

Mestrado Integrado em Engenharia Civil

A INFLUÊNCIA DO RESERVATÓRIO DE JUSANTE NA EXPLORAÇÃO OTIMIZADA DE SISTEMAS ELEVATÓRIOS. ESTUDO DE CASO.

JOÃO MANUEL RODRIGUES COSTA

A INFLUÊNCIA DO RESERVATÓRIO DE JUSANTE NA EXPLORAÇÃO OTIMIZADA DE SISTEMAS ELEVATÓRIOS. ESTUDO DE CASO

JOÃO MANUEL RODRIGUES COSTA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM HIDRÁULICA

Orientador: Professor Doutor Francisco Manuel de Oliveira Piqueiro

Coorientador: Professor Doutor José Carlos Tentúgal Valente

Fevereiro de 2015

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2014/2015

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2014/2015 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2015*.

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

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

A meus Pais

A dúvida é o princípio da sabedoria

Aristóteles

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao meu orientador, o Professor Doutor Francisco Piqueiro, e ao meu coorientador, o Professor Doutor José Tentúgal Valente, pela disponibilidade mostrada e orientação ao longo do processo de elaboração da dissertação. As opiniões partilhadas foram fundamentais na realização do trabalho.

Aos meus pais, por toda a força e incentivo que me deram durante a realização da dissertação. Pelo precioso auxílio familiar e esforço despendido, que me permitiu frequentar este curso, estou profundamente agradecido.

Ao meu irmão, pela motivação que sempre me incutiu ao longo do mestrado.

Aos meus avós, um especial obrigado por sempre acreditarem em mim e pelo apoio incondicional.

Aos meus colegas de faculdade e amigos, pelos bons momentos proporcionados ao longo do curso e a ajuda prestada sempre que necessária.

RESUMO

Os grupos elevatórios são responsáveis por grande parte do consumo de energia eléctrica em sistemas de abastecimento de água, acarretando assim grandes custos para as entidades gestoras destes sistemas.

Neste contexto, é prioritário procurar a melhor eficiência energética e os menores custos de exploração. Com este objetivo devem definir-se os períodos de bombagem ótimos em função da variação do preço da energia eléctrica ao longo do dia e da capacidade de armazenamento dos reservatórios.

Nesta dissertação procede-se ao tratamento de dados, alusivos ao ano de 2014, relativos ao sistema elevatório constituído pela estação elevatória de S. Lourenço e pelo reservatório de Vila Chã. Caracteriza-se o seu funcionamento real em termos hidráulicos, e são calculados os consumos energéticos e custos associados.

Após o tratamento de dados e análise do funcionamento real do sistema, define-se uma metodologia que permita simular o funcionamento otimizado do sistema em função das características do reservatório de jusante.

Seguidamente aplica-se esta metodologia à simulação de oito cenários, nos quais se mantêm todas as características do sistema e se utilizam os consumos reais registados, mas alterando as condições de armazenamento no reservatório. Comparam-se os custos com a energia, os períodos de bombagem e o volume armazenado nos oito cenários.

PALAVRAS-CHAVE: abastecimento de água, estações elevatórias, reservatórios, eficiência energética, otimização.

ABSTRACT

Pumps are responsible for much of the electricity consumption in water supply systems, thus bringing great cost to the managing companies of these systems.

In this context, the priority is to look for the best energetic efficiency and lower operating costs. For this purpose should be defined the optimal pumping periods due to the change in the price of electricity throughout the day and storage capacity of water tanks.

In this dissertation it is made the processing of data, depicting the year of 2014, relating to the system consisting of the pumping station of S. Lourenço and the Vila Chã water tank. It features up its real operation in hydraulic terms, and energy consumption and associated costs are calculated.

After the data processing and analysis of the actual operation of the system, it is defined a methodology to simulate the optimal functioning of the system according to the downstream water tank characteristics.

Then it is applied this methodology to the simulation of eight scenarios, in which all system features remain the same and is used registered real consumption, but modifying the storage conditions in the water tank. Are compared the energy costs, the pumping periods and the volume stored in the eight scenarios.

KEYWORDS: water supply, pumping stations, water tanks, energetic efficiency, optimization.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2. OBJETIVOS	2
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	2
2. SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA	3
2.1. CICLO HIDROLÓGICO E CICLO DE UTILIZAÇÃO DA ÁGUA	3
2.2. CONSTITUINTES DE UM SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA	5
2.3. SISTEMAS ELEVATÓRIOS DE ÁGUA DE ABASTECIMENTO	7
2.3.1. CARACTERÍSTICAS GERAIS E DISPOSIÇÕES REGULAMENTARES	7
2.3.2. CAUDAL DE DIMENSIONAMENTO	8
2.3.3. PERDAS DE CARGA	8
2.3.4. ALTURA MANOMÉTRICA	10
2.3.5. POTÊNCIA E ENERGIA	11
2.3.6. CONDUTAS ELEVATÓRIAS	11
2.3.7. GRUPOS ELEVATÓRIOS	13
2.4. RESERVATÓRIOS	18
2.4.1. CARACTERÍSTICAS GERAIS	18
2.4.2. CAPACIDADE	21
2.4.3. DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO	22
3. CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA EM SISTEMAS ELEVATÓRIOS	25
3.1. CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA	25
3.2. INDICADORES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	26
3.2.1. CONSUMO ESPECÍFICO	26
3.2.2. CONSUMO ESPECÍFICO NORMALIZADO	27

3.2.3. GREEN PUMP INDEX	27
3.3. MEDIDAS PARA REDUZIR OS CUSTOS COM ENERGIA ELÉTRICA	28
3.3.1. REDUÇÃO DE CUSTOS SEM REDUÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	29
3.3.2. REDUÇÃO DE CUSTOS DIMINUINDO O CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	29
3.3.3. REDUÇÃO DE CUSTOS POR ALTERAÇÃO DO SISTEMA OPERACIONAL	30
 4. ESTUDO DE CASO	 31
4.1. INTRODUÇÃO	31
4.2. CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA DE BOMBAGEM.....	31
4.2.1. ESTAÇÃO ELEVATÓRIA DE SÃO LOURENÇO.....	31
4.2.2. RESERVATÓRIO DE VILA CHÃ	33
4.3. FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE BOMBAGEM	34
4.3.1. CAUDAIS BOMBADOS PELA ESTAÇÃO ELEVATÓRIA E CAUDAIS CEDIDOS PELO RESERVATÓRIO.....	34
4.3.2. VOLUMES BOMBADOS PELA ESTAÇÃO ELEVATÓRIA E VOLUMES CEDIDOS PELO RESERVATÓRIO	38
4.3.3. ENERGIA CONSUMIDA	40
4.3.4. VOLUME DE ÁGUA ARMAZENADA	45
4.4. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO SISTEMA DE BOMBAGEM.....	49
4.4.1. CONSUMO ESPECÍFICO	49
4.4.2. CONSUMO ESPECÍFICO NORMALIZADO	50
4.4.3. GREEN PUMP INDEX	50
 5. METODOLOGIA DO ESTUDO	 51
5.1. INTRODUÇÃO	51
5.2. PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO	51
5.3. PERÍODOS TEMPORAIS ESTUDADOS	54
5.4. CENÁRIOS SIMULADOS	55
5.4.1. CENÁRIO UM	55
5.4.2. CENÁRIO DOIS	56
5.4.3. CENÁRIO TRÊS	56
5.4.4. CENÁRIO QUATRO	56
5.4.5. CENÁRIO CINCO.....	56
5.4.6. CENÁRIO SEIS	56
5.4.7. CENÁRIO SETE	56

5.4.8. CENÁRIO OITO	56
---------------------------	----

6. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

57

6.1. INTRODUÇÃO	57
------------------------------	-----------

6.2. CENÁRIO 1	57
-----------------------------	-----------

6.2.1. SEMANA DE VERÃO	57
------------------------------	----

6.2.2. SEMANA DE INVERNO	59
--------------------------------	----

6.3. CENÁRIO 2	60
-----------------------------	-----------

6.3.1. SEMANA DE VERÃO	60
------------------------------	----

6.3.2. SEMANA DE INVERNO	62
--------------------------------	----

6.4. CENÁRIO 3	63
-----------------------------	-----------

6.4.1. SEMANA DE VERÃO	63
------------------------------	----

6.4.2. SEMANA DE INVERNO	64
--------------------------------	----

6.5. CENÁRIO 4	66
-----------------------------	-----------

6.5.1. SEMANA DE VERÃO	66
------------------------------	----

6.5.2. SEMANA DE INVERNO	67
--------------------------------	----

6.6. CENÁRIO 5	69
-----------------------------	-----------

6.6.1. SEMANA DE VERÃO	69
------------------------------	----

6.6.2. SEMANA DE INVERNO	71
--------------------------------	----

6.7. CENÁRIO 6	72
-----------------------------	-----------

6.7.1. SEMANA DE VERÃO	72
------------------------------	----

6.7.2. SEMANA DE INVERNO	74
--------------------------------	----

6.8. CENÁRIO 7	75
-----------------------------	-----------

6.8.1. SEMANA DE VERÃO	75
------------------------------	----

6.8.2. SEMANA DE INVERNO	77
--------------------------------	----

6.9. CENÁRIO 8	78
-----------------------------	-----------

6.9.1. SEMANA DE VERÃO	78
------------------------------	----

6.9.2. SEMANA DE INVERNO	80
--------------------------------	----

7. CONCLUSÃO

83

7.1. CONCLUSÕES	83
------------------------------	-----------

7.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	84
--	-----------

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87
---	----

ANEXOS	91
---------------------	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.2.1 - Ciclo hidrológico	3
Fig.2.2 – Ciclo de utilização da água	4
Fig.2.3 – Esquema de um sistema de abastecimento de água	5
Fig.2.4 – Perfil longitudinal esquemático de uma conduta elevatória.....	10
Fig.2.5 – Variação dos investimentos e despesas de energia com os diâmetros	12
Fig.2.6 – Esquema de uma bomba centrífuga	14
Fig.2.7 – Diagrama em colina – Curvas características e de isoefficiência de uma bomba	15
Fig.2.8 – Determinação do ponto de funcionamento de uma bomba.....	16
Fig.2.9 – Ponto de funcionamento de uma bomba isolada e de duas bombas iguais associadas em paralelo.....	16
Fig.2.10 – Ponto de funcionamento de uma bomba isolada e de duas bombas iguais associadas em série.....	17
Fig.2.11 – Reservatório com duas células de seção circular com elementos pré-fabricados	19
Fig.2.12 – Reservatório apoiado com duas células de seção circular e reservatório elevado	20
Fig.2.13 – Cálculo da capacidade de um reservatório.....	22
Fig.2.14 – Diagrama cronológico e curva de caudais acumulados para fator de ponta horário 3,0	23
Fig.2.15 – Capacidade de regularização dos reservatórios em função do caudal de alimentação	24
Fig.3.1 – Custos ao longo do ciclo de vida de um sistema elevatório	25
Fig.4.1 – Grupos eletrobomba de eixo horizontal da EE S. Lourenço.....	32
Fig.4.2 – Curva caraterística das bombas da EE S. Lourenço	32
Fig.4.3 – Esquema sinóptico da EE S. Lourenço.....	33
Fig.4.4 – Exterior do reservatório de Vila Chã	33
Fig.4.5 – Esquema sinótico do reservatório de Vila Chã	34
Fig.4.6 – Caudal cedido pelo reservatório de Vila Chã no dia 1 de Maio de 2014.....	35
Fig.4.7 – Caudal bombado pela EE S. Lourenço no dia 1 de Maio de 2014.....	36
Fig.4.8 – Volumes mensais bombados pela EE S. Lourenço e cedidos pelo reservatório de Vila Chã.....	39
Fig.4.9 – Variação do preço da energia eléctrica no período semanal de Verão	41
Fig.4.10 – Variação do preço da energia eléctrica ao Sábado no Inverno	42
Fig.4.11 – Comparação do consumo mensal de energia, calculado e registado, na EE S. Lourenço.....	44
Fig.4.12 – Nível de água no reservatório de Vila Chã ao longo do dia 1 de Maio de 2014	46
Fig.5.1 – Ferramenta Solver do Microsoft Excel.....	53
Fig.5.2 – Volumes de 1 de Maio até 7 de Maio.....	54

Fig.5.3 – Volumes de 6 de Novembro até 12 de Novembro	55
Fig.6.1 – Períodos de bombagem na situação real e no cenário 1 (Semana de Verão)	58
Fig.6.2 – Volume armazenado na situação real e no cenário 1 (Semana de Verão)	58
Fig.6.3 – Períodos de bombagem na situação real e no cenário 1 (Semana de Inverno)	59
Fig.6.4 – Volume armazenado na situação real e no cenário 1 (Semana de Inverno).....	60
Fig.6.5 – Períodos de bombagem no cenário 1 e no cenário 2 (Semana de Verão)	61
Fig.6.6 – Volume armazenado no cenário 1 e no cenário 2 (Semana de Verão).....	61
Fig.6.7 – Períodos de bombagem no cenário 1 e no cenário 2 (Semana de Inverno)	62
Fig.6.8 – Volume armazenado no cenário 1 no cenário 2 (Semana de Inverno)	63
Fig.6.9 – Períodos de bombagem no cenário 1 e no cenário 3 (Semana de Verão)	64
Fig.6.10 – Volume armazenado no cenário 1 e no cenário 3 (Semana de Verão).....	64
Fig.6.11 – Períodos de bombagem no cenário 1 e no cenário 3 (Semana de Inverno)	65
Fig.6.12 – Volume armazenado no cenário 1 no cenário 3 (Semana de Inverno)	66
Fig.6.13 – Períodos de bombagem no cenário 1 e no cenário 4 (Semana de Verão)	67
Fig.6.14 – Volume armazenado no cenário 1 e no cenário 4 (Semana de Verão).....	67
Fig.6.15 – Períodos de bombagem no cenário 1 e no cenário 4 (Semana de Inverno)	68
Fig.6.16 – Volume armazenado no cenário 1 no cenário 4 (Semana de Inverno)	69
Fig.6.17 – Períodos de bombagem no cenário 4 e no cenário 5 (Semana de Verão)	70
Fig.6.18 – Volume armazenado no cenário 4 e no cenário 5 (Semana de Verão).....	70
Fig.6.19 – Períodos de bombagem no cenário 4 e no cenário 5 (Semana de Inverno)	71
Fig.6.20 – Volume armazenado no cenário 4 no cenário 5 (Semana de Inverno)	72
Fig.6.21 – Períodos de bombagem no cenário 1 e no cenário 6 (Semana de Verão)	73
Fig.6.22 – Volume armazenado no cenário 1 e no cenário 6 (Semana de Verão).....	73
Fig.6.23 – Períodos de bombagem no cenário 1 e no cenário 6 (Semana de Inverno)	74
Fig.6.24 – Volume armazenado no cenário 1 no cenário 6 (Semana de Inverno)	75
Fig.6.25 – Períodos de bombagem no cenário 1 e no cenário 7 (Semana de Verão)	76
Fig.6.26 – Volume armazenado no cenário 1 e no cenário 7 (Semana de Verão).....	76
Fig.6.27 – Períodos de bombagem no cenário 1 e no cenário 7 (Semana de Inverno)	77
Fig.6.28 – Volume armazenado no cenário 1 no cenário 7 (Semana de Inverno)	78
Fig.6.29 – Períodos de bombagem no cenário 1 e no cenário 8 (Semana de Verão)	79
Fig.6.30 – Volume armazenado no cenário 1 e no cenário 8 (Semana de Verão).....	79
Fig.6.31 – Períodos de bombagem no cenário 1 e no cenário 8 (Semana de Inverno)	80
Fig.6.32 – Volume armazenado no cenário 1 no cenário 8 (Semana de Inverno)	81

Fig.A1 – Caudais cedidos ao longo do ano pelo reservatório de Vila Chã.....	92
Fig.A2 – Caudais bombados ao longo do ano pela EE S. Lourenço	93
Fig.A3 – Nível de água ao longo do ano no reservatório de Vila Chã	94

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 – Valores de referência do consumo específico normalizado em sistemas elevatórios	27
Tabela 3.2 – Escala de classificação do indicador GPX.....	28
Tabela 4.1 – Caudais instantâneos, bombados pela EE S. Lourenço e cedidos pelo reservatório de Vila Chã	35
Tabela 4.2 – Período de tempo com falha de registo de caudais instantâneos	37
Tabela 4.3 – Período de tempo com falha de registo de caudais após preenchimento	37
Tabela 4.4 – Cálculo do volume bombado e do volume cedido	39
Tabela 4.5 – Energia ativa registada pela Águas do Noroeste na EE S. Lourenço	42
Tabela 4.6 – Energia ativa e custos mensais calculados a partir dos caudais bombados.....	43
Tabela 4.7 – Diferença entre a energia ativa registada e a energia ativa calculada	45
Tabela 4.8 – Nível de água nas células do reservatório de Vila Chã	46
Tabela 4.9 – Falha no registo do nível de água nas células do reservatório de Vila Chã.....	47
Tabela 4.10 – Período de tempo com falha de registo do nível de água após preenchimento	48
Tabela 4.11 – Volume armazenado no reservatório de Vila Chã	48
Tabela 4.12 – Indicador CE.....	49
Tabela 4.13 – Indicador CEN	50
Tabela 4.14 – Indicador GPX	50
Tabela 5.1 – Algoritmo de otimização	52
Tabela 5.2 – Condições de armazenamento nos oito cenários simulados	55
Tabela 6.1 – Custos diários e total semanal para o cenário 1 e situação real (Semana de Verão).....	57
Tabela 6.2 – Custos diários e total semanal para o cenário 1 e situação real (Semana de Inverno) ...	59
Tabela 6.3 – Custos diários e total semanal para os cenários 1 e 2 (Semana de Verão)	60
Tabela 6.4 – Custos diários e total semanal para os cenários 1 e 2 (Semana de Inverno)	62
Tabela 6.5 – Custos diários e total semanal para os cenários 1, 2 e 3 (Semana de Verão)	63
Tabela 6.6 – Custos diários e total semanal para os cenários 1, 2 e 3 (Semana de Inverno)	65
Tabela 6.7 – Custos diários e total semanal para os cenários 1 e 4 (Semana de Verão)	66
Tabela 6.8 – Custos diários e total semanal para os cenários 1 e 4 (Semana de Inverno)	68
Tabela 6.9 – Custos diários e total semanal para os cenários 4 e 5 (Semana de Verão)	69
Tabela 6.10 – Custos diários e total semanal para os cenários 4 e 5 (Semana de Inverno)	71
Tabela 6.11 – Custos diários e total semanal para os cenários 1 e 6 (Semana de Verão).....	72
Tabela 6.12 – Custos diários e total semanal para os cenários 1 e 6 (Semana de Inverno)	74
Tabela 6.13 – Custos diários e total semanal para os cenários 1 e 7 (Semana de Verão).....	75

Tabela 6.14 – Custos diários e total semanal para os cenários 1 e 7 (Semana de Inverno)	77
Tabela 6.15 – Custos diários e total semanal para os cenários 1 e 8 (Semana de Verão).....	78
Tabela 6.16 – Custos diários e total semanal para os cenários 1 e 8 (Semana de Inverno)	80

SÍMBOLOS E ACRÓNIMOS

SÍMBOLOS

D – diâmetro da conduta [m]

D_E – despesas com energia [€]

E – energia [kW.h]

g – aceleração da gravidade [m/s²]

H_a – altura de aspiração [m]

H_g – desnível geométrico [m]

H_m – altura manométrica [m]

i – interesse

I₀ – investimentos iniciais [€]

j – coeficiente de perda de carga unitária [m/m]

k – rugosidade equivalente do material da conduta [mm]

K_L – coeficiente de perda de carga localizada

L – comprimento da conduta [m]

n – anos

NPSH_r – NPSH requerido [m]

P – potência [kW]

p_E – preço da energia [€/kW.h]

P_m – pressão a montante [Pa]

P_s – pressão na seção de entrada da bomba [Pa]

P_v – tensão de saturação do vapor de água [Pa]

Q – caudal [m³/s]

Q_{mda} – caudal médio diário anual [m³/s]

Re – número de Reynolds

t_b – tempo de bombagem [h]

U – velocidade do escoamento [m/s]

V – volume [m³]

V_a – valor actual [€]

V_f – valor futuro [€]

V_i – volume inicial [m³]

V_f – volume final [m^3]

γ – peso volúmico da água [N/m^3]

ΔH_a – perda de carga na conduta de aspiração [m]

ΔH_c – perda de carga na conduta de compressão [m]

ΔH_L – perda de carga localizada [m]

ΔH_p – perda de carga permanente [m]

η – rendimento do motor

λ – coeficiente de resistência

ν – coeficiente de viscosidade cinemático [m^2/s^2]

ACRÓNIMOS

CE – Consumo Específico

CEN – Consumo Específico Normalizado

EE – Estação Elevatória

ERSAR – Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos

ETA – Estação de Tratamento de Águas

ETAR – Estação de Tratamento de Águas Residuais

GPX – *Green Pump Index*

IWA – International Water Association

NPSH – *Net Positive Suction Head*

RASARP – Relatório Anual dos Serviços de Águas e Resíduos em Portugal

1

INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os sistemas de abastecimento de água são infraestruturas essenciais na sociedade atual, desempenhando um papel fundamental no desenvolvimento social, económico e ambiental.

Nestes sistemas as estações elevatórias têm um papel fundamental, proporcionando a elevação da água sempre que a adução por gravidade não o possibilite ou não garanta as condições desejadas. Os grupos elevatórios, habitualmente munidos de motor elétrico, são grandes consumidores de energia, e portanto, uma grande parcela dos custos de exploração de sistemas de abastecimento de água está associada ao funcionamento destes órgãos.

Sendo assim, a procura de soluções para a redução dos custos com a energia elétrica em estações elevatórias é uma prioridade. A redução destes custos pode abranger soluções variadas, desde as mais complexas e com necessidade de grandes investimentos até às mais simples e sem necessidade de investimentos.

Entre as soluções mais simples de implementar e que não implicam investimentos em equipamento, está a alteração da operação dos grupos elevatórios. Os períodos de funcionamento das bombas devem ser definidos em função da variação do preço da energia elétrica praticado ao longo do dia e a capacidade de armazenamento dos reservatórios do sistema, de modo a reduzir os custos associados ao processo de bombagem.

Conhecidas as características físicas e hidráulicas de cada sistema, é necessária a aquisição de dados relativos ao consumo de água a jusante, os quais podem ser obtidos recorrendo a dispositivos de telemetria. Com estes dados e conhecendo a variação da tarifa elétrica ao longo do dia, é possível, com o recurso a ferramentas computacionais, construir modelos de otimização que permitam determinar o uso mais eficiente e a política de exploração mais económica dos sistemas elevatórios.

A implementação das soluções de otimização tem carácter corretivo, mas os modelos de otimização podem ser aplicados, com carácter preventivo, no estudo de instalações novas.

Estes modelos podem auxiliar os gestores e operadores das entidades responsáveis pelo abastecimento de água nas tomadas de decisão acerca do funcionamento dos sistemas.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é analisar a influência do reservatório de jusante na exploração otimizada de sistemas elevatórios.

Pretende-se simular o funcionamento de um sistema elevatório para diferentes capacidades e condições de armazenamento do reservatório de jusante, procurando sempre a melhor eficiência energética e o menor custo de exploração possível.

Com este objetivo analisa-se um sistema real, a estação elevatória de São Lourenço e o reservatório de Vila Chã. A entidade gestora deste sistema, a Águas do Noroeste S.A., forneceu os dados relativos à exploração do mesmo.

Especificamente, os passos seguidos rumo ao objectivo principal foram os seguintes:

- Tratamento de dados e análise do funcionamento do sistema real em estudo, em termos de caudais bombados, caudais cedidos, volumes bombados, volumes cedidos, consumo de energia ativa, volume armazenado e eficiência energética;
- Definição de uma metodologia que, minimizando os custos energéticos, permita simular diferentes características do reservatório de jusante;
- Aplicação da metodologia definida para a simulação de diversos cenários, nos quais se modificam as características do reservatório de jusante;
- Comparação dos resultados obtidos nos cenários simulados e na situação real.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho inicia-se com um capítulo introdutório, onde se definem os pressupostos iniciais deste, o âmbito da análise e os objetivos a alcançar. Para além deste capítulo a dissertação está organizada noutros 6 capítulos.

No capítulo 2 começa-se por abordar brevemente o ciclo hidrológico, o ciclo de utilização da água e os constituintes principais de um sistema de abastecimento de água. Seguidamente caracterizam-se mais detalhadamente as estações elevatórias e os reservatórios, expondo os aspetos mais importantes na sua conceção, nomeadamente, dimensionamento hidráulico e disposições construtivas e regulamentares.

No capítulo 3 referem-se aspetos relativos ao consumo de energia elétrica em sistemas elevatórios e descrevem-se medidas para reduzir os custos associados a esse consumo. Apresentam-se ainda três indicadores de eficiência energética utilizados para classificar o desempenho energético de sistemas elevatórios.

No capítulo 4 caracteriza-se o sistema em estudo. Apresentam-se os dados fornecidos pela Águas do Noroeste, S.A., e descreve-se o tratamento desses dados. Com base nesses dados faz-se uma análise do funcionamento do sistema de bombagem. Para finalizar este capítulo classifica-se energeticamente o sistema recorrendo aos indicadores referidos no capítulo 3.

No capítulo 5 descreve-se a metodologia adotada para proceder ao estudo do funcionamento otimizado do sistema em função das características do reservatório de jusante, bem como os períodos analisados e os cenários simulados.

No capítulo 6 apresentam-se, discutem-se e comparam-se os resultados obtidos nas simulações efetuadas, focando aspetos relativos aos períodos de bombagem, ao volume armazenado no reservatório e aos custos com a energia elétrica.

O capítulo 7 constitui a fase final do trabalho e corresponde à enumeração das principais conclusões desta Dissertação, apontando-se ainda aspetos e temas que merecem análise e desenvolvimento em trabalhos futuros.

2

SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

2.1. CICLO HIDROLÓGICO E CICLO DE UTILIZAÇÃO DA ÁGUA

O ciclo da água, ou ciclo hidrológico, é o conjunto de fenómenos naturais que fazem com que a água circule continuamente no planeta, passando pelos seus vários estados (sólido, líquido e gasoso). A radiação solar e a gravidade são os impulsionadores deste movimento de água.

A radiação solar provoca a evaporação da água à superfície do planeta, em oceanos, rios, lagos, passando para a atmosfera sob a forma de vapor de água. Uma parte deste vapor de água resulta também da evapotranspiração, que é a água que se evapora directamente dos solos, mais a resultante da respiração e transpiração das plantas.

Quando as temperaturas atmosféricas descem, o vapor de água condensa-se sob a forma de nuvens. Quando certas condições, de pressão e temperatura, se reúnem ocorre precipitação que pode acontecer sob a forma de chuva, neve, granizo ou orvalho.

A água que regressa à superfície terrestre pode ter vários destinos. Parte dela é devolvida directamente à atmosfera por evaporação, enquanto a restante se infiltra no solo, constituindo o escoamento subterrâneo, ou escorre superficialmente em rios, lagos e oceanos. O escoamento subterrâneo também alimenta as linhas de água superficiais. Recomeça, assim, o ciclo hidrológico. Na figura 2.1 esquematiza-se este processo.



Fig.2.1 – Ciclo hidrológico [1]

No entanto, o Homem interrompe o curso natural da água, fazendo com que esta entre num subciclo, o ciclo de utilização da água. Este ciclo corresponde a todas as fases de utilização da água, desde o momento no qual é captada até ao momento em que é restituída à natureza, e portanto, ao seu curso natural.

Este ciclo inicia-se com a captação, que pode ser feita superficialmente, em albufeiras ou subterraneamente, nos lençóis freáticos. As águas pluviais também podem ser captadas e são uma solução viável para uso em sistemas de abastecimento de água em pequena escala. A captação pode ter vários objetivos, mas os principais são a produção de energia elétrica e o consumo humano (indústria, rega, uso doméstico, etc.).

No caso da produção de energia elétrica, em aproveitamentos hidroelétricos, a água é restituída à natureza imediatamente após a passagem nas turbinas. Por outro lado, a água destinada a actividades humanas é transportada para Estações de Tratamento de Água (ETA), onde é feito o seu tratamento conforme o uso a que se destina, e passa depois por uma série de processos e usos até ser devolvida ao seu curso natural.

Seguidamente, a água é armazenada em reservatórios e distribuída pelas redes, sob pressão, até aos pontos de consumo. Os reservatórios permitem regularizar o transporte, isto é, regularizam os caudais afluentes e os caudais cedidos para consumo permitindo o armazenamento quando as afluências são superiores, para fazer face à situação oposta quando os consumos são superiores.

A adução de água, isto é, o seu transporte em condutas, da origem até às ETA ou das ETA até aos reservatórios do sistema é, preferencialmente, feito graviticamente, mas a topografia do terreno pode obrigar à utilização de estações elevatórias, que fornecem a energia adicional necessária para o escoamento seguir o seu rumo nas condutas.

Após a utilização da água nos diversos pontos de consumo, esta é drenada por uma rede de colectores até às Estações de Tratamento de Águas Residuais (ETAR). O escoamento nos coletores de drenagem não é feito sob pressão, exceto em troços em que seja necessário o uso de estações elevatórias de águas residuais. Nas ETAR os efluentes, são tratados de modo a que a sua qualidade seja compatível com a capacidade de biodegradação do meio recetor.

Concluído o processo de tratamento, a água é restituída à natureza, e assim, termina o ciclo de utilização da água. Na figura 2.2 apresenta-se uma representação esquemática deste subciclo.



Fig.2.2 – Ciclo de utilização da água [1]

2.2. CONSTITUINTES DE UM SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Como foi referido em 2.1, parte do ciclo de utilização da água é composto pela captação, adução, tratamento, armazenamento e distribuição. Estas são as partes constituintes de um sistema de abastecimento de água.

Sendo assim, estes sistemas são constituídos por um vasto conjunto de infraestruturas. A cada uma das partes acima referidas correspondem-lhe órgãos, constituídos por obras de construção civil, equipamentos eléctricos e electromecânicos, acessórios e equipamentos de automação e controle.

Pode-se distinguir as partes dos sistemas de abastecimento de água como sendo em “alta” ou em “baixa”. O sistema de abastecimento de água é um sistema em “alta” se é constituído por um conjunto de componentes a montante da rede de distribuição, fazendo a ligação da origem de água ao sistema em “baixa”. Portanto, os sistemas em “alta”, são as componentes responsáveis pela captação, tratamento e adução. Por outro lado, o sistema de abastecimento de água é em “baixa” se for constituído por um conjunto de componentes que ligam o sistema em “alta” ao utilizador final. Sendo assim, os sistemas em “baixa” integram os componentes relacionados com a distribuição de água à população e os respectivos ramais de ligação. Os reservatórios do sistema podem fazer parte do sistema em “alta” ou do sistema em “baixa”. Habitualmente, os reservatórios de distribuição, imediatamente a montante das redes de distribuição integram a componente em “baixa”, sendo que os restantes, mais a montante do sistema, integram a componente em “alta”. Na figura 2.3 apresenta-se um esquema de um sistema de abastecimento de água.

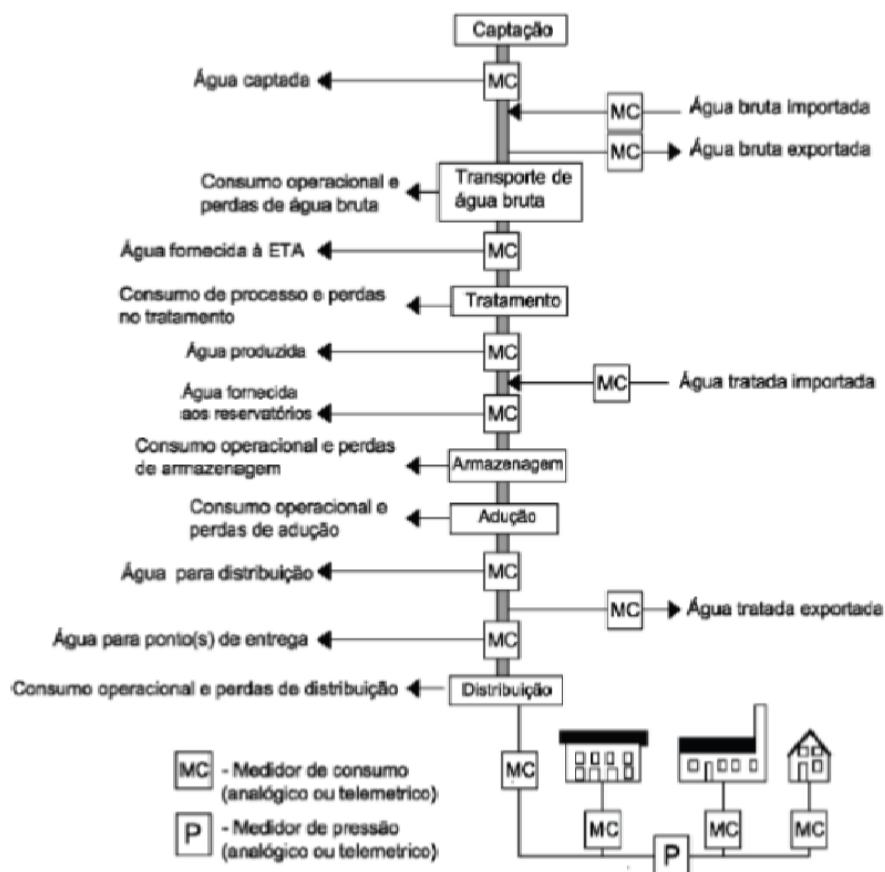


Fig.2.3 – Esquema de um sistema de abastecimento de água [2]

A captação de água é o primeiro componente de um sistema de abastecimento de água, na qual se recolhe a água da natureza, sendo, portanto, fundamental. O tipo de captação a adotar depende dos volumes e caudais necessários e da situação em que a água se encontra no ciclo hidrológico. Usualmente, as captações são efectuadas em lençóis freáticos, em poços artesianos, em rios, lagos e albufeiras, excetuando situações especiais em que não é possível recorrer a estas origens e se recolhe a água das chuvas ou a água do mar [3].

A adução é o conjunto de obras destinadas a conduzir a água desde a origem até à distribuição e, portanto, representa a componente dos sistemas de abastecimento de água mais extensa e mais distribuída espacialmente. Consequentemente, é a componente mais difícil de projectar, construir e reparar, sendo também a que representa maior importância em termos de investimento e funcionamento. As adutoras podem ser canais ou galerias, que funcionam em regime de superfície livre, ou condutas em pressão, nas quais o escoamento pode ser gravítico ou por bombagem [4].

Qualquer que seja a origem da água, superficial ou subterrânea, esta carece de tratamento prévio ao seu consumo de modo a assegurar que não represente qualquer perigo para a saúde humana. Os processos de tratamento variam consoante a origem e a qualidade da água na origem. Frequentemente, as águas subterrâneas, em comparação com as águas superficiais, apresentam uma melhor qualidade, uma maior constância de propriedades físico-químicas e menor contaminação, devido à filtração que ocorre no solo. Portanto, as águas superficiais são sujeitas a um processo de tratamento mais elaborado que as águas subterrâneas. As operações de tratamento realizadas nas ETA podem classificar-se em três tipos: Tratamento físico (arejamento, sedimentação, filtração, etc.), tratamento químico (oxidação, correção de pH, desinfecção, etc.) e tratamento bacteriológico (filtração em meio biológico, nitrificação, etc.) [5].

Ao longo do seu percurso no sistema de abastecimento de água, desde a origem até ao ponto de consumo, a água é armazenada em reservatórios. Os reservatórios podem ter várias funções. Maioritariamente, os reservatórios têm como função a regularização. Quando intercalados no sistema de adução, estes servem de volante de regularização entre os diferentes regimes em que se processa a adução, por exemplo, entre um troço de adução gravítica e um por bombagem ou entre uma estação de tratamento e um troço adutor adjacente. Quando situados imediatamente a montante das redes de distribuição, servem de volante de regularização, permitindo compensar as flutuações dos consumos face ao regime de adução estabelecido. Outra função, muito importante, dos reservatórios é servir de reserva de emergência para combate a incêndios ou para assegurar a distribuição em caso de interrupção da adução de água a montante. Reservatórios podem ser construídos também com o intuito de equilibrar as pressões numa rede de distribuição [6].

As redes de distribuição são a componente mais a jusante de um sistema de abastecimento de água. Estas têm como objectivo distribuir a água para abastecimentos doméstico, comercial, industrial, fontanários públicos, para combate a incêndios (hidrantes) e para limpeza de arruamentos. Estas redes podem ser de dois tipos: rede ramificada e rede emalhada. Habitualmente, uma rede de distribuição terá segmentos destes dois tipos. A situação mais comum, é existir uma rede principal, de configuração emalhada, e uma rede secundária, de configuração ramificada, ligada à rede principal e que faz a ligação direta aos pontos de consumo.

Nos subcapítulos seguintes, será feita uma exposição mais detalhada dos aspetos hidráulicos e funcionais de sistemas elevatórios e reservatórios, uma vez que são os componentes que são objeto de estudo ao longo desta dissertação.

2.3. SISTEMAS ELEVATÓRIOS DE ÁGUA DE ABASTECIMENTO

2.3.1. CARACTERÍSTICAS GERAIS E DISPOSIÇÕES REGULAMENTARES

Sempre que a energia disponível no escoamento não é suficiente para conduzir o mesmo até seções de nível energético superior é necessário recorrer a sistemas elevatórios.

Os sistemas elevatórios são sistemas hidráulicos em pressão, nos quais a linha de energia é elevada por meio de bombas hidráulicas. As bombas hidráulicas recebem energia do exterior e transformam-na em energia mecânica, aumentando assim a carga hidráulica do sistema. Este aumento de carga hidráulica permite ao escoamento vencer um desnível topográfico desfavorável, bem como compensar as perdas de carga hidráulica intrínsecas ao sistema e garantir uma pressão mínima no fluido compatível com as aplicações previstas.

As estações elevatórias podem ter funções de captação, superficial ou subterrânea, mas, devido ao contexto deste trabalho, apenas se fará referência aos aspetos relativos a estações elevatórias em adução e com reservatório de regularização.

Nos sistemas elevatórios em adução, associados a reservatórios de regularização, há que considerar, em geral, os seguintes **componentes**:

- Estações de bombagem ou elevatórias – estruturas de elevação;
- Conduitas – estruturas de transporte (conduitas elevatórias e de aspiração);
- Órgãos acessórios de manobra e segurança;
- Sistemas de controlo, comando e proteção.

Seguidamente serão referidos alguns aspetos gerais a ter em conta na conceção de sistemas elevatórios, preconizados no Decreto Regulamentar nº 23/95 - Regulamento Geral dos Sistemas Públicos e Prediais de Distribuição de Água e de Drenagem de Águas Residuais, que daqui em diante se referirá por “Regulamento” [7].

No artigo 74º do referido Regulamento focam-se os elementos básicos a ter em conta na **localização** das estações elevatórias:

- “A integração com o restante sistema por forma a minimizar os custos globais;
- Os condicionamentos urbanísticos, topográficos, geológicos e hidrológicos, nomeadamente a verificação dos níveis máximos de cheia;
- Os condicionamentos hidrogeológicos, designadamente a existência de níveis freáticos elevados que possam originar um efeito de impulsão significativo;
- A distância da fonte de alimentação de energia elétrica;
- A minimização de problemas do funcionamento hidráulico da exploração através de um traçado adequado da conduta elevatória em planta e perfil longitudinal;
- A localização da descarga de emergência, quando a mesma se torne necessária;
- Os efeitos da propagação de ruídos e vibrações.”

Quanto aos **grupos elevatórios** propriamente ditos, o Regulamento refere o seguinte no artigo 78º:

- “O equipamento de bombagem é constituído por grupos electrobomba, submersíveis ou não, de eixo horizontal ou vertical;
- Na definição e caracterização dos grupos electrobomba deve ter-se em consideração:
 - O número máximo de arranques por hora admissível para o equipamento a instalar;
 - A velocidade máxima de rotação compatível com a natureza do material;

- A instalação, no mínimo, de um dispositivo de elevação de reserva, com potência igual a cada um dos restantes instalados e destinado a funcionar como reserva ativa mútua e, excecionalmente, em conjunto para reforço da capacidade elevatória.”

Quanto às **condutas elevatórias**, que são mencionadas no artigo 79º, diz-se o seguinte:

- “O diâmetro das condutas elevatórias é definido em função de um estudo técnico-económico que abranja todo o período de exploração;
- O perfil longitudinal é preferencialmente ascendente, não devendo a linha piezométrica intersear a conduta, mesmo em situações de caudal nulo;
- Devem ser definidas as envolventes de cotas piezométricas mínimas e máximas provenientes da ocorrência de regimes transitórios e verificada a necessidade ou não de órgãos de proteção;
- Para a libertação de ar das condutas pode recorrer-se a ventosas de funcionamento automático ou a tubos de ventilação;
- Em todos os pontos baixos da conduta e sempre que se justificar em pontos intermédios, devem ser instaladas descargas de fundo por forma a permitir um esvaziamento num período de tempo aceitável;
- Devem ser previstos maciços de amarração.”

2.3.2. CAUDAL DE DIMENSIONAMENTO

O caudal de cálculo para o dimensionamento de adutoras, neste caso elevatórias, depende dos consumos da rede de distribuição a jusante. Consequentemente, a escolha deste caudal depende, não só das características da adução mas também da capacidade dos reservatórios de regularização que lhe estão associados. No caso de condutas elevatórias, uma maior capacidade de regularização dos reservatórios permite uma maior flexibilização dos períodos de bombagem e respetivos caudais de bombagem. Assim, há uma grande variedade de soluções que satisfazem as necessidades do binómio adução-regularização e, portanto, o valor do caudal de dimensionamento será, assim, aquele que minimize os encargos globais para este conjunto [8].

Sendo a variedade de opções tão vasta, tem-se que o limite máximo é o caudal diário máximo, ao qual corresponderia a situação de reservatório vazio, e o limite mínimo é o caudal diário médio anual, ao qual corresponderia uma capacidade dos reservatórios suficiente para a regularização de caudais. O volume diário a transportar, juntamente com a capacidade de reserva, deve permitir fazer face ao maior consumo no fim do período de utilização da obra [8].

O caudal de dimensionamento deve ser ponderado com um coeficiente de perdas na adução, para acautelar tal situação e servir de margem de segurança, bem como de um fator de duração de transporte. Nas adutoras por bombagem, este último, tem valor 1 para um funcionamento em 24h, 1.5 para um funcionamento em 16h e 3 para um funcionamento em 8h. Quanto ao coeficiente de perdas na adução, é usual considerar um acréscimo de caudal entre 3% a 5% para grandes caudais e um acréscimo de 10%, ou um mínimo de 0.2 l/s, para caudais pequenos [9].

2.3.3. PERDAS DE CARGA

2.3.3.1. Perda de carga contínua

Ao longo do seu percurso nas condutas, o escoamento tem de vencer a resistência derivada de factores como a viscosidade do líquido, a rugosidade das paredes das tubagens e a própria gravidade, o que

provoca uma perda de carga ou energia. A perda de carga contínua, ou permanente, ΔH_p , ao longo de um comprimento, L , é quantificada através da expressão (2.1.):

$$\Delta H_p = j \times L \quad (2.1.)$$

O coeficiente de perda de carga unitária, j , é função da aceleração da gravidade, g , do diâmetro da conduta, D , da velocidade do escoamento, U , e de um parâmetro adimensional, λ , segundo a relação (2.2.):

$$j = \frac{\lambda}{D} \times \frac{U^2}{2g} \quad (2.2.)$$

O parâmetro adimensional, λ , designa-se por coeficiente de resistência, e a expressão mais utilizada para o seu cálculo é a equação de *Colebrook-White* (2.3.), que é implícita e exige o recurso a métodos iterativos para a sua resolução:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log \left[\frac{k}{3,7 \cdot D} + \frac{2,51}{\text{Re} \cdot \sqrt{\lambda}} \right] \quad (2.3.)$$

Esta equação é função da rugosidade equivalente do material da conduta, k , do seu diâmetro, D , e do número de Reynolds, Re , que traduz a natureza do escoamento (laminar, turbulento liso, turbulento rugoso ou de transição) e é calculado pela expressão (2.4.), em função da velocidade do escoamento, U , do diâmetro da conduta, D , e do coeficiente de viscosidade cinemática do líquido, ν :

$$\text{Re} = \frac{U \cdot D}{\nu} \quad (2.4.)$$

2.3.3.2. Perdas de carga localizadas

Sempre que o escoamento encontra alguma singularidade, como válvulas, curvas, derivações ou mudanças de seção, perde energia adicional para além da perda de carga contínua. Estas perdas de carga, provocadas por alterações súbitas das condições de escoamento, são designadas perdas de carga localizadas, ΔH_L , e podem ser calculadas em função da velocidade do escoamento, U , e da aceleração da gravidade, g , através da equação (2.5.):

$$\Delta H_L = K_L \cdot \frac{U^2}{2g} \quad (2.5.)$$

O coeficiente de perdas de carga localizadas, K_L , é atribuído conforme o tipo de singularidade em questão. Habitualmente, K_L é um valor global, sendo o somatório de vários coeficientes associados às múltiplas singularidades na mesma conduta.

Em alternativa, pode-se expressar as perdas de carga localizadas através de um comprimento equivalente de tubagem. Este acréscimo de comprimento, Δl , adiciona-se ao comprimento real, e calcula-se de tal forma que a respectiva perda de carga contínua seja igual à perda de carga localizada que lhe está associada [4].

Geralmente, as perdas de carga localizadas são muito menores que a perda de carga contínua, sendo essa diferença maior quanto maior for a extensão da conduta.

2.3.4. ALTURA MANOMÉTRICA

A altura manométrica é a diferença entre as cargas hidráulicas do escoamento à saída e à entrada de uma bomba hidráulica ou de uma estação elevatória, isto é, é a energia que a bomba introduz no escoamento, que permite que este vença o desnível geométrico e as perdas de carga na conduta.

A figura 2.4 representa um perfil longitudinal esquemático de uma conduta elevatória. Nesta pode-se observar que a altura manométrica, H_m , é igual ao somatório do desnível geométrico, H_g , com as perdas de carga nas condutas de aspiração e compressão, respetivamente ΔH_a e ΔH_c . A linha entre os pontos 1 e 4 é a linha piezométrica, e o respetivo troço 23 corresponde à altura manométrica:

$$H_m = H_g + \Delta H_a + \Delta H_c \quad (2.6.)$$

No esquema apresentado a bomba encontra-se abaixo do nível de água a montante, H_a , isto é, a bomba está afogada, e as pressões na conduta de aspiração são, neste caso, sempre positivas. Em determinados esquemas de instalação pode ocorrer a situação de a bomba estar situada acima do nível de água a montante e, portanto, ocorrem pressões negativas na conduta de aspiração. O valor dessas pressões deve ser limitado para não ocorrer cavitação.

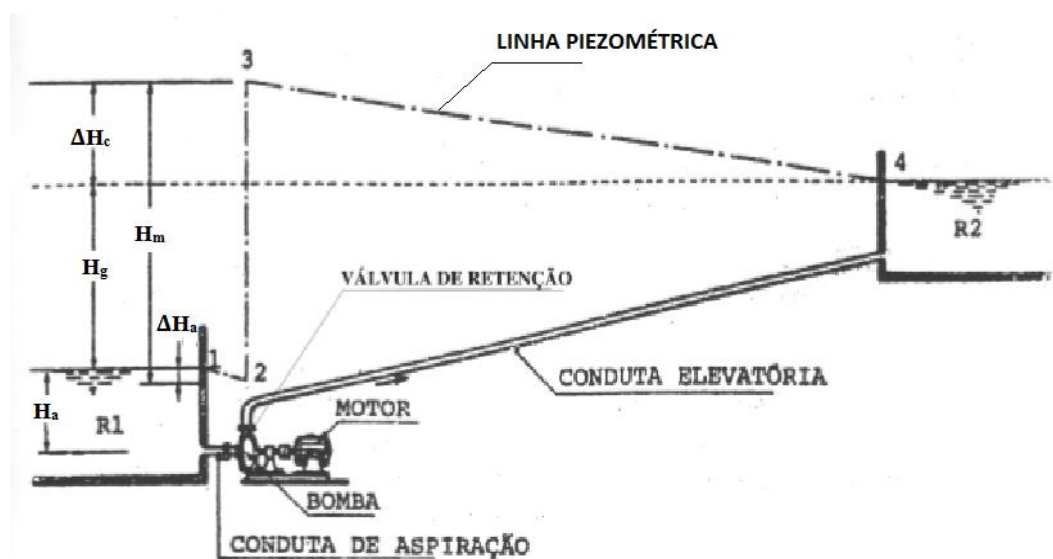


Fig.2.4 – Perfil longitudinal esquemático de uma conduta elevatória [10]

2.3.5. POTÊNCIA E ENERGIA

A potência, P , despendida pelo motor da bomba é quantificada dividindo a potência útil do mesmo pelo seu rendimento. A potência depende então do caudal bombado, Q , da altura manométrica, H_m , do peso volúmico da água, γ , e do rendimento do motor, η :

$$P = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_m}{\eta} \quad (2.7.)$$

A energia consumida pelo motor da bomba, E , expressa em quilowatt-hora, na elevação da água pode então ser calculada multiplicando a potência despendida pelo motor, P , pelo tempo de bombagem, t_b :

$$E = P \cdot t_b \quad (2.8.)$$

2.3.6. CONDUTAS ELEVATÓRIAS

2.3.6.1. Traçado em planta e em perfil longitudinal

O traçado das condutas elevatórias, tanto em planta como em perfil, depende essencialmente das condições topográficas locais.

O traçado em planta deve ser o mais curto possível, minimizando assim os custos de primeiro investimento mas também os encargos de exploração, já que traçados mais longos envolvem maiores perdas de carga e portanto maior consumo energético. No caso de serem necessárias curvas no traçado em planta devem-se evitar raios de curvatura pequenos, já que, isso implica a construção de maciços de amarração de maiores dimensões, aumentando assim os custos iniciais [9].

O traçado em perfil longitudinal deve ser o mais regular possível, o que levará por vezes a troços de maior profundidade. Por outro lado devem evitar-se pressões muito elevadas, de modo a evitar a utilização de materiais mais resistentes, que, obviamente, elevam os custos iniciais. De modo a evitar problemas de arrastamento de ar, não se devem implantar troços de conduta horizontais. Em zonas em que o terreno seja horizontal numa grande extensão, a conduta deve ser instalada em “zig-zag”, permitindo deste modo que o ar se acumule nos pontos altos. Segundo a NP-387, as inclinações mínimas recomendadas são de 0,3% para troços ascendentes e 0,5% para troços descendentes. O traçado deve ser efectuado, tal que, nunca seja intersetado pela linha piezométrica, sendo recomendável que esta linha nunca tenha um valor inferior a 0,5 bar. Para troços com inclinações superiores a 20% é recomendável a construção de maciços de amarração para a tubagem [9].

Atendendo às condições acima referidas, os traçados em planta e em perfil longitudinal, devem ser alvo de um estudo económico procurando entre as soluções possíveis, que cumpram os requisitos referidos, a mais vantajosa.

2.3.6.2. Material

As características físicas do material das condutas elevatórias, é também muito importante no seu dimensionamento hidráulico, já que, diferentes materiais apresentarão diferentes resistências a

agressões físicas e químicas, bem como diferentes resistências mecânicas, o que definirá as pressões máximas a que as condutas podem estar sujeitas.

Regra geral, as tubagens e respectivos acessórios são metálicos, mas materiais como o polietileno de alta densidade começam a ter alguma aplicação. O aço galvanizado é o material mais usado em estações elevatórias de pequenos caudais e as pressões de serviço têm um máximo de 1.6 MPa. Caso se pretenda que as condutas elevatórias tenham um período de vida útil longo, o ferro fundido é o material mais indicado, já que, apresenta grande resistência à corrosão. As pressões de serviço usuais para este material variam entre 1 MPa e 2.5 MPa. Como foi referido, o polietileno começa a ter alguma aplicação, principalmente quando se pretende uma tubagem com alguma flexibilidade. A tubagem deste material pode ser fabricada com uma pressão de serviço até 1.6 Mpa [10].

2.3.6.3. Dimensionamento hidráulico

O dimensionamento hidráulico de condutas elevatórias consiste na procura do diâmetro mais económico, que será aquele que minimiza o somatório do investimento inicial com os custos de exploração, nomeadamente, os custos de energia resultantes do funcionamento dos grupos elevatórios. Os diâmetros possíveis para esta análise económica são aqueles que enquadram as velocidades e pressões do escoamento dentro de determinados limites.

Em relação aos limites de velocidade, tem-se o limite mínimo de 0,3 m/s, para evitar deposição de materiais arrastados pelo escoamento, e um limite máximo de 1,5 m/s [8].

Quanto às pressões, importa referir em primeiro lugar que no dimensionamento hidráulico de condutas adutoras se considera, frequentemente, a linha de energia coincidente com a linha piezométrica, desprezando assim a parcela da altura cinética, visto que o seu valor é muito reduzido em relação à parcela da pressão. Quanto aos valores de pressões, não é admissível que a piezométrica esteja acima da conduta e valores mínimos de 10 m.c.a. devem ser cumpridos [8].

Como foi referido anteriormente, na escolha do diâmetro mais económico para uma conduta elevatória há que considerar os investimentos iniciais bem como os encargos de exploração, nomeadamente os custos com a energia. A solução ótima é então aquela que minimiza os custos globais. Na figura 2.5 representa-se a variação dos investimentos iniciais e dos custos com energia com os diâmetros.

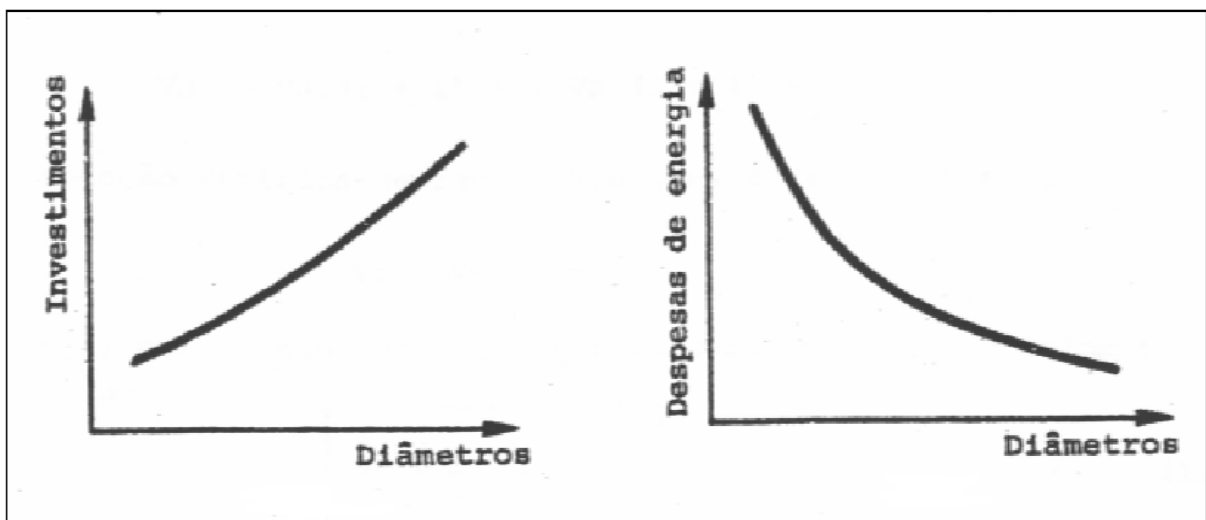


Fig.2.5 – Variação dos investimentos e despesas de energia com os diâmetros [8]

Tem-se então que proceder a uma análise económica das várias alternativas de diâmetro, e para tal, há que considerar o conceito de interesse ou taxa de juro sobre o capital original no período considerado. Este conceito reflete o fato de que o capital se torna mais valioso com o passar do tempo e, portanto, a comparação de custos e investimentos tem que ser feita relativamente ao mesmo instante [8].

Sendo V_a , o valor atual, V_f , o valor futuro e i , o interesse, ao fim de n anos tem-se:

$$V_a = \frac{V_f}{(1+i)^n} \quad (2.9.)$$

Se no fim de cada ano, durante n anos, se verificar um gasto ou recebimento de uma quantia constante, X , V_a será igual a:

$$V_a = X \cdot \sum_{m=1}^n \frac{1}{(1+i)^m} \quad (2.10.)$$

Para as diferentes hipóteses dos diâmetros a analisar é necessário comparar os investimentos e despesas de exploração, sendo essa análise efectuada para um período de n anos, equivalente ao horizonte de projecto.

No ano 0 apenas se considerará os investimentos iniciais, I_0 , relativos à aquisição e instalação do equipamento. Do ano 1 ao ano n , tem que se considerar as despesas com energia, D_E as quais podem ser obtidas multiplicando o valor obtido da expressão (2.8.) pelo preço horário da energia, p_E :

$$D_E = E \times p_E \quad (2.11.)$$

Como as despesas são variáveis de ano para ano tem que se utilizar expressões do tipo de (2.10.) para obter o valor actualizado das despesas ao ano 0. Portanto, o diâmetro a adotar para a conduta é aquele que conduz ao menor valor de V_a , calculado através da expressão (2.12.) [8]:

$$V_a = I_0 + D_E \cdot \sum_{m=1}^n \frac{1}{(1+i)^m} \quad (2.12.)$$

2.3.7. GRUPOS ELEVATÓRIOS

2.3.7.1. Tipos de grupos elevatórios

Os grupos elevatórios são constituídos pela bomba e pelo motor. Os motores utilizados são maioritariamente eléctricos e são os elementos que fornecem energia às bombas. Em sistemas de abastecimento de água, particularmente em sistemas elevatórios, são utilizadas, quase exclusivamente, as bombas centrífugas.

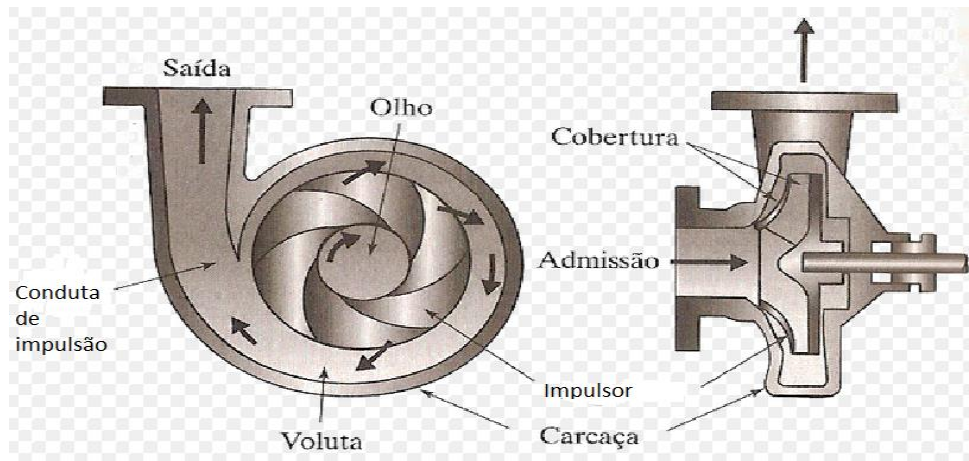


Fig.2.6 – Esquema de uma bomba centrífuga [11]

As bombas são accionadas mecanicamente por um eixo rotativo, que por sua vez promove a rotação do impulsor fazendo com que a água, que entra axialmente na admissão, passe para o olho da bomba e saia com grande velocidade pela conduta de impulsão.

A escolha do tipo de grupo electrobomba a utilizar nos sistemas elevatórios depende de diversos factores. Fundamentalmente, esta escolha depende das características do espaço disponível, da necessidade de manter a bomba sempre cheia de água, a facilidade de comando automático e do custo e facilidade de conservação. Os tipos de grupos electrobomba, utilizados em sistemas de abastecimento de água, são os seguintes [10]:

- Grupo electrobomba de eixo horizontal, constituído por bomba e motor, assentes em estrado comum, com veios unidos por união elástica e funcionando na horizontal;
- Grupo electrobomba monobloco de eixo horizontal, em que o motor e a bomba são ligados directamente;
- Grupo electrobomba de eixo vertical com bomba submersível. Neste caso o motor fica acima do nível da água e a bomba submersa e suspensa por meio de um tubo, no interior do qual passa o veio e a água;
- Grupos electrobomba submersível, em que a bomba e motor, ligados directamente, funcionam submersos.

Os grupos de eixo horizontal são, geralmente, utilizados em bombeamentos a partir de reservatórios e condutas, tal como os de eixo vertical, sendo que os últimos se utilizam quando o espaço disponível é reduzido. Os grupos submersíveis são utilizados para bombeamentos a partir de furos e poços [10]:

2.3.7.2. Curvas características de bombas hidráulicas

As características de funcionamento das bombas hidráulicas podem ser expressas de forma gráfica, as designadas curvas características. As curvas características de uma determinada bomba representam a altura manométrica em função do caudal bombado para o intervalo de valores em que a bomba pode operar. Por vezes, representam-se, no eixo das ordenadas, as potências em vez de alturas manométricas.

Na figura 2.7 está representado um exemplo de um diagrama em colina de uma bomba hidráulica, num sistema de eixos cartesianos, no qual se incluem dois tipos de curva: a altura manométrica em função do caudal para cada diâmetro do impulsor; curvas de isoefficiência ou igual rendimento.

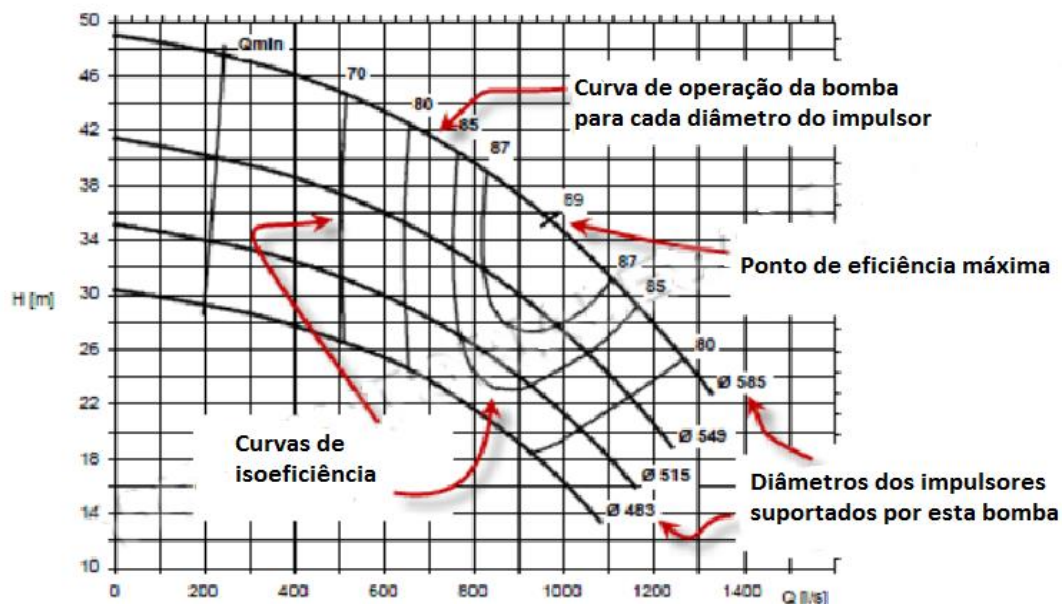


Fig.2.7 – Diagrama em colina - Curvas características e de isoefficiência de uma bomba [12]

Como se pode verificar na figura 2.7, para cada bomba, com uma determinada velocidade de rotação, existe uma curva característica para cada diâmetro do impulsor suportado pela bomba. Verifica-se que para um dado caudal, o aumento do diâmetro do impulsor implica uma maior altura de elevação.

Analisando a mesma figura, verifica-se que ao longo de cada curva característica distinguem-se valores diferentes de rendimento da bomba. No processo de seleção das bombas para um sistema elevatório, deve procurar-se uma bomba de modo a que o ponto de funcionamento se situe na zona de maiores rendimentos dos diagramas em colina, como o apresentado na figura 2.7.

2.3.7.3. Ponto de funcionamento

O ponto de funcionamento de uma bomba é o ponto representativo das características de operação de uma bomba quando integrada numa instalação. Para a obtenção deste ponto é necessário, para além da curva característica da bomba, obter a curva característica da instalação. Esta última pode ser obtida a partir da expressão (2.6.), representando assim a altura manométrica em função do caudal bombado.

Portanto, o ponto de funcionamento (H_m , Q) pode ser obtido, graficamente, intersetando estas duas curvas, como se demonstra na figura 2.8. A bomba funcionará com altura manométrica e caudal correspondentes a este ponto.

Uma alteração das condições de funcionamento, provocará a alteração do ponto de funcionamento. Alterações no desnível geométrico da instalação provocam o deslocamento na vertical da curva característica da instalação, paralelamente à curva existente, movendo o ponto de funcionamento ao longo da curva característica da bomba. Assim, modifica-se o caudal bombado e a altura manométrica, sendo que, quando um aumenta o outro diminui.

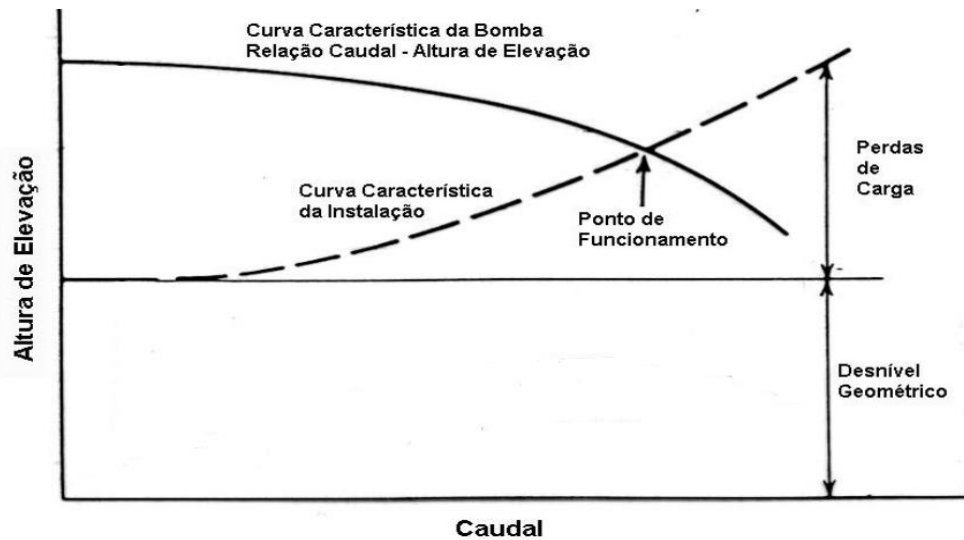


Fig.2.8 – Determinação do ponto de funcionamento de uma bomba [13]

Por outro lado, alterações no diâmetro da conduta elevatória, e consequente alteração das perdas de carga, fazem com que a curva característica da instalação rode em torno do ponto de abscissa nula, movendo também o ponto de funcionamento.

Em sistemas elevatórios em que se prevêem caudais de bombagem diferentes, e portanto diversos pontos de funcionamento, podem ser instalados variadores de velocidade de rotação do motor para acautelar tal situação.

2.3.7.4. Associação de bombas em paralelo

Se duas, ou mais, bombas funcionam em paralelo, pode-se obter a curva característica do conjunto somando as abcissas correspondentes, os caudais de bombagem, para cada altura de elevação. Ou seja, bombas associadas em paralelo permitem elevar maior caudal a uma mesma altura de elevação. Quando associadas em paralelo, as bombas não elevam o mesmo caudal do que elevariam se não estivessem associadas. De fato, o caudal elevado por cada bomba quando estas estão associadas é inferior.

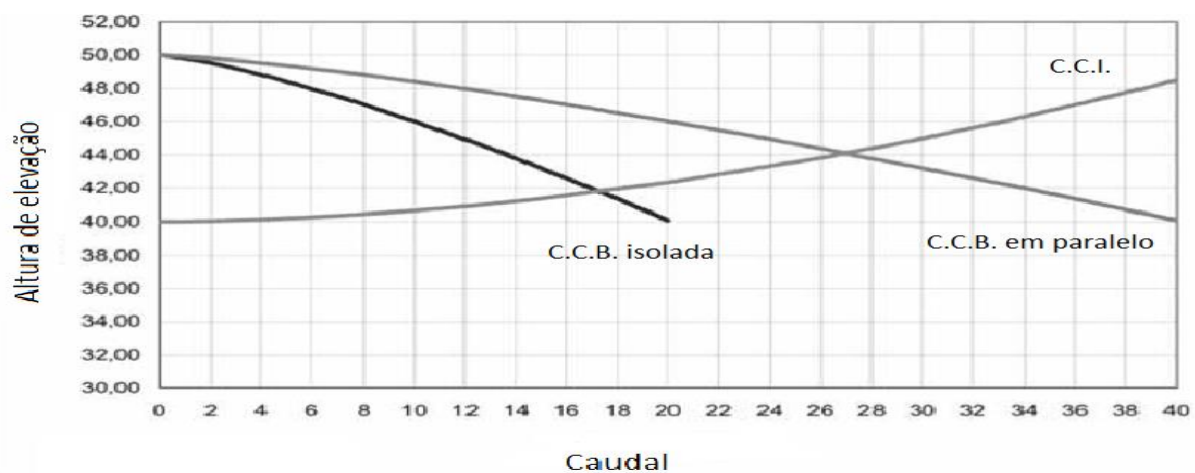


Fig.2.9 – Ponto de funcionamento de bomba isolada e de duas bombas iguais associadas em paralelo [14]

Na figura 2.9 estão representadas: a curva característica de uma bomba, a curva característica do conjunto de duas bombas iguais em paralelo e a curva característica de uma instalação. Os aspetos acima referidos podem ser verificados nesta mesma figura, observando os pontos de funcionamento para as duas situações.

2.3.7.5. Associação de bombas em série

Bombas a funcionar em série permitem elevar o mesmo caudal a maiores alturas de elevação. Então, para obter a curva característica da associação de bombas somam-se as ordenadas homólogas, as alturas de elevação, para o mesmo caudal.

A altura de elevação de cada bomba quando estas estão associadas em série, para o mesmo caudal, é inferior ao caudal de elevação das mesmas bombas a funcionar isoladamente.

Em analogia com a figura 2.9, para a associação de bombas em paralelo, representa-se na figura 2.10 as curvas características, de uma bomba isolada, da associação de duas bombas iguais em série e curva característica de uma instalação.

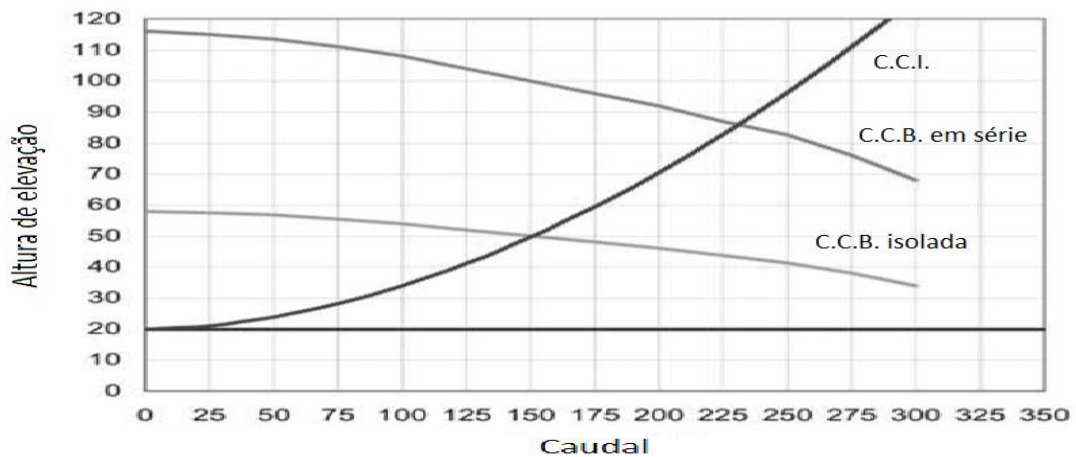


Fig.2.10 – Ponto de funcionamento de bomba isolada e de duas bombas iguais associadas em série [14]

2.3.7.6. NPSH

NPSH é um acrónimo da expressão inglesa *Net Positive Suction Head*, e expressa a pressão absoluta que um escoamento dispõe à entrada de uma bomba hidráulica. O NPSH requerido pela bomba, valor definido pelos fabricantes, é a energia que o escoamento deve ter à entrada da bomba para que não se verifiquem fenómenos de cavitação.

O fenómeno de cavitação é caracterizado pela formação de bolhas de vapor, ou gás dissolvido, na água que entra na bomba que entrando para a zona de compressão da conduta provocam ruídos e vibrações que danificam a instalação. Este fenómeno acontece quando a energia que o escoamento dispõe à entrada da bomba não é suficiente para vencer as perdas de carga até ao impulsor, com uma pressão absoluta superior à tensão de vapor da água. Por este motivo, a quantificação do NPSH é muito importante, devendo garantir-se que o NPSH da instalação seja superior ao NPSH requerido pela bomba [10].

Concretamente, a pressão na seção de entrada da bomba, P_s , deve ser tal que, subtraída do NPSH requerido pela bomba, não dê um valor inferior à tensão de saturação do vapor da água, P_v :

$$P_s \geq P_v + NPSH_r \quad (2.13.)$$

Aplicando o Teorema de Bernoulli à conduta de aspiração, desprezando as parcelas da altura cinética, pode-se obter uma nova condição para o cálculo da altura de aspiração, h_a , que permita cumprir a limitação imposta na expressão (2.13.), em função da perda de carga na conduta de aspiração, ΔH_a , da pressão ao nível da água a montante, P_m , e de P_v e $NPSH_r$, já definidos anteriormente [15]:

$$h_a \leq \frac{P_m}{\gamma} - \Delta H_a - \frac{P_v}{\gamma} - NPSH_r \quad (2.14.)$$

Como facilmente se compreende, os problemas de cavitação e, consequentemente, da limitação da altura de aspiração para cumprir as restrições do NPSH da bomba, só surgem nos casos em que a bomba se encontra a um nível superior ao nível da água a bombear e, portanto, quando surgem pressões negativas na conduta de aspiração. Nos casos em que a bomba se encontra abaixo do nível de água a bombear, as pressões são sempre positivas e portanto este problema não se põe.

2.4. RESERVATÓRIOS

2.4.1. CARACTERÍSTICAS GERAIS

O armazenamento em sistemas de abastecimento de água tem reflexos em termos económicos e de segurança, e esta função é desempenhada pelos reservatórios, que permitem a acumulação de água e se situam em pontos estratégicos do sistema, podendo ser construídos com diversos objectivos, sendo que os principais são, funções de regularização de caudais aduzidos face à flutuação dos consumos, funções de reserva de emergência para fazer face à ocorrência de incêndios ou avaria no sistema de adução, funções de equilíbrio de pressões nas redes de distribuição e, como é o caso do reservatório de jusante em estudo neste trabalho, funções de regularização do funcionamento de bombagens [6].

A regularização de caudais efectuada pelos reservatórios pode ser diária, entre horas do dia, ou interdiária, entre dias do ano. As flutuações do consumo face à capacidade dos reservatórios ditarão qual o regime de operação dos mesmos.

Os reservatórios podem servir como reserva de emergência em situações de incêndio, acidentes na captação, intervenções de reparação ou manutenção na conduta adutora, variação da qualidade de água na origem e paragem de grupos electrobomba (por avaria ou cortes de energia eléctrica) [6].

Por vezes, a solicitação do caudal de ponta por uma rede de distribuição a partir de um único reservatório pode provocar grandes perdas de carga, fazendo com que as pressões sejam inferiores a mínimos aceitáveis. Nesses casos podem ser construídos reservatórios na extremidade oposta da rede, a cotas mais baixas, que são abastecidos pela rede nos períodos de menor consumo, e que nos períodos de ponta abastecem os pontos da rede mais distantes do reservatório principal com pressões superiores [6].

No caso dos troços em que adução se faz por bombagem, como é o caso em estudo nesta dissertação, os reservatórios têm também funções de regularização, mas neste caso, entre diferentes regimes de adução. Nestes casos, os reservatórios regularizam a adução gravítica, que é contínua, com a adução por bombagem, cujo período será condicionado pela capacidade do reservatório [6].

Os reservatórios são constituídos pelos seguintes componentes principais:

- Células;
- Câmara de manobras;
- Órgãos acessórios e de instrumentação.

As células podem ser construídas com formatos de seção quadrada, retangular ou circular. As seções circulares conduzem a soluções mais económicas e por isso são as mais correntemente utilizadas. Em termos de material, o betão armado (Fig.2.12) constitui o material que mais se adequa na construção de reservatórios, sendo que, excepcionalmente, podem ser construídos com paredes de alvenaria, pré-fabricados metálicos (Fig.2.11) ou de poliéster reforçado [16].

A altura de água nos reservatórios que proporciona soluções económicas aumenta com a capacidade e normalmente está compreendida entre os 2,5 m e os 5.0 m [6].



Fig.2.11 - Reservatório com duas células de seção circular com elementos pré-fabricados [17]

Para além de aberturas de acesso ao interior e dispositivos de ventilação instalados na cobertura, as células devem estar obrigatoriamente munidas de descargas de fundo e descargas de superfície. As descargas de fundo são utilizadas para esvaziar o reservatório no caso de operações de limpeza, enquanto a descarga de superfície se destina a dar saída à água na eventualidade desta ultrapassar o nível máximo admitido [16].

Na câmara de manobras ficam instaladas as tubagens, válvulas, medidores de caudal, equipamentos eléctricos e de automação e outros acessórios. Quando os reservatórios estão associados a uma estação elevatória é na câmara de manobras que se situam os grupos electrobomba e respectivos acessórios.

Quanto aos **aspetos construtivos** convém ainda transcrever o artigo 71º do Regulamento anteriormente referido:

- “Os reservatórios devem ser resistentes, estanques e ter o fundo inclinado a, pelo menos, 1% para as caleiras ou para a caixa de descarga;
- Para permitir a sua colocação fora de serviço para eventuais operações de limpeza, desinfecção e manutenção, os reservatórios devem estar dotados de *by-pass*, a menos que sejam constituídos por mais de uma célula;
- Os reservatórios enterrados e semienterrados devem ser formados, pelo menos, por duas células que, em funcionamento normal, se intercomuniem, estando no entanto preparadas para funcionar isoladamente.”

Menciona-se de seguida o artigo 69º do Regulamento, que se refere aos reservatórios no que concerne à sua **localização**:

- “Os reservatórios devem situar-se o mais próximo possível do centro de gravidade dos locais de consumo, a uma cota que garanta as pressões mínimas em toda a rede;
- Em áreas muito acidentadas podem criar-se andares de pressão, localizando-se os reservatórios de forma que as pressões na rede se encontrem entre os limites, mínimo e máximo, admissíveis;
- Em áreas extensas pertencentes ao mesmo andar de pressão pode dividir-se a capacidade de reserva por vários reservatórios afastados, mas ligados entre si de forma a equilibrar toda a distribuição;
- Em aglomerados que se expandam numa direção preferencial pode localizar-se um segundo reservatório de extremidade, a um nível inferior ao principal, de modo a equilibrar as pressões nas zonas de expansão.”

Os reservatórios são classificados, principalmente, em relação à sua função, à sua posição altimétrica no terreno e em relação à sua capacidade e de acordo com o artigo 68º do Regulamento relativo à **classificação** de reservatórios:

- “Consoante a sua função, em: de distribuição ou equilíbrio, de regularização de bombagem e de reserva para combate a incêndios;
- Consoante a sua implantação, em: enterrados, semienterrados e elevados;
- Consoante a sua capacidade, em: pequenos, médios e grandes, respetivamente, para valores inferiores a 500 m³, compreendidos entre 500 m³ e 5000 m³ e superiores a este último valor.”



Fig.2.12 - Reservatório apoiado com duas células de seção circular e reservatório elevado [17]

2.4.2. CAPACIDADE

A capacidade de um reservatório pode ser definida como o volume de água que este pode acumular no seu interior. A capacidade de armazenamento dos reservatórios com funções de regularização deve ser igual ao somatório das necessidades de regularização e reserva de emergência:

$$V = V_{regularização} + V_{emergências} \quad (2.15.)$$

Como se referiu anteriormente as necessidades de regularização podem ser diárias, entre horas do dia, ou interdiárias, entre dias do mês. Portanto, o volume de regularização deve ser tal que permita suprir tanto as necessidades diárias como interdiárias [6].

$$V_{regularização} = V_{reg_diário} + V_{reg_interdiário} \quad (2.16.)$$

O que acontece nos reservatórios integrados em sistemas de abastecimento de água é que quando o caudal aduzido é superior aos caudais solicitados pelas redes de distribuição a jusante (nas horas de menor consumo, normalmente durante a noite), o reservatório vai acumulando a água em excesso, e quando o caudal consumido é superior ao caudal aduzido (nas horas de ponta), o reservatório vai esvaziando. Portanto, a não ser que o sistema de adução que alimenta o reservatório assegure o transporte de um volume diário igual ou superior ao volume necessário no dia de maior consumo, torna-se necessário constituir uma reserva para fazer face a estas variações entre caudais que entram e saem do reservatório.

Quanto ao volume para **reserva de emergência** importa citar parte do artigo 70º do Regulamento que estabelece regras para a sua definição:

- “A reserva de água para incêndio é função do grau de risco da zona e não deve ser inferior aos valores seguintes:
 - 75 m³ – grau 1;
 - 125 m³ – grau 2;
 - 200 m³ – grau 3;
 - 300 m³ – grau 4;
 - A definir caso a caso – grau 5.
- A reserva de água para avarias deve ser fixada admitindo:
 - A avaria se dá no período mais desfavorável, mas não simultaneamente em mais de uma conduta alimentadora;
 - A sua localização demora entre uma e duas horas quando a conduta é acessível por estrada ou caminho transitável, ou ainda em pontos afastados de não mais de 1 Km e demora mais meia hora por cada quilómetro de conduta não acessível por veículos motorizados;
 - A reparação demora entre quatro e seis horas, incluindo-se neste tempo o necessário para o esvaziamento da conduta, reparação propriamente dita, reenchimento e desinfecção. “

O Regulamento define ainda que a capacidade de reserva de emergência deve ser o maior valor dos necessários para avaria ou incêndio.

Os graus de risco referidos estão definidos no ponto 1 do artigo 18º - Volumes de água para combate a incêndios no mesmo Regulamento.

Por fim, o Regulamento estabelece, também no artigo 70º, um limite mínimo para o reservatório em função do caudal diário médio anual, Q_{mda} , dado pela expressão (2.17.):

$$V \geq k.Q_{mda} \quad (2.17.)$$

Onde k tem os seguintes valores mínimos:

$k = 1.0$ para agregados populacionais superiores a 100000 habitantes;

$k = 1.25$ para agregados populacionais compreendidos entre 10000 e 100000 habitantes;

$k = 1.5$ para agregados populacionais compreendidos entre 1000 e 10000 habitantes;

$k = 2.0$ para agregados populacionais inferiores a 1000 habitantes e para zonas de maior risco, nomeadamente aerogares, estabelecimentos hospitalares e quartéis.

2.4.3. DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO

O dimensionamento hidráulico de reservatórios, isto é, a definição do seu volume exige o conhecimento da evolução dos caudais, de entrada e de saída, no tempo. A partir desses valores é possível construir as correspondentes curvas de volumes acumulados e, a partir destas, determinar as diferenças máximas de volumes afluentes e volumes cedidos.

O cálculo da capacidade teórica de um reservatório, para efeitos de regularização, pode ser calculada facilmente por via gráfica como se exemplifica na figura 2.13. Como se pode observar, no exemplo da figura o caudal aduzido é constante enquanto o caudal distribuído varia ao longo do dia, sendo que o somatório das maiores diferenças de volume acumulado, A mais B, corresponde à capacidade mínima a adotar para o reservatório, excluindo o volume de reserva de emergência [6].

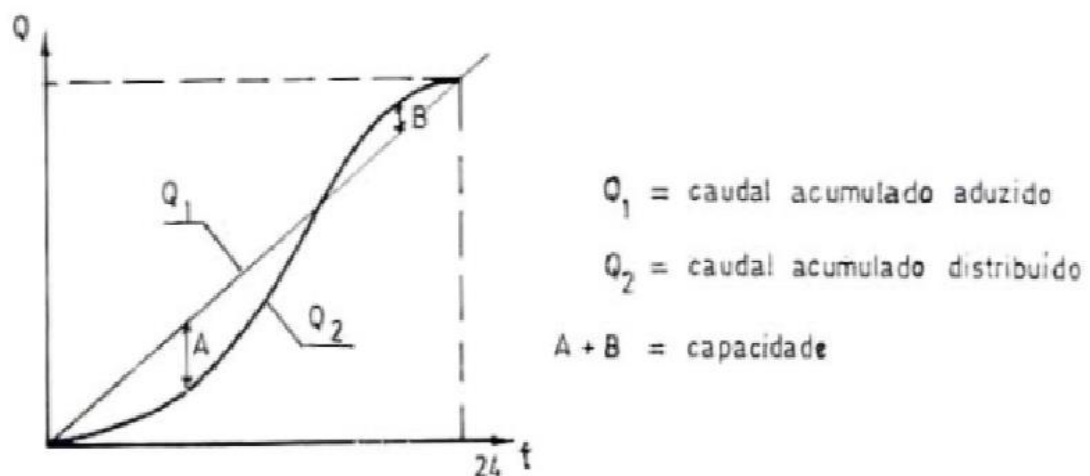


Fig.2.13 – Cálculo da capacidade de um reservatório [6]

Conhecendo os caudais de adução e os caudais distribuídos, o cálculo da capacidade torna-se bastante simples, como se pôde verificar.

A obtenção dos caudais consumidos ao longo do tempo numa rede em exploração pode fazer-se recorrendo à instalação de medidores de caudal a montante das redes de distribuição, obtendo assim uma série de registos de caudais consumidos no tempo. No entanto, numa situação de primeiro dimensionamento, em que a rede ainda não esteja em funcionamento, esse processo não é possível e portanto a solução passa por adotar leis de consumo tipificadas, os diagramas cronológicos.

Nestes casos é necessário realizar as projecções demográficas e definir as capitações no período de vida útil do sistema. Como as capitações se referem a consumos diários médios anuais, multiplicando os valores anteriores obtém-se o caudal médio diário anual. Como se sabe, os consumos estão sujeitos a variações mensais, diárias e horárias, e de modo a traduzir estas variações em relação ao caudal diário médio anual, utilizam-se os designados factores de ponta (mensais, diários e horários) [18].

O fator de ponta horário é o quociente entre o caudal de ponta horário e o caudal diário médio anual, o fator de ponta diário é o quociente entre o consumo do dia de maior consumo e o caudal diário médio anual (atribuindo-se normalmente um valor de 1,5), e o fator de ponta mensal é o quociente entre o consumo diário médio do mês de maior consumo e o caudal diário médio anual (atribuindo-se normalmente um valor de 1,3) [18].

Na figura 2.14 apresenta-se um exemplo de um diagrama cronológico e respectiva curva de volumes acumulados para um fator de ponta de 3,0. A parcela do volume de regularização diária deve ser tal que permita fazer face a este tipo de flutuações horárias.

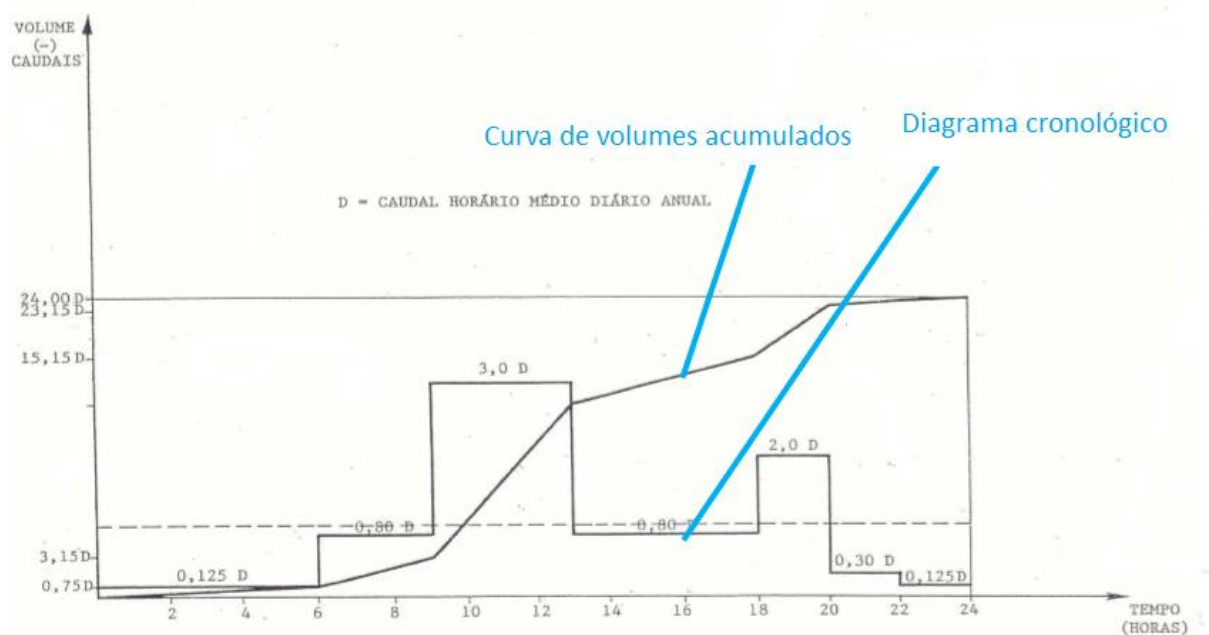


Fig.2.14 – Diagrama cronológico e curva de volumes acumulados para fator de ponta horário 3,0 [17]

Quanto ao volume de regularização interdiário é de todo o interesse analisar a figura 2.15, extraída do Manual do Saneamento Básico. O eixo das abcissas traduz-se nos factores de ponta e, portanto, conforme o caudal de dimensionamento do sistema, podemos obter a capacidade de regularização interdiária do reservatório em relação ao caudal médio diário anual.

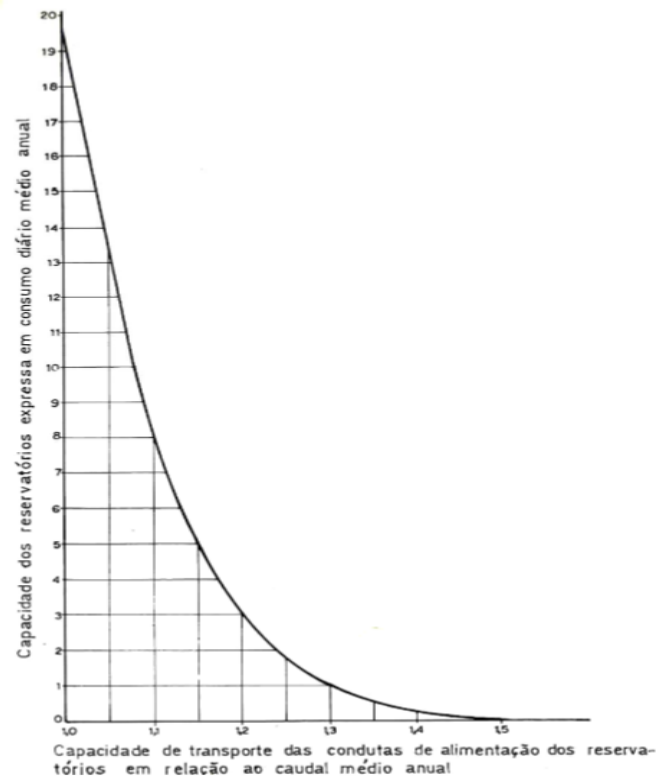


Fig.2.15 – Capacidade de regularização dos reservatórios em função do caudal de alimentação [16]

Então, se o sistema for dimensionado para o caudal do dia de maior consumo, ao qual corresponde um fator de ponta de 1,5, pode-se observar na figura 2.13 que a capacidade de regularização interdiária necessária é 0. Se o sistema for dimensionado para o caudal diário médio do mês de maior consumo, ao qual corresponde o fator de ponta de 1,3, a capacidade de regularização interdiária deverá ser igual ao volume médio diário anual, e no caso do sistema do sistema ser dimensionado para o caudal diário médio anual (apenas em aglomerados de pequena dimensão) essa capacidade deverá ser de 20 vezes o volume médio diário anual.

3

CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA EM SISTEMAS ELEVATÓRIOS

3.1. CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA

Nos sistemas de abastecimento de água, é nos equipamentos elevatórios que se verifica maior consumo energético representando este a maior fatia no custo total de energia eléctrica. Entre 2% a 3% do consumo de energia eléctrica no mundo é utilizada em processos de bombagem. Neste sentido, pode afirmar-se que o custo da energia eléctrica é o parâmetro mais relevante na exploração otimizada de sistemas elevatórios.

Segundo o Relatório Anual dos Serviços de Água e Resíduos em Portugal (RASARP) de 2012 [19], da Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos (ERSAR), as estações elevatórias representam 65% do total do consumo de energia no sector da água em Portugal. Neste mesmo relatório destaca-se a necessidade da redução dos encargos com energia, particularmente em estações elevatórias, nomeadamente através da redução do indicador de qualidade relativo à eficiência energética em estações elevatórias. O significado deste indicador será explicitado mais adiante [20].

A energia consumida pelo sistema depende da selecção da bomba, da conceção da instalação e do modo como o sistema é operado. O custo inicial da instalação é uma pequena parte das despesas ao longo do ciclo de vida útil do sistema. A compreensão do funcionamento dos componentes do sistema como um todo, permitirá otimizar o seu funcionamento tendo em vista a redução do consumo de energia. Na figura 2.14 pretende-se representar a importância dos custos com a energia ao longo do ciclo de vida útil de um sistema elevatório [21].

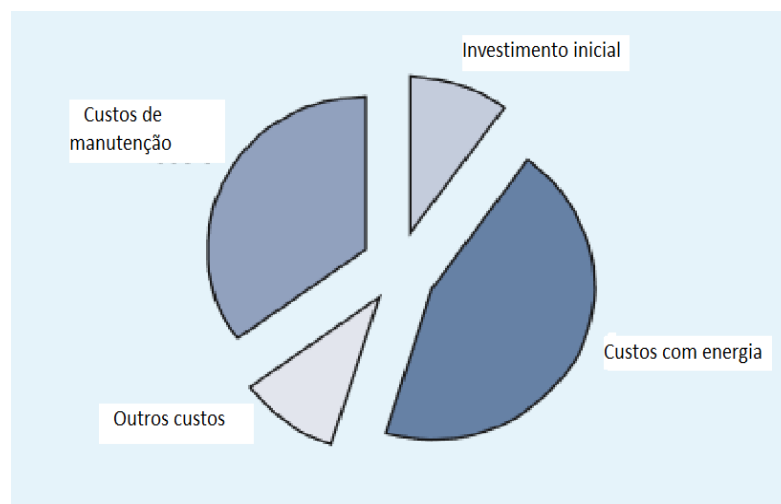


Fig. 3.1 – Custos ao longo do ciclo de vida de um sistema elevatório [21]

Estudos efectuados demonstram que entre 30% a 50% da energia consumida pelos sistemas elevatórios pode ser reduzida através de alterações no equipamento ou no funcionamento do sistema. O funcionamento dos sistemas elevatórios depende principalmente de dois aspetos: a capacidade de regularização do reservatório de jusante e a variação dos consumos de água nas redes de distribuição [20] [21].

Consequentemente, a operação das estações elevatórias, definida pelas entidades gestoras, deverá ser definida de modo a minimizar os gastos energéticos, garantindo um nível de serviço adequado às necessidades de consumo e tirando partido da capacidade de armazenamento dos reservatórios.

3.2. INDICADORES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Sendo o custo com a energia tão relevante, a otimização energética das estações elevatórias representa uma metodologia para reduzir os custos de exploração e maior eficiência por parte das entidades gestoras.

O potencial de otimização energético de um sistema elevatório deve ser avaliado considerando, para além da eficiência dos grupos electrobomba, o funcionamento global do sistema. Esta avaliação deve ser feita com base em dados reais, obtidos através da monitorização do funcionamento do sistema, que caracterizem o ponto de funcionamento do sistema (caudal de elevação e altura manométrica), o rendimento dos grupos electrobomba, os caudais bombados, o nível de água nos reservatórios e o consumo de energia [20].

Desta forma será possível identificar soluções de otimização ou regras de operação ótimas que permitam minimizar o consumo de energia eléctrica.

Concretamente, a avaliação da eficiência do sistema elevatório pode ser feita recorrendo ao cálculo de diversos indicadores e comparando o seu valor com valores de referência. Os indicadores de eficiência energética constituem uma ferramenta de avaliação do desempenho energético do sistema, e de avaliação da eficácia de alterações ao sistema. Estes indicadores podem também ser utilizados para comparar a operação actual com operações passadas numa instalação, com o objectivo de identificar falhas ou oportunidades de melhoria, ou ainda para comparação da eficiência de sistemas similares [14].

3.2.1. CONSUMO ESPECÍFICO (CE)

O consumo específico (3.1.), ou energia específica, é o indicador mais utilizado em sistemas elevatórios de abastecimento de água. Este indicador, expresso em quilowatt hora por metro cúbico, é um parâmetro, bastante simples, que permite calcular o consumo de energia consumido por metro cúbico de água bombado:

$$CE = \frac{\text{Energia consumida}}{\text{Volume bombado}} \quad (3.1.)$$

Este indicador não é adequado para comparar sistemas elevatórios de características diferentes, sendo esta a sua principal limitação. Esta limitação deriva do facto de que, sendo os rendimentos dos grupos electrobomba iguais, quanto maiores forem as alturas de elevação maior é o consumo de energia por

unidade de volume elevado. No entanto, este é um indicador bastante útil para comparar diversas soluções de otimização para o mesmo sistema elevatório [20].

3.2.2. CONSUMO ESPECÍFICO NORMALIZADO (CEN)

Com o intuito de contornar a limitação do indicador anterior, a *International Water Association* (IWA) propôs o artifício de reduzir as alturas manométricas de diferentes instalações a uma única altura, de modo a ser possível comparar o desempenho energético destas, incorporando assim o rendimento dos sistemas.

Assim foi criado o indicador designado por consumo específico normalizado (3.2.), ou energia específica normalizada, expresso em quilowatt hora por metro cúbico vezes cem metros, e representa o consumo de energia necessário para elevar um metro cúbico de água a uma altura de cem metros. Este indicador corresponde ao inverso da eficiência média de bombeamento, isto é, para uma determinada instalação de bombagem, o CEN, varia linearmente e de forma inversamente proporcional com o rendimento do grupo electrobomba [20]:

$$CEN = \frac{Energiaconsumida}{Volumebombado \times Altura\ manométrica} \times 100 \quad (3.2.)$$

Este é também o indicador preconizado pela ERSAR (2ª geração do sistema de avaliação) para avaliação da eficiência energética e qualidade do serviço de sistemas elevatórios. Os valores de referência para este indicador são os indicados na tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Valores de referência do consumo específico normalizado em sistemas elevatórios [22]

Valor de referência [kWh/m ³ .100]	Eficiência média	Qualidade do serviço
[0,27;0,40]	Entre 68 e 100%	Boa
]0,40;0,54]	Entre 50 e 68%	Mediana
]0,54;+∞[	Inferior a 50%	Insatisfatória

Observando a tabela 3.1 pode-se verificar que a maiores valores de eficiência do sistema correspondem menores valores do indicador e vice-versa. Conclui-se ainda que o valor mínimo teórico do indicador, que corresponderá a uma eficiência de 100%, é de 0,27kW.h/m³.100.

3.2.3. GREEN PUMP INDEX (GPX)

Este indicador (3.3.), relaciona o caudal médio bombado, em m³/h, o desnível geométrico a vencer, em metros, e a potência média requerida pelo grupo eletrobomba, em kW:

$$GPX = \frac{Q \times Hg}{3,67 \times Potência} \quad (3.3.)$$

Este indicador, ao contrário dos anteriormente referidos, energia específica e energia específica normalizada, relaciona a eficiência do sistema na elevação de um determinado desnível geométrico correspondendo a um rendimento equivalente do mesmo [20].

Incluindo parâmetros caracterizadores do desempenho da bomba, incluindo a pressão (estática) e o caudal, este indicador caracteriza de forma mais real o consumo de energia no seu funcionamento [23].

Por outro lado, ao não considerar a altura manométrica deixa de lado as perdas de carga na conduta bem como ineficiências relacionadas com o funcionamento dos grupos eletrobomba, aspetos que são passíveis de serem otimizados [23].

Representando um rendimento equivalente dos sistemas, este indicador, facilita a comparação entre grupos electrobomba distintos independentemente do sistema em que estão inseridos.

O indicador GPX foi concebido para que o seu valor varie entre 0 e 100 correspondendo maiores valores a melhores níveis de desempenho em termos de eficiência energética. Na figura 3.2 apresenta-se a escala de classificação deste indicador, com os intervalos de valores do lado esquerdo e a respectiva classificação em termos de eficiência, bem como medidas recomendadas, do lado direito.

Tabela 3.2 – Escala de classificação do indicador GPX [20]

Valor do indicador	Classificação	Eficiência
<50	G8	Baixa
50 - 54	G7	Baixa
55 - 59	G6	Baixa
60 - 64	G5	Baixa
65 - 69	G4	Média
70 - 74	G3	Média
75 - 79	G2	Excelente
>80	G1	Excelente

O cálculo deste indicador depende especialmente da existência de dados reais sobre o funcionamento do sistema, sendo que a utilização de valores teóricos ou estimados pode desvirtuar a mais-valia deste indicador [20].

Considera-se que este indicador é o mais completo na avaliação da eficiência energética de sistemas elevatórios, em relação ao consumo específico e ao consumo específico normalizado, porque para além de permitir a comparação entre sistemas distintos considera a parcela das perdas de carga e ineficiências dos grupos eletrobomba como pontos de possível otimização [20].

3.3. MEDIDAS PARA REDUZIR OS CUSTOS COM ENERGIA ELÉTRICA

Os elevados montantes de capital despendido na exploração de sistemas elevatórios, em especial com a energia eléctrica, pressionam no sentido da procura de soluções otimizadas.

A redução dos custos com a energia eléctrica em sistemas elevatórios abrange soluções variadas, desde as mais simples de implementar e sem necessidade de investimento até às mais complexas e com necessidade de investimentos avultados. Estas soluções podem passar por redução do consumo de energia eléctrica, ou apenas os custos, ou pela alteração do regime de funcionamento nos sistemas elevatórios.

Podem-se distinguir três tipos de medidas a ser implementadas para a redução dos custos energéticos em sistemas elevatórios [24]:

- Redução de custos sem redução do consumo de energia eléctrica;
- Redução de custos diminuindo o consumo de energia eléctrica;
- Redução de custos por alteração do sistema operacional.

3.3.1. REDUÇÃO DE CUSTOS SEM REDUÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA

Estas podem ser medidas administrativas ou operacionais que podem implicar ou não a realização de investimentos.

Entre as medidas ao nível administrativo, podem ser encontradas soluções que não requerem investimentos, como por exemplo, a alteração da potência contratada pela entidade gestora e a alteração dos tarifários. A alteração da potência contratada pode ser uma solução de redução de custos se, eventualmente, esta for superior à potência necessária para o funcionamento dos grupos eletrobomba. A alteração do tarifário pode ser também uma solução de minimização de custos, uma vez que o tarifário ao qual a instalação está sujeito pode não ser o mais adequado ao seu funcionamento [24].

Em termos operacionais, as soluções de redução do consumo de energia eléctrica passam por correção do fator de potência e alteração da tensão de alimentação. O fator de potência é definido pela razão entre a potência real, ou absorvida, pela potência total, ou aparente. Baixos factores de potência, resultantes de, por exemplo, motores operando em vazio ou motores sobredimensionados, implicam correntes maiores aumentando as perdas na instalação e o consequente aumento do consumo energético. A alteração da tensão de alimentação, por exemplo de baixa para média ou alta tensão, permite uma redução dos custos de energia eléctrica já que os tarifários em tensões maiores são mais económicos [24].

3.3.2. REDUÇÃO DE CUSTOS DIMINUINDO O CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA

O consumo de energia eléctrica nos grupos eletrobomba depende da altura de elevação, do caudal bombado e do rendimento dos motores, portanto, uma redução do consumo energético depende de alterações nestes três parâmetros.

A redução da altura manométrica implica uma menor potência requerida pelo motor da bomba e, consequentemente um menor consumo energético. A altura manométrica é composta pela parcela da altura geométrica mais a parcela das perdas de carga. A altura geométrica, geralmente, é uma parcela fixa, portanto, uma redução da altura manométrica implica uma redução das perdas de carga. As perdas de carga podem ser reduzidas aumentando o diâmetro da conduta, limpeza ou revestimento das tubagens, eliminação de ar nas tubagens e disposição correta de tubagens [24].

O caudal bombado é o outro fator que tem influência direta na potência solicitada ao motor da bomba. Uma redução do caudal bombado pode ser conseguida através da redução de perdas de água ou através

da modificação de componentes das instalações hidráulicas a jusante, nomeadamente nas redes de distribuição, que permitam reduzir os consumos [24].

Uma melhoria do rendimento da bomba implica, para o mesmo caudal e altura de elevação, que o consumo energético será menor, já que a potência utilizada será menor.

3.3.3. REDUÇÃO DE CUSTOS POR ALTERAÇÃO DO SISTEMA OPERACIONAL

Na maioria das estações elevatórias investimentos em pequenas modificações das bombas ou mudanças operacionais podem resultar numa redução significativa do custo com a energia elétrica. Devido a isso, a definição de uma política operacional ótima das bombas tem vindo a tornar-se uma metodologia prática e eficaz para atingir a eficiência económica nesses sistemas sem a necessidade de alterar as infra-estruturas dos mesmos [24].

As duas medidas mais utilizadas para reduzir os custos alterando o sistema operacional são o uso de variadores de velocidade nos grupos eletrobomba e a alteração do funcionamento bombagem-armazenamento.

Os variadores de velocidade permitem alterar o ponto de funcionamento dos grupos electrobomba através do controlo da velocidade de rotação das bombas. Estes dispositivos permitem, assim, ajustar os caudais bombados em função dos caudais solicitados a jusante, podendo conduzir a importantes benefícios económicos devido à redução dos consumos energéticos [25].

Alteração do funcionamento bombagem-armazenamento

O dimensionamento dos reservatórios é essencial para uma boa eficiência energética, pois é com base na capacidade de regularização destes que se pode estabelecer a melhor política operacional tendo em vista a minimização do custo de energia.

A alteração do funcionamento bombagem-armazenamento não implica uma redução do consumo de energia, mas sim um deslocamento do consumo para horários em que o custo de energia é menor.

Na prática, a política operacional consiste em definir os arranques e paragens dos grupos electrobomba em função do nível de água no reservatório abastecido e no período do dia. Como foi referido em 2.4.2 o reservatório enche quando o caudal bombado é maior que o caudal cedido e esvazia na situação inversa, portanto, jogando com esta capacidade de regularização de caudais do reservatório procurar-se-á estabelecer o funcionamento das bombas nas horas em que o custo da energia é mais barato, dentro do possível. Procurar-se-á evitar períodos de bombagem nas horas de pico, nas quais o consumo é maior e o custo da energia também [26].

Como é óbvio, independentemente da solução que permita menores custos energéticos, a continuidade do abastecimento nunca deverá ser prejudicada.

Com base no que foi aqui referido, estudar-se-á no seguimento deste trabalho a influência do reservatório de jusante na exploração otimizada de um sistema elevatório de características e solicitações de água a jusante conhecidas.

4

ESTUDO DE CASO

4.1. INTRODUÇÃO

Para o desenvolvimento desta dissertação, com o objetivo de estudar o funcionamento de uma estação elevatória em função das características do reservatório de jusante, foi necessário adquirir dados, e proceder ao seu tratamento, relativos ao funcionamento do sistema de bombagem. Estes dados foram fornecidos pela empresa Águas do Noroeste, S.A..

A empresa Águas do Noroeste foi instituída dia 29 de Abril de 2010 através da fusão das sociedades Águas do Cávado, Águas do Minho e Lima e Águas do Ave. Esta empresa tem como principal missão construir, conceber e explorar as infraestruturas de abastecimento de água e saneamento de um sistema multimunicipal.

Os locais escolhidos para realizar este estudo, geridos pela empresa Águas do Noroeste, fazem parte do Subsistema Multimunicipal de Abastecimento de Água de Areias de Vilar, que abrange os municípios de Barcelos, Esposende, Maia (Norte), Póvoa de Varzim, Santo Tirso, Trofa, Vila do Conde e Vila Nova de Famalicão. Foram escolhidos a estação elevatória de São Lourenço e o reservatório de Vila Chã, ambos localizados no concelho de Esposende. A estação elevatória de São Lourenço eleva água para o reservatório de Vila Chã através de uma conduta em ferro fundido dúctil com 350 mm de diâmetro e uma extensão de 4776,5 m.

4.2. CARATERÍSTICAS DO SISTEMA DE BOMBAGEM

4.2.1. ESTAÇÃO ELEVATÓRIA DE SÃO LOURENÇO

A Estação Elevatória (EE) de São Lourenço, localizada no concelho de Esposende, está implantada a uma cota de 159,9 m, estando os eixos dos grupos eletrobomba elevados de 60 cm (altura de aspiração), isto é, a uma cota de 160,5 m.

Esta estação é constituída por dois grupos de bombagem de eixo horizontal (Fig.4.1) com 160 kW de potência cada, não funcionando simultaneamente, sendo que um é reserva do outro. O ponto de funcionamento teórico das bombas é ($Q_{\text{bombado}} = 89.7$ l/s; Altura manométrica = 99.75 m), isto é, as bombas elevam um caudal de 89,7 litros por segundo a uma altura (manométrica) de 99,75 m. Na figura 4.2 está representada a curva característica das bombas, e como se verifica, para este ponto de funcionamento o rendimento das bombas é de 77%.



Fig.4.1 – Grupos electrobomba de eixo horizontal da E.E. de São Lourenço

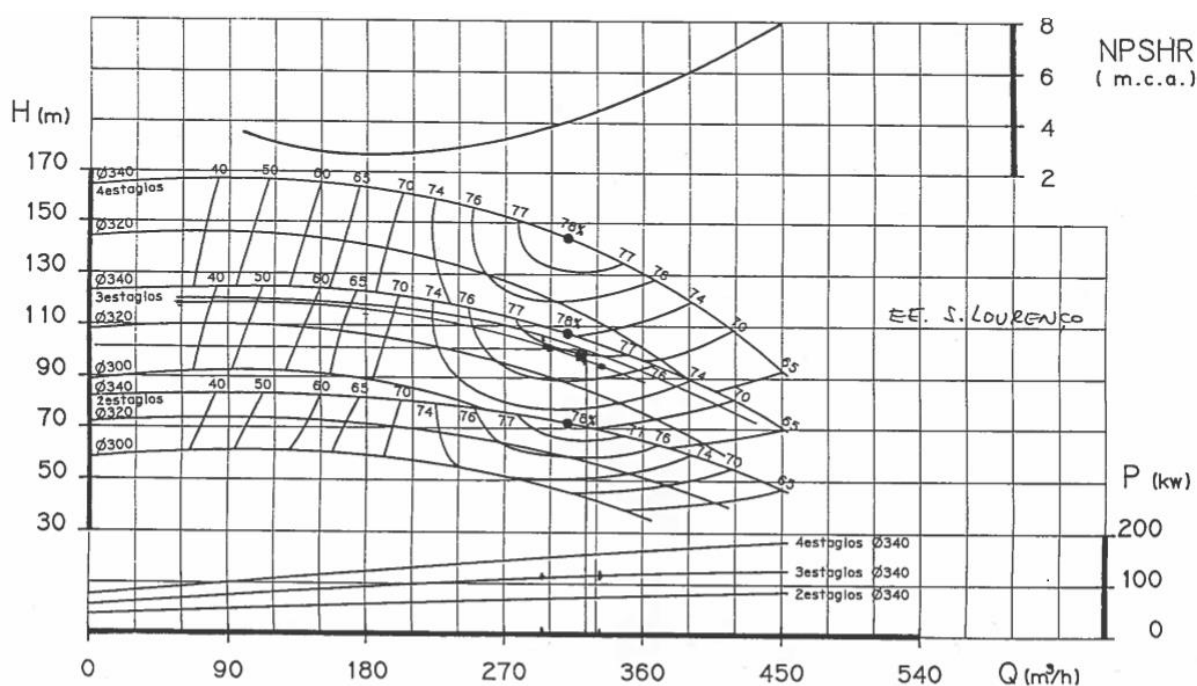


Fig.4.2 – Curva característica das bombas da EE S. Lourenço

Esta estação elevatória está associada a um reservatório de regularização de montante constituído por duas células com volume de 1600 m³ cada. A água chega a este reservatório vinda da estação elevatória do Bouro, é armazenada nas células do reservatório, e a partir deste, vai por gravidade para distribuição local ou é bombada para o reservatório de jusante de Vila Chã. Pode-se observar este esquema de funcionamento no esquema sinótico da estação elevatória representado na figura 4.3.

Como se pode observar no esquema dessa mesma figura, a câmara de manobras da estação elevatória está munida, para além das válvulas de seccionamento sempre necessárias, de uma válvula redutora de pressão e de um *bypass*, para fazer face a situações de emergência, na entrada de água, de válvulas de retenção à saída das bombas, e de medidores de caudal nas tubagens de saída de água, tanto para a distribuição local como para a conduta elevatória.

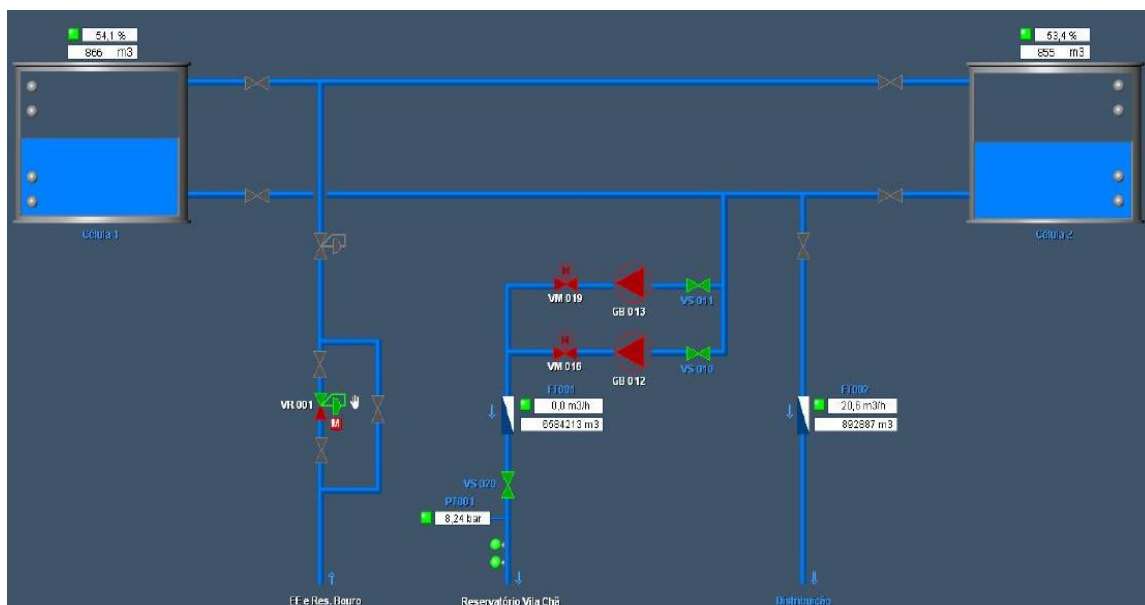


Fig.4.3 – Esquema sinótico da E.E. de São Lourenço

4.2.2. RESERVATÓRIO DE VILA CHÃ

O reservatório de Vila Chã, também localizado no concelho de Esposende, é constituído por duas células com seção circular de betão armado com volume de 800 m³ cada (Fig. 4.4), sendo a cota da soleira 246,3 m e o nível de pleno armazenamento 251,0 m. Subtraindo à cota da soleira do reservatório a cota de implantação da estação elevatória obtém-se a o desnível geométrico de valor 86,4 m.



Fig.4.4 – Exterior do reservatório de Vila Chã

A água chega a este reservatório vinda da estação elevatória de São Lourenço, é armazenada nas células deste, e daqui vai por gravidade para a distribuição local e também para o reservatório do Fragoso. Tal como acontece na estação elevatória de São Lourenço, também a câmara de manobras deste reservatório está munida com válvula redutora de pressão e *bypass* na entrada de água, medidores de caudal nas tubagens de saída para a distribuição local e para a adutora gravítica que conduz a água até ao reservatório do Fragoso, como se pode observar na figura 4.5, bem como medidores do nível de água nas células do reservatório.

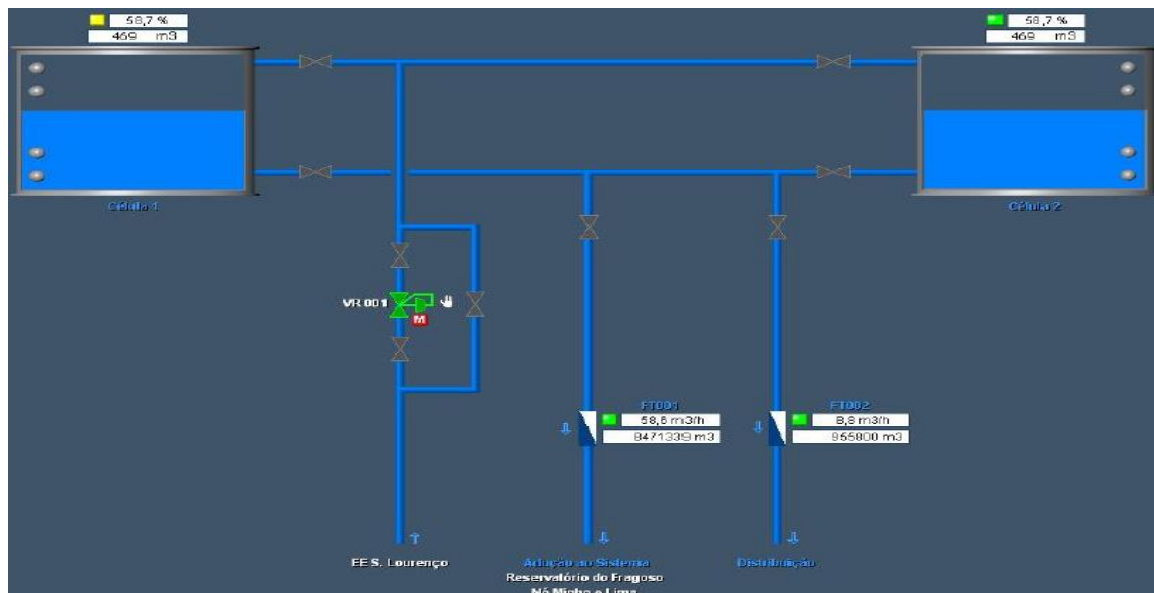


Fig.4.5 – Esquema sinótico do reservatório de Vila Chã

4.3. FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE BOMBAGEM

O funcionamento do sistema de bombagem, constituído pela estação elevatória de São Lourenço e pelo reservatório de Vila Chã, pode ser caracterizado por uma série de dados temporais, nomeadamente, caudais bombados, caudais cedidos pelo reservatório, consumo de energia e níveis de água nas células do reservatório.

Dos dados fornecidos pela empresa Águas do Noroeste foram selecionados os dados correspondentes a um ano civil, desde o dia 1 Janeiro de 2014 às 00:00h até ao dia 31 de Dezembro de 2014 às 23:55h. Para o desenvolvimento desta dissertação foi necessário analisar e proceder ao tratamento adequado dos dados fornecidos.

4.3.1. CAUDAIS BOMBADOS PELA ESTAÇÃO ELEVATÓRIA E CAUDAIS CEDIDOS PELO RESERVATÓRIO

4.3.1.1. Caudais instantâneos

Um dos dados fornecidos pela Águas do Noroeste foi o registo dos caudais instantâneos, bombados pela estação elevatória de São Lourenço e cedidos pelo reservatório de Vila Chã, através de amostragens de 5 em 5 minutos, todos os dias sem exceção.

A título de exemplo, apresentam-se na tabela 4.1 os caudais instantâneos registados no dia 1 de Maio, das 00:00h às 01:00h. Estes caudais são valores instantâneos, registados pelos medidores de caudal instalados nas tubagens, indexados ao instante temporal indicado.

Tabela 4.1 – Caudais instantâneos, bombados pela EE S. Lourenço e cedidos pelo reservatório de Vila Chã

Data (dd/mm/aaaa)	Hora (hh:mm:ss)	Q _{bombado} EE S.Lourenço (m ³ /h)	Q _{saída dist.local} Reser.Vila Chã (m ³ /h)	Q _{saída adução} Reserv. Vila Chã (m ³ /h)
01/05/2014	00:00:00	260,02	5,13	63,70
01/05/2014	00:05:00	259,92	5,65	62,15
01/05/2014	00:10:00	259,64	5,15	62,14
01/05/2014	00:15:00	259,61	4,76	61,06
01/05/2014	00:20:00	258,99	4,38	60,13
01/05/2014	00:25:00	259,11	5,09	58,47
01/05/2014	00:30:00	259,85	5,22	59,18
01/05/2014	00:35:00	259,79	4,14	57,19
01/05/2014	00:40:00	259,99	4,12	56,60
01/05/2014	00:45:00	259,47	4,10	57,34
01/05/2014	00:50:00	260,15	4,11	56,63
01/05/2014	00:55:00	259,48	3,86	56,76
01/05/2014	01:00:00	260,01	4,30	57,06

No exemplo da tabela 4.1 pode-se observar que, neste intervalo de tempo, o processo de bombagem estava a decorrer com um caudal de bombagem da ordem dos 260 m³/h. Quanto aos caudais cedidos pelo reservatório, verifica-se um caudal entre 3,86 m³/h e 5,65 m³/h para a distribuição local e um caudal entre os 56,60 m³/h e os 63,70 m³/h de saída para a adução.

Na figura 4.6 representam-se os caudais instantâneos cedidos pelo reservatório de Vila Chã, obtidos da soma dos caudais de saída para a adução e de saída para a distribuição local, registados ao longo do dia 1 de Maio, onde se observa, que o pico de consumo se verifica entre as 11:00h e as 12:00h, e que o período de menor consumo se verifica de madrugada.

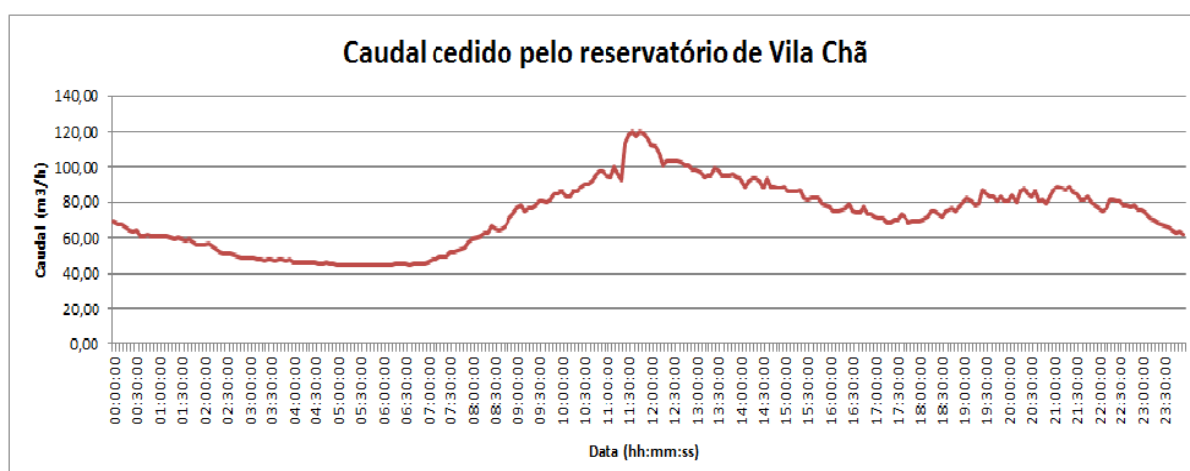


Fig.4.6 – Caudal cedido pelo reservatório de Vila Chã no dia 1 de Maio de 2014

De forma semelhante, e para o mesmo período de tempo, apresenta-se na figura 4.7 os caudais instantâneos bombados pela EE S. Lourenço. Verifica-se que neste dia o processo de bombagem ocorreu em dois períodos, das 00:00h às 04:15h e das 15:15h às 19:40h, totalizando um tempo de bombagem de 8 horas e 40 min. Uma análise do registo em todo o período estudado permite concluir que o tempo de bombagem médio diário é de 5,08 horas. Observando a figura 4.7, nomeadamente o segundo período de bombagem neste dia, constata-se que no processo de arranque das bombas o caudal só estabiliza no ponto de funcionamento cerca de meia hora depois do arranque e que os caudais nesse intervalo de tempo são superiores ao caudal médio bombado.

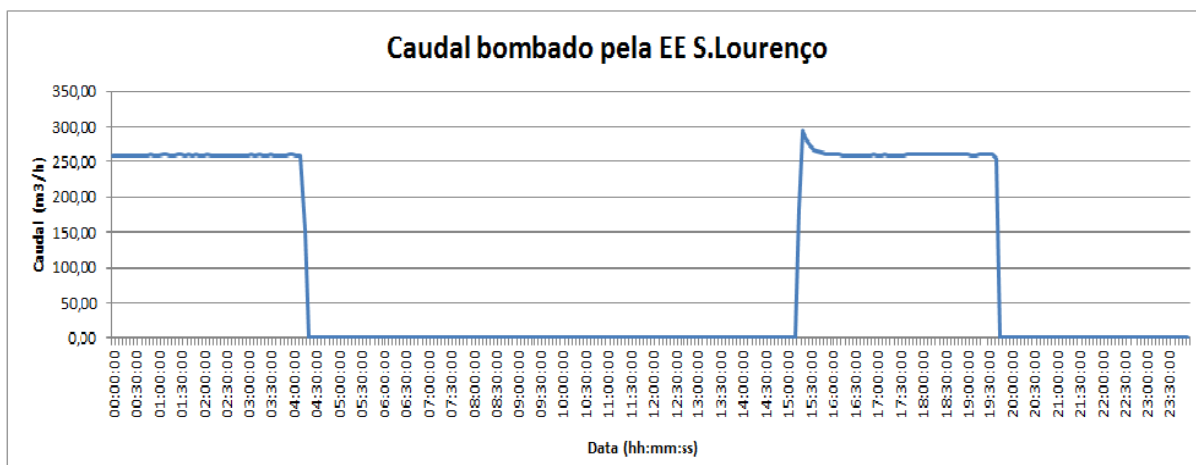


Fig.4.7 – Caudal bombado pela EE S. Lourenço no dia 1 de Maio de 2014

4.3.1.2. Ponto de funcionamento

Como foi referido em 4.2.1 o ponto de funcionamento teórico das bombas é (89,7l/s; 99,75m), sendo que 89,7 l/s equivale a 322,92 m³/h, mas na realidade verifica-se que o caudal de bombagem é substancialmente inferior, a rondar os 260m³/h, como se pode constatar observando a figura 4.7, e portanto o ponto de funcionamento real será bem diferente do teórico. Relativamente aos valores teóricos, o caudal bombado é inferior e a altura manométrica correspondente será superior.

Sabendo que o ponto de funcionamento do sistema de bombagem se situa, obrigatoriamente, num ponto da curva caraterística da bomba (Fig. 4.2), e conhecendo o caudal efetivamente bombado, pode-se obter o ponto de funcionamento real a partir desta. Portanto, assumindo um caudal de bombagem de 260 m³/h, obtém-se da figura 4.2 a correspondente altura de elevação, ou manométrica, de 110 m. Para este ponto de funcionamento, o rendimento dos grupos electrobomba é ligeiramente menor, com um valor de 66,5%. No seguimento desta dissertação utilizar-se-á, nos cálculos a efetuar, este ponto de funcionamento calculado (260 m³/h, 110 m).

4.3.1.3. Preenchimento de falhas nos registos

Na tabela 4.2 apresenta-se um exemplo de um período de tempo, 28 de Junho das 09:35h às 10:05h, em que o registo de caudais fornecidos pela Águas do Noroeste contém valores indisponíveis, representados na tabela por n/a (do inglês *non available*). Ao longo do período escolhido para análise, esta situação verifica-se em intervalos de tempo que vão dos 20 min até quase 2 dias.

Tabela 4.2 – Período de tempo com falha de registo de caudais instantâneos

Data (dd/mm/aaaa)	Hora (hh:mm:ss)	Q _{bombado} EE S.Lourenço (m ³ /h)	Q _{saída dist.local} Reser.Vila Chã (m ³ /h)	Q _{saída adução} Reserv. Vila Chã (m ³ /h)
28/06/2014	09:35:00	0,00	n/a	n/a
28/06/2014	09:40:00	0,00	n/a	n/a
28/06/2014	09:45:00	0,00	n/a	n/a
28/06/2014	09:50:00	0,00	n/a	n/a
28/06/2014	09:55:00	0,00	n/a	n/a
28/06/2014	10:00:00	0,00	n/a	n/a
28/06/2014	10:05:00	0,00	n/a	n/a

De modo a obter um registo contínuo de dados há que proceder ao preenchimento destas falhas. O método utilizado neste trabalho para obter os valores em falta foi o método das médias ponderadas.

Designando por t o período de tempo em que existe uma falha nos registos num determinado mês X , por $\overline{Q_x}$ a média dos caudais registados nesse mês, por $\overline{Q_y}$ a média dos caudais registados num mês Y (imediatamente anterior ou posterior ao mês X) e por t' o período homólogo a t para o mês Y , obteve-se uma estimativa dos caudais instantâneos no período t , Q_t , em função dos caudais instantâneos no período t' , $Q_{t'}$, utilizando a expressão (4.1.):

$$Q_t = Q_{t'} \times \frac{\overline{Q_x}}{\overline{Q_y}} \quad (4.1.)$$

Na tabela 4.3 apresenta-se um exemplo dos valores de caudais instantâneos, após preenchimento por este método, para o período correspondente ao da tabela 4.2.

Tabela 4.3 – Período de tempo com falha de registo de caudais após preenchimento

Data (dd/mm/aaaa)	Hora (hh:mm:ss)	Q _{bombado} EE S.Lourenço (m ³ /h)	Q _{saída dist.local} Reser.Vila Chã (m ³ /h)	Q _{saída adução} Reserv. Vila Chã (m ³ /h)
28/06/2014	09:35:00	0,00	9,63	43,78
28/06/2014	09:40:00	0,00	9,64	43,03
28/06/2014	09:45:00	0,00	9,33	42,57
28/06/2014	09:50:00	0,00	9,47	41,14
28/06/2014	09:55:00	0,00	8,67	42,74
28/06/2014	10:00:00	0,00	8,75	41,94
28/06/2014	10:05:00	0,00	11,05	40,35

Assumindo que os padrões de consumo são semelhantes em meses seguidos, obtém-se, recorrendo a este método, uma estimativa consistente dos valores dos caudais instantâneos em falta.

Efetuada o tratamento dos dados de caudais instantâneos fornecidos, nomeadamente o preenchimento das falhas nos registos, foi possível representar graficamente os caudais ao longo de todo o ano em análise (Fig.A1 e A2 em anexo).

Analisando os registos conclui-se que o maior caudal cedido pelo reservatório de Vila Chã se verificou no dia 19 de Abril de 2014 com um valor de 364,28 m³/h, e o menor caudal registou-se no dia 6 de Março com um valor de 0,01 m³/h. Observando a figura A1 pode-se constatar que no mês de Maio, na segunda quinzena de Abril e na primeira quinzena de Junho, o caudal médio cedido pelo reservatório foi superior ao caudal médio nos restantes períodos do ano.

Observando a figura A2 verifica-se que os caudais instantâneos bombados pela EE S. Lourenço se situam entre os 250 m³/h e os 310 m³/h, mas como foi possível aferir dos registos de caudais fornecidos pela Águas do Noroeste o caudal médio bombado é de 256,3 m³/h, sendo que os valores mais elevados se verificam no arranque das bombas, como foi anteriormente referido.

4.3.2. VOLUMES BOMBADOS PELA ESTAÇÃO ELEVATÓRIA E VOLUMES CEDIDOS PELO RESERVATÓRIO

Partindo dos valores de caudal instantâneo fornecidos em intervalos de 5 minutos, pode-se obter os volumes, bombado e cedido, em cada intervalo, multiplicando esses valores pelo tempo de bombagem:

$$Volume = Q \times t_{\text{bombagem}} \quad (4.2.)$$

Procedendo desta forma, assumiu-se que o valor de caudal registado, que como foi referido é um valor instantâneo, representa a média do intervalo ao qual está associado.

A partir do momento em que o caudal estabiliza no ponto de funcionamento, as variações de caudal são muito pequenas, e portanto, os caudais instantâneos registados são idênticos aos valores médios dos intervalos. Sendo assim, os volumes calculados após a estabilização do caudal no arranque das bombas, serão muito próximos dos valores reais.

Por outro lado, os valores instantâneos registados no intervalo de cerca de meia hora após o arranque das bombas, são ligeiramente diferentes do valor médio no intervalo associado, já que a variação de caudal é mais acentuada, e portanto, os volumes calculados com os valores instantâneos podem diferir um pouco dos valores reais.

O registo de caudais cedidos pelo reservatório é contínuo, e as variações de caudal em intervalos de 5 minutos também são pequenas, e portanto a suposição de que os valores instantâneos são representativos dos valores médios dos intervalos é pertinente, conduzindo assim a valores de volume próximos dos reais.

Assim sendo, apresenta-se na tabela 4.4 um exemplo dos volumes calculados para os intervalos de 5 minutos para o mesmo período de tempo exemplificado na tabela 4.1.

Fazendo o somatório dos volumes calculados mensalmente obteve-se a distribuição de volumes bombados e cedidos que se apresentam na figura 4.8.

Tabela 4.4 – Cálculo do volume bombado e do volume cedido

Data (dd/mm/aaaa)	Hora (hh:mm:ss)	Q _{bombado} (m ³ /h)	Q _{cedido} (m ³ /h)	V _{bombado} (m ³)	V _{cedido} (m ³)
01/05/2014	00:00:00	260,02	68,83	21,67	5,74
01/05/2014	00:05:00	259,92	67,80	21,66	5,65
01/05/2014	00:10:00	259,64	67,29	21,64	5,61
01/05/2014	00:15:00	259,61	65,82	21,63	5,48
01/05/2014	00:20:00	258,99	64,51	21,58	5,38
01/05/2014	00:25:00	259,11	63,55	21,59	5,30
01/05/2014	00:30:00	259,85	64,41	21,65	5,37
01/05/2014	00:35:00	259,79	61,33	21,65	5,11
01/05/2014	00:40:00	259,99	60,72	21,67	5,06
01/05/2014	00:45:00	259,47	61,44	21,62	5,12
01/05/2014	00:50:00	260,15	60,73	21,68	5,06
01/05/2014	00:55:00	259,48	60,61	21,62	5,05
01/05/2014	01:00:00	260,01	61,37	21,67	5,11

Uma análise desta figura permite concluir que os volumes mensais bombados pela EE S. Lourenço e cedidos pelo reservatório de Vila Chã são semelhantes, e portanto, pode-se afirmar que existe uma regularização mensal dos caudais.

Em correspondência com o gráfico A1, que representa os caudais cedidos ao longo do ano e que se apresenta em anexo, pode-se verificar na figura 4.8 que os maiores volumes correspondem aos maiores caudais médios. Como tal, é no mês de Maio que se verificam os maiores volumes bombados e cedidos.

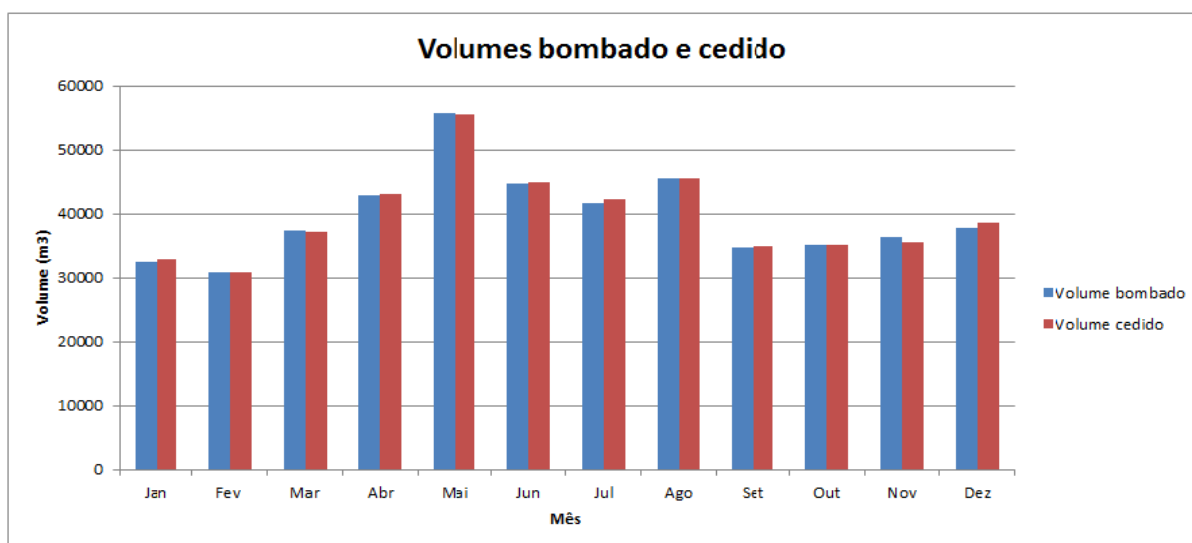


Fig.4.8 – Volumes mensais bombados pela EE S. Lourenço e cedidos pelo reservatório de Vila Chã

Obtiveram-se totais de 475279 m³ de volume anual bombado pela EE de S. Lourenço e 476940 m³ de volume anual cedido pelo reservatório de Vila Chã, resultando numa diferença de 1661 m³.

4.3.3. ENERGIA CONSUMIDA

4.3.3.1. Estrutura de preços da energia elétrica

O contrato de fornecimento de energia elétrica na EE S. Lourenço é realizado em média tensão, cuja tarifa se pratica em longas utilizações com um ciclo diário tetra-horário, havendo distinção entre dias de semana, Sábados e Domingos.

Sendo assim, a tarifa de energia é constituída por quatro períodos horários de energia definidos ao longo do dia:

- Horas de ponta;
- Horas de cheia;
- Horas de vazio normal;
- Horas de super vazio.

Para além desta divisão diária, existe a distinção entre o horário de Inverno, que decorre entre o dia 1 de Outubro e o dia 31 de Março, e o horário de Verão, que se desenrola entre o dia 1 de Abril e o dia 30 de Setembro.

Horas de ponta

O período de horas de ponta apresenta o valor mais elevado do preço de energia eléctrica ao longo do dia, 0,1089 €/kW.h. Este período aplica-se a todos os dias da semana, com exceção de Sábados, Domingos e feriados. Sendo o período em que o preço da energia eléctrica é maior, deve evitar-se, ou pelo menos minimizar, a bombagem durante este intervalo de tempo. Os intervalos de tempo em que se verificam horas de ponta são:

- Período semanal Inverno: das 09:30h às 12:00h e das 18:30h às 21:00h;
- Período semanal Verão: das 09:15h às 12:15h.

Horas de cheia

O período de horas de cheia corresponde ao segundo valor mais elevado de preço de energia eléctrica ao longo do dia, 0,0974 €/kW.h. Este período energético abrange também os Sábados, e, apesar de não ser o intervalo de tempo com o preço mais elevado, apresenta um preço por kW.h bem superior ao períodos de vazio normal e super vazio, e portanto, deve também evitar-se o accionamento das bombas neste período. As horas de cheia verificam-se nos seguintes intervalos de tempo:

- Período semanal Inverno: das 07:00h às 09:30h, das 12:00h às 18:30h e das 21:00h às 24:00h;
- Sábado Inverno: das 09:30h às 13:00h e das 18:30h às 22:00h;
- Período semanal Verão: das 07:00h às 09:15h e das 12:15h às 24:00h;
- Sábado Verão: das 09:00h às 14:00h e das 20:00h às 22:00h.

Horas de vazio normal

A este período corresponde o terceiro valor mais elevado do preço por kW.h, 0,0697 €/kW.h. Ao contrário dos períodos energéticos anteriores, este abrange, para além dos dias de semana, os Sábados e Domingos. O preço da energia eléctrica neste período é substancialmente inferior ao dos períodos referidos anteriormente, e portanto, será conveniente efetuar bombagem neste período. Os intervalos de tempo correspondentes a este período são os seguintes:

- Período semanal Inverno: das 00:00h às 02:00h e das 06:00h às 07:00h;
- Sábado Inverno: das 00:00h às 02:00h, das 06:30h às 09:30h, das 13:00h às 18:30h e das 22:00h às 24:00h;
- Período semanal Verão: das 00:00h às 02:00h e das 06:00h às 07:00h;
- Sábado Verão: das 00:00h às 02:00h, das 06:00h às 09:00h, das 14:00h às 20:00h e das 22:00h às 24:00h;
- Domingo: das 00:00h às 02:00h e das 06:00h às 24:00h.

Horas de super vazio

O período de horas de super vazio apresenta o valor de preço de energia eléctrica mais baixo dos quatro períodos diários, 0,0587 €/kW.h. Tal como o período de horas de vazio normal, abrange também todos os dias da semana, Sábados e Domingos. Consequentemente, tendo em vista a optimização energética, os grupos electrobomba devem bombear sempre durante este período, a não ser que o reservatório de jusante esteja cheio. Este período energético ocorre no mesmo intervalo de tempo todos os dias, quer no Inverno quer no Verão, como seguidamente se explicita:

- Período semanal Inverno: das 02:00h às 06:00h;
- Sábado Inverno: das 02:00h às 06:00h;
- Período semanal Verão: das 02:00h às 06:00h;
- Sábado Verão: das 02:00h às 06:00h;
- Domingo: das 02:00h às 06:00h.

Seguidamente, apresenta-se nas figuras 4.9 e 4.10, a variação do preço de energia eléctrica, segundo os períodos acima referidos, para um dia de semana no Verão e um Sábado no Inverno. Esta representação gráfica da variação do preço permite imediatamente identificar quais os horários mais favoráveis e aqueles a evitar para o processo de bombagem.

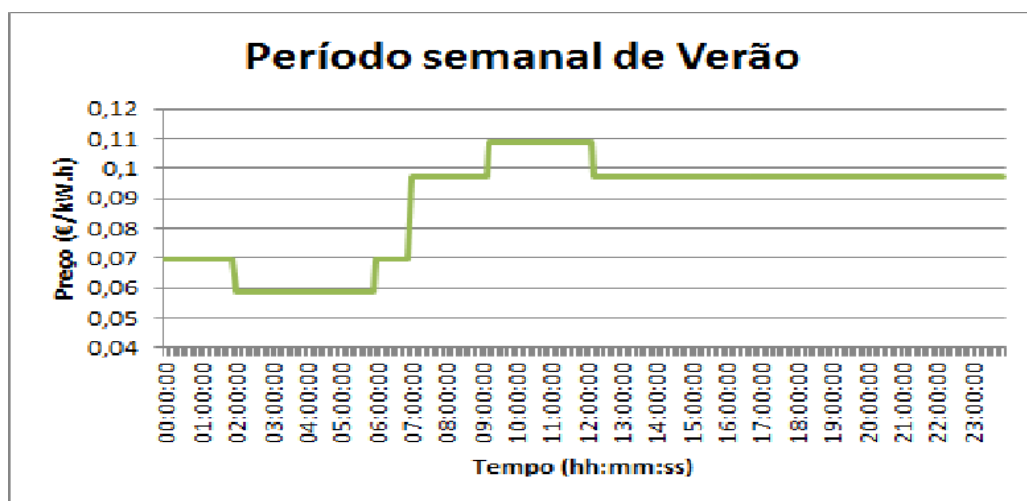


Fig.4.9 – Variação do preço da energia eléctrica no período semanal de Verão

Observando a figura 4.9, rapidamente se verifica que no período semanal de Verão se deve procurar um regime de bombagem que inclua o período das 00:00h até às 07:00h, e que evite o período de horas de ponta, das 09:15h às 12:15h.

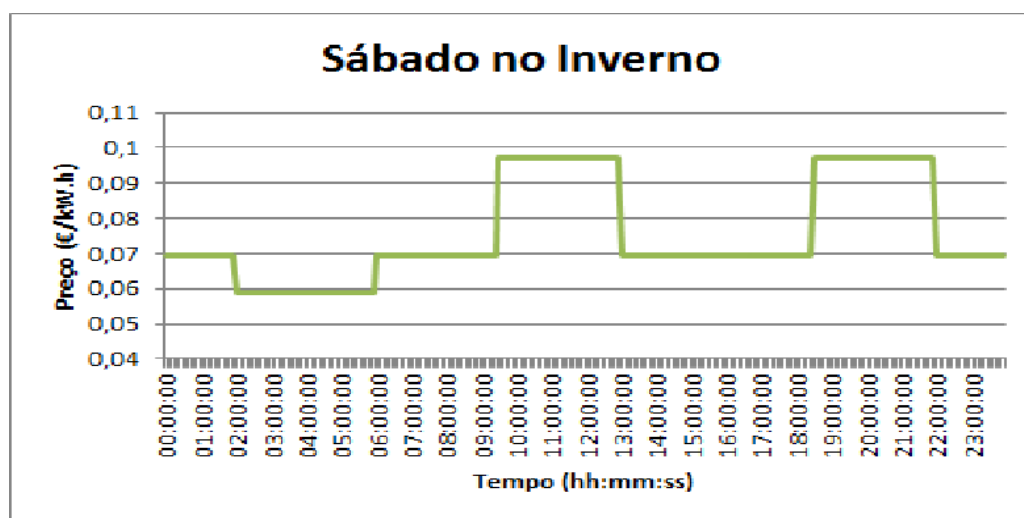


Fig.4.10 – Variação do preço da energia eléctrica ao Sábado no Inverno

Analogamente, analisando a figura 4.10, pode-se concluir que aos Sábados no período de Inverno deve, essencialmente, evitar-se bombear nas horas de cheia, isto é, das 09:30h às 13:00h e das 18:30h às 22:00h.

4.3.3.2. Consumo de energia registado

A empresa Águas do Noroeste disponibilizou também dados relativos ao consumo energético na EE S. Lourenço no período em estudo.

Na tabela 4.5 apresentam-se os valores de energia ativa, separados mensalmente e com os valores correspondentes aos períodos de ponta, de cheia, de vazio normal e super vazio discriminados.

Tabela 4.5 – Energia ativa registada pela Águas do Noroeste na EE S. Lourenço

Mês	Energia Ponta (kW.h)	Energia Cheia (kW.h)	Energia Vazio Normal (kW.h)	Energia Super Vazio (kW.h)	Energia total mensal (kW.h)
Janeiro	229	1220	6869	4842	13160
Fevereiro	79	902	7151	4241	12373
Março	76	978	8081	5743	14878
Abril	44	1878	8097	7017	17036
Maio	64	5446	9914	6445	21869
Junho	46	2913	7470	6765	17194
Julho	53	2234	7238	7039	16564
Agosto	45	2712	8382	7014	18153

Setembro	179	741	5962	7064	13946
Outubro	73	486	7319	6364	14242
Novembro	86	591	7867	6136	14680
Dezembro	88	871	7654	6130	14743
Total	1062	20972	92004	74800	188838

Uma análise do quadro 4.5 permite apurar que a maior fatia de consumo energético está associada aos intervalos de tempo de horas de vazio normal. Como se pode ver pelos valores totais associados a cada período energético, o processo de bombagem é efetuado, na sua maioria, nas horas de vazio normal e de super vazio, que são os intervalos de tempo em que o preço energético é menor. Ainda assim, verifica-se uma importante percentagem de consumo associado às horas de cheia.

Constata-se também que os maiores consumos de energia se verificam no período de Verão, de Abril até Setembro, obviamente devido aos maiores consumos de água por parte das populações e, portanto, maior necessidade de bombear água para o reservatório de Vila Chã. O consumo de energia ativa registada, totaliza 188838 kW.h para o ano de 2014.

4.3.3.3. Consumo de energia calculado

Partindo dos registos dos caudais bombados e utilizando as equações (2.7.) e (2.8.) foi possível calcular a potência, e a respectiva energia consumida, para todos os intervalos de 5 minutos registados. Tal como nos cálculos dos volumes, expostos em 4.3.2, também aqui se assume que o valor instantâneo do caudal registado representa o valor médio do intervalo. Multiplicando o valor da energia consumida pelo custo unitário da energia, correspondente a um dos quatro períodos energéticos referidos, obtém-se o custo da energia no intervalo considerado. Na tabela 4.6 apresenta-se os valores de energia ativa consumida e custos calculados a partir do registo de caudais bombados, e, analogamente à tabela 4.5, separados mensalmente e por períodos energéticos.

Tabela 4.6 – Energia ativa e custos mensais calculados a partir dos caudais bombados

Mês	Energia Ponta (kW.h)	Energia Cheia (kW.h)	Energia Vazio Normal (kW.h)	Energia Super Vazio (kW.h)	Energia total mensal (kW.h)	Custo mensal (€)
Janeiro	147	816	6546	5218	12727	857,98
Fevereiro	1	477	6917	4675	12071	803,20
Março	1	613	7820	6176	14610	967,37
Abril	0	2240	7315	7259	16814	1154,14
Maio	18	5730	9461	6659	21866	1610,24
Junho	0	3581	6946	7027	17553	1245,35
Julho	0	2007	7125	7177	16309	1113,41
Agosto	0	2902	7726	7179	17807	1242,53

Setembro	128	521	5694	7261	13604	887,77
Outubro	8	528	6711	6521	13768	902,82
Novembro	0	383	7561	6311	14255	934,78
Dezembro	147	1400	6883	6415	14845	1008,62
Total	450	21198	86705	77878	186229	12728,21

Analisando os resultados obtidos que constam na tabela 4.6 verifica-se, tal como sucede nos consumos registados pela empresa expostos na tabela 4.5, que os maiores consumos energéticos acontecem no período de Verão. O valor de energia ativa calculada totaliza um valor de 186229 kW.h no ano em estudo.

Em relação aos consumos em cada período energético, também nos valores calculados se verifica que os maiores consumos de energia ativa acontecem no período de horas de vazio normal, seguido do período de horas de super vazio. Os consumos em horas de cheia apresentam um valor significativo e os valores de consumo nas horas de ponta apresentam um valor residual.

4.3.3.4. Comparação dos consumos energéticos registados e calculados

Seguidamente, comparam-se os valores de consumo de energia ativa registados pela empresa Águas do Noroeste, com os valores desta grandeza calculados a partir dos registos fornecidos de caudais bombados. Na figura 4.11 apresenta-se a comparação, por via gráfica, dos valores calculados e registados de energia ativa, separados mensalmente.

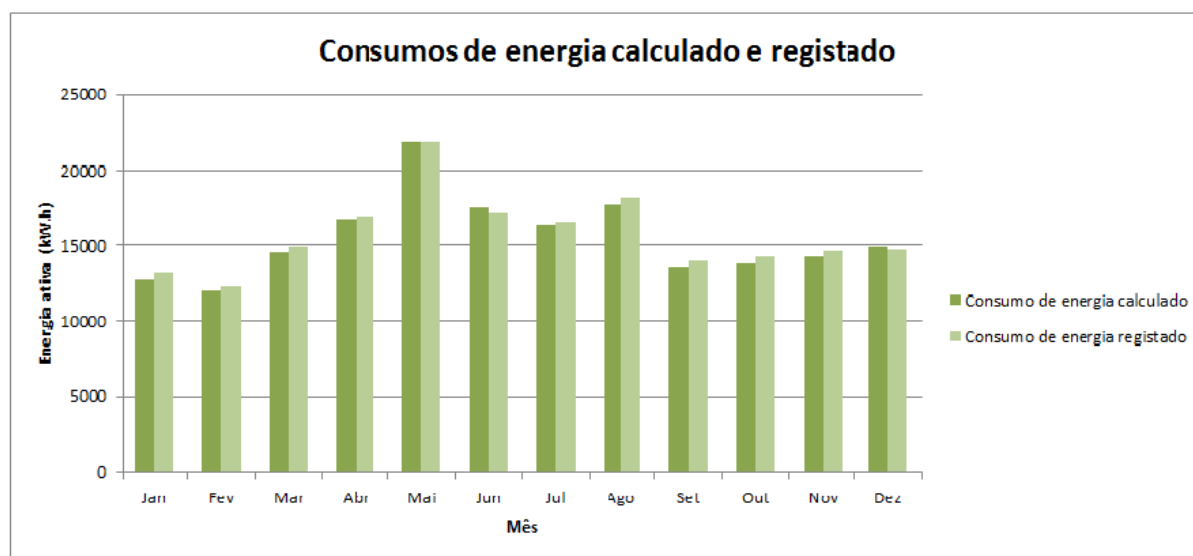


Fig.4.11 – Comparação do consumo mensal de energia, calculado e registado, na EE S. Lourenço

Como é possível constatar através da observação da figura 4.11, a diferença entre o consumo de energia registado e consumo de energia calculado apresenta diferenças muito pequenas todos os meses do ano.

Na tabela 4.7 estão representadas as diferenças entre a energia registada e a energia calculada para cada mês do ano. Verificam-se diferenças que variam entre os 3 e os 474 kW.h, nos meses de Maio e Outubro respetivamente.

Tabela 4.7 – Diferença entre a energia ativa registada e a energia ativa calculada

Mês	Energia registada (kW.h)	Energia calculada (kW.h)	Diferença (kW.h)
Janeiro	13160	12727	433
Fevereiro	12373	12071	302
Março	14878	14610	268
Abril	17036	16814	222
Maio	21869	21866	3
Junho	17194	17553	-359
Julho	16564	16309	255
Agosto	18153	17807	346
Setembro	13946	13604	342
Outubro	14242	13768	474
Novembro	14680	14255	425
Dezembro	14743	14845	-102

Com diferenças tão pequenas entre os valores registados e os valores calculados pode-se afirmar que as suposições relativas aos caudais instantâneos e caudais médios nos intervalos, expostas em 4.3.2, são válidas, isto é, considerando o valor instantâneo registado como um valor médio do intervalo, obtêm-se valores muito próximos dos valores reais registados.

4.3.4. VOLUME DE ÁGUA ARMAZENADA

4.3.4.1. Nível de água nas células do reservatório

Outro dos dados fornecidos pela empresa Águas do Noroeste foi o nível de água nas células do reservatório de Vila Chã ao longo do ano em estudo, fornecido também na forma de um registo em intervalos de 5 minutos e expresso em percentagem da altura útil do reservatório.

Partindo do mesmo exemplo diário e horário, utilizado nas tabelas 4.1 e 4.4, apresentam-se na tabela 4.8 os níveis de água no reservatório.

Numa primeira análise da tabela 4.8 verifica-se que a água é distribuída igualmente pelas duas células, e isto acontece todos os dias do ano sem exceção. Neste período escolhido como exemplo, o nível de água no reservatório sobe dos 47,4% até aos 58,9 %, isto é, o reservatório está a encher, situação que seria expectável uma vez que a estação elevatória de S. Lourenço está a bombear água, como se pode constatar na tabela 4.1.

Tabela 4.8 – Nível de água nas células do reservatório de Vila Chã

Data (dd/mm/aaaa)	Hora (hh:mm:ss)	Nível Célula 1 (%)	Nível Célula 2 (%)
01/05/2014	00:00:00	47,4	47,4
01/05/2014	00:05:00	48,3	48,3
01/05/2014	00:10:00	49,3	49,3
01/05/2014	00:15:00	50,2	50,2
01/05/2014	00:20:00	51,2	51,2
01/05/2014	00:25:00	52,1	52,1
01/05/2014	00:30:00	53,1	53,1
01/05/2014	00:35:00	54,0	54,0
01/05/2014	00:40:00	55,0	55,0
01/05/2014	00:45:00	56,0	56,0
01/05/2014	00:50:00	56,9	56,9
01/05/2014	00:55:00	57,9	57,9
01/05/2014	01:00:00	58,9	58,9

Na figura 4.12 está representado o nível de água no reservatório de Vila Chã ao longo do dia 1 de Maio, onde se pode verificar que este enche em dois períodos ao longo do dia, por volta das 4:00h e das 20:00h, que corresponde ao fim dos períodos de bombagem nesse mesmo dia. Por outro lado os níveis mínimos nesse dia, cerca de 50%, verificam-se às 00:00h e por volta das 15:30h.

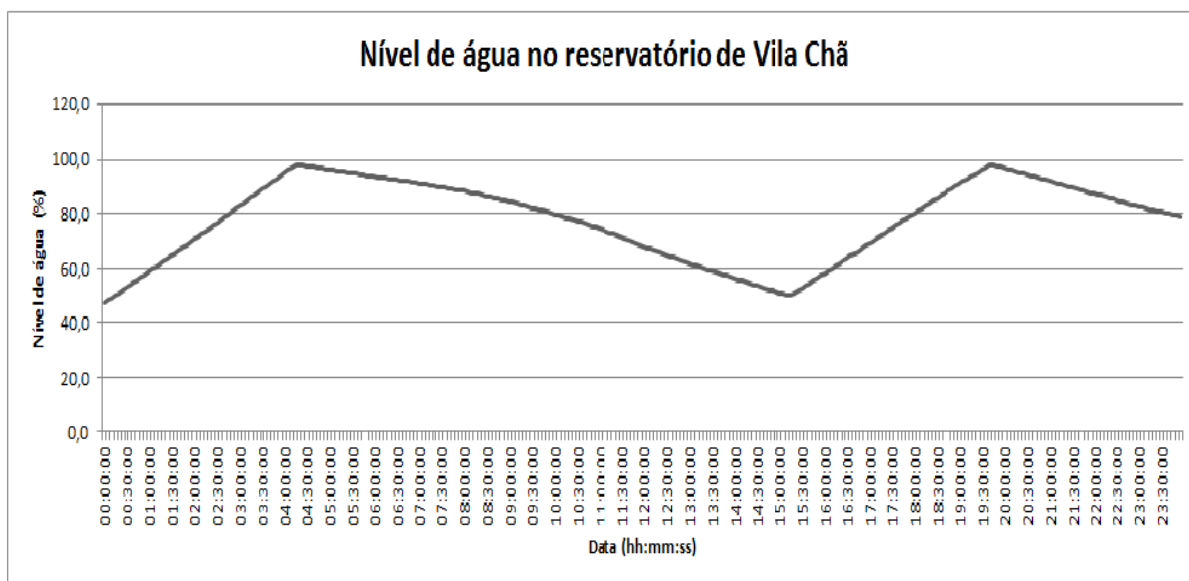


Fig.4.12 – Nível de água no reservatório de Vila Chã ao longo do dia 1 de Maio 2014

4.3.4.2. Preenchimento de falhas nos registos

Tal como acontece com o registo de caudais instantâneos, também o registo do nível de água no reservatório apresenta alguns períodos de tempo em que os valores estão indisponíveis. Na tabela 4.9 apresenta-se um exemplo de um período de 30 minutos em que o registo apresenta uma falha. Como se pode verificar pelos valores anteriores e posteriores aos valores indisponíveis o reservatório estava a esvaziar.

Tabela 4.9 – Falha no registo do nível de água nas células do reservatório de Vila Chã

Data (dd/mm/aaaa)	Hora (hh:mm:ss)	Nível Célula 1 (%)	Nível Célula 2 (%)
30/06/2014	16:15:00	48,9	48,9
30/06/2014	16:20:00	48,7	48,7
30/06/2014	16:25:00	48,5	48,5
30/06/2014	16:30:00	n/a	n/a
30/06/2014	16:35:00	n/a	n/a
30/06/2014	16:40:00	n/a	n/a
30/06/2014	16:45:00	n/a	n/a
30/06/2014	16:50:00	n/a	n/a
30/06/2014	16:55:00	n/a	n/a
30/06/2014	17:00:00	47,0	47,0
30/06/2014	17:05:00	46,8	46,8
30/06/2014	17:10:00	46,6	46,6

A utilização do método das médias ponderadas, como foi feito para o registo de caudais, conduziria, por vezes, a resultados absurdos e não coerentes com os valores disponíveis. Isto deve-se ao fato de a variação do nível de água no reservatório poder não apresentar comportamento semelhante em períodos homólogos de dias ou meses distintos como acontece com os caudais, que devido aos padrões de consumo serem semelhantes em dias diferentes apresentam variações similares.

Sendo assim, de modo a proceder ao preenchimento dos valores em falta e obter um registo contínuo, assumiu-se uma variação linear do nível de água entre os instantes adjacentes, anterior e posterior, da falha. Para tal, bastou utilizar a equação de uma reta (4.3.), e utilizando os pontos referidos para calcular os coeficientes a e b . Conhecidos estes valores obtém-se o nível de água na célula, Y , substituindo o valor de X , que é o número atribuído a cada instante temporal:

$$Y = a.X + b \quad (4.3.)$$

Apresenta-se, então, na tabela 4.10 o preenchimento, através deste método, da falha no registo representada na tabela 4.9.

Tabela 4.10 – Período de tempo com falha de registo do nível de água após preenchimento

Data (dd/mm/aaaa)	Hora (hh:mm:ss)	Nível Célula 1 (%)	Nível Célula 2 (%)
30/06/2014	16:15:00	48,9	48,9
30/06/2014	16:20:00	48,7	48,7
30/06/2014	16:25:00	48,5	48,5
30/06/2014	16:30:00	48,3	48,3
30/06/2014	16:35:00	48,1	48,1
30/06/2014	16:40:00	47,9	47,9
30/06/2014	16:45:00	47,7	47,7
30/06/2014	16:50:00	47,5	47,5
30/06/2014	16:55:00	47,2	47,2
30/06/2014	17:00:00	47,0	47,0
30/06/2014	17:05:00	46,8	46,8
30/06/2014	17:10:00	46,6	46,6

Após o preenchimento de todas as falhas no registo do nível de água no reservatório de Vila Chã, foi possível representar graficamente estes valores ao longo de todo o ano de 2014, que se apresenta em anexo na figura A3. Observando essa figura verifica-se que a variação do nível de água é maior nos meses de Verão. De fato, só nestes meses foi solicitada a capacidade máxima do reservatório, com exceção de um dia no mês de Janeiro. Foi possível depreender que, salvo situações excepcionais, os limites de armazenamento estabelecidos para o reservatório de Vila Chã são de 30% e 98% do seu volume, respetivamente valor mínimo e máximo.

4.3.4.3. Volume armazenado

Sendo conhecida a capacidade do reservatório, 1600 m³ dividida em duas células de 800 m³, e conhecido o nível de água no mesmo, calculou-se o volume armazenado em cada instante temporal. Como a seção transversal do reservatório é constante ao longo da sua altura, a percentagem do nível de água é numericamente igual à percentagem de volume armazenado, e portanto, multiplicando essa percentagem pelo volume total do reservatório obtém-se o volume armazenado.

Na tabela 4.11 apresenta-se, a título de exemplo, o cálculo do volume armazenado para o mesmo período que tem sido utilizado como exemplo ao longo deste capítulo.

Tabela 4.11 – Volume armazenado no reservatório de Vila Chã

Data (dd/mm/aaaa)	Hora (hh:mm:ss)	Nível Células (%)	Volume armazenado (m ³)
01/05/2014	00:00:00	47,4	758

01/05/2014	00:05:00	48,3	773
01/05/2014	00:10:00	49,3	788
01/05/2014	00:15:00	50,2	804
01/05/2014	00:20:00	51,2	819
01/05/2014	00:25:00	52,1	834
01/05/2014	00:30:00	53,1	850
01/05/2014	00:35:00	54,0	865
01/05/2014	00:40:00	55,0	880
01/05/2014	00:45:00	56,0	895
01/05/2014	00:50:00	56,9	911
01/05/2014	00:55:00	57,9	926
01/05/2014	01:00:00	58,9	942

Sendo assim, são conhecidos os volumes armazenados no instante inicial e no instante final do ano em estudo, e a diferença entre estes dois valores é a diferença entre o volume anual bombado e volume anual cedido. O volume armazenado às 00:00h do dia 1 de Janeiro de 2014 era 1018 m³, e o volume armazenado às 24:00h do dia 31 de Dezembro de 2014 era 648 m³, e portanto, pode-se afirmar que o volume cedido foi superior ao volume bombado em 370 m³. Em 4.3.2. obteve-se uma diferença entre volume cedido e volume bombado de 1661 m³, perfazendo um erro de 1291 m³, em relação ao volume real, num total de volumes anuais a rondar os 477000 m³. Considera-se que este erro, inferior a 0,3%, é bastante aceitável para este tipo de cálculo e para o objetivo deste trabalho.

4.4. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO SISTEMA DE BOMBAGEM

Como foi mencionado em 3.2 os indicadores de eficiência energética devem ser calculados tendo por base dados reais de funcionamento do sistema. Com os dados fornecidos pela Águas do Noroeste, expostos anteriormente, foi possível calcular estes indicadores.

4.4.1. CONSUMO ESPECÍFICO

O indicador consumo específico (CE), ou energia específica, pôde ser determinado com base na energia consumida, e no cálculo do volume bombado, em todo o período analisado, utilizando a expressão (3.1.).

Na tabela 4.12 apresentam-se os valores utilizados no cálculo do valor de referência, anual, deste indicador e o seu valor.

Tabela 4.12 – Indicador CE

Energia consumida	Volume bombado	CE
186229 kW.h	475279 m ³	0,39 kW.h/m ³

Este indicador não tem um valor de referência, sendo mais indicado para comparar soluções de otimização para o mesmo sistema elevatório.

4.4.2. CONSUMO ESPECÍFICO NORMALIZADO

O indicador consumo específico normalizado (CEN) foi também determinado com base no total de energia consumida, e no volume total bombado, calculado, no ano em análise, mas também no valor da altura manométrica, que é o que diferencia este indicador do anterior, como se pode observar pela expressão (3.2.) utilizada no seu cálculo.

Na tabela 4.13 estão indicados os valores utilizados para o cálculo do valor de referência, anual, deste indicador e o seu valor.

Tabela 4.13 – Indicador CEN

Energia consumida	Volume bombado	Altura manométrica	CEN
186229 kW.h	475279 m ³	110 m	0,36 kW.h/m ³ .100

Comparando o valor obtido para este indicador com os valores de referência preconizados pela ERSAR, conclui-se que, segundo este indicador, a eficiência média deste sistema de bombagem é superior a 70% e portanto, a qualidade do serviço prestado é considerada como “boa”.

4.4.3. GREEN PUMP INDEX

Em relação ao indicador *Green Pump Index* (GPX), os parâmetros a utilizar no cálculo são a altura geométrica, o caudal médio de bombagem e a potência média solicitada pela bomba, e obtém-se através da expressão (3.3.). O valor deste indicador não varia ao longo dos meses, já que, a relação entre o caudal bombado médio e a potência média é constante. A tabela 4.14 contém os valores utilizados para determinar este indicador e o respetivo valor.

Tabela 4.14 – Indicador GPX

Q _{bombado} médio	Potência média	Altura geométrica	GPX
256,3 m ³ /h	100,4 kW	86,4 m	60,1

Segundo a escala de classificação deste indicador, um valor de 60,1 representa um sistema classificado como G5, o que corresponde a uma eficiência baixa, e portanto, um sistema em que é necessário implementar medidas de otimização energética.

5

METODOLOGIA DO ESTUDO

5.1. INTRODUÇÃO

Com o objetivo de estudar a influência da capacidade do reservatório de jusante nos custos de energia elétrica no processo de bombagem, utilizou-se a ferramenta *Solver* do *Microsoft Excel* para resolver um problema de otimização cujo objetivo é a minimização desses mesmos custos.

Sendo conhecidos os consumos a jusante do reservatório, o ponto de funcionamento das bombas (caudal de elevação e altura manométrica) e a estrutura de preços da energia elétrica ao longo do dia, é possível formular um problema em que, aplicando restrições ao volume máximo de bombagem (função do caudal de elevação) e à capacidade de armazenamento do reservatório, se calcula o volume ótimo de bombagem em cada hora.

Com este objetivo foram simulados diversos cenários, nos quais se alteram as condições de armazenamento no reservatório de Vila Chã, para dois períodos semanais, um no Verão e outro no Inverno. Aplicando o estudo a semanas inteiras é possível analisar as diferenças entre os dias de semana e os Sábados e Domingos.

A definição do problema de otimização utilizada nesta dissertação é baseada na solução proposta por Pacheco Figueiredo e Poças Martins [26].

5.2. PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO

O princípio base do algoritmo de otimização utilizado é a equação de balanço no reservatório de jusante. Esta equação estabelece o equilíbrio dos volumes, armazenado, bombado e cedido segundo a relação (5.1.), isto é, o volume final armazenado no reservatório, V_f , é igual ao volume inicial armazenado, V_i , adicionado do volume bombado e subtraído do volume cedido:

$$V_f = V_i + V_{\text{bombado}} - V_{\text{cedido}} \quad (5.1.)$$

O volume cedido foi calculado anteriormente a partir dos dados de caudais instantâneos fornecidos pela Águas do Noroeste e o volume inicial armazenado no reservatório, em qualquer instante escolhido, foi também determinado a partir dos níveis de água fornecidos. O volume bombado será a variável do problema de otimização, e o volume final armazenado será calculado recorrendo à equação (5.1.).

Como foi referido, o objetivo do problema é a minimização do custo com a energia elétrica, e portanto é necessário definir esse mesmo custo em função da variável do problema, o volume bombado. Dividindo o volume pelo tempo de bombagem obtém-se o caudal bombado, e com esse valor, aplicando a equação (2.7.) obtém-se a potência, que por sua vez multiplicada pelo tempo de bombagem dá a energia consumida. Simplificando, a aplicação da expressão (2.7.) utilizando o volume bombado, em vez do caudal bombado, resulta na energia consumida na elevação.

O custo resultante da elevação calcula-se multiplicando o valor da energia em cada intervalo de tempo considerado pelo custo unitário de energia nesse mesmo intervalo. O valor a minimizar é o somatório dos custos energéticos no período considerado.

Com o intuito de resolver este problema no programa Excel, organizou-se uma folha de cálculo como se apresenta na tabela 5.1 para um período de 12 horas do dia 1 de Maio de 2014.

Para a construção desta tabela foi necessário calcular os volumes cedidos acumulados por hora, atribuir os preços unitários da energia para cada hora e introduzir o volume armazenado no início do período analisado.

Tabela 5.1 – Algoritmo de otimização

Data	Hora	V _{bombado} (m ³)	V _{cedido} (m ³)	V _{armazenado} (m ³)	Potência (kW)	Energia (kW.h)	Tarifário (€/kW.h)	Custo (€)
01/05/2014	00:00:00	-	-	758,15	-	-	-	-
01/05/2014	01:00:00	[0;260]	63,92	(5.1.)	(2.7.)	(2.8.)	0,0697	E x Tarif
01/05/2014	02:00:00	[0;260]	59,16	(5.1.)	(2.7.)	(2.8.)	0,0697	E x Tarif
01/05/2014	03:00:00	[0;260]	52,06	(5.1.)	(2.7.)	(2.8.)	0,0587	E x Tarif
01/05/2014	04:00:00	[0;260]	47,77	(5.1.)	(2.7.)	(2.8.)	0,0587	E x Tarif
01/05/2014	05:00:00	[0;260]	46,01	(5.1.)	(2.7.)	(2.8.)	0,0587	E x Tarif
01/05/2014	06:00:00	[0;260]	44,75	(5.1.)	(2.7.)	(2.8.)	0,0587	E x Tarif
01/05/2014	07:00:00	[0;260]	45,10	(5.1.)	(2.7.)	(2.8.)	0,0697	E x Tarif
01/05/2014	08:00:00	[0;260]	51,04	(5.1.)	(2.7.)	(2.8.)	0,0974	E x Tarif
01/05/2014	09:00:00	[0;260]	64,64	(5.1.)	(2.7.)	(2.8.)	0,0974	E x Tarif
01/05/2014	10:00:00	[0;260]	79,42	(5.1.)	(2.7.)	(2.8.)	0,1089	E x Tarif
01/05/2014	11:00:00	[0;260]	89,83	(5.1.)	(2.7.)	(2.8.)	0,1089	E x Tarif
01/05/2014	12:00:00	[0;260]	108,67	(5.1.)	(2.7.)	(2.8.)	0,1089	E x Tarif
							Total	ΣCustos

A ferramenta *Solver* testa soluções possíveis para o problema atribuindo valores às células do volume bombado e procura aquela que minimiza o somatório dos custos. Como se pode depreender todo este processo só faz sentido devido à variação do custo da energia elétrica ao longo do dia, e portanto, a solução ótima irá, naturalmente, conter a maior parte do volume bombado nas horas em que a energia

é mais barata. As limitações de volume armazenado no reservatório irão afetar a distribuição dos períodos de bombagem, obrigando por vezes a bombagens em períodos energéticos mais caros.

Após a organização da tabela é necessário configurar a ferramenta *Solver* para resolver o problema. Na figura 5.1 apresenta-se a janela de configuração desta ferramenta.

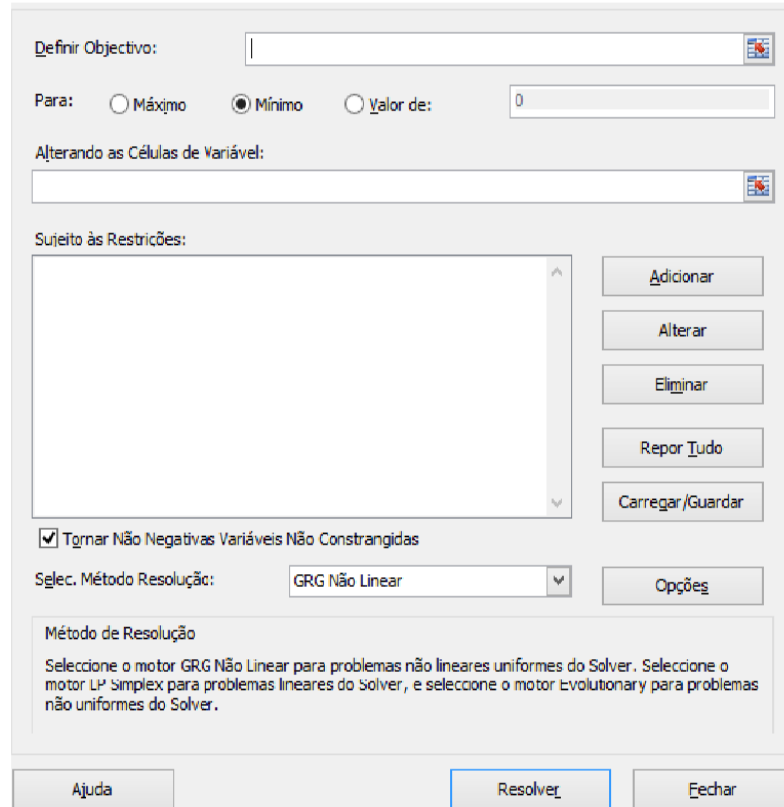


Fig.5.1 – Ferramenta *Solver* do *Microsoft Excel*

O primeiro passo da configuração é escolher a célula objetivo e o valor que se pretende para essa mesma célula, que no caso deste problema é a célula do custo total, resultante do somatório dos custos horários, com o valor mínimo possível.

Seguidamente selecciona-se a coluna na qual se encontram as células da variável do problema, que neste caso é a coluna do volume bombado.

Finalmente adicionam-se as restrições do problema. A primeira restrição a ter em conta é o valor do volume bombado. Neste sistema em estudo verificou-se que o caudal correspondente ao ponto de funcionamento das bombas é de $260 \text{ m}^3/\text{h}$ e, portanto, o volume máximo bombado em cada período horário terá que ser menor ou igual a 260 m^3 . Por outro lado, como é óbvio, o volume bombado tem que ser maior ou igual a 0. Tem então que se impor estas duas condições à coluna do volume bombado.

As restrições seguintes estão relacionadas com as capacidades de armazenamento, mínima e máxima, do reservatório. Deve-se, então, impor que o volume armazenado nunca ultrapasse a capacidade máxima, nem seja inferior à capacidade mínima. Estas restrições aplicam-se à coluna do volume armazenado. No decorrer deste trabalho foram simulados diversos cenários nos quais se variam estes

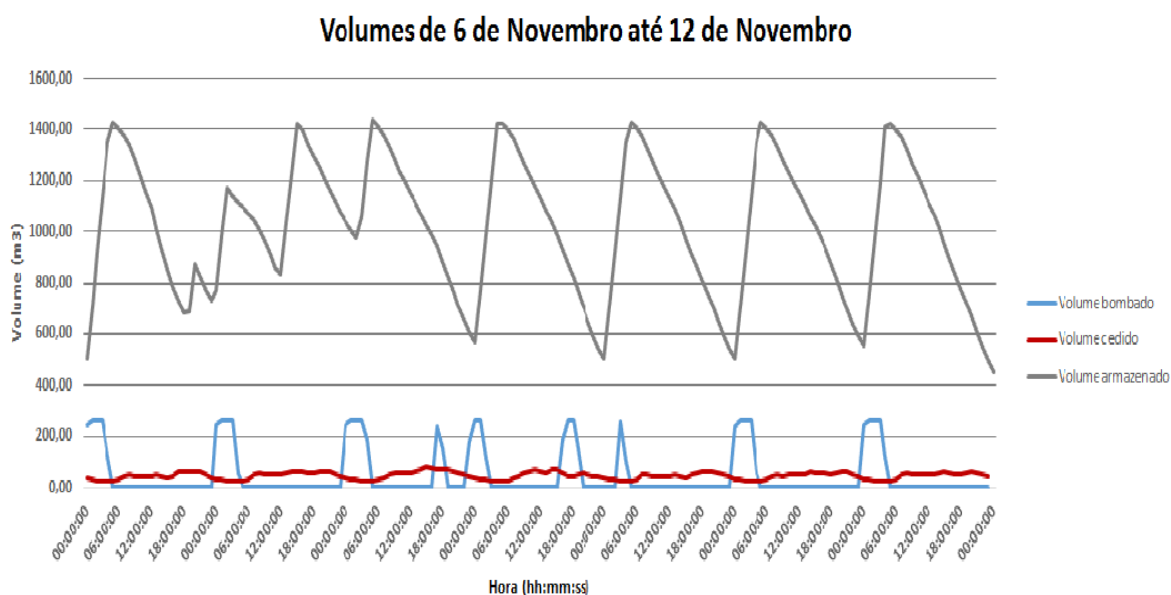


Fig.5.3 – Volumes de 6 de Novembro até 12 de Novembro

5.4. CENÁRIOS SIMULADOS

Após o tratamento de dados e seleção dos períodos a estudar foram simulados oito cenários, para estes mesmos períodos semanais, que permitissem analisar a influência do armazenamento no reservatório de jusante na operação das bombas e nos respetivos custos de energia. Apresenta-se a tabela 5.2 um resumo das condições de armazenamento impostas em cada cenário, seguido de uma explicação de cada um destes.

Tabela 5.2 – Condições de armazenamento nos oito cenários simulados

V (m3)	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6	Cenário 7	Cenário 8
V máximo	98%	98%	98%	98%	98%	98%	90%	98%
V mínimo	30%	30%	30%	20%	20%	50%	30%	20%
V armazenado no final do dia	-	V inicial	35 %	-	30%	-	-	-

5.4.1. CENÁRIO 1

Neste cenário aplicou-se o algoritmo de otimização utilizando limites de armazenamento, mínimo e máximo, iguais aos estabelecidos pela empresa Águas do Noroeste, respetivamente 30% e 98% do volume do reservatório. Neste cenário não se impôs qualquer restrição ao volume armazenado ao fim de cada dia. Pretendeu-se assim avaliar qual o potencial de poupança energética em relação à operação de bombagem real. Este cenário será utilizado como termo de comparação com todos os outros cenários simulados.

5.4.2. CENÁRIO 2

Nesta simulação utilizaram-se os mesmos limites de armazenamento do cenário um, mas impôs-se um volume armazenado no final de cada dia igual ao volume armazenado no instante inicial. Pretendeu-se avaliar qual a diferença de consumo energético em relação ao cenário um.

5.4.3. CENÁRIO 3

Tal como nas simulações anteriores utilizaram-se limites de 30% e 98% como limite de armazenamento, mas impondo um volume de armazenamento de 35% no final de cada dia. A simulação deste cenário, tal como o cenário dois, tem como objetivo avaliar as consequências da imposição de um volume de armazenamento ao final de cada dia.

5.4.4. CENÁRIO 4

O cenário quatro tem como objetivo avaliar as consequências de uma diminuição do volume mínimo de armazenamento para 20% do volume do reservatório, mantendo o volume máximo em 98 %.

5.4.5. CENÁRIO 5

No cenário cinco simula-se a mesma situação do cenário quatro mas impondo um volume armazenado no final de cada dia igual a 30% do volume do reservatório.

5.4.6. CENÁRIO 6

A simulação do cenário seis tem como objetivo avaliar quais as repercussões que a imposição de um volume mínimo de armazenamento de 50%, por exemplo, para fazer face a uma situação de emergência, tem nos custos de bombagem.

5.4.7. CENÁRIO 7

No cenário sete simula-se a diminuição do volume máximo de armazenamento para 90%, por exemplo, por uma questão de segurança para acautelar transbordamentos no reservatório.

5.4.7. CENÁRIO 8

Por último, neste cenário simula-se o fecho de uma das células do reservatório, por exemplo, para reparação ou limpeza, diminuindo assim para metade o volume máximo de armazenamento mas também o volume armazenado no instante inicial. Quanto ao limite mínimo, considera-se nesta situação, um limite mínimo de armazenamento de 20 % do volume do reservatório.

6

ANÁLISE E DISCUSSÃO DE
RESULTADOS

6.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos nas simulações efetuadas, recorrendo ao algoritmo de otimização exposto anteriormente, para os oito cenários referidos.

Faz-se uma análise dos resultados comparando-os com a situação real nos dois períodos semanais simulados. Comparando os períodos de bombagem, os consumos energéticos e custos e os volumes armazenados no reservatório, procura-se analisar a influência das características do armazenamento no reservatório de jusante.

Como foi referido anteriormente, o algoritmo de otimização calcula os volumes ótimos de bombagem em cada hora que conduzam ao custo mínimo, obedecendo às restrições impostas. Assim, os resultados apresentados são soluções que obedecem aos limites de armazenamento impostos, mas também às restrições adicionadas para minimizar o número de arranques dos grupos elevatórios.

6.2. CENÁRIO 1

6.2.1. SEMANA DE VERÃO

Aplicando o algoritmo de otimização nas condições definidas para este cenário obteve-se uma redução no custo semanal de energia de 42 €, como se pode verificar na tabela 6.1 na qual se apresentam os custos diários e total semanal de bombagem, para a situação real e para o cenário 1.

Tabela 6.1 – Custos diários e total semanal para o cenário 1 e situação real (Semana de Verão)

Custos energia	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5	Dia 6	Dia 7	Total
Real (€)	72,6	34,5	64,3	56,8	37,8	57,1	56,4	379,6
Cenário 1 (€)	38,7	52,4	50,3	47,3	50,8	44,1	53,9	337,6

Observando a figura 6.1 pode-se constatar que para este cenário, com condições semelhantes à situação real, a situação ótima é definida por um período de bombagem mais longo ao início do dia, aproveitando as horas do dia em que o tarifário é mais baixo, e um período de bombagem mais curto durante a tarde ou início da noite. Durante os dias da semana este último período será, inevitavelmente, nas horas de cheia, sendo que aos fins-de-semana é possível executar a bombagem em horas de vazio normal.

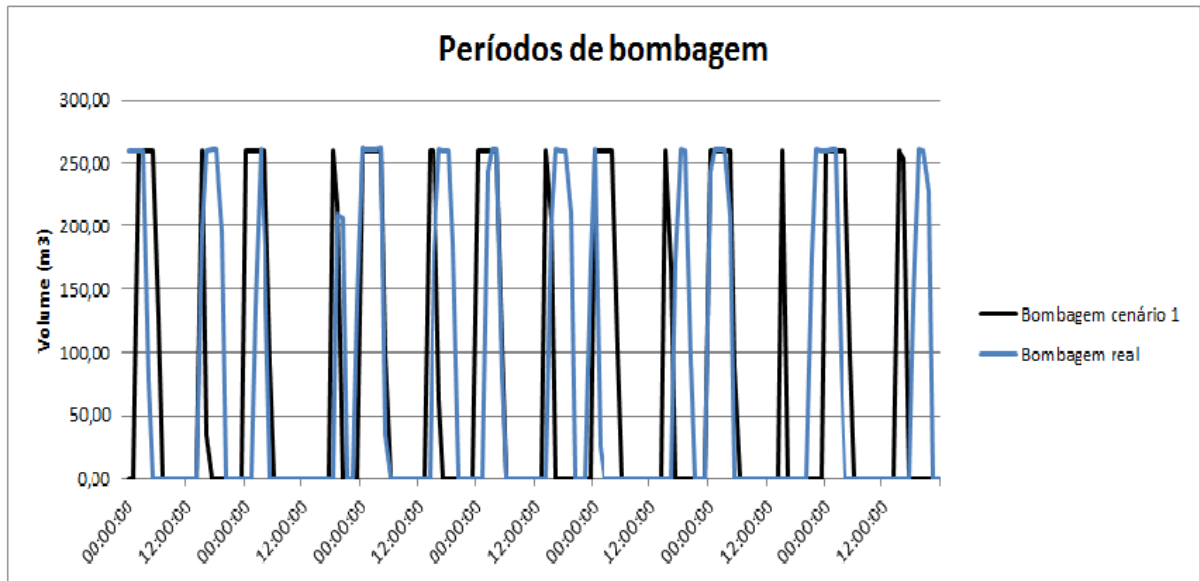


Fig.6.1 – Períodos de bombagem na situação real e no cenário 1 (Semana de Verão)

Com estes dois períodos de bombagem são satisfeitas as necessidades de água a jusante, aproveitando ao máximo a capacidade de armazenamento do reservatório. Na figura 6.2 está representado o nível de água no reservatório ao longo da semana na situação real e no cenário 1. Observa-se que na simulação efetuada o reservatório atinge o seu limite máximo, todos os dias, ao fim do primeiro período de bombagem e atinge o limite mínimo ao fim de cada dia. Esta flutuação diária do nível de água é o que permite períodos de bombagem nos períodos energéticos mais baratos. Como se pode ver na mesma figura, na situação real a flutuação do nível de água não é tão pronunciada, já que, os períodos de bombagem são mais frequentes ao longo do dia. A simulação deste cenário demonstra que o aproveitamento ótimo da capacidade de armazenamento do reservatório permite uma redução significativa dos custos energéticos, sendo que neste período foi superior a 10%.

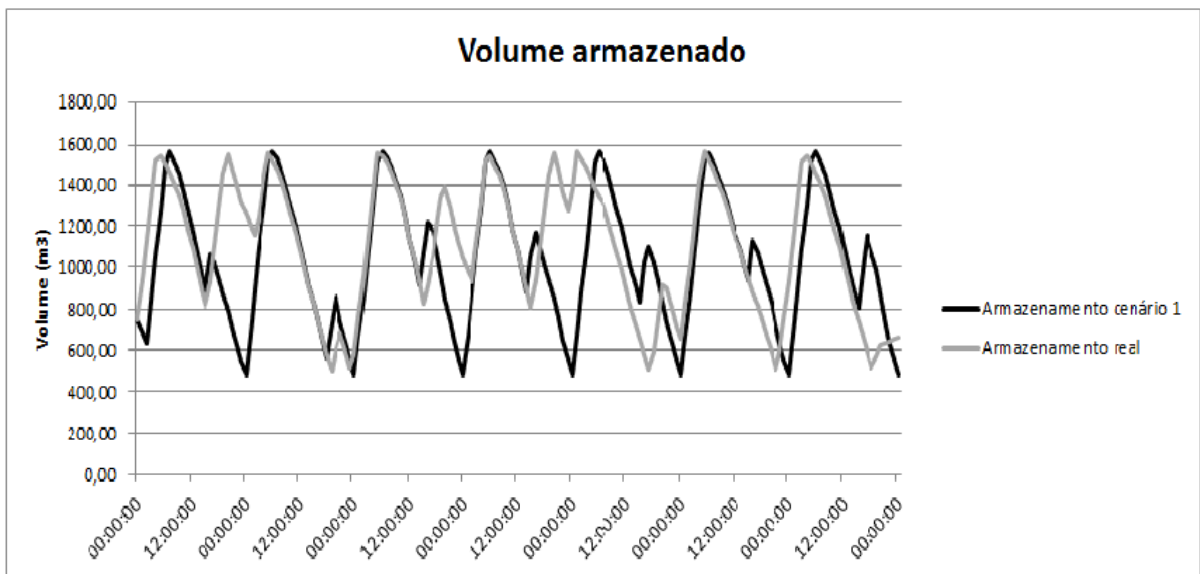


Fig.6.2 – Volume armazenado na situação real e no cenário 1 (Semana de Verão)

6.2.2. SEMANA DE INVERNO

Realizando a simulação para o período semanal de Inverno estudado verificou-se também uma redução de custos. Na tabela 6.2 apresentam-se os custos energéticos para este período para a situação real e para o cenário 1. Obteve-se uma redução de custos de 12,3 €.

Tabela 6.2 – Custos diários e total semanal para o cenário 1 e situação real (Semana de Inverno)

Custos energia	Dia 6	Dia 7	Dia 8	Dia 9	Dia 10	Dia 11	Dia 12	Total
Real (€)	28,5	27,1	45,7	40,1	8,2	27,0	28,5	205,0
Cenário 1 (€)	25,6	28,4	30,2	27,8	26,2	27,4	27,1	192,7

Observando a figura 6.3, conclui-se que nesta semana de Inverno em análise os períodos de bombagem que minimizam os custos se realizam integralmente nos períodos energéticos mais baratos. Como o reservatório atinge o limite mínimo no final de cada dia, é necessário efetuar bombagem imediatamente a seguir, isto é, no início do dia seguinte. Após um período de bombagem de uma hora no período de vazio normal as bombas param, e voltam a arrancar quando inicia o período de horas de super vazio, elevando o volume de água necessária para todo o dia nesse período energético.

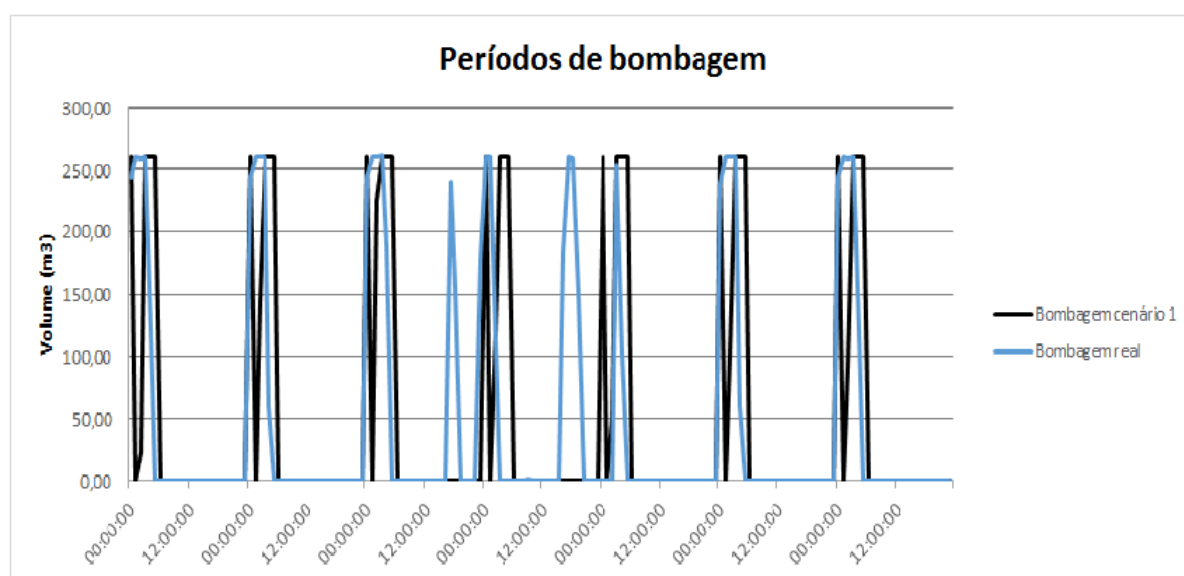


Fig.6.3 – Períodos de bombagem na situação real e no cenário 1 (Semana de Inverno)

Analisando a figura 6.4 verifica-se que o limite máximo de água no reservatório apenas é atingido em uma ocasião, situação que no período de Verão ocorre uma vez por dia. Isto deve-se ao fato de os consumos no Inverno serem menores, e portanto, o volume bombado é também menor, não sendo necessário, neste caso, utilizar a capacidade máxima do reservatório para regularizar os volumes. Tal como no período de Verão, o limite mínimo de água armazenada ocorre no final de cada dia. Em relação ao período de Verão, a situação real no período de Inverno está mais próxima da situação otimizada, logo, a redução do custo da energia não é tão elevada, mas ainda assim significativa, cerca de 6%.

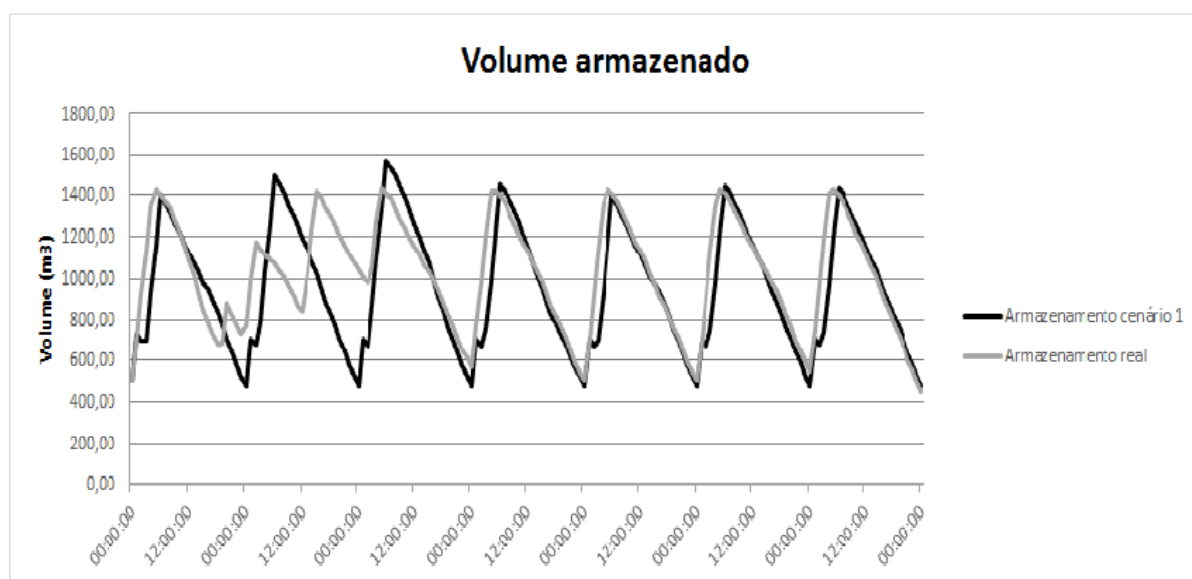


Fig.6.4 – Volume armazenado na situação real e no cenário 1 (Semana de Inverno)

6.3. CENÁRIO 2

Com a simulação deste cenário pretendeu-se avaliar qual a diferença de custos energéticos em relação ao cenário 1, impondo um volume armazenado ao final de cada dia igual ao volume armazenado no instante inicial.

6.3.1. SEMANA DE VERÃO

Como se pode verificar na tabela 6.3 esta situação implica maiores custos do que a do cenário 1, no qual não existe qualquer restrição para além do volume mínimo. Neste cenário obteve-se, para o período de Verão, um custo energético 16,3€ superior ao do cenário 1.

Tabela 6.3 – Custos diários e total semanal para os cenários 1 e 2 (Semana de Verão)

Custos energia	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5	Dia 6	Dia 7	Total
Cenário 1 (€)	38,7	52,4	50,3	47,3	50,8	44,1	53,9	337,6
Cenário 2 (€)	49,3	54,2	49,6	46,6	52,6	45,7	55,7	353,9

Nesta situação, como o reservatório não atinge o limite mínimo no final de cada dia, não é necessário realizar bombagem logo no início do dia seguinte, mas, por outro lado, os períodos energéticos mais baratos não são totalmente aproveitados nos dias de semana, obrigando a efetuar períodos de bombagem mais longos nas horas de cheia e, conseqüentemente, aumentando os custos. Observando a figura 6.5 pode-se verificar essa pequena diferença nos períodos de bombagem, mas que tem repercussões significativas nos custos de energia, especialmente nos dias de semana (Dias 1, 2, 5, 6 e 7), como se pode ver na tabela 6.3.

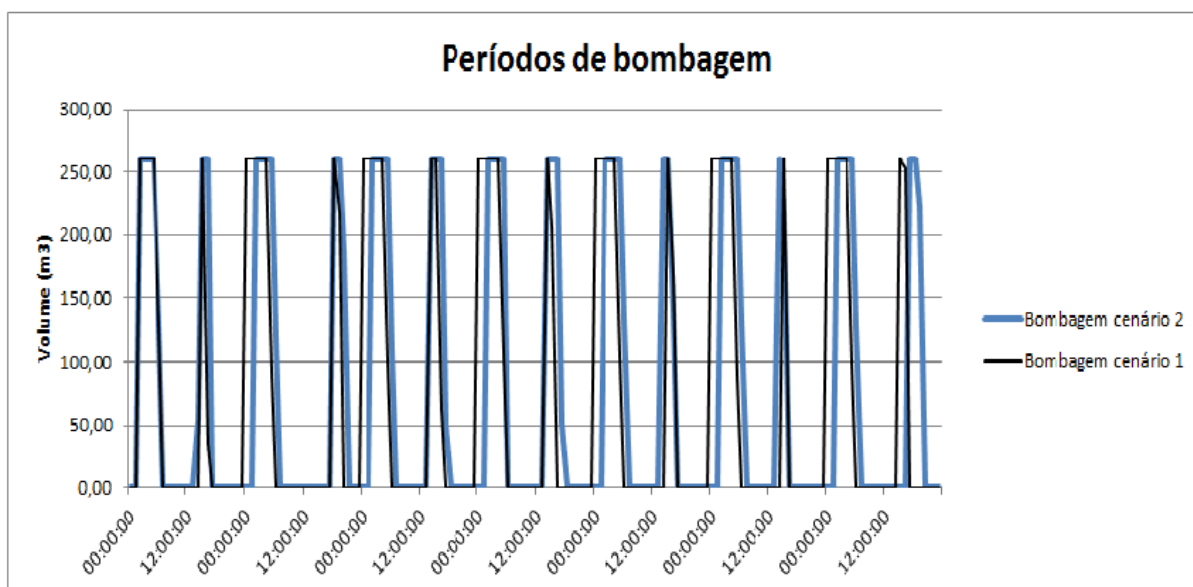


Fig.6.5 – Períodos de bombagem no cenário 1 e no cenário 2 (Semana de Verão)

Na figura 6.6 está representado o volume de água armazenada ao longo desta semana nos cenários 1 e 2. Verifica-se que, tal como acontece no cenário 1 o reservatório atinge o seu limite máximo, ou muito perto, após o primeiro período de bombagem diário. No entanto a imposição de volumes armazenados iguais no final de cada dia igual ao volume armazenado no instante inicial não permite que o limite mínimo de armazenamento seja atingido, sendo o volume de armazenamento sempre superior a 600 m³.

Tal como aconteceu na simulação do cenário 1, também no cenário 2 a oscilação do volume de água armazenada é mais regular do que na situação real, aumentando após os períodos de bombagem, duas vezes por dia, e diminuindo nos restantes períodos.

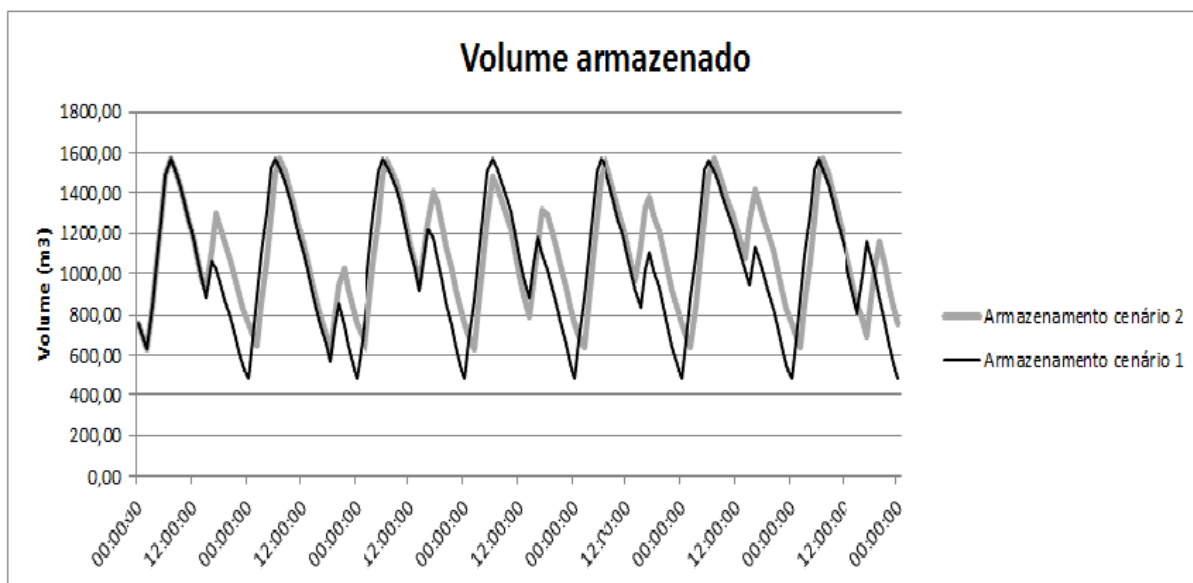


Fig.6.6 – Volume armazenado na situação real e no cenário 2 (Semana de Verão)

6.3.2. SEMANA DE INVERNO

Como se pode verificar na tabela 6.4, para o período semanal de Inverno os custos no cenário 1 e no cenário 2 são muito semelhantes, sendo ligeiramente diferentes nos dias 6 e 8 de Novembro. Pode-se afirmar então que, neste período semanal, a imposição de um volume armazenado no final de cada dia igual ao volume armazenado no instante inicial não altera os custos de bombagem.

Tabela 6.4 – Custos diários e total semanal para os cenários 1 e 2 (Semana de Inverno)

Custos energia	Dia 6	Dia 7	Dia 8	Dia 9	Dia 10	Dia 11	Dia 12	Total
Cenário 1 (€)	25,6	28,4	30,2	27,8	26,2	27,4	27,1	192,7
Cenário 2 (€)	26,2	28,4	30,3	27,8	26,2	27,4	27,1	193,4

De fato, observando a figura 6.7 verifica-se uma correspondência quase perfeita dos períodos de bombagem, ocorrendo em ambos os cenários nos períodos energéticos mais baratos. A única diferença significativa nestes dois cenários verifica-se no primeiro dia (imperceptível na figura), já que, sendo o volume inicial armazenado igual nas duas situações, no cenário 2 é necessário bombear um volume maior para ter um volume armazenado igual ao do instante inicial.

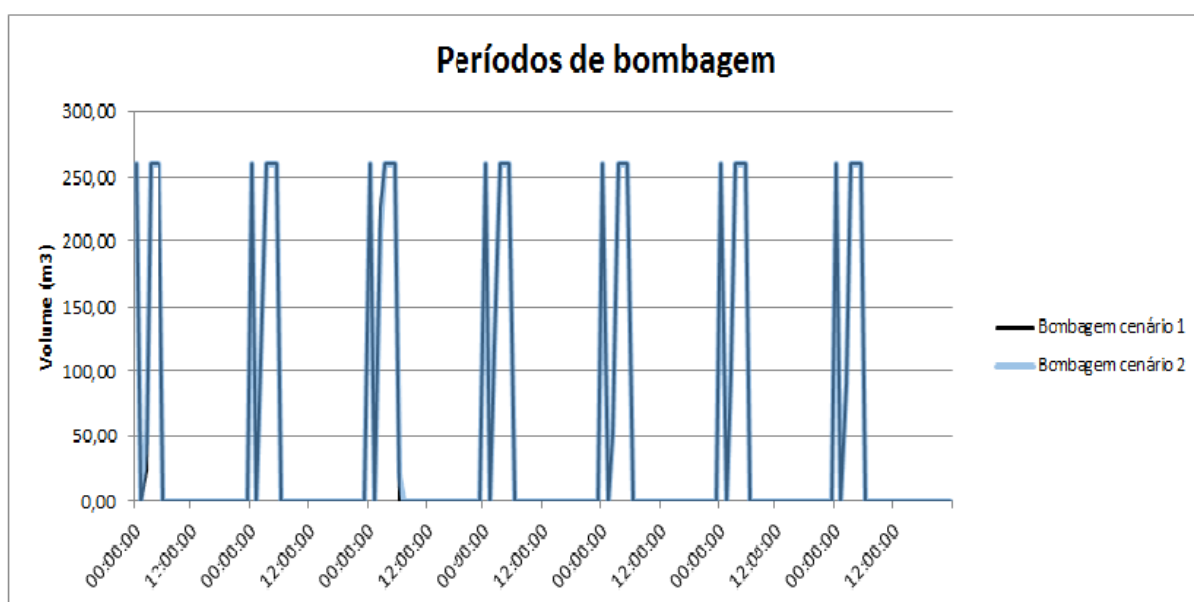


Fig.6.7 – Períodos de bombagem no cenário 1 e no cenário 2 (Semana de Inverno)

Consequentemente, a variação de volume armazenado no reservatório nos dois cenários é idêntica mas entre valores ligeiramente diferentes, como se pode constatar analisando a figura 6.8. No cenário 1 o volume armazenado atinge o limite mínimo, 480 m³, no final de cada dia, e no cenário 2 o volume armazenado atinge o mínimo no final de cada dia mas com valor igual ao volume armazenado no instante inicial, 507 m³. Também neste cenário o limite máximo de armazenamento apenas é atingido num dos dias da semana.

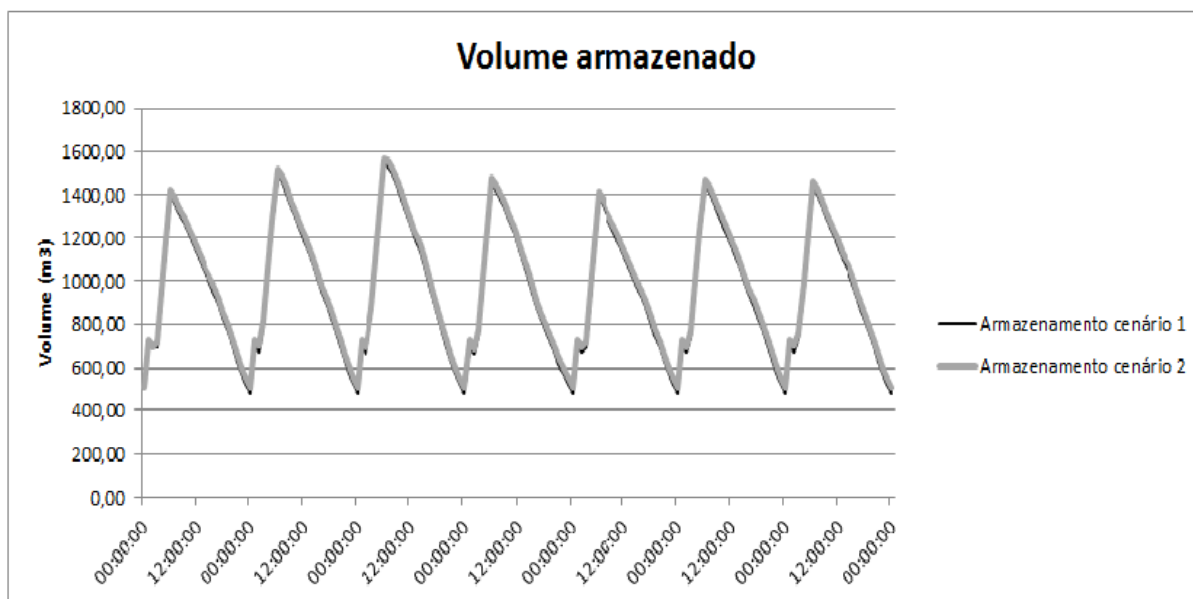


Fig.6.8 – Volume armazenado no cenário 1 e no cenário 2 (Semana de Inverno)

6.4. CENÁRIO 3

Tal como no cenário 2, na simulação deste cenário impôs-se um volume armazenado no final de cada dia superior ao limite mínimo de armazenamento. Neste caso escolheu-se um volume ligeiramente superior, 35% do volume do reservatório, de modo a que não seja estritamente necessário começar a bombagem logo no instante inicial de cada dia.

6.4.1. SEMANA DE VERÃO

Verifica-se que nos cenários 1 e 3 os custos são idênticos e inferiores aos do cenário 2. Uma análise mais minuciosa da tabela 6.5 permite concluir que no cenário 3 os custos diários, com exceção do primeiro dia, são ligeiramente inferiores aos do cenário 1. Para o período simulado de uma semana, a redução de custos obtidos nos dias 2 a 7 apenas compensa o maior custo no dia 1. A simulação no dia 1 é enganosa porque depende do volume armazenado no instante inicial. Prolongando a simulação deste cenário a um período mais longo seriam obtidos custos totais inferiores aos do cenário 1.

Tabela 6.5 – Custos diários e total semanal para os cenários 1, 2 e 3 (Semana de Verão)

Custos energia	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5	Dia 6	Dia 7	Total
Cenário 1 (€)	38,7	52,4	50,3	47,3	50,8	44,1	53,9	337,6
Cenário 2 (€)	49,3	54,2	49,6	46,6	52,6	45,7	55,7	353,9
Cenário 3 (€)	41,8	52,0	49,6	46,6	50,5	43,6	53,6	337,7

Observando a figura 6.9 verifica-se que os períodos de bombagem ótimos obtidos nas simulações dos cenários 1 e 3 são muito semelhantes, sendo que o primeiro intervalo de bombagem no cenário 3 é adiantado cerca de uma hora, permitindo assim aproveitar ao máximo o período de horas de super vazio, situação que não ocorria no cenário 1.

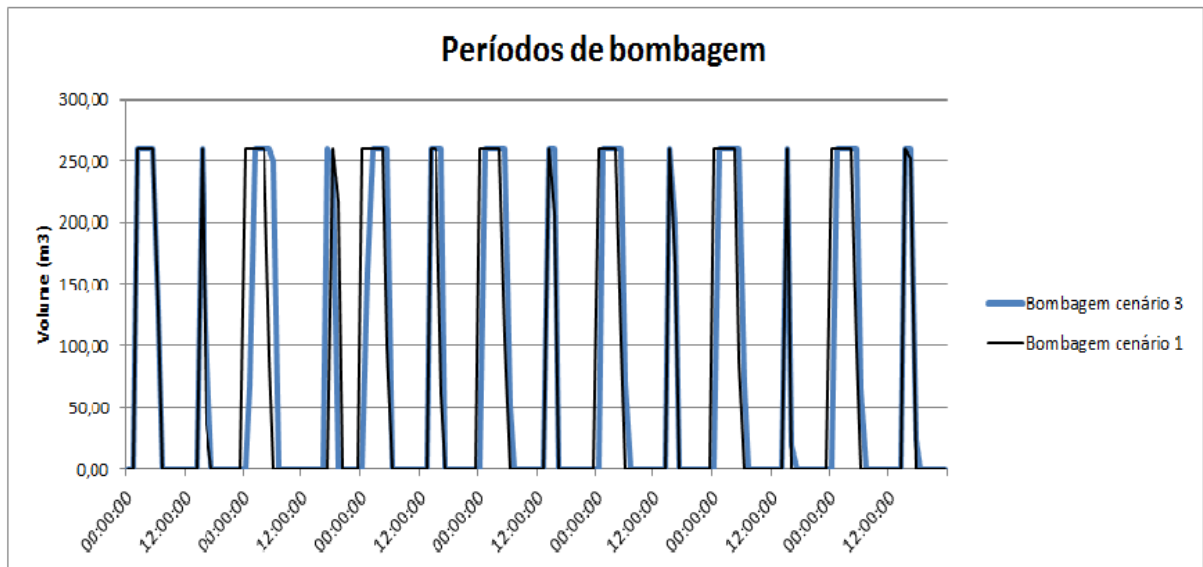


Fig.6.9 – Períodos de bombagem no cenário 1 e no cenário 3 (Semana de Verão)

Quanto ao volume armazenado neste cenário verifica-se que este atinge os limites, máximo e mínimo, ou muito perto, uma vez por dia, tal como no cenário 1. A diferença está nos instantes em que estes limites são atingidos, sendo ligeiramente adiantados em relação ao cenário 1. Nos instantes em que no cenário 1 é atingido o limite mínimo, às 00:00h de cada dia, no cenário 3 o volume armazenado é igual a 560 m³, que corresponde a 35 % do volume do reservatório.

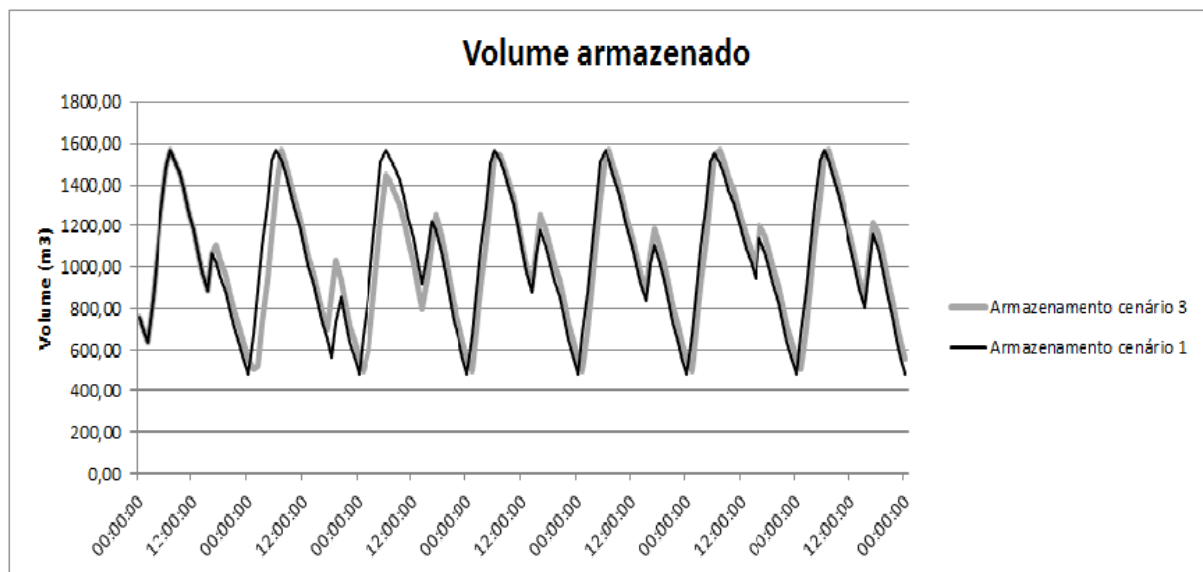


Fig.6.10 – Volume armazenado no cenário 1 e no cenário 3 (Semana de Verão)

6.4.2. SEMANA DE INVERNO

Analisando a tabela 6.6 verifica-se que é no cenário 3 que a redução de custos é maior, e tal como na semana de Verão, todos os dias, com exceção do primeiro dia que é condicionado pelo volume armazenado no instante inicial, apresentam custos de bombagem menores que os cenários 1 e 2. Se a simulação fosse prolongada a um período mais longo a redução dos custos seria mais evidente.

Tabela 6.6 – Custos diários e total semanal para os cenários 1, 2 e 3 (Semana de Inverno)

Custos energia	Dia 6	Dia 7	Dia 8	Dia 9	Dia 10	Dia 11	Dia 12	Total
Cenário 1 (€)	25,6	28,4	30,2	27,8	26,2	27,4	27,1	192,7
Cenário 2 (€)	26,2	28,4	30,3	27,8	26,2	27,4	27,1	193,4
Cenário 3 (€)	27,4	27,9	30,2	27,2	25,3	26,7	26,4	191,1

Os períodos de bombagem neste cenário para a semana de Inverno diferem dos obtidos para o cenário 1. Neste caso o valor do volume armazenado imposto para o final de cada dia é superior ao volume armazenado no instante inicial, que por sua vez é ligeiramente superior ao limite mínimo de armazenamento. Por essa razão é possível efetuar apenas um período de bombagem contínuo, com exceção do dia 8, em oposição ao período descontínuo que ocorre no cenário 1, como se pode observar na figura 6.11. Para além desta vantagem, o período de horas de super vazio é totalmente aproveitado, permitindo assim a redução de custos.

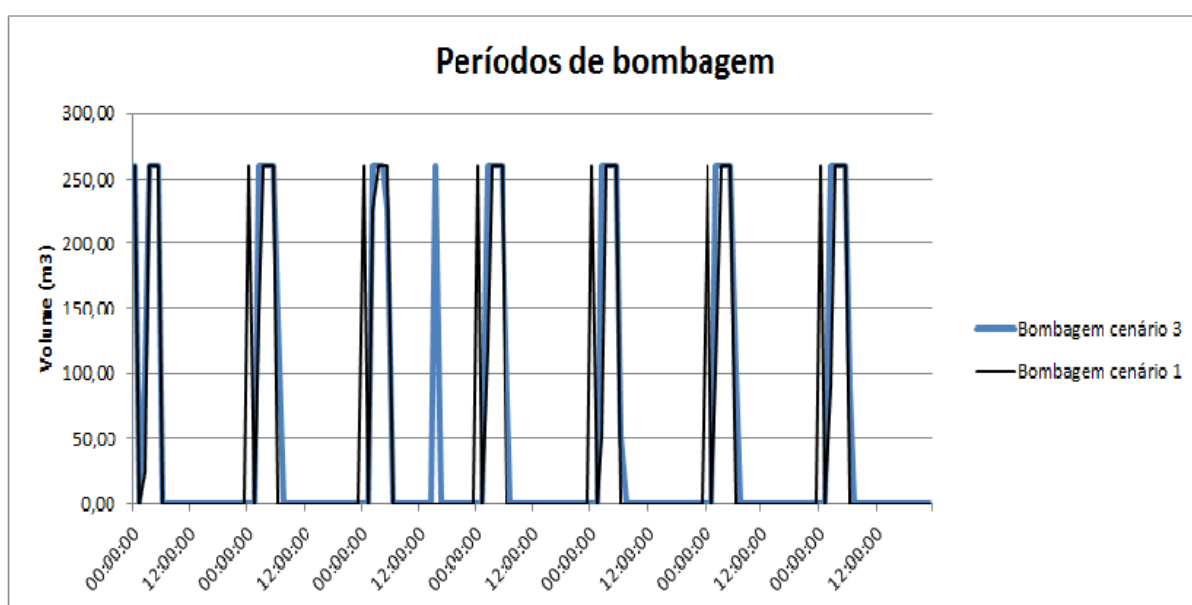


Fig.6.11 – Períodos de bombagem no cenário 1 e no cenário 3 (Semana de Inverno)

Neste cenário a capacidade do reservatório no período de Inverno apenas é aproveitada na totalidade num dia, sendo que nos restantes nunca são atingidos os dois limites de armazenamento, máximo e mínimo, como se verifica na figura 6.12.

Outro aspeto a realçar neste cenário é o fato de o nível mínimo no reservatório ocorrer nas primeiras horas do dia, imediatamente antes do início do período de bombagem. No caso dos cenários 1 e 2 este nível ocorre às 00:00h de cada dia, correspondendo no cenário 1 ao limite mínimo de armazenamento porque não se impôs qualquer outra condição, e correspondendo no cenário 2 ao limite imposto para o final do dia. Neste cenário 3 a imposição de um volume armazenado no fim do dia faz com que o nível mínimo no reservatório seja atingido entre uma a duas horas depois, dependendo da hora de arranque das bombas.

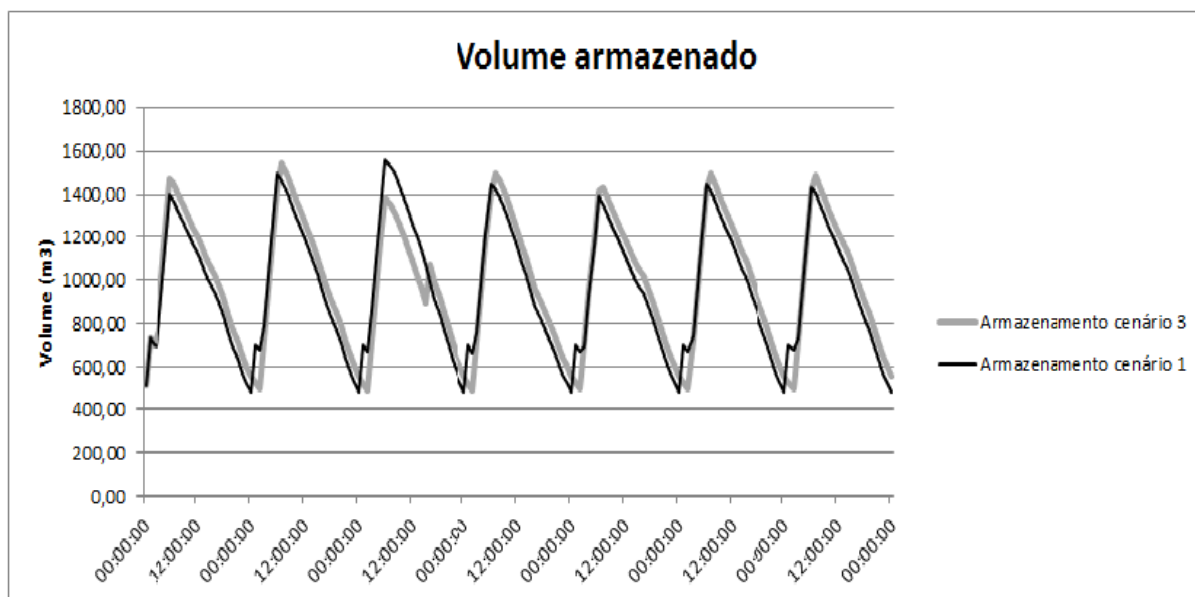


Fig.6.12 – Volume armazenado no cenário 1 e no cenário 3 (Semana de Inverno)

6.5. CENÁRIO 4

Neste cenário simulou-se a redução do limite mínimo de água armazenada em 10%, dos 30% para os 20%, com o objectivo de analisar qual o efeito nos custos de bombagem relativamente ao limite mínimo de 30%. Pretende-se também analisar qual o efeito no armazenamento de água no reservatório, não impondo qualquer outra restrição ao volume armazenado ao longo do dia.

6.5.1. SEMANA DE VERÃO

Começando por analisar a tabela 6.7, constata-se que a redução do limite mínimo do reservatório para 20% tem como consequência uma redução de custos energéticos. Em relação ao cenário 1, que representa a situação real otimizada, obteve-se uma redução do custo semanal de 16.1€.

Tabela 6.7 – Custos diários e total semanal para os cenários 1 e 4 (Semana de Verão)

Custos energia	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5	Dia 6	Dia 7	Total
Cenário 1 (€)	38,7	52,4	50,3	47,3	50,8	44,1	53,9	337,6
Cenário 4 (€)	34,0	49,9	49,6	46,6	48,4	41,5	51,5	321,5

A redução de custos é significativa, mas apresenta uma pequena desvantagem, relativamente ao cenário 1, que é o fato de ocorrerem 2 arranques no espaço de duas horas. O custo mínimo possível de obter implica uma hora de bombagem ao início de cada dia, seguido de uma paragem de uma hora e de novo arranque das bombas às 02:00h para aproveitar o período de horas de super vazio, como se pode observar na figura 6.13. O resto do volume necessário para satisfazer os consumos é elevado num período mais curto, de pouco mais de uma hora, durante a tarde ou noite.

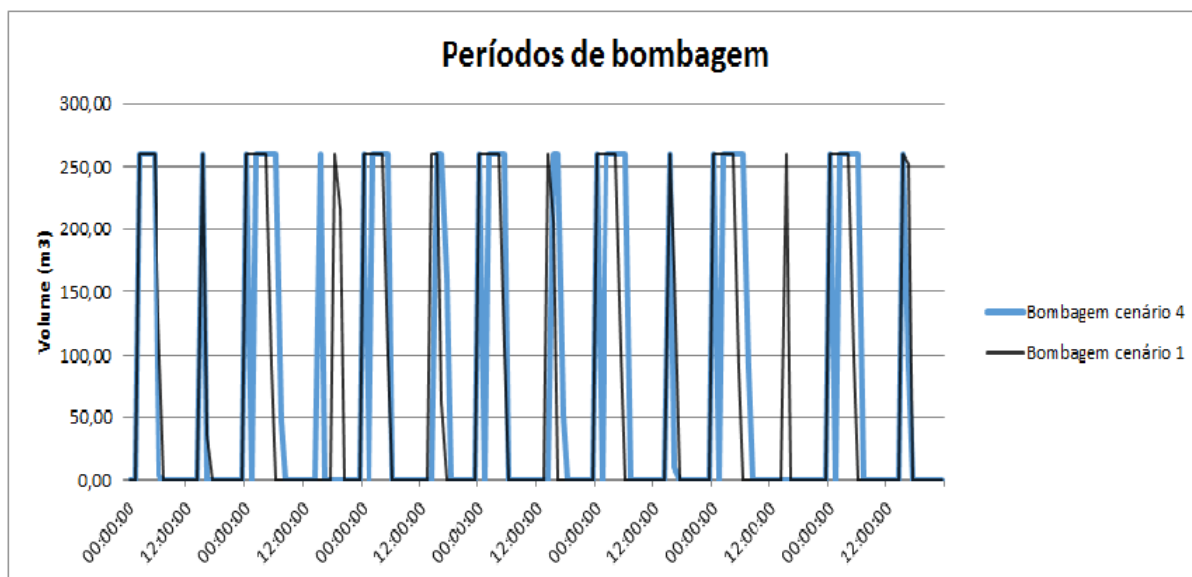


Fig.6.13 – Períodos de bombagem no cenário 1 e no cenário 4 (Semana de Verão)

Observando a figura 6.14 verifica-se que o limite mínimo de água no reservatório é atingido no final de cada dia, como acontece no cenário 1, mas, por outro lado, no término do período de bombagem mais longo o limite máximo nem sempre é atingido, nomeadamente, nos dias de fim-de-semana, nos quais a folga para esse limite máximo ronda os 300 m³.

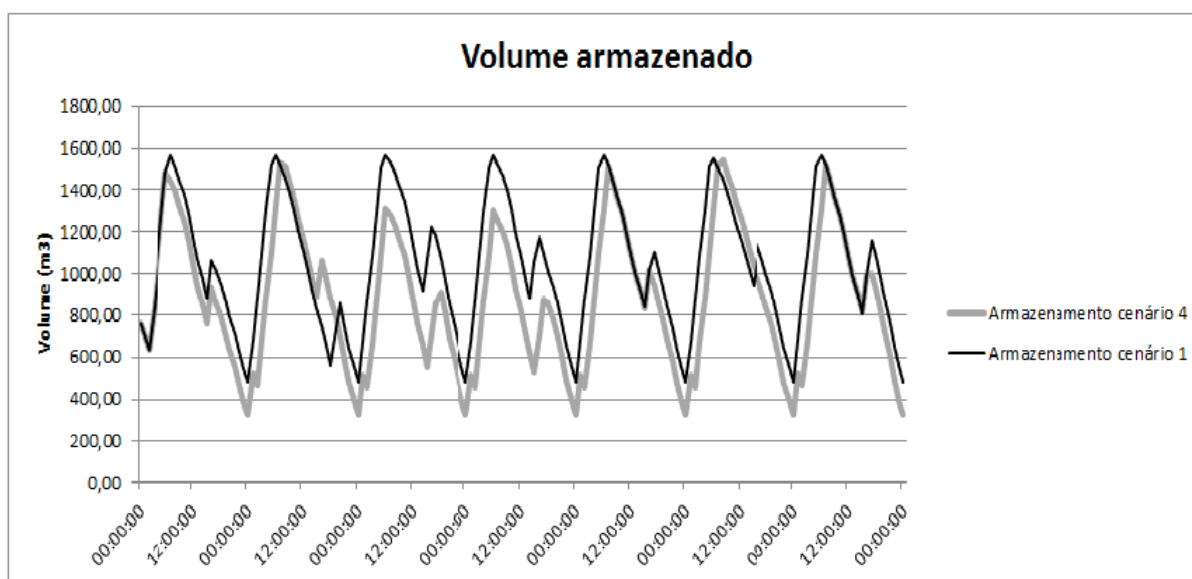


Fig.6.14 – Volume armazenado no cenário 1 e no cenário 4 (Semana de Verão)

6.5.2. SEMANA DE INVERNO

Analisando a tabela 6.8 verifica-se que também para o período de Inverno neste cenário ocorre uma redução de custos energéticos em relação ao cenário 1. No entanto analisando atentamente esta mesma tabela, conclui-se que o total de custos semanal seria igual se ignorássemos o primeiro dia. De fato, o primeiro dia deturpa o resultado desse somatório. Isto porque o volume armazenado no instante inicial é o mesmo para os dois cenários, cerca de 507 m³, muito próximo do limite mínimo no cenário 1 mas

ainda afastado desse mesmo limite no cenário 4, e portanto, o volume que é necessário bombear no primeiro dia no cenário 1 é maior do que no cenário 4. A partir do segundo dia os custos são exactamente os mesmos, logo, conclui-se que a redução do limite mínimo para 20% do volume do reservatório não afeta os custos de bombagem neste período de Inverno.

Tabela 6.8 – Custos diários e total semanal para os cenários 1 e 4 (Semana de Inverno)

Custos energia	Dia 6	Dia 7	Dia 8	Dia 9	Dia 10	Dia 11	Dia 12	Total
Cenário 1 (€)	25,6	28,4	30,2	27,8	26,2	27,4	27,1	192,7
Cenário 4 (€)	20,8	28,4	30,2	27,8	26,2	27,4	27,1	187,9

Para este cenário, os períodos de bombagem que conduzem ao custo mínimo ficam definidos por uma hora de bombagem das 00:00h às 01:00h, seguido de uma hora de paragem e a restante bombagem efectuada nas horas de super vazio. Como se pode observar na figura 6.15 estes períodos não diferem dos do cenário 1, estando apenas ligeiramente desfasados.

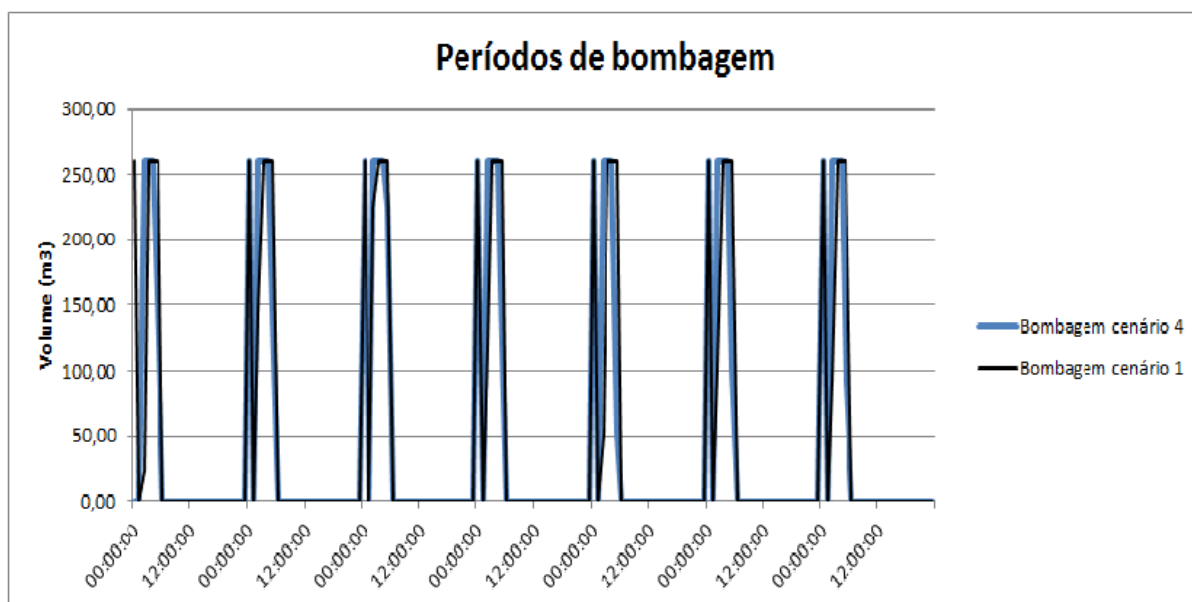


Fig.6.15 – Períodos de bombagem no cenário 1 e no cenário 4 (Semana de Inverno)

Observando a figura 6.16 verifica-se que a variação de volume armazenado é similar à que sucede no cenário 1, cerca de 1100 m³, mas entre limites diferentes. Como se baixou o limite mínimo de armazenamento, para 320 m³, a variação do nível de água ocorre entre esse mínimo e um máximo de 1400 m³. No cenário 1 a variação ocorre entre os 480 m³ e o limite máximo, 1568 m³. Mais uma vez, o limite mínimo é atingido no final de cada dia e o volume armazenado máximo, abaixo do limite, atinge-se no final do período de bombagem mais longo.

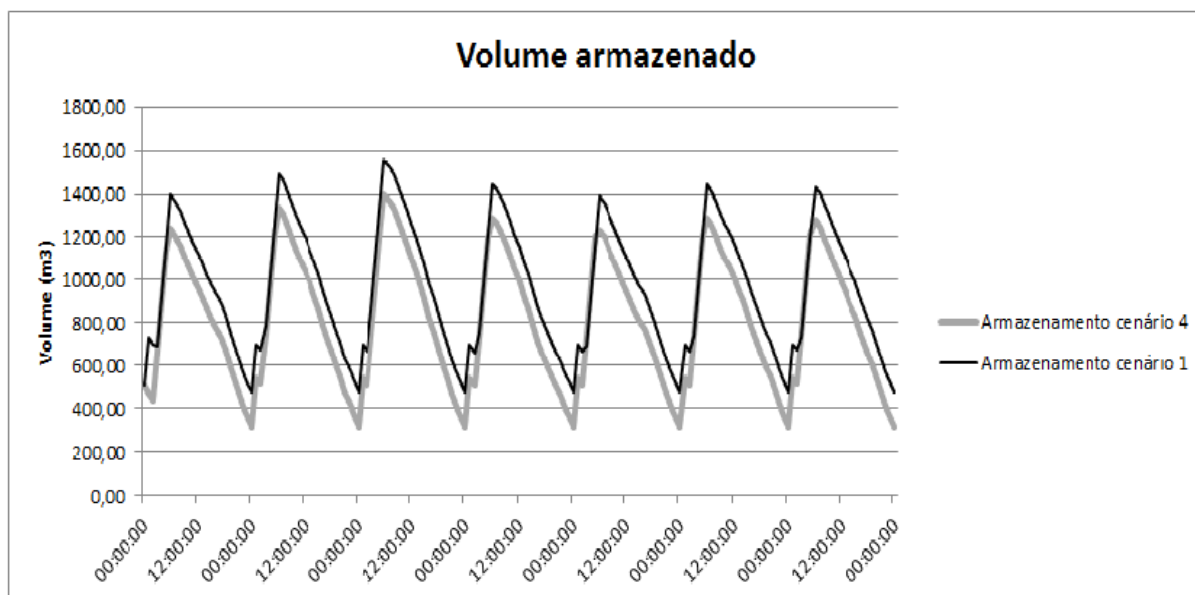


Fig.6.16 – Volume armazenado no cenário 1 e no cenário 4 (Semana de Inverno)

6.6. CENÁRIO 5

A simulação deste cenário é feita com o objectivo de avaliar as vantagens e desvantagens, relativamente ao cenário 4, da imposição de um volume armazenado no final de cada dia superior ao limite mínimo de armazenamento. Optou-se por testar um volume armazenado ao final do dia de 30% do volume do reservatório.

6.6.1. SEMANA DE VERÃO

Analisando a tabela 6.9 constata-se que, para o período de Verão, este cenário não apresenta vantagens ao nível dos custos energéticos. Efetivamente os custos são superiores aos do cenário 4 em todos os dias de semana, sendo iguais nos dias de fim-de-semana.

Tabela 6.9 – Custos diários e total semanal para os cenários 4 e 5 (Semana de Verão)

Custos energia	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5	Dia 6	Dia 7	Total
Cenário 4 (€)	34,0	49,9	49,6	46,6	48,4	41,5	51,5	321,5
Cenário 5 (€)	38,7	51,2	49,6	46,6	49,6	43,4	52,7	331,8

Com este valor de 30% do volume do reservatório escolhido como volume de armazenamento ao final de cada dia não se obtém uma redução de custos, mas, como se pode verificar na figura 6.17, permite ter um menor número de arranques das bombas, uma vez que não é necessário bombear na hora inicial de cada dia para satisfazer o limite mínimo de armazenamento. É possível que impondo um valor de 25% de volume armazenado ao fim do dia, em vez de 30%, se pudesse obter uma redução de custos, como acontece no cenário 3. Neste cenário 5, no período de Verão, os períodos de bombagem ótimos ficaram definidos por um período de cerca de 5 horas durante a madrugada e um período inferior a 2 horas durante a tarde ou noite, nos dias de semana. Nos dias de fim-de-semana os períodos de bombagem podem ser mais distribuídos, já que, nesses dias há horários energéticos mais baratos também ao longo da tarde e da noite.

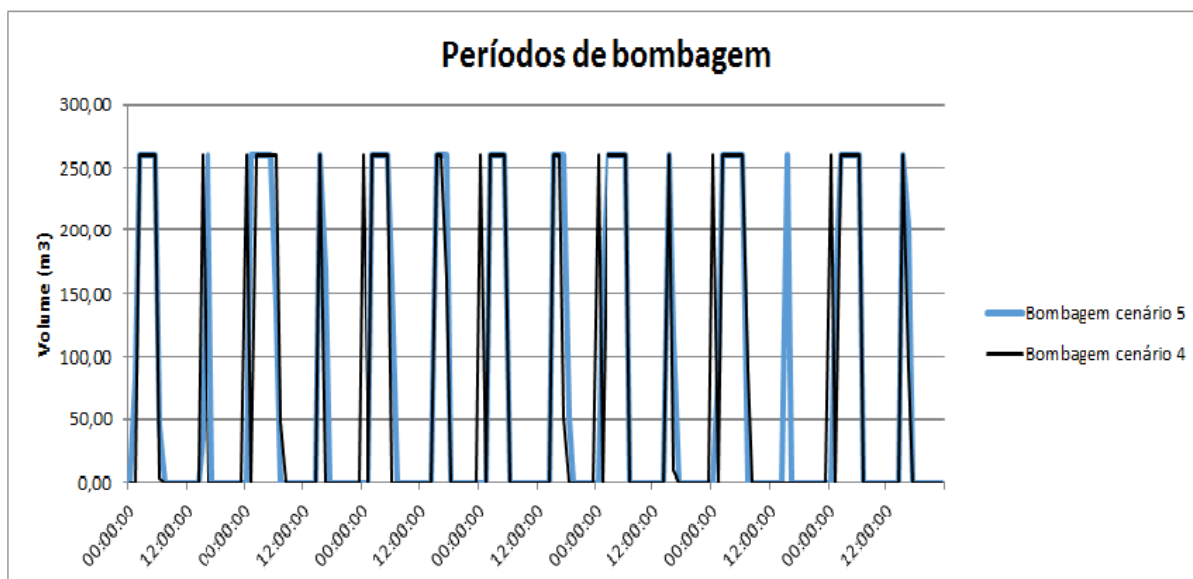


Fig.6.17 – Períodos de bombagem no cenário 4 e no cenário 5 (Semana de Verão)

Observando a figura 6.18 identifica-se uma situação neste cenário que acontece também nos cenários 2 e 3, nos quais também se impõe um volume armazenado no final do dia superior ao limite mínimo, mas que é mais evidente neste cenário 5, que é o fato de o volume mínimo armazenado em cada dia ser bem superior ao limite mínimo de 320 m³.

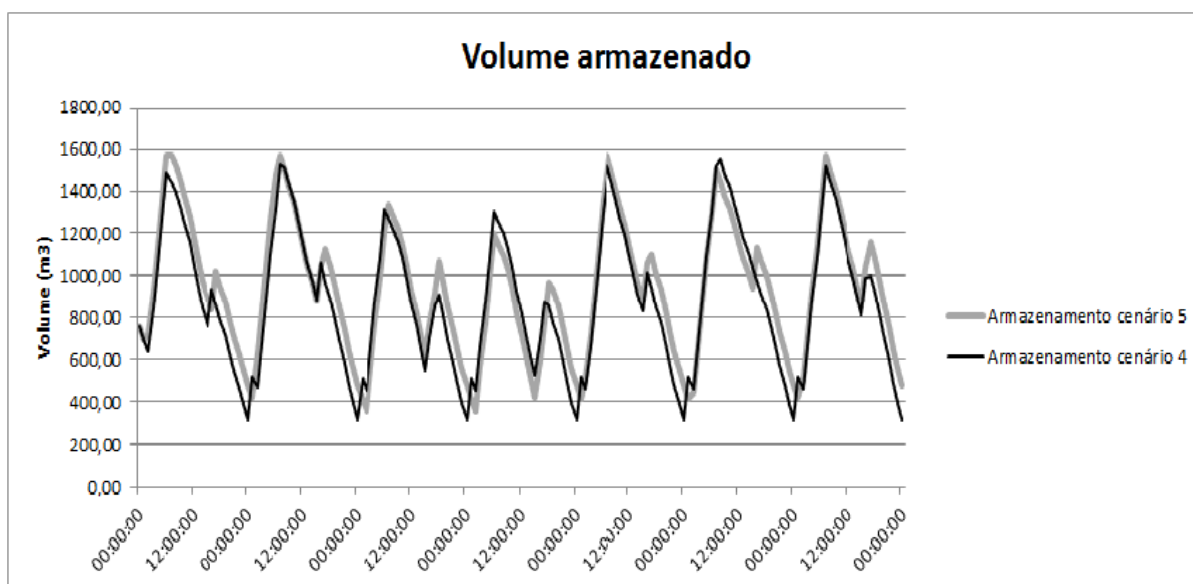


Fig.6.18 – Volume armazenado no cenário 4 e no cenário 5 (Semana de Verão)

6.6.2. SEMANA DE INVERNO

Contrariamente ao que acontece no período de Verão neste cenário, no período de Inverno obtém-se uma redução dos custos de bombagem em todos os dias, com exceção do primeiro dia pelos motivos já referidos. O total semanal é novamente enganador devido a esta situação. Realça-se novamente que uma simulação ao longo de um período mais longo, ou simplesmente ignorando o primeiro dia, resultaria num valor total no cenário 5 inferior ao do cenário 4.

Tabela 6.10 – Custos diários e total semanal para os cenários 4 e 5 (Semana de Inverno)

Custos energia	Dia 6	Dia 7	Dia 8	Dia 9	Dia 10	Dia 11	Dia 12	Total
Cenário 4 (€)	20,8	28,4	30,2	27,8	26,2	27,4	27,1	187,9
Cenário 5 (€)	24,6	27,9	30,1	27,2	25,3	26,7	26,4	188,1

A imposição de um volume armazenado no final de cada dia superior ao limite mínimo de armazenamento tem também neste cenário, e para este período de Inverno, efeitos positivos, não só na redução de custos energéticos, mas também na operação das bombas. Neste caso será necessário apenas um arranque diário dos grupos elevatórios, como se pode observar na figura 6.19, sendo a bombagem efectuada quase exclusivamente nas horas de super vazio.

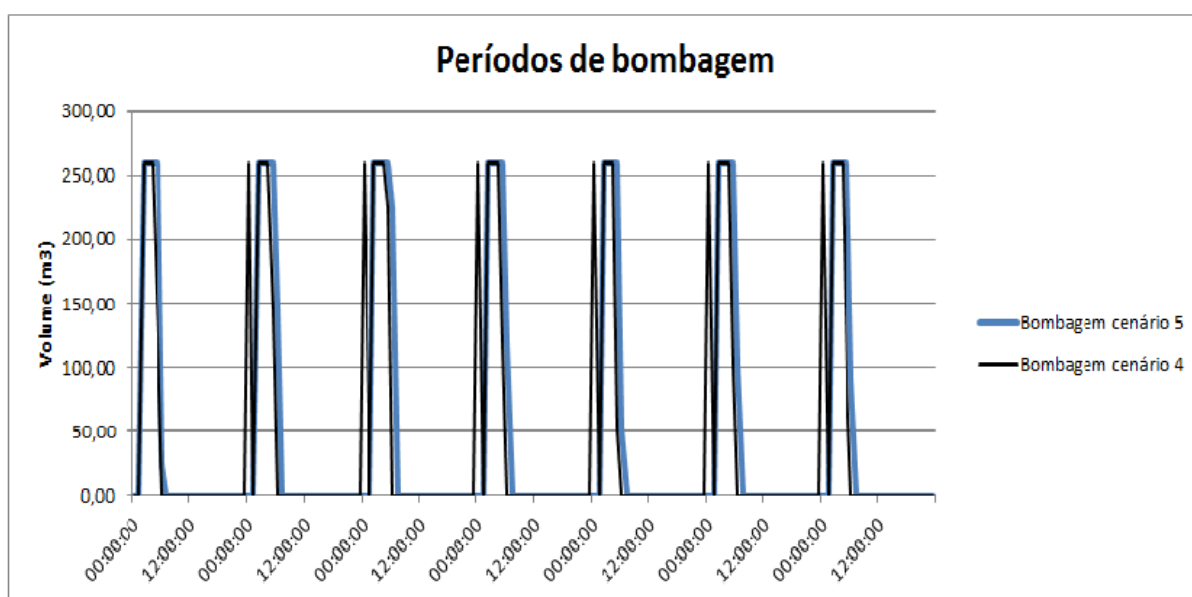


Fig.6.19 – Períodos de bombagem no cenário 4 e no cenário 5 (Semana de Inverno)

Comparando o armazenamento nos cenários 4 e 5, representado na figura 6.20, verifica-se que a variação de volume armazenado nos dois cenários é semelhante. No cenário 4 o limite mínimo de armazenamento é atingido às 00:00h de cada dia, aumentando o volume nas horas seguintes com uma quebra de uma hora na qual a bombagem é interrompida. No cenário 5 a situação é ligeiramente diferente, sendo o volume armazenado de 30% às 00:00h e atingindo um mínimo antes do arranque das bombas mas sem nunca ser atingido o limite mínimo de armazenamento de 20%. Tal como no cenário 4 o limite máximo de armazenamento nunca é atingido, embora no cenário 5 o volume máximo armazenado em cada dia seja superior ao do cenário 4.

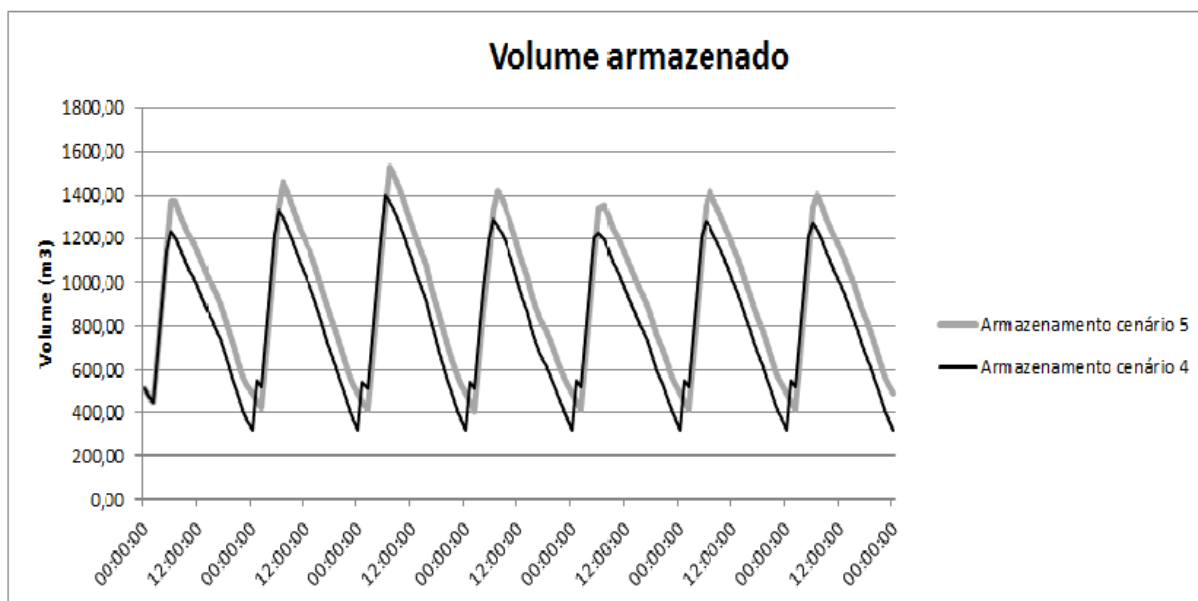


Fig.6.20 – Volume armazenado no cenário 4 e no cenário 5 (Semana de Inverno)

6.7. CENÁRIO 6

Neste cenário simula-se um aumento do volume mínimo de armazenamento para 50% do volume do reservatório, mantendo o nível máximo em 98%.

6.7.1. SEMANA DE VERÃO

Analisando a tabela 6.11 pode-se concluir que um aumento do volume mínimo de armazenamento para 50%, e portanto reduzindo a capacidade efectiva do reservatório em 20%, os custos de bombagem aumentam significativamente neste período de Verão. Obtém-se um aumento do custo semanal de 28.8€ em relação ao cenário 1. Apesar de ocorrer um aumento de custos em todos os dias simulados, mais de metade do aumento total semanal deve-se ao efeito do primeiro dia na simulação.

Tabela 6.11 – Custos diários e total semanal para os cenários 1 e 6 (Semana de Verão)

Custos energia	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5	Dia 6	Dia 7	Total
Cenário 1 (€)	38,7	52,4	50,3	47,3	50,8	44,1	53,9	337,6
Cenário 6 (€)	53,3	55,8	50,7	47,7	54,2	47,3	57,3	366,4

Examinando a figura 6.21 pode-se verificar que o aumento do limite mínimo de armazenamento simulado neste cenário altera substancialmente a distribuição ótima dos períodos de bombagem ao longo de cada dia. Neste cenário verifica-se em relação ao cenário de referência, o cenário 1, uma maior distribuição do volume bombado ao longo do dia, não permitindo o aproveitamento dos horários energéticos mais baratos. O período de bombagem de madrugada é encurtado e o período que ocorre durante a tarde ou noite é alargado. Observando novamente a tabela 6.11 pode-se constatar que o efeito desta alteração tem efeitos mais gravosos nos dias de semana (Dias 1, 2, 5 6 e 7).

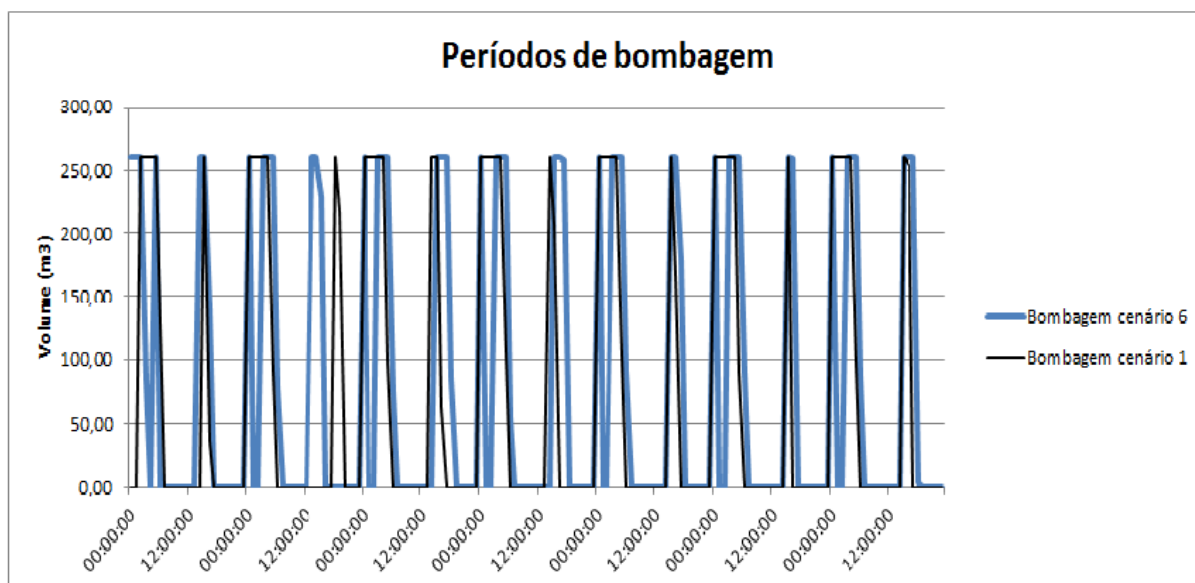


Fig.6.21 – Períodos de bombagem no cenário 1 e no cenário 6 (Semana de Verão)

Em relação ao armazenamento no reservatório neste cenário verifica-se que a oscilação do nível de água armazenada ao longo do dia é maior que em todos os cenários anteriormente simulados. A maior distribuição dos períodos de bombagem faz com que ocorram dois ciclos de enchimento e esvaziamento do reservatório. Ao fim dos períodos de bombagem noturnos o limite máximo é atingido todos os dias, esvaziando, até ao limite mínimo ou aproximando-se desse limite, após a paragem das bombas. Durante a tarde ocorre novo período de bombagem e o reservatório enche, mas não até ao limite máximo, esvaziando novamente, sendo atingido o limite mínimo às 00:00h, quando termina a bombagem.

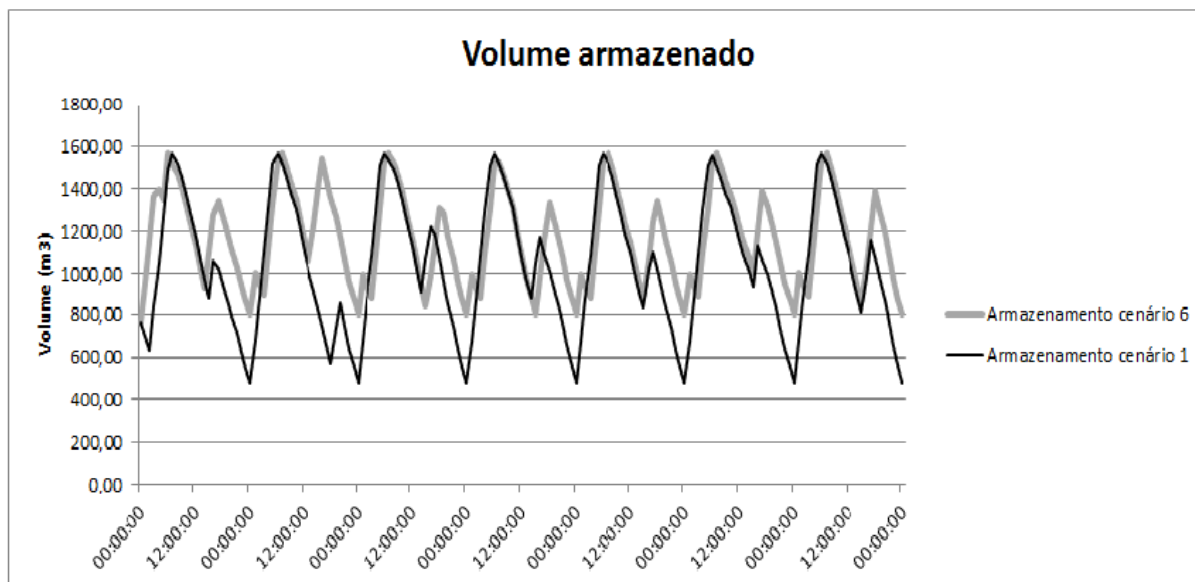


Fig.6.22 – Volume armazenado no cenário 1 e no cenário 6 (Semana de Verão)

6.7.2. SEMANA DE INVERNO

Analogamente ao que sucede no período de Verão, também no período de Inverno se verifica um aumento dos custos energéticos para este cenário. Obtém-se nestas condições um aumento do custo semanal com a energia de 31€, sendo que a parcela correspondente ao primeiro dia é de 12.4€. Pelos motivos anteriormente referidos o resultado neste dia não é comparável com os outros dias, apresentando um aumento de valor cerca de três vezes superior aos outros dias de semana.

Tabela 6.12 – Custos diários e total semanal para os cenários 1 e 6 (Semana de Inverno)

Custos energia	Dia 6	Dia 7	Dia 8	Dia 9	Dia 10	Dia 11	Dia 12	Total
Cenário 1 (€)	25,6	28,4	30,2	27,8	26,2	27,4	27,1	192,7
Cenário 6 (€)	38,0	32,5	31,7	28,9	30,2	31,3	31,1	223,7

Neste cenário as diferenças, em relação ao cenário 1, em termos de períodos de bombagem são bem mais evidentes no período de Inverno. Observando a figura 6.23 identificam-se claramente períodos de bombagem no cenário 6 em horários em que não eram necessários no cenário 1. O período de bombagem noturno é diminuído, mas é necessário um pequeno período de bombagem durante a tarde ou noite.

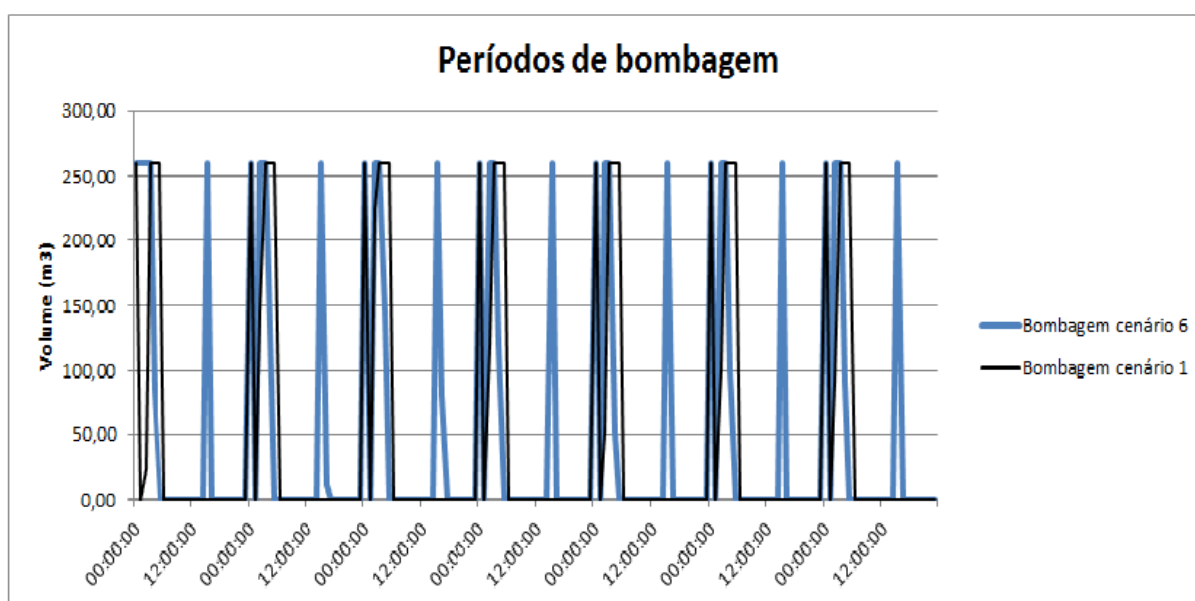


Fig.6.23 – Períodos de bombagem no cenário 1 e no cenário 6 (Semana de Inverno)

Tal como acontece no período de Verão, o limite mínimo de armazenamento é atingido no final de cada dia e o volume máximo armazenado, nem sempre atingindo o limite máximo, verifica-se ao final do período de bombagem noturno. Porém, no período de Inverno, como o segundo período de bombagem é muito mais curto não ocorrem variações do nível de água tão acentuadas como no período de Verão.

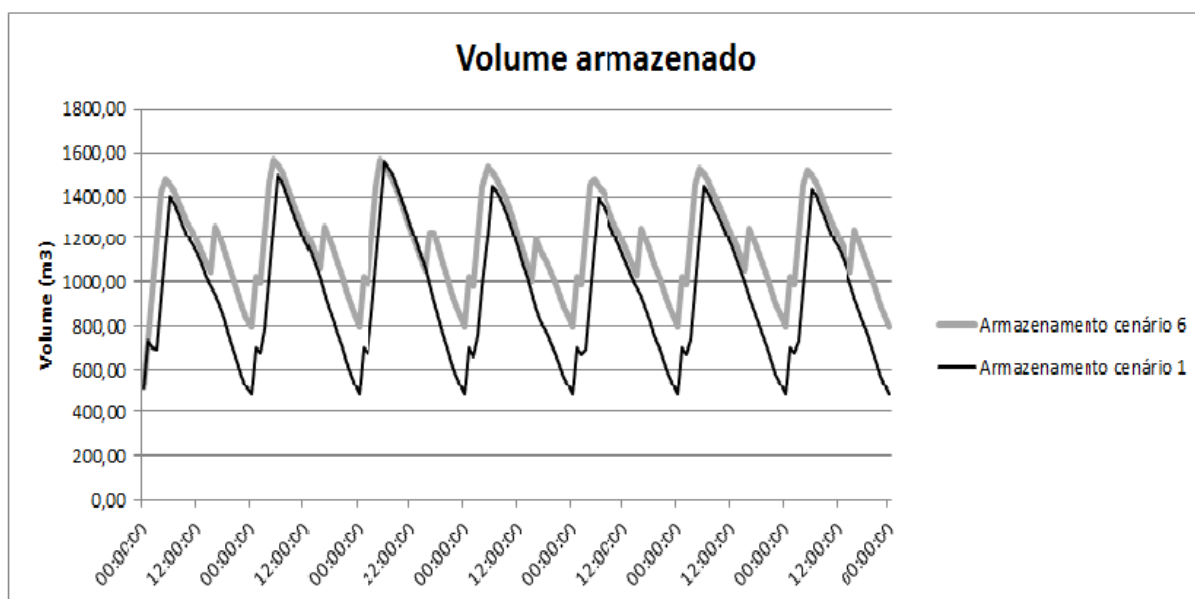


Fig.6.24 – Volume armazenado no cenário 1 e no cenário 6 (Semana de Inverno)

6.8. CENÁRIO 7

Neste cenário simula-se uma diminuição do volume máximo de armazenamento para 90% do volume do reservatório, mantendo o nível mínimo em 30%.

6.8.1. SEMANA DE VERÃO

Analisando a tabela 6.13 verifica-se que nas condições estabelecidas para este cenário há um ligeiro aumento dos custos com a energia eléctrica de 2.4 € no total semanal, não sendo um valor significativo. Curiosamente, no dia 4 obteve-se até uma pequena diminuição desses custos.

Tabela 6.13 – Custos diários e total semanal para os cenários 1 e 7 (Semana de Verão)

Custos energia	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5	Dia 6	Dia 7	Total
Cenário 1 (€)	38,7	52,4	50,3	47,3	50,8	44,1	53,9	337,6
Cenário 7 (€)	40,8	53,2	49,7	46,7	51,1	44,2	54,2	340,0

Neste cenário, os períodos de bombagem ótimos ficam definidos, como aconteceu noutros cenários, por um período noturno mais longo descontínuo numa hora e por um período de pouco mais de uma hora durante a tarde ou noite. Em relação ao cenário 1, apesar de apresentar custos semelhantes, tem a desvantagem da interrupção da bombagem por um período de uma hora. Esta situação deriva do fato de se ter estabelecido como restrição nas simulações períodos de bombagem e paragem de pelo menos uma hora. Obedecendo a essa restrição esta é solução que minimiza os custos energéticos.

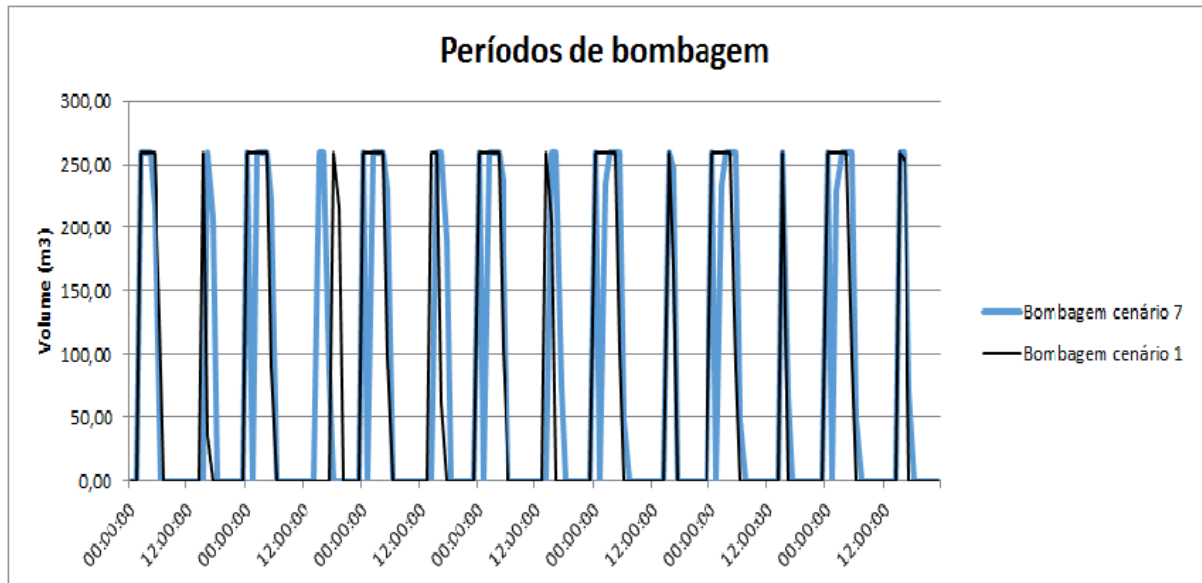


Fig.6.25 – Períodos de bombagem no cenário 1 e no cenário 7 (Semana de Verão)

As diferenças no armazenamento no reservatório em relação ao cenário 1, que se podem observar na figura 6.26, verificam-se no período em que a bombagem é interrompida, esvaziando ligeiramente e após o período de bombagem mais longo o nível máximo atingido é inferior, já que foi essa a alteração que se impôs neste cenário. Quanto ao volume mínimo armazenado, que corresponde ao limite mínimo estabelecido de 30% do volume do reservatório, verifica-se no final de cada dia, e portanto, coincide nos dois cenários.

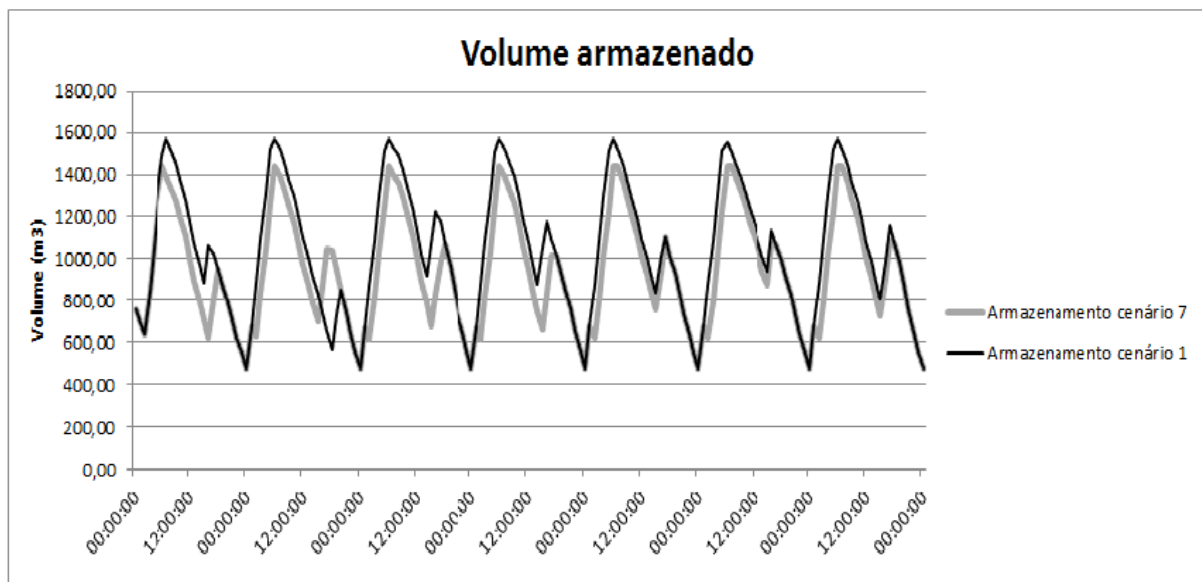


Fig.6.26 – Volume armazenado no cenário 1 e no cenário 7 (Semana de Verão)

6.8.2. SEMANA DE INVERNO

Para o período de Inverno, as condições estabelecidas para este cenário traduzem-se num aumento muito mais significativo dos custos energéticos do que no período de Verão. A redução semanal dos custos totaliza neste período 18€, e como se pode ver na tabela 6.14, neste caso o primeiro dia não afeta o cálculo dos custos, já que em ambos os cenários, 1 e 7, o volume máximo armazenado nesse dia é inferior aos 90% do volume do reservatório estabelecidos para o cenário 7.

Tabela 6.14 – Custos diários e total semanal para os cenários 1 e 7 (Semana de Inverno)

Custos energia	Dia 6	Dia 7	Dia 8	Dia 9	Dia 10	Dia 11	Dia 12	Total
Cenário 1 (€)	25,6	28,4	30,2	27,8	26,2	27,4	27,1	192,7
Cenário 7 (€)	25,6	32,3	31,3	28,9	30,2	31,3	31,1	210,7

O aumento dos custos neste cenário, relativamente ao cenário 1, deriva do fato de ser necessário um período de bombagem adicional a efetuar durante a tarde ou noite, como se pode verificar na figura 6.27. Apesar de ser um período curto, de pouco mais de uma hora, a grande diferença de preço unitário da energia entre os períodos de vazio normal e de cheia faz com que os custos aumentem significativamente.

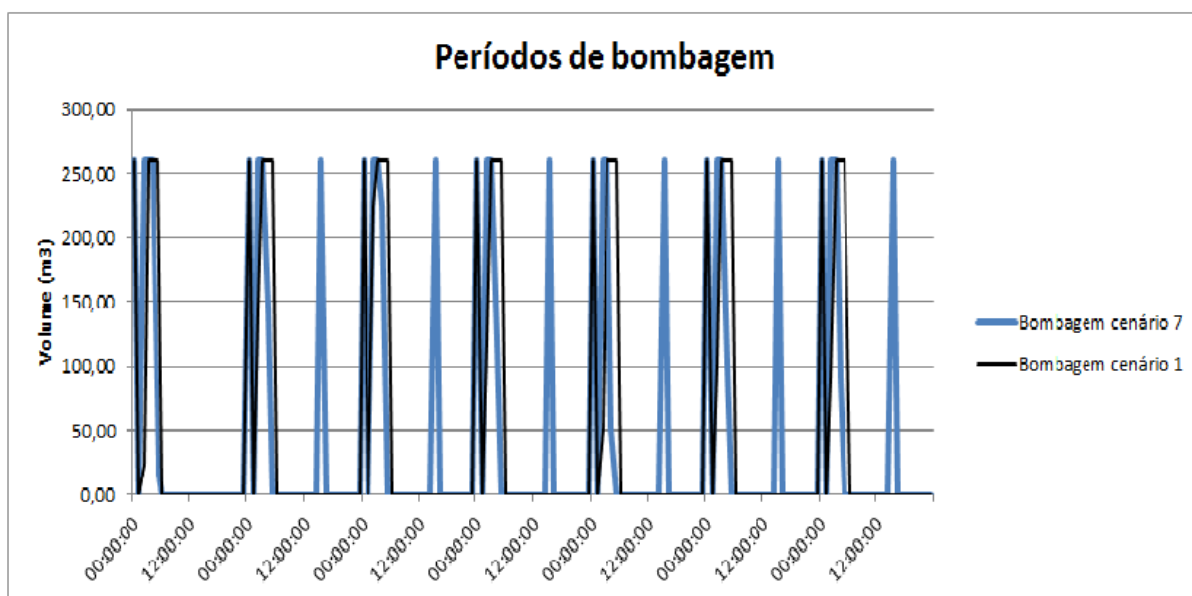


Fig.6.27 – Períodos de bombagem no cenário 1 e no cenário 7 (Semana de Inverno)

Em termos de volume armazenado no reservatório, o que sucede é que a transição de uma hora de bombagem do período de madrugada para o período da tarde faz com que o volume máximo armazenado nesta semana nunca atinja valores próximos do limite máximo, ou seja, a imposição de um limite máximo de 90% obrigou a que se transferisse um período de bombagem para a tarde, e consequentemente, o valor máximo armazenado neste cenário fica ainda mais longe do limite máximo do que no cenário 1. O volume mínimo armazenado coincide em valor, 30% do volume do reservatório, e no tempo, às 00:00h, com o do cenário 1.

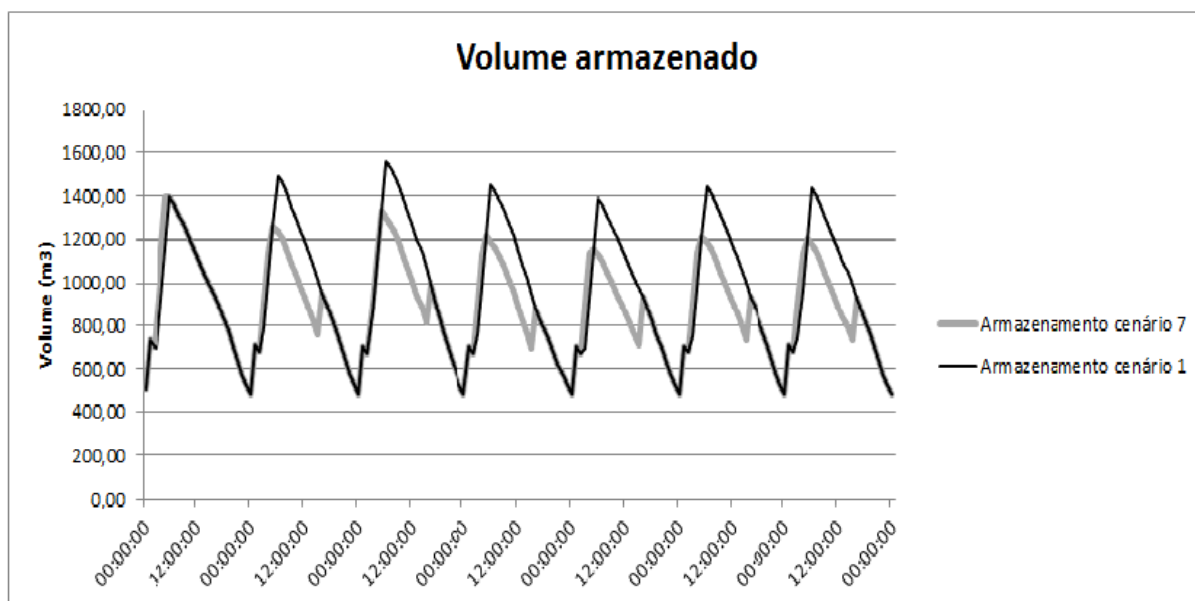


Fig.6.28 – Volume armazenado no cenário 1 e no cenário 7 (Semana de Inverno)

6.9. CENÁRIO 8

Este último cenário pretende simular a situação em que se fecha uma das células do reservatório, reduzindo a capacidade deste para metade mas também reduzindo para metade o volume inicial armazenado. Considera-se para esta situação um limite mínimo de armazenamento de 20% do volume de uma das células. Pretende-se assim avaliar qual o custo adicional de um eventual fecho de uma célula para limpeza ou reparação. Os resultados obtidos podem ajudar na escolha de um dia mais adequado, o que origine menor aumento de custos, para esta operação.

6.9.1. SEMANA DE VERÃO

Analisando a tabela 6.15 constata-se que neste cenário ocorre um grande aumento dos custos com a energia, o que seria de esperar, já que se reduz a capacidade de regularização do reservatório para metade. O aumento do custo semanal totaliza neste período de Verão um valor de 33.5€. Como ao Domingo, dia 4, apenas se praticam os horários energéticos mais baratos também seria expectável que esse fosse o dia em que o aumento de custos é menor.

Tabela 6.15 – Custos diários e total semanal para os cenários 1 e 8 (Semana de Verão)

Custos energia	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5	Dia 6	Dia 7	Total
Cenário 1 (€)	38,7	52,4	50,3	47,3	50,8	44,1	53,9	337,6
Cenário 8 (€)	47,2	58,3	51,9	48,2	56,2	49,3	60,0	371,1

Como se pode verificar na figura 6.29 a redução do volume do reservatório para metade obriga a períodos de bombagem mais curtos e mais espaçados no tempo do que no cenário 1, bem como nos outros cenários. Os períodos ótimos de bombagem para este cenário ficam definidos por um período de bombagem de uma hora às 00:00h de cada dia, para impedir que o limite mínimo seja ultrapassado,

e por dois períodos de duração idêntica, cerca de três horas, um nas horas de super vazio e outro durante a tarde.

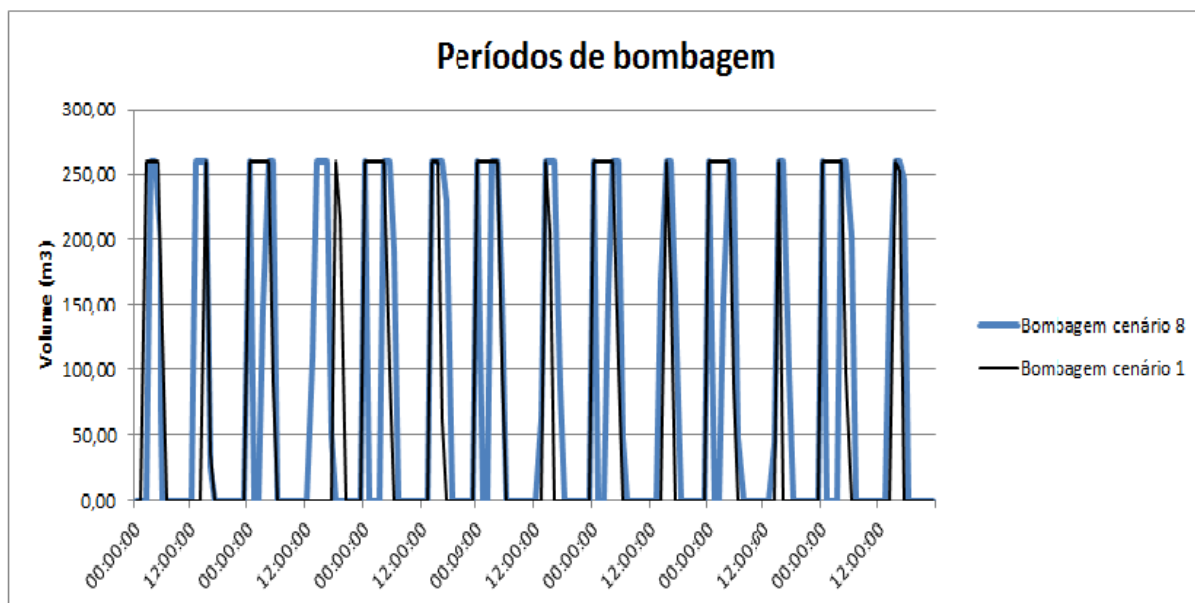


Fig.6.29 – Períodos de bombagem no cenário 1 e no cenário 8 (Semana de Verão)

Esta distribuição dos períodos de bombagem faz com o reservatório atinja os seus limites de armazenamento, ou muito perto, duas vezes por dia. Como se pode observar na figura 6.30, o limite máximo é atingido no fim dos períodos de bombagem de cerca de três horas, e o limite mínimo é atingido imediatamente antes do período de bombagem seguinte. Verifica-se que nesta situação não são aproveitadas na íntegra as horas de super vazio nem horas de vazio normal, sendo que nos dias de semana as bombas têm que ser acionadas num grande período de horas de cheia.

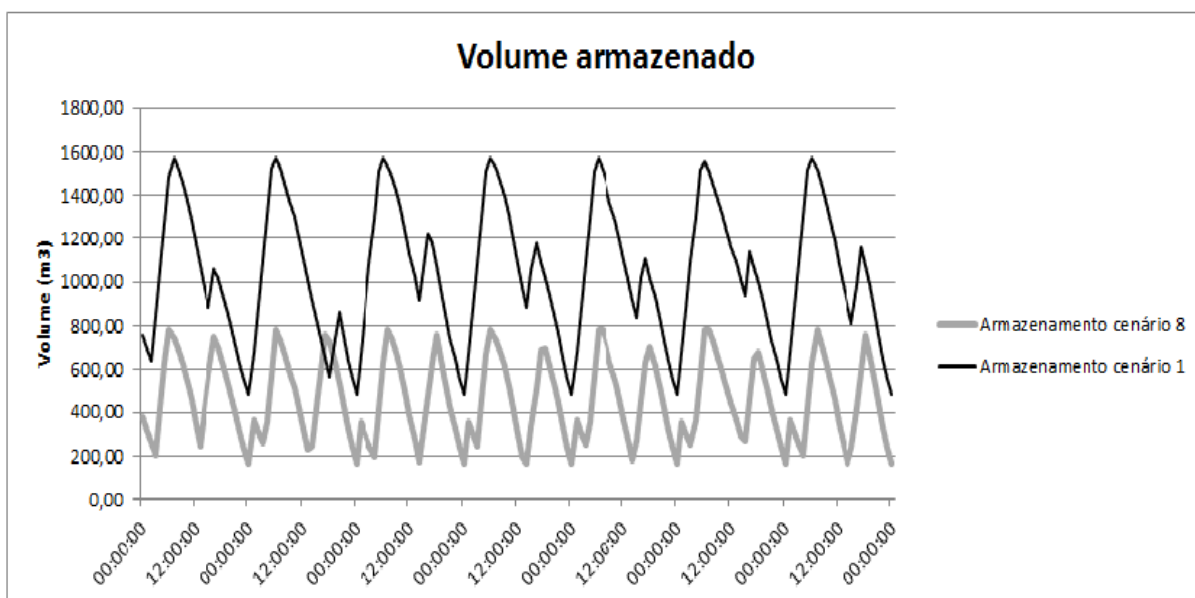


Fig.6.30 – Volume armazenado no cenário 1 e no cenário 8 (Semana de Verão)

6.9.2. SEMANA DE INVERNO

Tal como acontece neste cenário para o período de Verão, também no período de Inverno as repercussões da diminuição da capacidade do reservatório para metade são bastante significativas no aumento dos custos de energia. O aumento do custo semanal neste período de Inverno totaliza 24.7€. Também o Domingo foi o dia em que o aumento do custo foi menor.

Tabela 6.16 – Custos diários e total semanal para os cenários 1 e 8 (Semana de Inverno)

Custos energia	Dia 6	Dia 7	Dia 8	Dia 9	Dia 10	Dia 11	Dia 12	Total
Cenário 1 (€)	25,6	28,4	30,2	27,8	26,2	27,4	27,1	192,7
Cenário 8 (€)	27,0	34,3	32,2	29,3	30,4	32,3	31,9	217,4

Para o período de Inverno, a diminuição da capacidade do reservatório tem efeito idêntico ao que acontece no período de Verão, isto é, é necessário diminuir os períodos de bombagem no período noturno e acionar a bomba num período durante a tarde como se pode observar na figura 6.31. Como os consumos são menores no Inverno, e portanto, também o volume bombado, o período de bombagem durante a tarde é bem menor que o que ocorre no período de Verão. Neste caso será de pouco mais de uma hora.

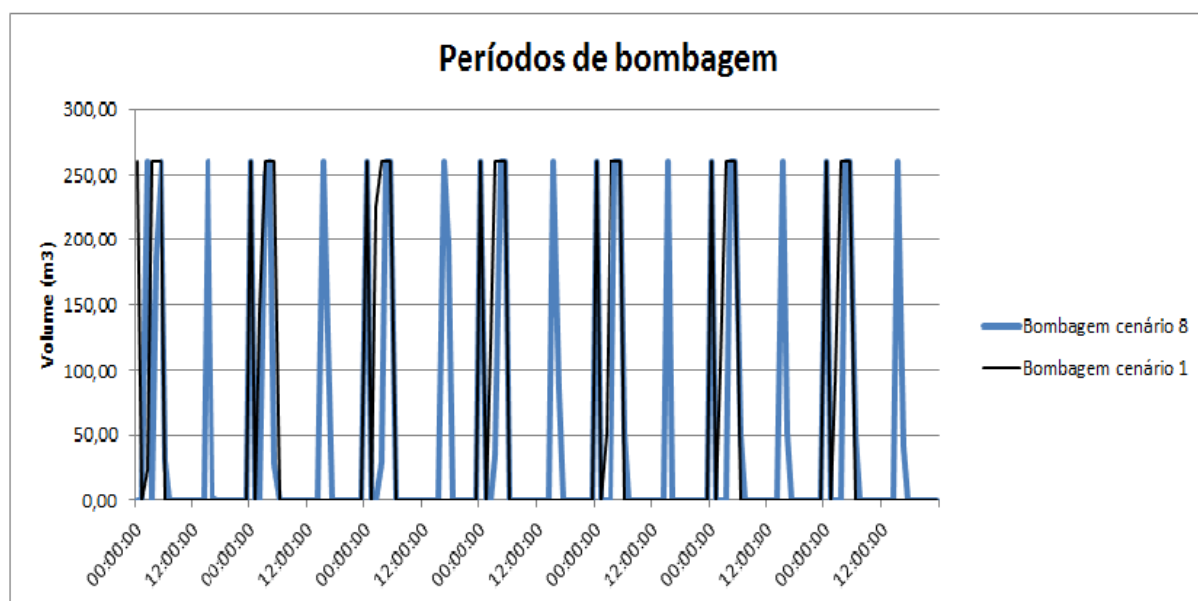


Fig.6.31 – Períodos de bombagem no cenário 1 e no cenário 8 (Semana de Inverno)

Como foi mencionado no parágrafo anterior, o volume bombado nos períodos de Inverno é menor que nos períodos de Verão, e esse fato tem reflexos no volume de água armazenada no reservatório. Na figura 6.32 pode-se observar que o limite máximo de armazenamento só é atingido uma vez por dia neste período, que é após o período de bombagem noturno mais longo. O limite mínimo de armazenamento também só é atingido no final de cada dia no período de Inverno. Na semana de Verão o reservatório enche e esvazia em duas ocasiões. Tal como no período de verão o grande aumento de custos de energia está associado ao deslocamento dos períodos de bombagem dos horários mais baratos para os mais caros, mas a percentagem de aumento de custo em relação ao cenário 1 é maior no período de Inverno, já que no cenário 1 a bombagem no período de Inverno se efetua exclusivamente nos períodos energéticos mais baratos.

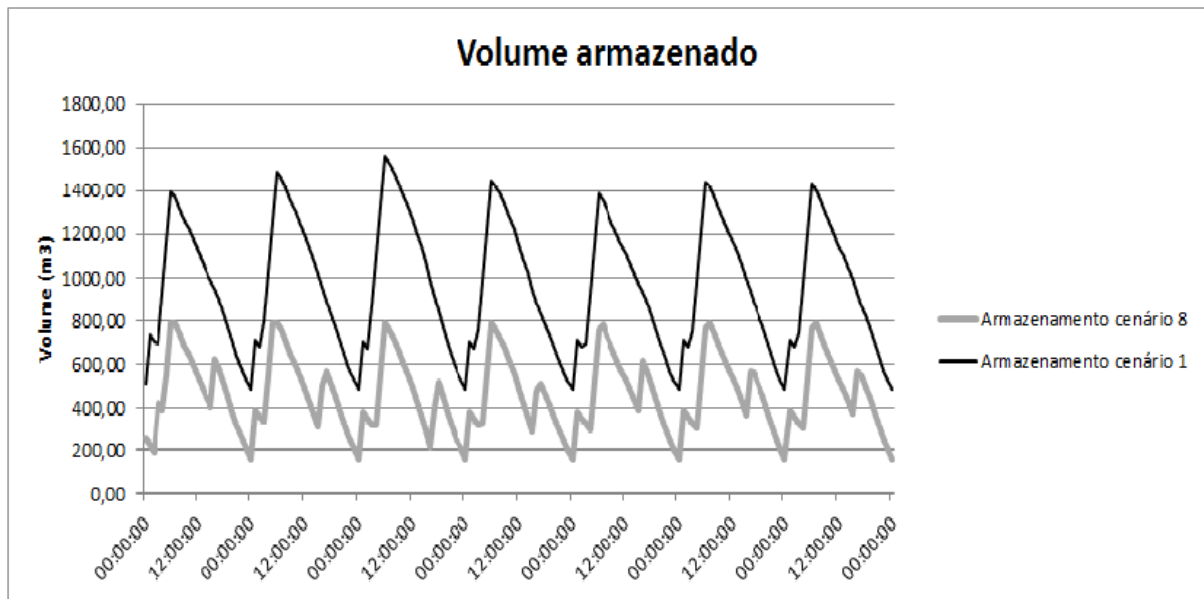


Fig.6.32 – Volume armazenado no cenário 1 e no cenário 8 (Semana de Inverno)

7

CONCLUSÃO

7.1. CONCLUSÕES

O tratamento dos dados fornecidos pela empresa Águas do Noroeste, S.A., permitiu depreender que o ponto de funcionamento real dos grupos elevatórios não corresponde ao ponto de funcionamento teórico. De fato, o caudal de elevação real é menor que o teórico, cerca de 260 m³/h e 322 m³/h respectivamente. Consequentemente, a altura manométrica também é diferente, sendo na realidade 110m e não 99.75m, que corresponde a perdas de carga 10,25m superiores.

A metodologia de otimização aplicada permite estudar inúmeros cenários de funcionamento de um sistema elevatório. Na análise efetuada nesta dissertação evidenciou-se a utilidade deste método na avaliação da influência da capacidade de regularização do reservatório de jusante nos custos com a energia elétrica. Porém, o algoritmo de otimização poderia ser aplicado para avaliar estes mesmos custos para outro ponto de funcionamento dos grupos elevatórios ou para outra estrutura do tarifário energético.

No período de Verão estudado foi possível obter custos com a energia elétrica inferiores aos da situação real em todos os cenários simulados, inclusive o cenário mais gravoso, o cenário 8, no qual se reduz a capacidade do reservatório para metade. Pode-se concluir que o potencial de otimização do funcionamento real do sistema elevatório analisado, no período de Verão, é elevado.

No período de Inverno, obteve-se uma redução de custos em relação à situação real nos cenários 1 a 5, e um aumento desses custos nos cenários 6 a 8. Comparando os resultados nos cenários 1 a 5, verifica-se que não só em valor absoluto mas também em termos relativos, as soluções otimizadas permitem maior redução de custos no período de Verão.

Nos cenários 1 a 3, nos quais se impuseram limites de armazenamento iguais aos da situação real, obteve-se uma redução de custos, tanto para o período de Verão como para o período de Inverno. No entanto, constata-se que o cenário 3 é o mais favorável, isto é, impondo um volume armazenado ao fim de cada dia ligeiramente superior ao limite mínimo de armazenamento permite um maior aproveitamento do horário energético mais barato. No período de Inverno, para além da redução de custos, esta imposição tem a vantagem de permitir menos um arranque das bombas, e portanto, um funcionamento mais regular dos grupos elevatórios.

A diminuição do limite mínimo de armazenamento de 30% para 20%, situação simulada no cenário 4, apenas influencia os custos com a energia na semana de Verão, originando uma redução dos mesmos. Na semana de Inverno os custos de bombagem são os mesmos para os dois limites mínimos de armazenamento e os períodos de bombagem ótimos não se alteram significativamente, apenas são ligeiramente adiantados no cenário 4. Porém, no período de Verão, esta diminuição faz com que o

período de bombagem noturno seja dividido em dois, não sendo portanto uma solução tão vantajosa em termos da regularidade de operação as bombas.

À semelhança do que foi simulado nos cenários 2 e 3, no cenário 5 também se impôs um volume armazenado no final de cada dia superior ao limite mínimo de armazenamento, sendo que neste caso é superior, em relação ao cenário 4, em 10% do volume do reservatório. No período de Verão, apesar de apresentar vantagens ao nível da regularidade de operação das bombas, obteve-se um aumento de custos energéticos. Para o período de Inverno obteve-se uma redução de custos e um período de bombagem ótimo definido por apenas um arranque diário das bombas.

As condições simuladas no cenário 6 acarretam um aumento significativo dos custos de bombagem nos dois períodos semanais estudados.

No cenário 7 os efeitos da diminuição do limite de armazenamento máximo, de 98% para 90% do volume do reservatório, são muito mais desfavoráveis no período de Inverno. Por um lado, no período de Verão esta alteração origina um ligeiro aumento dos custos, não alterando significativamente os períodos de bombagem. No período de Inverno esta alteração obriga a programar um arranque dos grupos elevatórios no período da tarde, acarretando um significativo aumento de custos.

No último cenário, simula-se o fecho de uma das células do reservatório e, como seria expectável, esta diminuição da capacidade de regularização do reservatório para metade acarreta grandes aumentos dos custos de bombagem, obrigando a períodos de bombagem mais distribuídos ao longo do dia. No entanto, o aumento dos custos é menos significativo nos dias de fim-de-semana, sendo recomendável proceder a operações de limpeza e/ou reparação nestes dias.

Em suma, os cenários em que se aumenta a capacidade do reservatório acarretam, em geral, uma diminuição dos custos com a energia, e os cenários em que se simula a situação oposta originam um aumento desses custos. Como se pode constatar analisando os resultados da simulação dos cenários 3 e 5, impondo uma restrição adicional ao volume armazenado ao final do dia, para além dos limites de armazenamento, é possível obter soluções menos onerosas, no entanto, para que esse valor imposto tenha um impacto económico positivo deve ser ligeiramente superior ao limite mínimo de armazenamento.

A diferença de volumes consumidos nas redes de distribuição a jusante do sistema elevatório afeta, como se percebe, as necessidades de elevação de água. Em geral, os volumes de água consumidos no período de Verão são superiores aos consumidos no período de Inverno. A simulação dos oito cenários escolhidos para este estudo possibilitou identificar situações em que a alteração das condições de armazenamento pode ter efeitos distintos nestes dois períodos, precisamente devido aos consumos desiguais. Concretamente, esta situação pode-se verificar nos resultados da simulação dos cenários 4 e 7.

7.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O estudo desenvolvido nesta dissertação e os resultados obtidos permitiram identificar alguns aspetos que se sugerem como alvo de investigação em trabalhos futuros e que a seguir se enumeram:

- Aplicação da metodologia utilizada para a simulação de mais cenários;
- Aplicação desta metodologia a períodos mais longos;
- Aplicação desta metodologia a sistemas elevatórios com bombas a funcionar em paralelo e em série;

- Aplicação do algoritmo de otimização utilizado para avaliar qual o ponto de funcionamento mais económico dos grupos elevatórios;
- Aplicação de metodologia de otimização alternativa para comparação de resultados.

ANEXOS

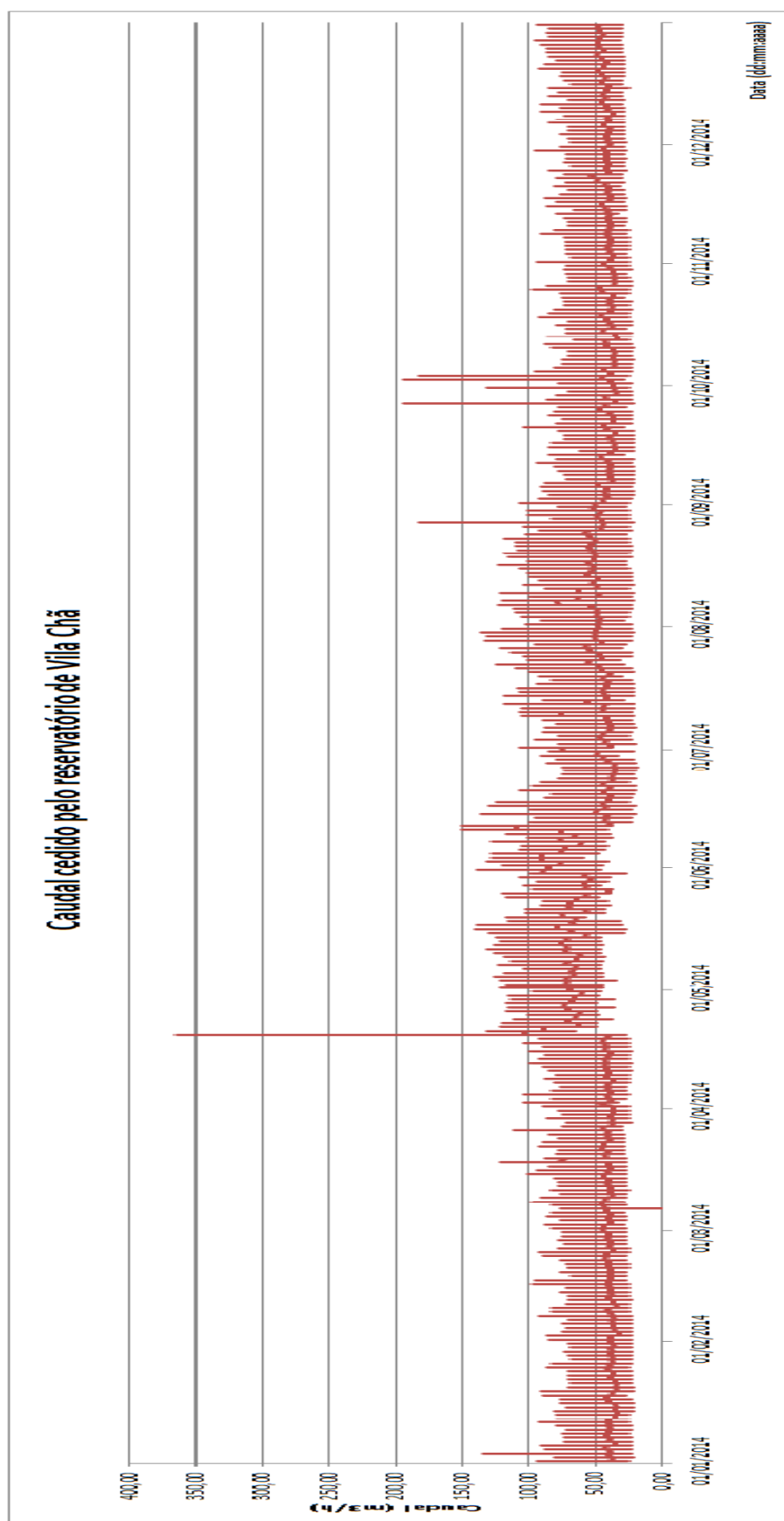


Fig.A1 – Caudais cedidos ao longo do ano pelo reservatório de Vila Chã

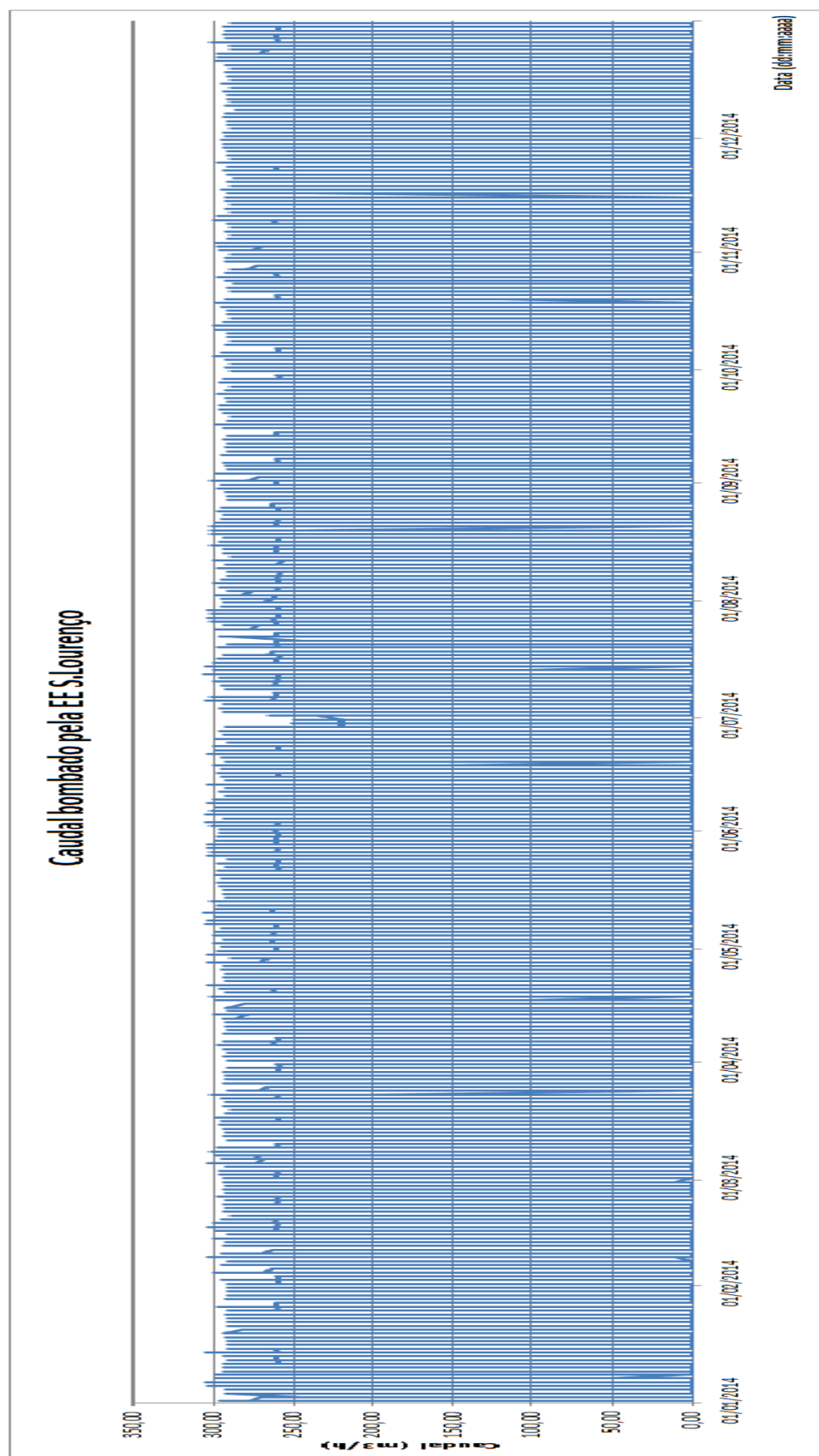


Fig.A2 – Caudais bombados ao longo do ano pela EE S. Lourenço

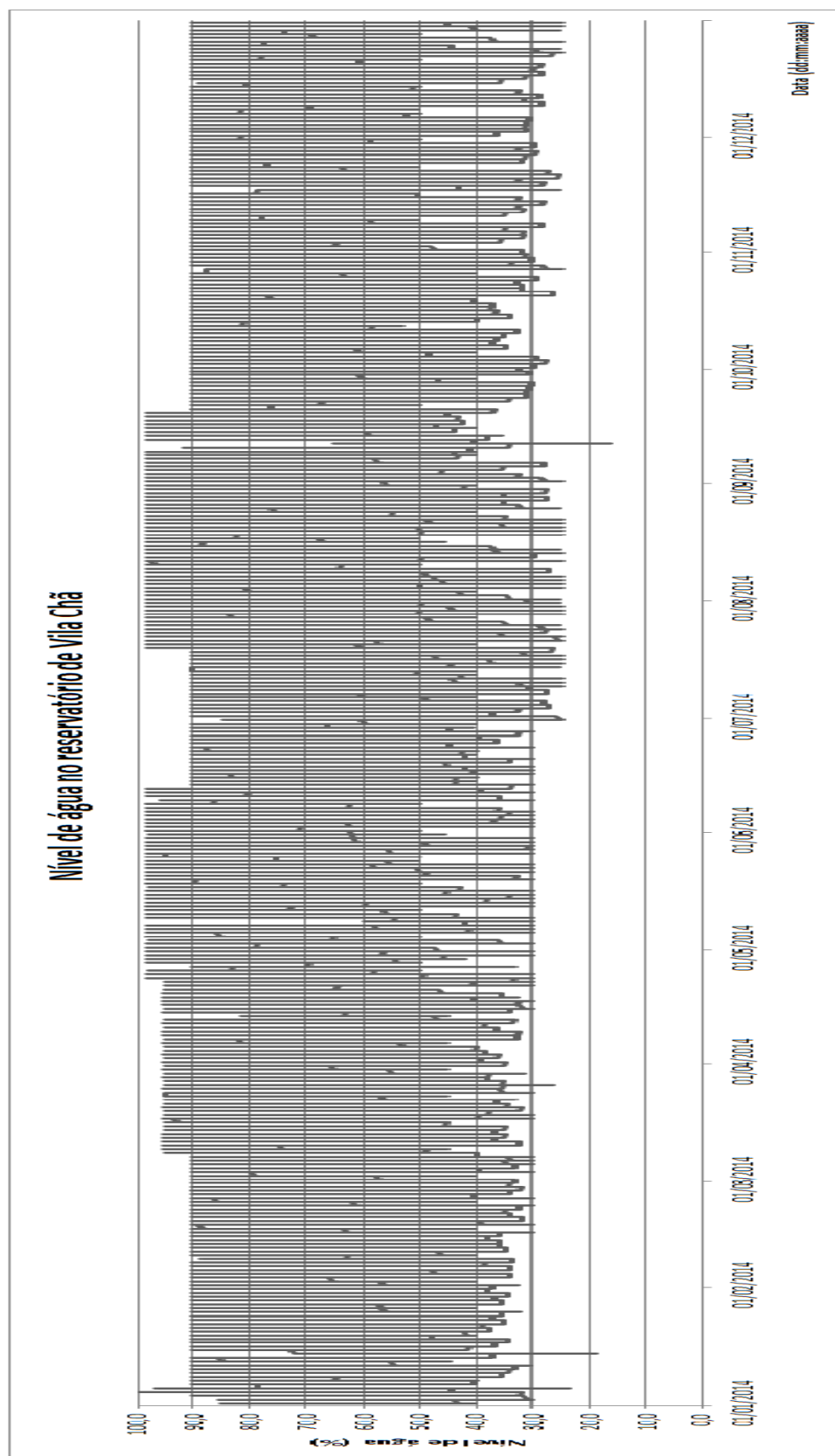


Fig.A3 – Nível de água ao longo do ano no reservatório de Vila Chã

