostra as curvas características da instalação para um, dois, três, quatro, cinco e seis grupos em paralelo, e as curvas de funcionamento das bombas de um fabricante seleccionado.



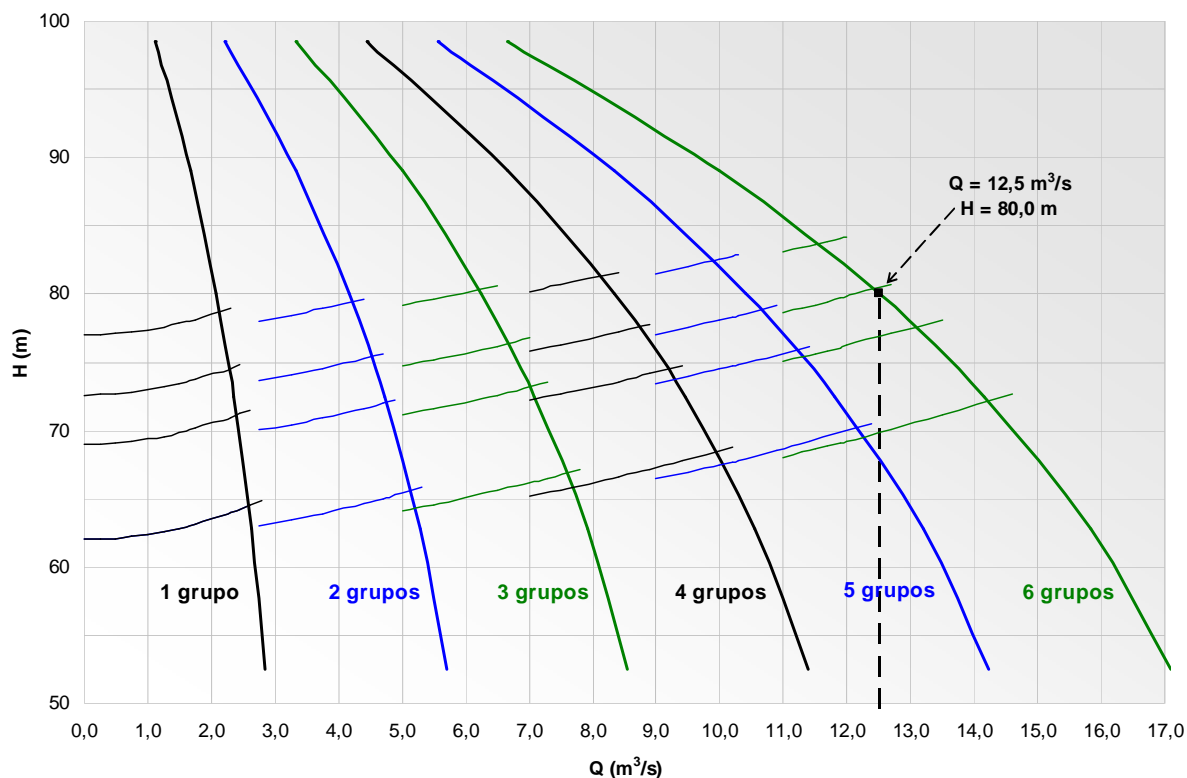


Figura 5 – Curvas de funcionamento do sistema elevatório

## 6 - CONDIÇÕES DE PRESSÃO NA ASPIRAÇÃO

As bombas foram posicionadas com a linha de centro do impulsor à cota (75,50), de modo a garantir uma pressão adequada na aspiração.

O estudo das condições de pressão na aspiração contemplou três cenários distintos, representados na Figura 6, no que respeita ao nível de água a montante – Nme, nível médio e NPA. Para cada um destes casos, foi avaliada a margem de segurança S do NPSH nos dois estados extremos do reservatório de jusante – cheio (ponto A da Figura 6) e vazio (ponto B) – sendo:

$$S = \text{NPSH}_{\text{disp}} - \text{NPSH}_{\text{req}} \approx (h_{\text{atm}} - h_v - \Delta h_{\text{asp}} + Z) - \text{NPSH}_{\text{req}} \quad (2)$$

em que:

$h_{\text{atm}}$  – pressão atmosférica em m c.a.;

$h_v$  – pressão de vapor da água;

$\Delta h_{\text{asp}}$  – perda de carga na aspiração;

Z – carga estática em relação à linha de centro do impulsor.

Foi considerado o funcionamento de apenas um grupo electrobomba, o que conduz às condições mais gravosas – o efeito favorável de uma menor perda de carga na aspiração é superado pelo efeito desfavorável de um maior NPSH requerido pela bomba em pontos de maior caudal.

A margem de segurança mínima obtida é de aproximadamente 1,7 m, que, como seria de esperar, se verifica no seguinte cenário:

- nível mínimo de exploração (Nme) na albufeira do Pedrógão;
- nível mínimo (Nme) no reservatório de jusante;
- apenas um grupo em serviço.

A Figura 6 mostra, graficamente, o estudo efectuado.

## 7 - SISTEMA DE REGULAÇÃO DOS GRUPOS

O funcionamento dos grupos electrobomba é comandado automaticamente em função dos níveis de água medidos no reservatório de regularização.

Por intermédio de uma medição contínua de nível no reservatório, associa-se a cada grupo um nível de arranque e um nível de paragem. Os níveis de arranque serão escalonados na parte inferior da altura útil de funcionamento e os níveis de paragem na parte superior.

O volume mínimo do reservatório é definido de forma a garantir três condições principais:

1. o volume de água compreendido entre o nível de arranque e o nível de paragem da mesma bomba é suficiente para garantir que não se ultrapassa um determinado número de arranques por hora;
2. os níveis consecutivos de arranque e os níveis consecutivos de paragem estão suficientemente distanciados entre si de modo a evitar manobras intempestivas dos grupos;
3. o volume de segurança alta é suficiente para evitar a perda de água pelo descarregador de superfície do reservatório; o volume de segurança baixa é suficiente para evitar o esvaziamento do reservatório.

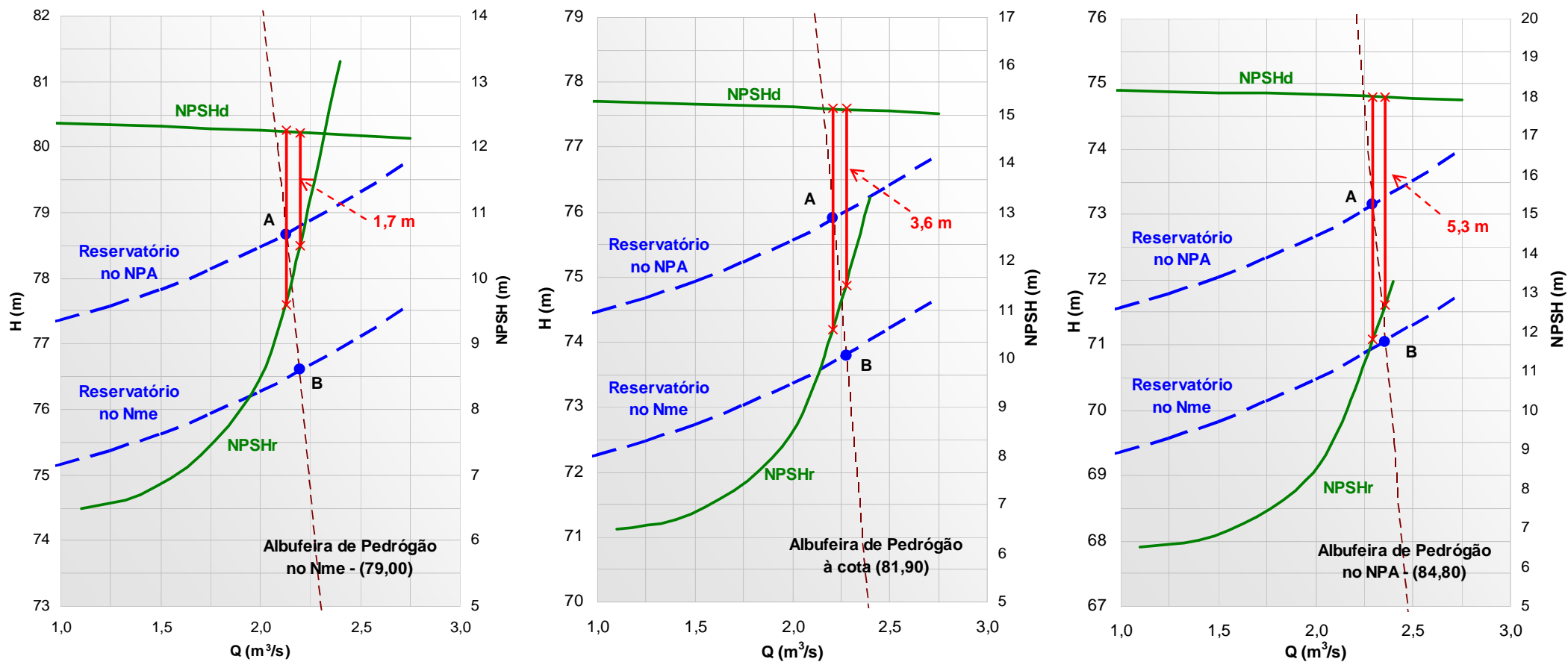


Figura 6 – Curvas de NPSH requerido e NPSH disponível, para três situações de nível de água na aspiração: 1) Nme (79,00); 2) nível médio; 3) NPA (84,80).

### 1. Volume de regulação

O volume mínimo necessário entre a ordem de arranque e a ordem de paragem da mesma bomba é dado por:

$$V_R = \frac{T \times Q_u}{4} \quad (3)$$

em que:

T – tempo entre arranques consecutivos do mesmo grupo (3600 s, correspondente a 1 arranque/h)

$Q_u$  – caudal de um grupo (2,083 m<sup>3</sup>/s)

### 2. Volumes de escalonamento das ordens

Os volumes de água que separam as ordens de arranque consecutivas e as ordens de paragem consecutivas dos vários grupos são dados, respectivamente, por:

$$V_{arr_{(i-1)-i}} = \frac{1}{2} Q_u T_a + [n - (i - 1)] \cdot Q_u \cdot T_a \quad (4)$$

$$V_{par_{i-(i-1)}} = Q_u T_p + (i - 1) \cdot Q_u \cdot T_p \quad (5)$$

em que:

$V_{arr_{(i-1)-i}}$  – volume compreendido entre o nível de arranque do grupo (i-1) e o nível de arranque do grupo i, variando i entre 2 e n;

$V_{par_{i-(i-1)}}$  – volume compreendido entre o nível de paragem do grupo i e o nível de paragem do grupo (i-1), variando i entre 2 e n;

n – número máximo de grupos (6);

$T_a$  – tempo que um grupo demora a atingir o caudal máximo (200 s);

$T_p$  – tempo de anulação do caudal máximo de um grupo (200 s);

Estas expressões têm em conta o volume de encaixe necessário para a paragem ou para o arranque de cada grupo e ainda um acréscimo de volume suficiente para prevenir manobras intempestivas na sequência de uma variação instantânea significativa do consumo de água do reservatório.

### 3. Volumes de segurança

Os volumes de segurança baixa e alta são dados, respectivamente, por:

$$V_{seg\_baixa} = \frac{1}{2} Q_u T_a \quad (6)$$

$$V_{seg\_alta} = Q_u T_p \quad (7)$$

No Quadro 3 estão indicados os vários níveis de regulação definidos e respectivos volumes.

Quadro 3 – Níveis de regulação e volumes no reservatório

Níveis de regulação	Volumes mínimos (m <sup>3</sup> )	Desníveis adoptados (m)	Volumes finais (m <sup>3</sup> )	Cotas (m)
Nível de alarme alto				156,05
	417	0,05	2170	
Paragem da bomba 1				156,00
	833	0,20	8680	
Paragem da bomba 2				155,80
	1250	0,20	8680	
Paragem da bomba 3				155,60
	1667	0,20	8680	
Paragem da bomba 4				155,40
	2083	0,20	8680	
Paragem da bomba 5				155,20
	2500	0,20	8680	
Paragem da bomba 6				155,00
	0	0,50	21700	
Arranque da bomba 1				154,50
	2292	0,20	8680	
Arranque da bomba 2				154,30
	1875	0,20	8680	
Arranque da bomba 3				154,10
	1458	0,20	8680	
Arranque da bomba 4				153,90
	1042	0,20	8680	
Arranque da bomba 5				153,70
	625	0,20	8680	
Arranque da bomba 6				153,50
	208	0,50	21700	
Nível de alarme baixo				153,00
<b>Total:</b>	<b>16250</b>	<b>3,05</b>	<b>132370</b>	-

De acordo com a metodologia seguida o reservatório necessita de um volume de 16250 m<sup>3</sup>.

Dada importância do reservatório, localizado à cabeça do circuito hidráulico primário do sub-sistema de Pedrógão, optou-se por dotá-lo de uma capacidade de armazenamento muito superior à estritamente necessária, constituindo-o assim como ponto de reserva de água.

## 8 - ESTUDO DOS REGIMES TRANSITÓRIOS HIDRÁULICOS

Para o estudo do comportamento deste sistema em regime transitório procedeu-se à sua modelação em computador utilizando o programa ERTEP, desenvolvido pela COBA, que recorre ao método das características para a modelação de escoamentos variáveis.

Para sistemas de bombagem deste tipo a situação mais desfavorável, no que respeita ao comportamento em regime transitório, é geralmente a saída de serviço não programada e simultânea dos grupos electrobomba quando estes se encontram a funcionar à sua máxima capacidade.

Como dispositivo de protecção foi previsto um sistema de seis reservatórios hidropneumáticos, com volume de 120 m<sup>3</sup> cada um. Os reservatórios contêm água e ar em pressão, permitindo a entrada

ou a saída de água, em função da pressão que se verifica na secção de conduta a que estão ligados, atenuando assim a variação das pressões na instalação durante a ocorrência dos regimes transitórios.

As simulações efectuadas visaram a verificação dos seguintes aspectos principais:

- volume de ar máximo atingido no interior dos reservatórios hidropneumáticos;
- pressões máximas e mínimas na estação elevatória.
- pressões máximas e mínimas ao longo da conduta elevatória.

As condições iniciais consideradas são as seguintes:

- volume de ar inicial: 396 m<sup>3</sup>
- cota piezométrica inicial: 160,2 m

Na Figura 7 estão representadas as envolventes das cotas piezométricas máximas e mínimas ao longo do sistema.

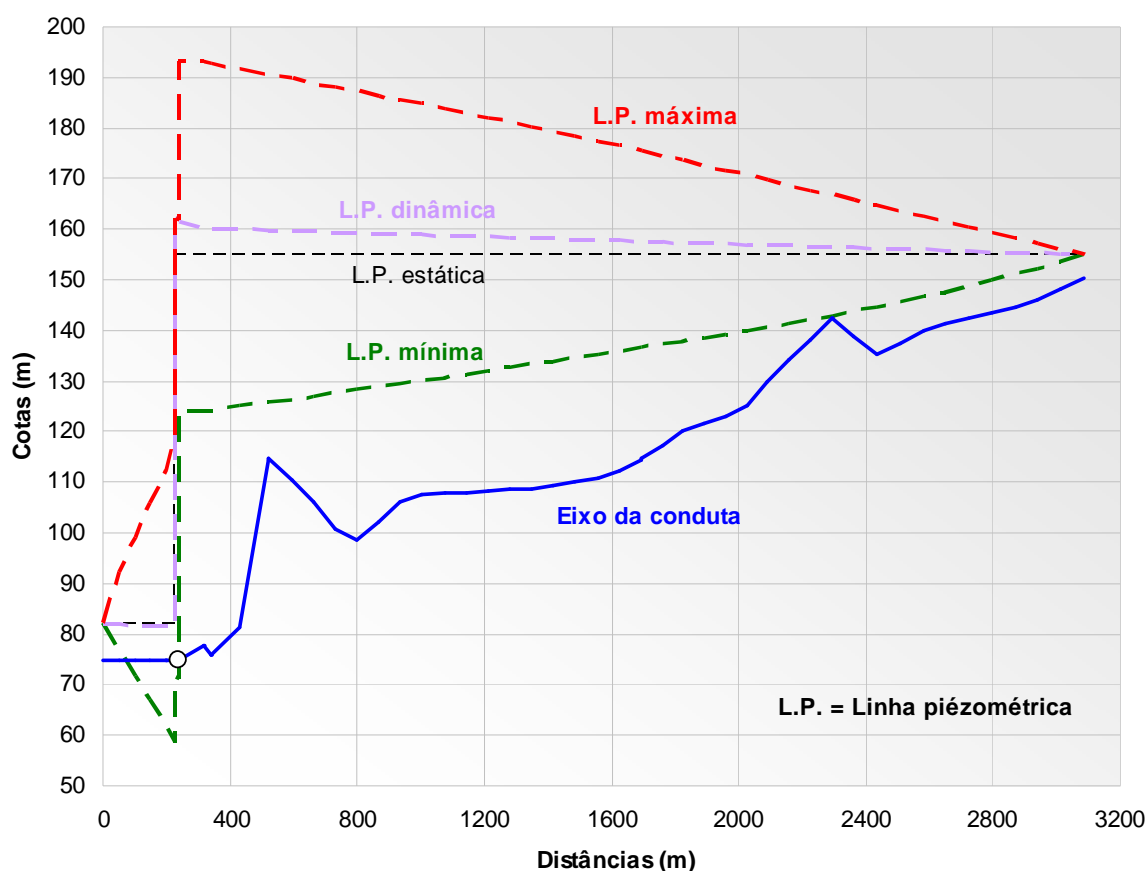


Figura 7 – Regime transitório. Envolventes das piezométricas máximas e mínimas

Os principais resultados obtidos são os seguintes:

Na estação elevatória:

- pressão máxima: 118,2 m
- pressão mínima: 46,3 m

Na conduta:

- pressão máxima: 116,8 m

- pressão mínima: 0,3 m

Nos reservatórios hidropneumáticos:

- caudal máximo de saída: 12,1 m<sup>3</sup>/s
- caudal máximo de entrada: 9,2 m<sup>3</sup>/s
- volume de ar máximo: 597 m<sup>3</sup>

Os reservatórios hidropneumáticos são cilíndricos, com eixo vertical, diâmetro de 4,0 m e altura de cerca de 10 m. São equipados com um sistema de ar comprimido que faz o controlo do volume de ar no seu interior.

O Quadro 4 mostra a variação do nível de água e do volume de ar com a cota piezométrica nos reservatórios hidropneumáticos, assumindo um comportamento segundo a lei:

$$P_1 \times V_1 = P_2 \times V_2 \quad (8)$$

Quadro 4 – Níveis, volumes e pressões nos reservatórios hidropneumáticos

	Cota piezométrica (m)	Nível de água (m)	Volume de ar (m <sup>3</sup> )	Pressão relativa do ar (m.c.a.)
Alarme alto	---	4,90	350,55	--
	161,2	4,34	392,77	74,3
	160,2	4,29	396,84	73,4
	159,0	4,21	402,57	72,2
	158,0	4,15	407,10	71,3
	157,0	4,09	411,62	70,4
	156,0	4,03	416,15	69,5
	155,0	3,96	421,42	68,5
	153,8	3,88	427,45	67,4
Alarme baixo	---	3,25	474,96	--

O sistema de ar comprimido promove a entrada e a saída de ar dos reservatórios, consoante o nível de água se torna superior ou inferior ao nível esperado.

## 9 - EQUIPAMENTOS MECÂNICOS AUXILIARES

A montagem e manutenção dos equipamentos no interior do edifício são efectuadas com auxílio de uma ponte rolante, com capacidade de carga de 20 t, vencendo um vão de 12,0 m.

Para ventilação da sala dos grupos são instalados dois arrefecedores evaporativos no interior do edifício, com um caudal de 15 000 m<sup>3</sup>/h cada um, e condutas de insuflação de ar. A captação de ar novo é efectuada através de grelha de entrada de ar colocada na fachada de nordeste. O ar quente de exaustão da sala sairá por grelhas de exterior colocadas na parte superior da fachada sudeste do edifício.

## 10 - INSTALAÇÕES ELÉCTRICAS

A estação elevatória será alimentada pela rede eléctrica de média tensão, através de uma linha aérea à tensão nominal de 60 kV.

Para a alimentação dos serviços auxiliares, em situações em que a estação elevatória se encontra fora de serviço, existe um posto de seccionamento / contagem e transformação com ligação à rede de média tensão de 30 kV.

Os motores dos grupos são alimentados à tensão de 11 kV, sendo o seu arranque realizado por arrancador progressivo.

Resumidamente, as instalações eléctricas compreendem:

- uma subestação de 60 kV, equipada com dois painéis de transformador e um painel de linha;
- dois transformadores 60/11 kV de 9 MVA para alimentação dos grupos;
- instalação de 11 kV para alimentação dos grupos;
- arrancadores progressivos de 11 kV;
- um posto de seccionamento e contagem / transformação para alimentação dos serviços auxiliares;
- transformadores dos serviços auxiliares de 11/0,4 kV e 30/0,4 kV;
- transformadores de medida e equipamento de contagem de energia;
- quadro dos serviços auxiliares de c.a. e c.c.;
- quadros eléctricos parciais (baixa tensão);
- sistema de compensação de energia reactiva;
- sistemas de alimentação em corrente contínua a 24 V e 110 V;
- sistema de automação e supervisão;
- iluminação e tomadas;
- sistema de protecção contra descargas atmosféricas;
- protecção contra sobretensões; rede de terras;
- protecção contra contactos directos e indirectos;
- sistema de detecção de intrusão e roubo;
- sistema automático de detecção de incêndio e sistema de CCTV.

A Figura 8 mostra o esquema geral unifilar da estação elevatória.



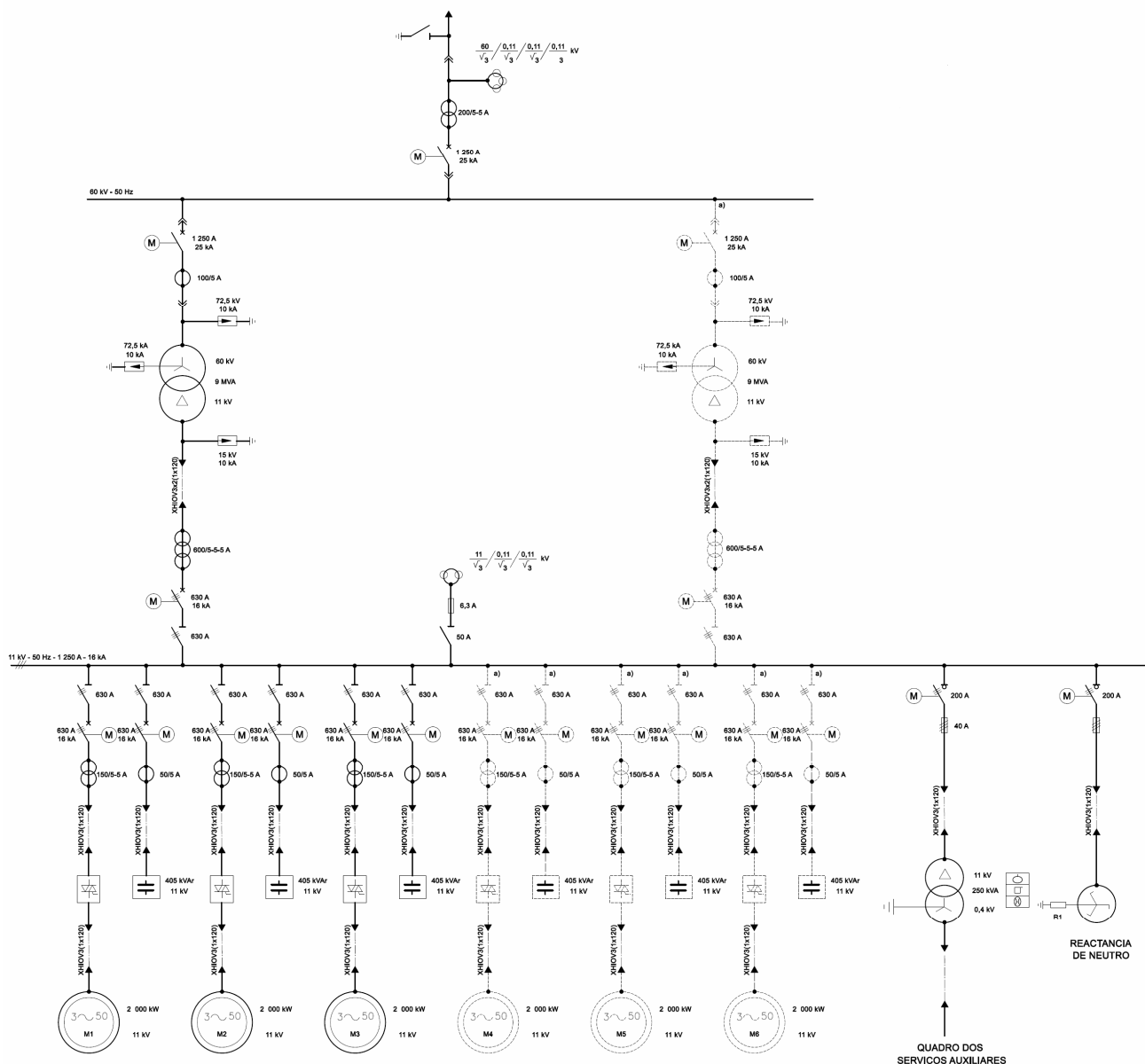


Figura 8 – Esquema geral unifilar

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- COBA (2006). Projecto de Execução da Estação Elevatória e Circuito Hidráulico do Pedrógão. Nota Técnica n.º 5: Estudo Prévio da Estação Elevatória, Central Hidroeléctrica e Conduta Elevatória.
- COBA (2008). Projecto de Execução da Estação Elevatória e Circuito Hidráulico do Pedrógão. Volume 2: Estações Elevatórias de Pedrógão. Volume 2.1 – Estação Elevatória Principal de Pedrógão e Conduta Elevatória.