



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Pedro Nuno Rocha Oliveira

Estudo para Otimização Energética do Subsistema de Queimadela

Mestrado Integrado em Engenharia Biológica

Trabalho efetuado sob orientação do:
Professor Doutor Eugénio Campos Ferreira
e do supervisor na empresa:
Engenheiro Adriano Magalhães

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição
CC BY

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Agradecimentos

No final desta etapa importante não podia deixar de agradecer, em primeiro lugar, à minha família, que sempre me acompanhou neste percurso académico e sempre me apoiou em todas as decisões, constituindo desta forma um suporte motivacional essencial.

Aos amigos que sempre se mostraram disponíveis para me auxiliar ao longo dos anos.

Aos meus orientadores, quer na Universidade, Prof. Eugénio Ferreira, quer na empresa, Eng. Adriano Magalhães, pois com a sua ajuda consegui enriquecer um pouco mais o meu trabalho académico e realizar um projeto interessante com utilidade prática nos dias de hoje.

Por último, gostaria de agradecer a todos os colegas na Águas do Norte que me ajudaram de algum modo, seja na receção, na extração dos dados que necessitava, etc., pois desta forma tornaram o meu trabalho mais rentável.

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

Estudo para otimização energética do Subsistema de Queimadela

Sumário

Esta dissertação, realizada no âmbito de Mestrado Integrado em Engenharia Biológica, teve por finalidade estudar a otimização energética do Subsistema Queimadela da empresa Águas do Norte, S.A..

O projeto incidiu em dois objetivos. O primeiro consistiu no acompanhamento da implementação de um modelo dinâmico, SCUBIC, que através de algoritmos informáticos possibilita uma poupança energética devido a alterações nos períodos de acionamento das bombas. O segundo objetivo abrangeu a elaboração de um algoritmo, em Excel, capaz de realizar a mesma função do SCUBIC.

Para o desenvolvimento do algoritmo foi necessário recorrer ao histórico de consumo de energia e efetuar análises de dados como, caudais de distribuição, caracterização do sistema adutor (tubagens, válvulas e nós), volumes de reservatórios, cotas onde estão colocadas as bombas, entre outros. De uma forma simplificada, foi necessário identificar as variáveis de decisão e qual a função objetivo de forma a minimizar os custos energéticos por ação do bombeamento de água.

Adicionalmente, a metodologia desenvolvida foi aplicada nalguns troços do Subsistema de Areias de Vilar e foi estudada uma alteração ao reservatório RQ 15 habilitando-o a funcionar em período noturno.

Obtiveram-se resultados relevantes, como se verifica com uma poupança de cerca de 6 000 euros anuais para o Subsistema de Queimadela. A aplicação do algoritmo desenvolvido em EXCEL permitiu, de forma expedita, verificar que as alterações na infraestrutura RQ 15 de insonorização trazem uma vantagem económica de 11 000 euros anuais.

Palavras-chave: bombas, eficiência energética, otimização

Abstract

This dissertation, carried out under the Integrated Master Program in Biological Engineering, aims to study the energy optimization of Águas do Norte S.A Subsystem, Queimadela.

The project focused on two main objectives. The first consisted in monitoring the implementation of a dynamic model, SCUBIC, which through computer algorithms enables energy savings due to changes in pump activation periods. The second objective covered the elaboration of an algorithm, in Excel, capable of performing the same function as SCUBIC.

For the development of the algorithm it was necessary to use the history of energy consumption and to perform data analysis such as distribution flows, characterization of the adductor system (pipes, valves and nodes), reservoir volumes, quotas where the pumps are placed, among others. In a simplified way, it was necessary to identify the decision variables and the objective function in order to minimize the energy costs per action of water pumping.

Additionally, the developed methodology was applied in some sections of the Areias de Vilar Subsystem and an alteration to the RQ 15 reservoir was studied, enabling it to operate at night. Relevant results were obtained, as is the case with savings of around € 6,000 per year for the Queimadela Subsystem. The application of the algorithm developed in EXCEL has made it possible, expeditiously, to verify that the alterations in the soundproofing infrastructure RQ 15 bring an economic advantage of 11 000 euros per year.

Keywords: energy efficiency, pumps, optimization

Índice

1.	INTRODUÇÃO AO TEMA.....	1
1.1.	Apresentação e enquadramento do tema	1
1.2.	ETA de Queimadela	2
2.	REVISÃO DO PROBLEMA	4
2.1.	Distribuição	4
2.2.	Fatores que afetam os padrões de consumo	5
2.3.	Tarifas e ciclos horários de energia elétrica	5
2.4.	Plano de otimização energética (POE)	7
2.5.	Controlo energético.....	7
2.6.	Norma ISO 50001	8
2.7.	Sistemas de bombeamento.....	9
2.7.1.	Variadores de frequência	10
2.7.2.	Substituição das bombas sobredimensionadas	11
2.8.	Planeamento ótimo.....	12
2.9.	Métodos de Otimização e Programação Matemática	14
2.9.1.	Programação linear	15
2.9.2.	Programação não linear	15
2.9.3.	Programação dinâmica.....	15
2.9.4.	Redes neuronais artificiais	16
2.10.	SCUBIC	16
3.	TRABALHO DESENVOLVIDO - SUBSISTEMA DE QUEIMADELA.....	18
3.1.	Análise do funcionamento das bombas	19
3.2.	Análise energética dos reservatórios	24
3.2.1.	Caracterização energética.....	26
3.3.	Nível de operação dos reservatórios	26
3.4.	Modulação virtual em EPANET por parte da SCUBIC	28
3.4.1.	Previsão de consumo	30
3.4.2.	Análise gráfica do comportamento dos reservatórios implementados pela SCUBIC	31
3.5.	Análise do “caso” RQ 15.....	36
3.6.	Programação não linear em Excel	37
3.7.	Resultados.....	41
4.	TRABALHO DESENVOLVIDO - SUBSISTEMA DE AREIAS DE VILAR	44
4.1.1.	Troço de Burgães	44
4.1.2.	Troço de Cerite (Famalicão).....	47
4.1.3.	Lemenhe.....	49

5. CONCLUSÃO	51
6. BIBLIOGRAFIA	52
7. ANEXO - BALANÇOS VOLÚMICOS AOS RESERVATÓRIOS.....	53

Índice de figuras

Figura 1: Caracterização do sistema adutor. A vermelho a água é elevada com auxílio de bombas, a preto a água é transportada por gravidade.	4
Figura 2: Períodos horários energéticos, quer para Inverno quer para Verão	6
Figura 3: Modelo de sistema de gestão de energia para a norma ISO 50001	10
Figura 4: Gamas de funcionamento das bombas (H – altura manométrica; Q – caudal; HB * e QB * – ponto ótimo; η * – eficiência do ponto ótimo; W^* - trabalho no ponto ótimo)	12
Figura 5: Nível ideal de um reservatório ao longo de um dia	13
Figura 6: Curva hidráulica correspondente ao bombeamento de RQ 01	20
Figura 7: Curva hidráulica correspondente ao bombeamento de RQ 17	21
Figura 8: Curva hidráulica correspondente ao bombeamento de RQ 10	23
Figura 9: Curva hidráulica correspondente ao bombeamento de EE 01, coluna 125-150, linha 6	23
Figura 10: Comparação da energia gasta por sistema de bombeamento durante cada mês	24
Figura 11: Comparação do custo por kWh de cada sistema de bombeamento	25
Figura 12: Comparação da utilização de cada tarifa energética de cada sistema de bombeamento	25
Figura 13: Volume instantâneo de RQ 16 no dia 1 de fevereiro de 2019	30
Figura 14: Volume instantâneo do RQ 10	31
Figura 15: Evolução do nível e caudal do reservatório RQ 15	31
Figura 16: Evolução do caudal de RQ 15 para RQ 16 e RQ 17	32
Figura 17: Evolução do nível de RQ 17 e RQ 18	32
Figura 18: Evolução do caudal de RQ 17 para RQ 18 e RQ 20	32
Figura 19: Evolução do nível RQ 20	33
Figura 20: Evolução do nível de RQ 21 e RQ 22	33
Figura 21: Evolução do nível de RQ 01	33
Figura 22: Evolução do caudal de RQ 01 para RQ 08 e do nível de RQ 08	34
Figura 23: Evolução do caudal de distribuição de RQ 08 para RQ 09 e do nível de RQ 09	34
Figura 24: Evolução do nível de EE 01	35
Figura 25: Evolução da distribuição de RQ 10 e do nível de RQ 10	35
Figura 26: Evolução do caudal de RQ 10 para RQ 11 e do nível de RQ 11	35
Figura 27 Evolução do caudal de entrada em EE 02 e do nível de EE 02	35
Figura 28: Evolução do nível de RQ 14	36
Figura 29: Exemplo do algoritmo em Excel aplicado no Subsistema Queimadela para dias úteis no inverno	40
Figura 30: Mapa corresponde ao troço de Burgães	44
Figura 31: Distribuição do troço de Burgães	45
Figura 32: Distribuição de Cerite	47
Figura 33: Algoritmo aplicado a Cerite no dia 11 de julho de 2019	48
Figura 34: Volume instantâneo do reservatório de Lemenhe	50

Índice de tabelas

Tabela 1: Custo de energia dos diferentes tarifários ao longo do ano	6
Tabela 2: Opção tarifária e percentagem de energia gasta por reservatório	18
Tabela 3: Cotas de bombeamento.....	19
Tabela 4: Valores informativos das bombas do Subsistema como a potência, caudal, etc.....	19
Tabela 5: Dados correspondentes ao bombeamento de RQ 15.....	22
Tabela 6: Consumo elétrico anual por infraestrutura.....	26
Tabela 7: Capacidade máxima e n° de células de cada reservatório.....	27
Tabela 8: Nível de operação dos reservatórios do Subsistema Queimadela	28
Tabela 9: Diferença de custo de operação do RQ 15 comparando o seu funcionamento no período da tarde com o seu funcionamento no período noturno.....	36
Tabela 10: Correspondência da divisão de 24 horas em diferentes períodos de tarifário.....	38
Tabela 11: Custos anuais de cada infraestrutura do Subsistema Queimadela	40
Tabela 12: Custos anuais por infraestrutura após o algoritmo em Excel.....	41
Tabela 13: Custos associados aos dias de inverno e verão	42
Tabela 14: Ação de bombeamento correspondente ao dia 13 de janeiro de 2019.....	46
Tabela 15: Ação de bombeamento correspondente ao dia 13 de janeiro de 2019 sugerida pelo solver	46

Nomenclatura

AdNorte	Águas do Norte
BTN	Baixa tensão normal
d	Número de dias do mês
E	Energia
E_c	Energia consumida
EE	Estação elevatória
Ele.	Elevatória
ETA	Estação de tratamento de água
F.O.	Função Objetivo
H	Altura manométrica
H.P.	Horas de ponta
ISO	International Standard Organization
MT	Média tensão
n	Hora do dia
NHP	Número de horas de ponta
P	Potência da bomba
P	Custo unitário de energia
PDCA	Plan-Do-Check-Act
POE	Plano de otimização energética
Q	Caudal
Q_e	Caudal de entrada
Q_s	Caudal de saída
RQ	Reservatório
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SGE	Sistema de Gestão de Energia
T	Tarifa

V_a	Volume atual
V_{max}	Volume máximo
V_{min}	Volume mínimo
V_x	Volume instantâneo do reservatório x
W	Trabalho
η	Eficiência

1. INTRODUÇÃO AO TEMA

1.1. Apresentação e enquadramento do tema

O tema desenvolvido neste projeto incide no “Estudo para otimização energética do Subsistema de Queimadela”. O subsistema em estudo pertence à empresa Águas do Norte, S.A, empresa do grupo Águas de Portugal, responsável pela conceção, exploração e gestão do sistema multimunicipal de abastecimento de água e de saneamento do Norte de Portugal.

Atualmente é imperativo realizarem-se esforços para reduzir os custos energéticos. Nas redes de distribuição de água para consumo humano, as estratégias de otimização assentam sobretudo na economia da água já que o seu uso está diretamente ligado ao consumo de energia.

Os sistemas de abastecimento de água têm função de levar água em quantidade e qualidade adequada à população. Contudo, devido ao aumento do consumo de água, estes sistemas deixam de conseguir efetuar este processo de uma maneira tradicional, com a eficiência desejada. Assim, é importante introduzir algoritmos matemáticos que, para além de utilizarem as variáveis comuns como, volumes, caudais e pressão, também considerem o custo energético como uma variável de decisão. Para tal, recorreu-se ao teste de uma plataforma analítica denominada SCUBIC. Esta plataforma é um produto da empresa Gotas Digitais Lda, com origem na Universidade de Aveiro.

A redução dos custos de energia é possível através do reagendamento das operações de bombeamento de água, relativamente às tarifas de energia que variam ao longo do dia. Como, por exemplo, bombear quando a energia é mais barata.

As entidades produtoras de água para consumo humano necessitam de elevadas quantidades de energia elétrica desde a sua captação até à distribuição, sendo que a maioria do consumo energético ocorre nas estações elevatórias. Uma vez que as tarifas de energia elétrica variam ao longo do dia, torna-se necessário efetuar um planeamento do funcionamento dos grupos de bombeamento e um controlo dos níveis de armazenamento de água nos reservatórios, a fim de evitar o consumo de energia nos períodos de maior custo energético. As estações elevatórias têm por função repor água nos reservatórios e sendo, para isso, usadas bombas hidráulicas para captar água e abastecer os reservatórios. Mas, para a redução do consumo energético, deve-se ter em atenção parâmetros como, a eficiência das bombas, tarifa de energia, perfil do consumo, restrições hidráulicas e limitações da rede.

Nenhum sistema é perfeito pois, ao longo de todo o processo, ocorrem perdas de água, umas accidentais, outras devido a roturas de condutas, transbordo dos reservatórios, envelhecimento de equipamentos, manutenção inadequada ou higienização dos reservatórios levando a que pelo menos uma das células fique totalmente vazia.

Assim, o projeto é organizado em quatro fases:

- A primeira fase consiste na análise do funcionamento atual do sistema, nomeadamente, do funcionamento das bombas, da ação de acionamento das mesmas, verificação dos medidores, informações dos níveis dos reservatórios, etc.
- A segunda parte baseia-se na otimização. Neste contexto, existem duas possibilidades, um algoritmo implementado em Excel/Solver devidamente detalhado e a programação desenvolvida pela SCUBIC onde é apresentada uma introdução do método e os resultados, não havendo informação do algoritmo usado, pois consiste em material confidencial.
- A terceira fase incide na aplicação do algoritmo em alguns troços do subsistema de Areias de Vilar.
- A última etapa consiste na análise dos resultados e sugestões para um melhor desempenho dos subsistemas em estudo.

1.2. ETA de Queimadela

A ETA de Queimadela está situada na freguesia de Revelhe, conselho de Fafe, na margem da barragem de Queimadela, albufeira do rio Vizela. A estação é composta por 2 linhas de tratamento.

Algumas características da ETA de Queimadela:

- Fornece água a 31 163 habitantes no conselho de Fafe;
- A origem da água bruta vem da Albufeira de Queimadela;
- Capacidade para captar um caudal de 18 000 m³/dia;
- Possui 23 reservatórios com uma capacidade de armazenamento total de 13 980 m³ no total;
- Tem uma extensão da rede adutora de 70 km, englobando todas as infraestruturas que realizam o transporte de água desde a sua origem até ao ponto de distribuição;
- Tem 25 os pontos de entrega sendo 21 a partir de reservatórios e 4 a partir de troços adutores.

A captação de água é realizada na albufeira de Queimadela, no rio Vizela, através de uma estação elevatória com 3 grupos de eletrobombas submersíveis. Cada grupo tem capacidade para bombear

375 m³/h estando dotados de variadores de velocidade que permitem captar o caudal mínimo de 95 m³/h. A água é elevada para a ETA através de 2 condutas independentes. De notar que as bombas já são antigas e os valores apresentados correspondem ao seu funcionamento ideal. Atualmente têm capacidade máxima de, aproximadamente, 350 m³/h.

A ETA possui um sistema informático de controlo e aquisição de dados denominado SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) que permite a monitorização e o controlo de sistemas de distribuição de água desde um centro de comando, que para este subsistema está localizado na ETA de Areias de Vilar em Barcelos. Este sistema permite o controlo manual ou automático dos equipamentos da rede.

A produção com base nos volumes armazenados nos reservatórios para os diferentes tarifários, é uma operação estática, mas eficaz e que por si só já apresenta algum nível de otimização. Contudo, esta forma de operação é muito limitante pois não considera as variações no consumo de água que acontecem diariamente, ao fim de semana e nas diferentes alturas do ano (inverno/verão).

Assim, uma das possíveis formas de melhorar a operação com base nos níveis dos reservatórios passa pela criação de mais tarifários nos SCADA. Ou seja, ao longo do dia existem vários períodos em cheia, três no inverno e dois no verão, podendo ser estes divididos conforme as necessidades de consumo. O mesmo acontece para o tarifário de Ponta nos meses de inverno.

Desta forma, encontrar o melhor nível de operação é possível através da implementação de soluções “dinâmicas” capazes de prever quais os melhores níveis de operação diários, com base na previsão do consumo de água para esse dia, ou através de uma operação dinâmica com ordens diárias de operação de ligar/desligar as bombas e válvulas.

2. REVISÃO DO PROBLEMA

2.1. Distribuição

A distribuição de água pode ser feita em alta ou em baixa. O sistema de abastecimento de água é um sistema em “alta” quando constituído por um conjunto de componentes a montante da rede de distribuição de água, fazendo a ligação do meio hídrico ao sistema em “baixa”. É considerado um sistema em “baixa” quando constituído por um conjunto de componentes que ligam o sistema em “alta” ao utilizador final. O sistema de abastecimento de água presta um serviço em “alta” ou em “baixa” sempre que vincula o meio hídrico a um utilizador final (Martins, 2014).

Os reservatórios de distribuição de água são dimensionados para satisfazer as seguintes condições: funcionar como condutor da distribuição, atendendo a variação horária e diária do consumo de água; assegurar uma reserva de água para combate a incêndios; manter uma reserva para atender as condições de emergência (acidentes, reparo nas instalações, interrupções da adução e outros) e manter a pressão constante na rede de distribuição.

O Subsistema em estudo é apresentado na Fig. 1, sendo importante observar que na segunda fase, para a otimização do consumo de energia, apenas se considera os reservatórios diretamente afetados por ação de bombeamento.

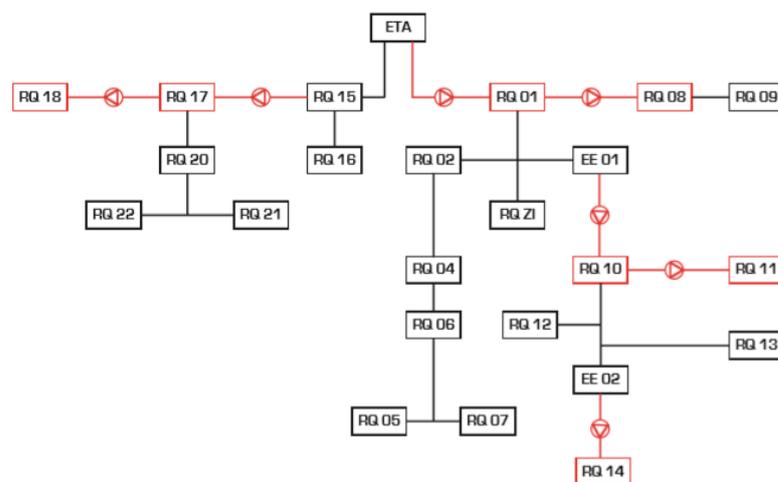


Figura 1: Caracterização do sistema adutor. A vermelho a água é elevada com auxílio de bombas, a preto a água é transportada por gravidade.

2.2. Fatores que afetam os padrões de consumo

O consumo de água não é igual ao longo do ano, pois caso tal se verificasse, o processo de otimização seria simples sendo possível efetuar por meio de programação linear com exatidão. Os fatores que afetam o consumo são vários sendo alguns apresentados abaixo (Falkenberg *et al.*, 2003):

- Localização geográfica;
- Turismo, pois pode provocar um crescimento ou uma redução da população;
- Tipo de bairro, isto é, zona residencial, industrial ou outra;
- Aspectos socioeconômicos;
- Condições atmosféricas;
- Dia da semana.

2.3. Tarifas e ciclos horários de energia elétrica

Após efetuada a análise das bombas prossegue-se para o cerne do tema, a energia. É importante perceber como esta é usada na empresa bem como os tipos de tarifários que existem variando de reservatório para reservatório.

Existem quatro tipos de tarifas de energia: simples, bi-horária, tri-horária e tetra-horária.

Na tarifa simples o custo da energia será o mesmo para qualquer período do dia. Na tarifa bi-horária existem dois custos, um correspondente ao período das horas de Vazio, no qual a energia é mais barata, e outro, correspondente ao período das horas Fora de Vazio. A tarifa tri-horária tem três ciclos horários, Vazio, Cheia e Ponta e a tarifa tetra-horária (Fig. 2) tem quatro ciclos, Super Vazio, Vazio, Cheia e Ponta. O custo também varia conforme a época do ano (inverno ou verão).

O custo da energia nos tarifários compreende três dimensões:

- Tarifa de acesso às redes - é independente do comercializador de energia e visa colmatar os custos inerentes à manutenção da rede nacional de distribuição e transporte de energia elétrica.
- Tarifa de energia ativa - reflete o preço de energia consumida nos diferentes períodos tarifários.
- Tarifa de potência contratada em horas de ponta - traduz uma penalização ao uso de energia nas horas de ponta em concreto. Esta depende do número de horas de ponta e do número de dias total existente em cada mês, sendo por isso ligeiramente diferentes em cada período de faturação. O custo do kWh é calculado da seguinte forma:

$$H.P. = \frac{E_c}{NHP} \times p \times d$$

onde

H.P. Taxa de potência contratada de horas de ponta

E_c Energia consumida

NHP Número de horas de ponta

p Custo unitário de energia

d Número de dias do mês.

Inverno		Verão	
Segunda-feira a sexta-feira		Segunda-feira a sexta-feira	
Ponta:	09.30/12.00 h 18.30/21.00 h	Ponta:	09.15/12.15 h
Cheias:	07.00/09.30 h 12.00/18.30 h 21.00/24.00 h	Cheias:	07.00/09.15 h 12.15/24.00 h
Super vazio:	02.00/06.00 h	Super vazio:	02.00/06.00 h
Vazio normal:	00.00/02.00 h 06.00/07.00 h	Vazio normal:	00.00/02.00 h 06.00/07.00 h
Sábado		Sábado	
Cheias:	09.30/13.00 h 18.30/22.00 h	Cheias:	09.00/14.00 h 20.00/22.00 h
Super vazio:	02.00/06.00 h	Super vazio:	02.00/06.00 h
Vazio normal:	00.00/02.00 h 06.00/09.30 h 13.00/18.30 h 22.00/24.00 h	Vazio normal:	00.00/02.00 h 06.00/09.00 h 14.00/20.00 h 22.00/24.00 h
Domingo		Domingo	
Super vazio:	02.00/06.00 h	Super vazio:	02.00/06.00 h
Vazio normal:	00.00/02.00 h 06.00/24.00 h	Vazio normal:	00.00/02.00 h 06.00/24.00 h

Figura 2: Períodos horários energéticos, quer para Inverno quer para Verão

Na Tabela 1 destacam-se as respetivas tarifas energéticas para cada período horário. Estes valores do custo específico serão usados nos cálculos posteriores.

Tabela 1: Custo de energia dos diferentes tarifários ao longo do ano

Período tarifário	Custo energia (€/kWh)			
	Inverno		verão	
	MT	BTN	MT	BTN
Super Vazio	0,0661	0,0998	0,0662	0,0998
Vazio	0,0735	0,0998	0,0734	0,0998
Cheia	0,1038	0,1463	0,1035	0,1463
Ponta	0,1210	0,2584	0,1207	0,2584

MT- média tensão BTN - baixa tensão normal

2.4. Plano de otimização energética (POE)

O POE consiste em três etapas onde, primeiramente, devem ser efetuados testes de eficiência importantes para a análise do desempenho real dos grupos eletrobomba, pois o funcionamento real poderá não corresponder à informação cedida pelos fabricantes. Concluídos estes testes, prossegue-se para a segunda etapa, a procura de soluções de otimização. Para tal é necessário o conhecimento dos caudais bombeados para adaptar as soluções ao sistema real. Numa última etapa, efetua-se uma avaliação económica de todas as soluções encontradas de forma a selecionar a mais vantajosa em custos energéticos (Rodrigues, 2016).

2.5. Controlo energético

Para satisfazer as necessidades de consumo com custos mais reduzidos é preciso obter um melhor aproveitamento do sistema de transporte e de reserva.

O funcionamento do sistema engloba a sequência de manobras exercidas sobre os seus elementos, válvulas e bombas, para atingir custos mínimos de energia e manutenção. Esta operação pode ser realizada de 4 formas, por controlo manual, automático, automático programado ou controlo centralizado.

No controlo manual, os elementos do sistema são manobrados por operadores locais que possuem pouca ou nenhuma informação a respeito do restante sistema. O segundo é semelhante, mas sem o operador humano. O controlo automático programado baseia-se em controladores lógicos programados (PLC). Por último, no controlo centralizado o processo de operação fica a cargo de uma central de controlo.

Para que se possa definir uma melhor regra operacional para um sistema de abastecimento de água, algumas condições básicas são necessárias (Zahed Filho, 1990):

- Definição clara dos objetivos a serem alcançados;
- Conhecimento da topologia do sistema e das características hidráulicas e mecânicas dos elementos que o compõem;
- Conhecimento de dados previsionais de consumo;
- Disponibilidade de modelos matemáticos.

Na redução do custo de energia elétrica desses sistemas, diversas alternativas podem ser tomadas (Tsutiya, 2001):

- Conhecimento do sistema tarifário;
- Redução da potência do equipamento;
- Alteração do sistema operacional;
- Automação do sistema de abastecimento de água;
- Geração de energia via fontes alternativas de energia elétrica.

A energia é perdida devido a várias razões: deficiente projeto das bombas aplicadas; instalação ou manutenção deficientes; tubagens antigas com alta perda de carga; pressão de suprimento excessiva; e estratégias de operação ineficientes das várias instalações de suprimento. Outra causa importante para o desperdício de energia é o excesso de oferta devido a vazamentos de água ou devido ao uso ineficiente de água. Quando a média mundial de perda de água é estimada em 30%, isso significa que a mesma porção de energia é perdida. Devido às causas acima descritas, a economia de consumo de energia pode chegar a 20% -30% do consumo atual (Firmino *et al.*, 2006).

Um sistema de gestão de energia, também chamado de sistema de apoio à decisão, compreende dois componentes, sendo eles:

- Previsão de procura - um módulo que prevê o perfil de recolha de água para um período de planeamento, geralmente de 24 horas.
- Esquematização - o objetivo da esquematização é gerar um cronograma diário para a operação das bombas do sistema de água e outras instalações controladas, como válvulas de controlo de pressão ou fluxo. Isso deve ser feito considerando-se a capacidade atual das fontes de água e as características do sistema de distribuição e, ao mesmo tempo, satisfazendo as várias restrições operacionais para suprir as necessidades dos consumidores.

2.6. Norma ISO 50001

A atividade da Águas do Norte (AdNorte) é altamente dependente da energia, na sua maioria energia elétrica. Como tal é um objetivo primordial da empresa otimizar todos os seus recursos, tendo como desafio permanente reduzir custos operacionais. Nesse sentido, torna-se necessário procurar essa otimização de recursos, também por via do aumento da eficiência energética.

Com o intuito de atingir os objetivos do aumento da eficiência energética, considerou-se que a implementação de um Sistema de Gestão de Energia seria a evolução natural para a gestão de energia na AdNorte, e o caminho para a melhoria contínua do mesmo, com vista à redução dos custos e consumos energéticos. Assim, e por forma a ir de encontro a este objetivo, a AdNorte decidiu implementar um Sistema de Gestão de Energia (SGE).

Esta norma tem como objetivo principal permitir que as organizações estabeleçam os sistemas e processos necessários para melhorar o desempenho energético, incluindo a eficiência energética e o consumo de energia. Pretende-se que, com a implementação desta norma, haja uma redução nas emissões de gases com efeito de estufa e de outros impactes ambientais, e, também, de uma redução dos custos de energia associados.

A norma baseia-se na metodologia PDCA (plan-do-check-act). Começa-se por realizar a avaliação energética e estabelecerem-se objetivos, metas e planos de ação; numa segunda fase prossegue-se para a implementação dos planos de ação de gestão de energia; na terceira fase monitorizam-se e relatam-se os resultados e, por último, impõem-se ações que procurem melhorar continuamente o sistema de gestão de energia. Na Fig. 3 é apresentado o modelo do sistema de gestão de energia para esta norma.

2.7. Sistemas de bombeamento

Um sistema de controlo de bombeamento de água pode ser dividido em 3 etapas: um modelo hidráulico da rede, um modelo de previsão de caudal e um modelo de controlo ótimo. Um modelo de controlo ótimo visa a minimização dos custos envolvidos na operação do sistema de captação e distribuição de água, ou seja, os custos envolvidos assentam no acionamento das bombas de captação e de distribuição de água, respeitando certas restrições como o volume de água nos reservatórios (Soler *et al.*, 2016).

As bombas hidráulicas têm como função primordial a movimentação de fluidos através de condutas sobre pressão. Para que tal aconteça, estas convertem a energia mecânica em energia hidráulica, na forma de pressão e energia cinética. A energia cedida pela bomba ao líquido na forma de energia por unidade e peso de fluido bombeado denomina-se altura manométrica.

Não existe uma única abordagem simples para minimizar os custos de energia de bombeamento, porque não há uma única razão para que os sistemas de bombeamento sejam operados de uma forma

menos eficiente. Em vez disso, há uma infinidade de razões pelas quais as estações de bombeamento operam a um custo superior ao ótimo. Algumas dessas razões incluem:

- Bombas que foram selecionadas incorretamente;
- Bombas que se desgastaram;
- Capacidade limitada no sistema de transmissão / distribuição;
- Capacidade de armazenamento limitada;
- Operação ineficiente de tanques de pressão (hidropneumáticos);
- Equipamento inadequado ou impreciso de telemetria;
- Penalidade devido a preços de energia de horário do dia ou sazonais;
- Erro do operador.

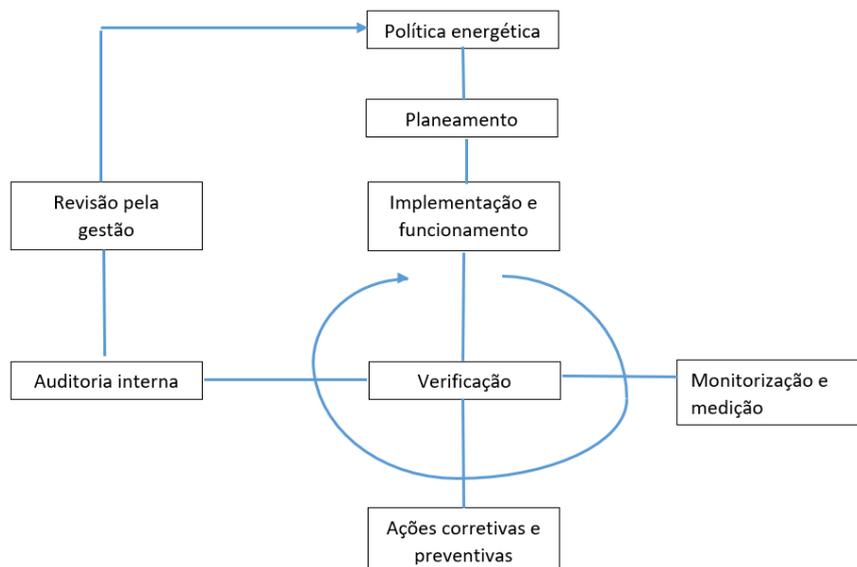


Figura 3: Modelo de sistema de gestão de energia para a norma ISO 50001

Assim, como se verificou anteriormente, no POE, o primeiro passo a efetuar no estudo é a análise aos grupos eletrobomba, pois estes sistemas já são antigos e podem apresentar algum desgaste ou outros inconvenientes mencionados previamente.

2.7.1. Variadores de frequência

Os variadores de frequência podem ser utilizados numa grande gama de aplicações, sendo as mais comuns aquelas onde é necessária uma velocidade variável na operação.

Uma grande parte dos motores acoplados aos equipamentos de uso industrial foram projetados para funcionar a velocidade constante, este facto não implica qualquer problema quando as condições de operação são constantes, mas em situações nas quais se verificam condições variáveis, a eficiência energética do sistema pode ser reduzida (Projeto Aqualitans, 2016).

Nas ETA existem bombas que são projetadas para funcionar com velocidade constante, de modo que se for necessário a variação do seu caudal deve-se realizar o ajuste do fluxo por meio de circuitos de bypass ou mediante paragens contínuas. Estes métodos aumentam as perdas de carga ou consomem energia desnecessária, mas com a utilização de um variador de frequência acoplado ao motor pode-se evitar estas perdas. Além disso, na ETA, é também comum que haja motores a trabalhar a uma velocidade superior à necessária para o seu desempenho ótimo. Em ambos casos, o uso de variadores, é recomendado para a redução do gasto energético (Projeto Aqualitans, 2016).

Nos casos em estudo os variadores de frequência estão aplicados na captação, na ETA de Queimadela, e em Cerite, sendo nos restantes casos, caudais fixos.

2.7.2. Substituição das bombas sobredimensionadas

Para uma ótima eficiência energética deve-se adequar os equipamentos de bombeamento às condições requeridas com objetivo de que trabalhem em pontos ótimos de funcionamento, ou seja, com rendimento desejável.

Nas análises ao funcionamento das bombas é habitual encontrar os sistemas de bombeamento sobredimensionados para o caudal e altura manométrica necessária. Isto acontece porque durante a fase de projeto tende-se a sobredimensionar com o objetivo de proporcionar versatilidade para futuras sobrecargas, de reduzir os riscos no cálculo e na seleção, assim como para proporcionar maior robustez do sistema. Esta situação supõe que as bombas trabalhem normalmente nos pontos ótimos de funcionamento. Mas por vezes tal não acontece e as bombas não trabalham no seu ponto ótimo sendo necessária a sua substituição. Um exemplo é apresentado na Fig. 4 onde se observam as três gamas de funcionamento das bombas:

- Gama admissível – caudal entre os 20 e 150 % do caudal nominal;
- Gama adequada – caudal entre os 66 e 115 % do caudal nominal;
- Gama ótima – caudal entre os 85 e 105 % do caudal nominal.

Sendo que, nas análises efetuadas na segunda fase, se alguma das bombas funcionar fora destas gamas deve ser substituída.

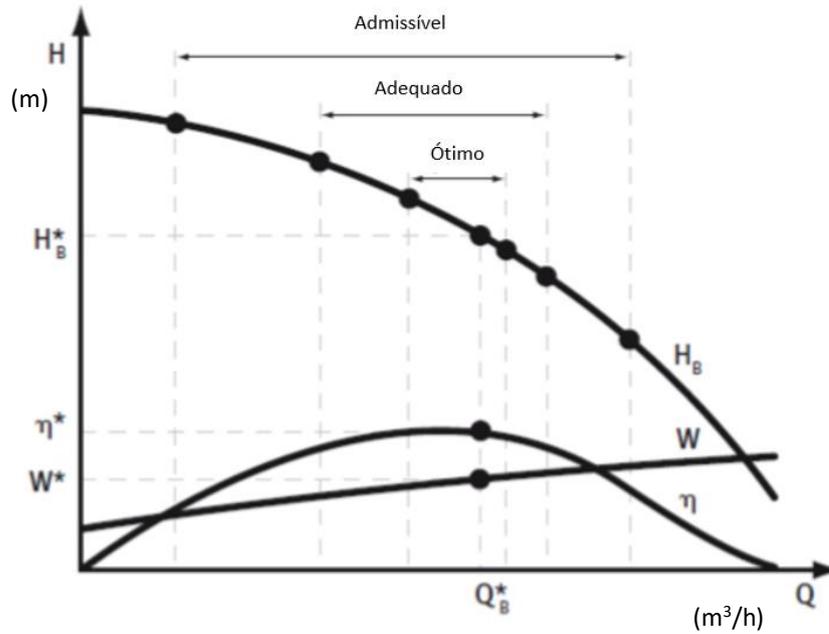


Figura 4: Gamas de funcionamento das bombas (H – altura manométrica; Q – caudal; H_B^* e Q_B^* – ponto ótimo; η^* – eficiência do ponto ótimo; W^* - trabalho no ponto ótimo)

2.8. Planeamento ótimo

O período de pico de energia é tipicamente favorável ao período de pico da recolha de água, indicando que, quando as tarifas de energia são baixas, poderemos ter capacidade de fornecimento extra. Essa capacidade é utilizada armazenando-se o excesso de água nos reservatórios durante o período mais económico, e distribuindo, dos reservatórios, durante o dia, reduzindo a produção de energia pelas bombas neste momento. Um cronograma ótimo típico é mostrado na Fig. 5.

Tal estratégia requer a operação da rede em alta capacidade durante o tempo de pico. A fim de permitir que isso aumente o fluxo, a pressão precisa de ser aumentada.

Uma rede de abastecimento de água é composta principalmente por condutas de água, reservatórios, nós e bombas de água. O problema de escalonamento de bombas é definido pelo processo de seleção das bombas disponíveis no sistema para serem usadas para fornecer água a um nó ou reservatório específicos, e quando se deve executar tal operação (ou seja, os períodos do dia em que as bombas devem ser desativadas).

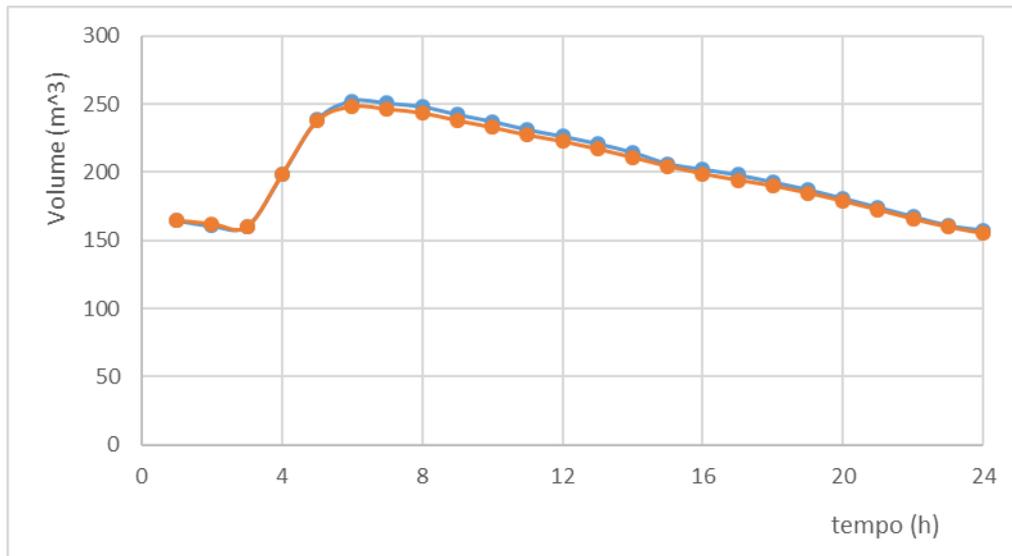


Figura 5: Nível ideal de um reservatório ao longo de um dia

O objetivo deste trabalho é responder à seguinte questão: como otimizar a gestão hídrica para maior eficiência, minimização do impacto ambiental e minimização de custos? Fatores importantes que influenciam o custo, além da duração da operação de bombeamento, são a estrutura tarifária da eletricidade e a eficiência dos conjuntos de bombas referentes às necessidades de bombeamento. Naturalmente, o sistema de abastecimento de água deve estar a funcionar adequadamente, ou seja, a programação das bombas deve ser, não apenas viável, mas também compatível com as restrições físicas e operacionais do sistema, como:

- Manter água suficiente dentro dos tanques do sistema, ou dentro de níveis específicos, de acordo com as necessidades;
- Conformidade física e hidráulica da rede de distribuição de água (por exemplo, restrições de nível de pressão de água);
- Bombas de restrições tecnológicas.

Além de ser importante para os custos de operação, a otimização de agendamento de bombeamento também pode levar a melhorias adicionais, como melhor resposta a períodos de escassez de água. Dependendo do tamanho da rede de água, do número de bombas, nós e reservatórios, a tarefa de modelagem do sistema por procedimentos analíticos pode ser extremamente difícil. Nesses casos, embora vários modelos de sistemas de distribuição de água estejam disponíveis, o problema de

otimização ainda é complexo, e os algoritmos que dependem da formulação analítica completa do problema são quase inúteis para grandes redes.

2.9. Métodos de Otimização e Programação Matemática

Os métodos de otimização são a área da ciência que procura a melhor solução – a solução ótima. Essa solução é normalmente obtida maximizando ou minimizando uma (ou várias) função (ões) objetivo através da escolha de valores para as variáveis de decisão. São efetuadas pesquisas dentro de um conjunto de soluções possíveis de acordo com os limites especificados para as variáveis. Para problemas simples, isto é, problemas com um número limitado de variáveis, a procura dessa solução pode ser um processo bastante expedito, podendo ser determinada manualmente em poucas iterações. À medida que o número de variáveis aumenta, a complexidade do problema e o número de combinações também aumenta, tornando inviável a determinação da solução ótima para a função objetivo.

A Função Objetivo é uma função que faz corresponder a cada ponto do espaço de soluções um valor. Este valor permite definir a qualidade da resposta dada, sendo que, no estudo de uma minimização, procura-se que este valor seja o menor possível e num problema de maximização espera-se o contrário.

A aplicação de métodos de otimização a sistemas de abastecimento de água pode tornar-se uma tarefa muito complexa, devido à quantidade de variáveis envolvidas e à complexidade da interação entre elas. Devido a essa complexidade, alguns investigadores optam por desenvolver os seus métodos de otimização integrando apenas parcialmente os parâmetros e as variáveis envolvidas no problema em estudo, ou considerando apenas parcialmente a sua extensão, analisando como se tratasse de um modelo estático. Desta forma, a formulação do problema torna-se mais simples; porém, esta simplificação comporta, necessariamente, a inclusão de erros na solução encontrada. A importância quantitativa e qualitativa desses erros deve ser analisada e o seu impacto perfeitamente compreendido. A incerteza na definição de algumas variáveis e parâmetros deve ser avaliada com recurso a uma análise de sensibilidade e, sempre que possível, deve ser feita a validação e a calibração dos métodos aplicados com recurso a dados reais de exploração (Andrês, 2016).

Os modelos de otimização permitem determinar o ótimo funcionamento do bombeamento ou os custos mínimos de operação, através da definição de uma função objetivo.

$$\text{F.O.} \quad \min P \sum_i T_i t_i$$

onde,

$$P \quad \text{Potência da bomba;}$$

- t Tempo em que a bomba se mantém ligada;
- T Tarifa da energia;
- i índice corresponde a período tarifário (super vazio, vazio, cheia ou ponta).

Contudo, deve-se ter em atenção que estes modelos precisam de simuladores hidráulicos, isto é, ferramentas computacionais que permitem a determinação do comportamento hidráulico/estático, a qualidade da água, bem como a melhor alternativa para a distribuição da mesma para fins de planeamento ou de projeto do sistema.

2.9.1. Programação linear

Utilizada como técnica de otimização operacional de sistemas de distribuição de água, para resolução de um problema onde as relações entre as variáveis, tanto nas restrições como nas funções objetivo, são lineares. Sob estas condições, problemas não lineares podem ser linearizados e resolvidos por interação ou procedimento de aproximação usando programação linear. Para que seja obtido um resultado satisfatório na aplicação, é necessária a utilização de funções custo, convexas, e funções benéficas, côncavas (Andrés, 2016).

2.9.2. Programação não linear

Esta não tem sido utilizada com muita frequência em otimização de sistemas de distribuição de água. Isto ocorre, particularmente, devido ao facto de o processo de otimização ser usualmente lento e depender de um tempo computacional longo quando comparado com outros métodos. A programação não linear pode, entretanto, oferecer uma formulação matemática mais geral e próxima da realidade que a programação dinâmica e pode fornecer uma fundamentação para análise por outros métodos. A programação não linear inclui, entre outras, programação quadrática, a programação geométrica e, num caso especial, a programação separável que pode ser usada interactivamente como um programa mestre ou um subprograma na aplicação em grandes sistemas (Andrés, 2016).

2.9.3. Programação dinâmica

A programação dinâmica é um procedimento bastante aplicado em sistemas de distribuição de água. A popularidade e o sucesso desta técnica podem ser atribuídos ao facto de as características não lineares e estatísticas, que caracterizam a maior parte dos sistemas de água, poderem ser traduzidas na formulação da programação dinâmica. Para aplicação da programação dinâmica na otimização de sistemas de distribuição de água, o problema deve ser decomposto num determinado número de estágios e analisado, de um estágio para o próximo, para todos os estados operacionais. Na finalização

dos resultados, aquele que apresentar o valor mais económico é selecionado como solução do problema (Oliveira, 2015).

2.9.4. Redes neuronais artificiais

As redes neuronais artificiais (RNA) são modelos usados no setor de abastecimento de água como uma ferramenta de previsão do comportamento de consumo de forma diferente da habitual, isto é, sem recorrer ao histórico de consumo. Este método recorre à análise de variáveis como pressões, caudais, níveis dos reservatórios, etc. Estes modelos substituem assim os modelos hidráulicos convencionais, desempenhando o seu papel de uma forma mais rápida e mais eficiente (Falkenberg *et al.*, 2003).

2.10. SCUBIC

A empresa Gotas Digitais Lda foi requisitada pela Águas do Norte para desenvolver um estudo relativo à eficiência de operação das estações elevatórias pertencentes ao subsistema de abastecimento de água da Queimadela. Contudo, ao avaliar os sistemas temos de ter em conta o sistema como um todo, pois mudanças numa zona da rede podem influenciar o nível de serviço da outra parte. O objetivo é capacitar a AdNorte de melhores níveis de serviço da maneira mais económica possível.

A aplicação SCUBIC disponibilizada pela Gotas Digitais Lda pretende proporcionar às empresas de distribuição de água a possibilidade de reduzir os seus custos energéticos até 15 %, reduzir as emissões de CO₂ até 15000 ton/ano ou até 8 % dos gases com efeito de estufa. Para além disto, também poderá apresentar a vantagem de aumentar a segurança operacional da rede de distribuição e dos reservatórios.

A implementação da SCUBIC assenta-se em três níveis, sendo eles, o nível estratégico, o nível do planeamento e o nível operacional. O primeiro é realizado pelos administradores e refere-se às tomadas de decisão. O planeamento incide na simulação, previsões dos consumos, construção do modelo hidráulico e nas operações da rede e é realizado pelos responsáveis da operação. O último nível é executado pelos operadores e consiste no cumprimento das ordens diárias, recolha dos dados, deteção de anomalias, ou seja, na visualização e otimização do processo.

Assim a SCUBIC integra dados em tempo real e históricos de funcionamento da rede bem como dados meteorológicos, algoritmos com inteligência artificial capazes de prever com a máxima precisão, o consumo de água para as futuras 24/48 horas, algoritmos de otimização especialmente desenvolvidos

para redes de abastecimento de água para otimizar o controlo das bombas e válvulas com o objetivo de reduzir os gastos com energia.

Plano / objetivo:

- Proteção do ambiente e melhoria da qualidade da água
- Melhoria da qualidade dos serviços prestados
- Otimização e gestão eficiente dos recursos à disposição
- Sustentabilidade económico-financeira e social

Ou seja, resumindo, a SCUBIC proporciona uma plataforma analítica que, em tempo real, disponibiliza a informação relativa ao agendamento da operação de elevação de água, velocidades de operação e previsão do comportamento de toda a rede para os parâmetros selecionados.

3. TRABALHO DESENVOLVIDO - SUBSISTEMA DE QUEIMADELA

Como foi introduzido de acordo com o POE o primeiro passo a ser efetuado é analisar devidamente o sistema de bombeamento pois este é o foco de todo este projeto, sendo responsável pelo maior encargo financeiro da empresa. Numa segunda etapa, para o desenvolvimento do projeto é necessário a familiarização com o sistema adutor do Subsistema Queimadela, isto é, todo o processo desde a captação até à distribuição de água. Assim, é efetuado um inventário dos 23 reservatórios e dos diferentes troços adutores que completam os 70 km do sistema adutor de Queimadela. De seguida, prossegue-se a uma extração de dados como, os caudais de entrada e de saída dos reservatórios e das bombas e os níveis dos reservatórios de 15 em 15 minutos nos últimos 3 meses do ano de 2018. Efetua-se esta extração para entender a rotina de acionamento das bombas para que, posteriormente, com os algoritmos matemáticos, a otimização seja possível, bem como, a comparação com o processo usado atualmente. Outros dados requeridos, são as faturas de eletricidade para o mesmo período de tempo, últimos 3 meses, pois para otimizar o processo é necessário ter uma noção de quanto se consome atualmente.

No sistema há infraestruturas que não apresentam sistema tarifário tetra-horário. Na Tabela 2 estão presentes os diferentes reservatórios (apenas os que apresentam bombas associadas) e a sua correspondente opção tarifária bem como a percentagem de energia despendida em cada infraestrutura.

Tabela 2: Opção tarifária e percentagem de energia gasta por reservatório

Infraestrutura	Tensão/ciclo	Opção tarifária	% Consumo de energia
RQ 01 + EE	MT	Tetra-horária	8,12
EE Q01	MT	Tetra-horário	13,55
RQ 10 + EE	BTN/sem ciclo	Simples	0,33
EE Q 02	BTN/semanal	Bi-horário	2,00
RQ 15 + EE	MT	Tetra-horário	19,53
RQ 17 + EE	BTN/sem ciclo	Simples	0,77
ETA	MT	Tetra-horário	55,68

Preços €/kWh

Pode-se concluir que, como expectado, que para além da ETA os reservatórios mais “problemáticos” a nível energético serão os que se situam no início do sistema, o RQ 01, o RQ 15 e a EE Q01, sendo por estes reservatórios que passa a maioria da água distribuída e onde se pode obter uma maior poupança de nível energético.

3.1. Análise do funcionamento das bombas

Desta forma é importante compreender, antes de mais, se as bombas são usadas com a eficiência desejada ou se estão aplicadas da melhor forma. Para tal, é feita uma comparação dos dados cedidos pelo fornecedor com as curvas hidráulicas respetivas das bombas. Nas Tabelas seguintes (3 e 4) encontra-se toda a informação acerca das bombas do Subsistema de Queimadela cedida pela empresa.

Tabela 3: Cotas de bombeamento

Distribuição	Cota de partida (m)	Cota de chegada (m)
ETA – RQ01	0	452,6
RQ01 – RQ08	452,6	640
EE01 – RQ10	418,5	578,6
RQ10 – RQ11	578,6	651,2
EE02 – RQ14	547	649,5
RQ15 – RQ17	390	558
RQ17 – RQ18	558	582

Tabela 4: Valores informativos das bombas do Subsistema como a potência, caudal, etc.

Instalação	Potência (kW)	Caudal (m ³ /h)	Altura manométrica (m)
ETA captação	75	375	47
ETA elevatória	110	440	60
RQ 01	37	21	259
RQ 15	110	121	200
EE 01	110	124,3	185
RQ 10	2,2	2,4	103
RQ 17	2,2	4,5	52,2

Nas Fig. 6, 7, 8 e 9 são apresentadas as curvas hidráulicas de algumas bombas para que possam ser analisadas quanto à sua eficiência, ou mesmo, quanto ao seu desgaste visto se tratarem de bombas antigas. Apenas não são apresentadas as curvas das bombas da ETA pois não há informação sobre ambas.

Neste caso, para a bomba do reservatório RQ 01 que bombeia para o RQ 08 observa-se que o caudal mínimo é de 21 m³/h para uma altura de 259 m, no entanto apenas é preciso transportar a água até uma altura de 188 m conseguindo bombear mais caudal. Atualmente esta bomba bombeia cerca de 32 m³/h.

Pelo gráfico verifica-se que para a altura pretendida a bomba teria de ser capaz de bombear cerca de 54 m³/h e para obter uma eficiência máxima teria de bombear a 45 m³/h.

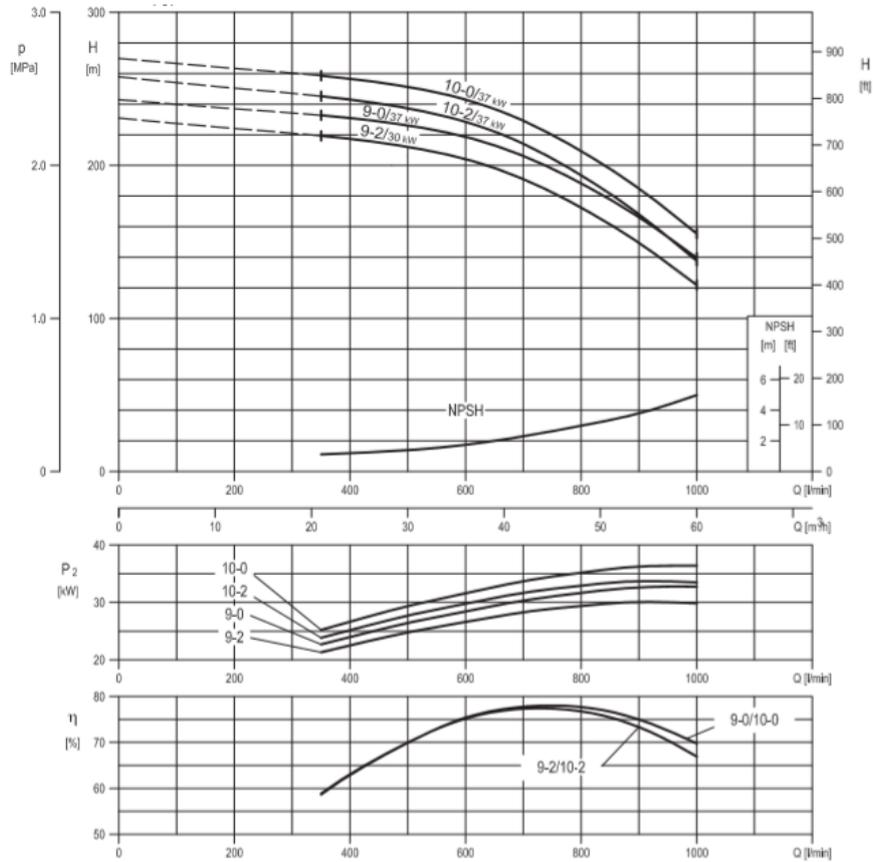


Figura 6: Curva hidráulica correspondente ao bombeamento de RQ 01

Postas estas observações, pode-se concluir que esta bomba foi bem dimensionada na altura da sua implementação pois para a altura pretendida e considerando as perdas de carga associadas esta seria capaz de trabalhar no ponto ótimo, mas com o desgaste acumulado com o passar dos anos tornou-se incapaz de assegurar o mesmo ritmo, sendo necessária a sua alteração.

No segundo caso, referente ao bombeamento de RQ 17 para RQ 18, teoricamente o mínimo da bomba será 4,5 m³/h para 52,2 m. A diferença de cotas é de, apenas, 28 m por isso a bomba tem de ser capaz de transportar mais caudal. Atualmente, em desempenho, esta bomba distribui, no seu auge, cerca de 14 m³/h.

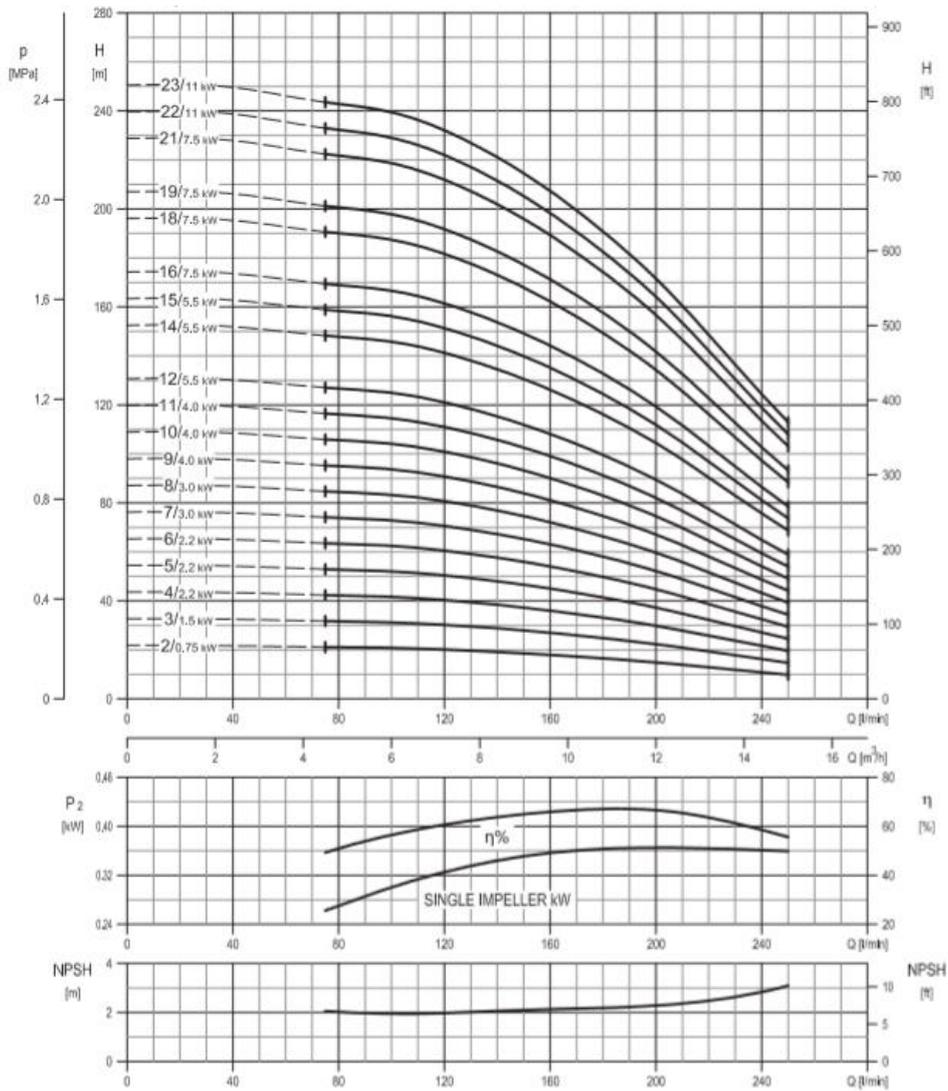


Figura 7: Curva hidráulica correspondente ao bombeamento de RQ 17

Por isso, através da análise gráfica verifica-se que a bomba tem um ótimo desempenho, não existindo grandes perdas de carga, mas, porém, foi mal selecionada pois tem, praticamente, eficiência mínima.

No terceiro caso, referente ao bombeamento do RQ 10 para RQ 11 (Fig.8), observa-se pela tabela, que o caudal mínimo fornecido será de 2,4 m³/h para 103 m. Neste caso concreto, a altura necessária para elevar a água será de 72,6 m e através da análise gráfica a bomba seria capaz de bombear, aproximadamente, 6,8 m³/h.

Em funcionamento, na ETA, esta bomba distribui cerca de 6 m³/h, o que se explica pelas perdas de carga associadas. Deste modo esta bomba foi bem selecionada pois apresenta eficiência máxima e cumpre o objetivo.

Para a bomba do RQ 15 não há acesso à curva hidráulica, mas conhecem-se vários pontos da curva (Tabela 5) e pode-se fazer uma interpolação linear para obter uma estimativa.

Tabela 5: Dados correspondentes ao bombeamento de RQ 15

H (m)	246	200	150
Q (m ³ /h)	80	121	178,5

Sabendo que o bombeamento é efetuado a, aproximadamente, 125 m³/h para uma altura associada de 168 m, é possível afirmar que está dentro do indicado apesar de não se conseguir ter certezas quanto ao ideal pois sem a curva hidráulica é impossível visto não se tratar de uma linha reta.

Na Fig. 9 observa-se a curva hidráulica da bomba da elevatória EE 01, na coluna correspondente ao 125-150 e “linha” 6. Atualmente, na ETA, esta funciona com um caudal de 125 m³/h para uma altura de 160 m. Pelo gráfico deveria ser capaz de bombear cerca de 140 m³/h, mas considerando as perdas e carga associadas a uma altura tão elevada pode-se afirmar que esta bomba está a funcionar dentro da normalidade e com uma eficiência aceitável.

Relativamente às bombas da marca Vogel, ambas situadas na ETA, não há acesso às respetivas curvas hidráulicas por se tratarem de bombas antigas, mas considera-se que o ponto apresentado na Fig. 4 (Q; H) corresponde ao ponto de funcionamento ótimo da bomba isto porque, contrariamente às restantes, este não pode ser o ponto mínimo pois elevam um caudal inferior ao apresentado. Qualquer que seja a curva hidráulica da bomba, estas não estarão a funcionar de acordo com a mesma pois bombeiam menos caudal para uma altura inferior quando comparado com o ponto ótimo. Por isso será um caso de estudo pois estas podem-se encontrar gastas ou com fugas associadas.

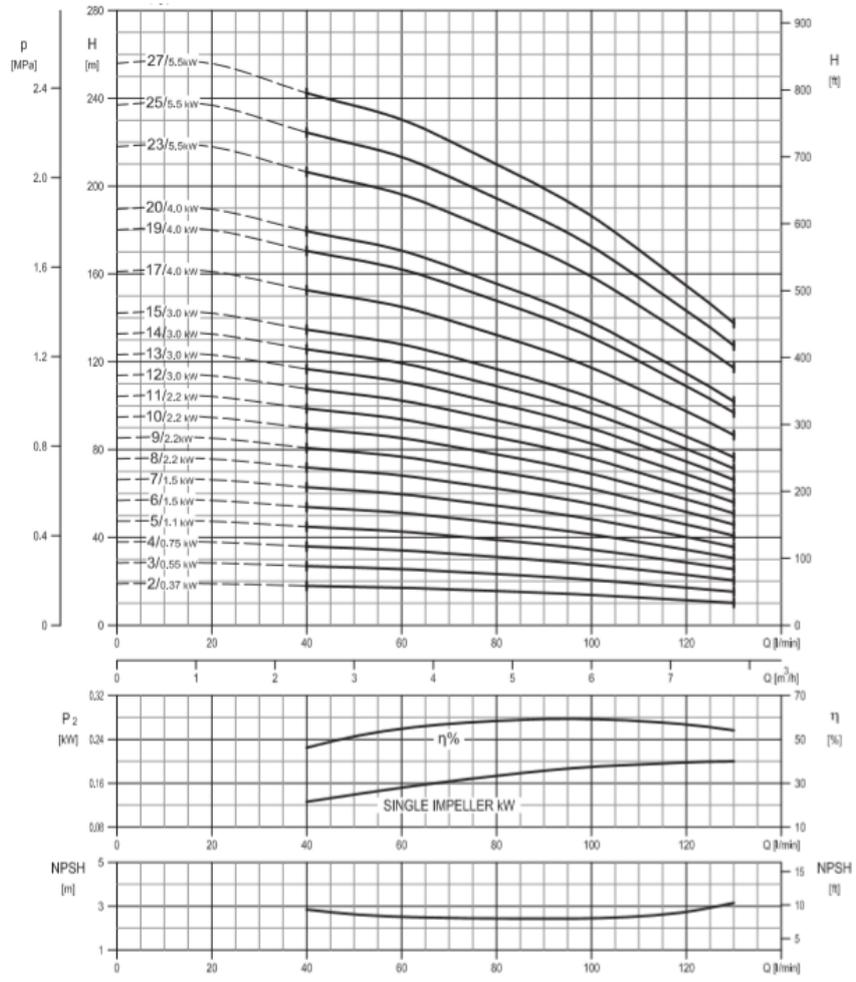


Figura 8: Curva hidráulica correspondente ao bombeamento de RQ 10

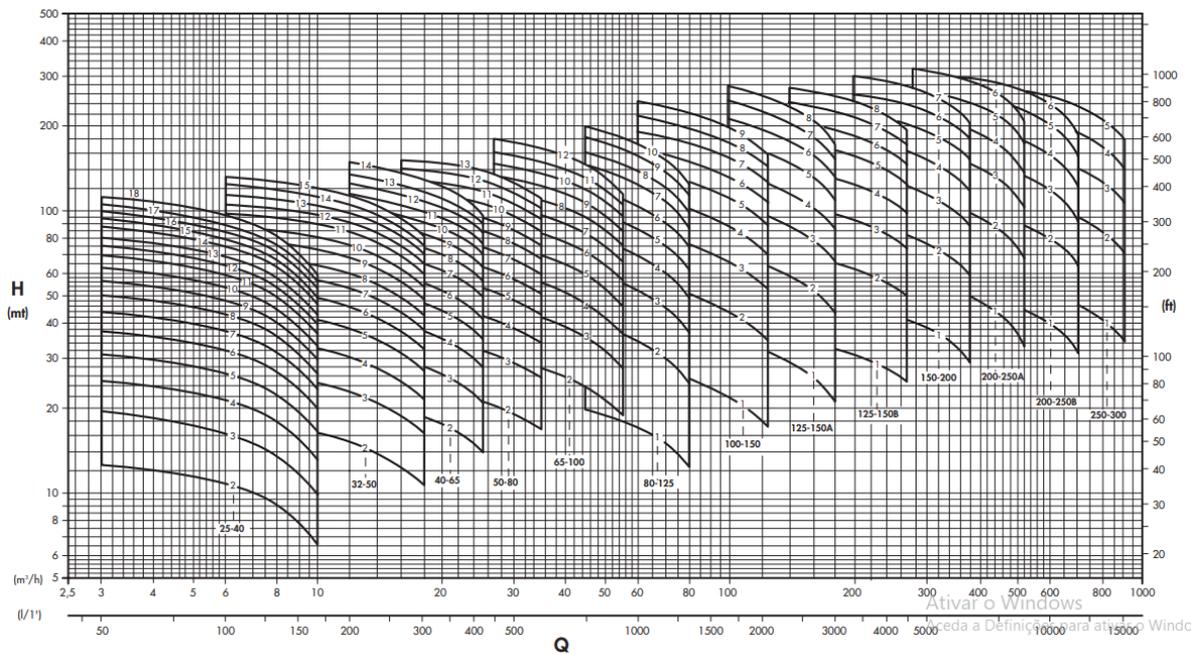


Figura 9: Curva hidráulica correspondente ao bombeamento de EE 01, coluna 125-150, linha 6

3.2. Análise energética dos reservatórios

São efetuadas algumas análises gráficas (Fig. 10, 11 e 12) destacando-se o estudo da energia por reservatório, do custo por reservatório, do custo específico (€/kWh) por reservatório, do estudo do bombeamento de RQ15 na medida em que este tem a restrição de só poder ser acionado no período diurno e se compensa em termos económicos modificar a infraestrutura para efetuar menos ruído e assim poder operar no período mais barato. Estas análises são importantes para descobrir o “foco” do gasto energético de forma a ser mais preciso.

Como se observa pelo gráfico o maior encargo económico encontra-se na ETA, quer através da captação, quer pela elevatória até ao RQ01. Destacar que o RQ10, RQ17 e EE02 não apresentam tarifa tetra horária e os seus consumos energéticos são “mínimos” por isso, a nível de cálculos, não é dado tanta importância.

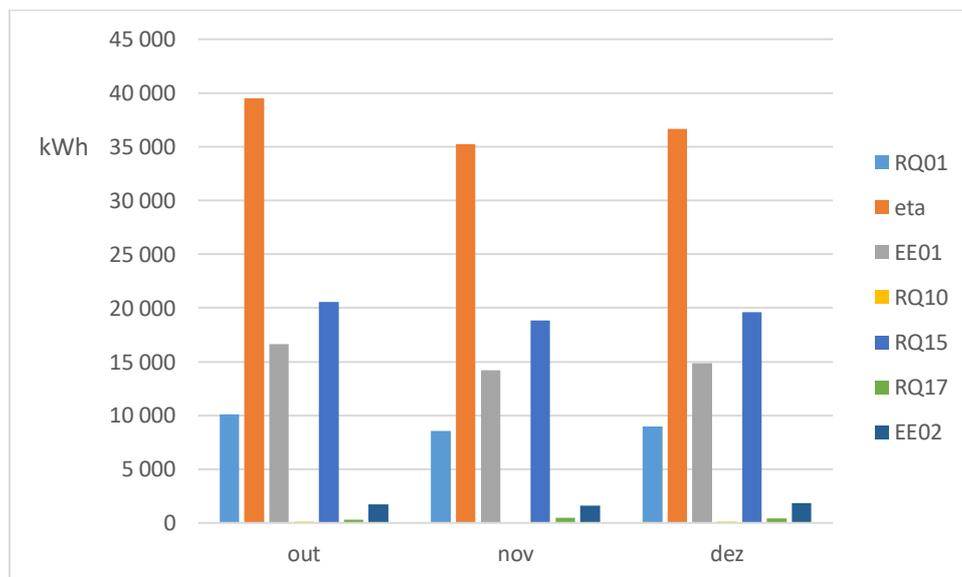


Figura 10: Comparação da energia gasta por sistema de bombeamento durante cada mês

Neste gráfico é fácil identificar os que apresentam tarifa simples, tendo por isso um preço por kWh bastante superior aos restantes (RQ10 e RQ17). Quanto aos restantes, pode afirmar-se que, o sistema tarifário está a ser usado devidamente pois apresenta um custo por kWh abaixo de 0,1, em média, o que significa que está a ser aproveitado o período mais barato.

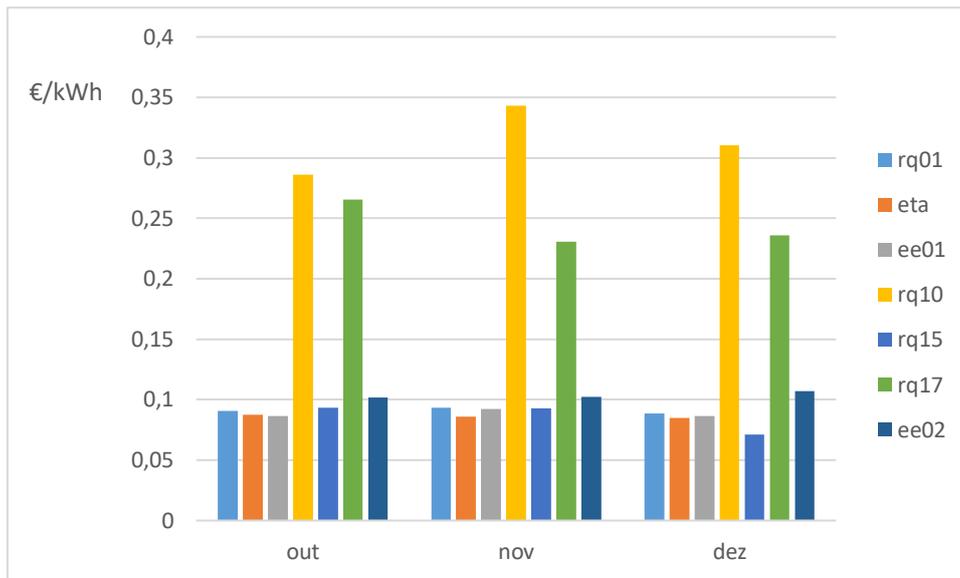


Figura 11: Comparação do custo por kWh de cada sistema de bombeamento

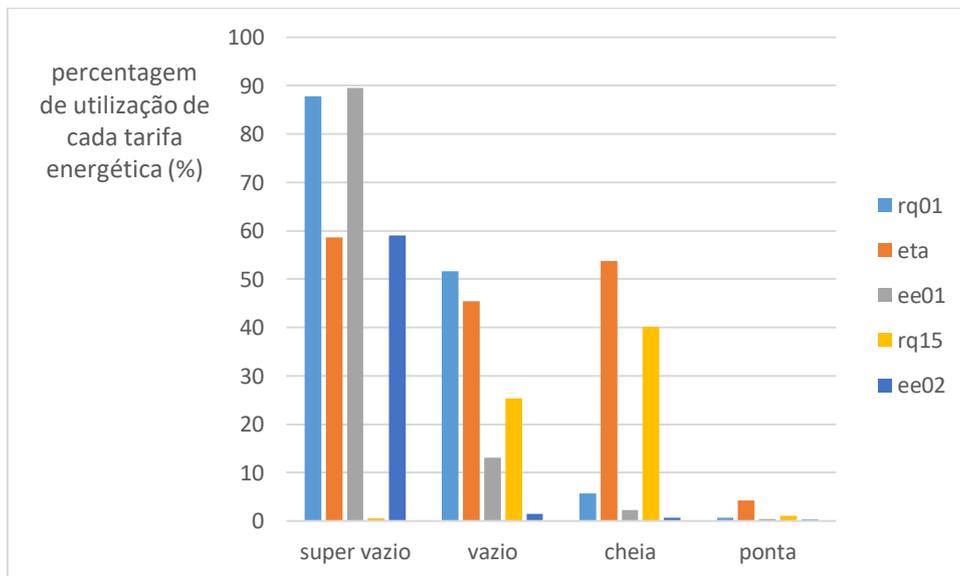


Figura 12: Comparação da utilização de cada tarifa energética de cada sistema de bombeamento

Este gráfico é importante para se ter uma noção de onde aplicar a otimização do sistema, isto porque devemos atuar onde está a ser gasta mais energia no período do dia mais caro. No RQ15 é compreensível, pois não se pode bombear água de noite devido ao facto de estar inserido numa zona habitacional e efetuar muito ruído, devendo-se por isso analisar se o custo de alterar a infraestrutura de modo a torná-la menos ruidosa, compensa a nível monetário. Assim resta apenas a ETA, que é a que utiliza mais energia no período de cheia e ponta sendo por isso o foco de toda a situação. Verifica-se que, no geral, o funcionamento da ETA está, consideravelmente, otimizado, mas há um desaproveitamento claro do período de Vazio, deslocando-se muitas destas horas para os períodos mais caros (cheia e

ponta), principalmente ao nível da captação e elevação para RQ 01, provando-se mais abaixo na programação. Contrariamente a estes reservatórios, deve-se destacar, pela positiva, o funcionamento do bombeamento de RQ 01 e de EE 01 pois estes têm aproveitamento, praticamente máximo, do período mais barato.

3.2.1. Caracterização energética

As condições de operação, os indicadores de performance e as oportunidades de melhoramento foram todas devidamente determinadas. Adicionalmente, foram efetuadas visitas à ETA da Queimadela e a alguns dos reservatórios que constituem o sistema. Com base nestas visitas e na informação disponibilizada, é possível rever os métodos de operação e os custos associados à mesma.

O subsistema da Queimadela que eleva água para os pontos de entrega identificados na Tabela 6 tem um consumo energético distribuído da seguinte forma:

Tabela 6: Consumo elétrico anual por infraestrutura

Infraestrutura	Consumo elétrico anual (kWh)
ETA	745 085
RQ 01	114 432
RQ 10	1 480
RQ 15	237 980
RQ 17	3 988
EE 01	195 581
EE 02	16 576

O maior consumo de energia localiza-se na ETA da Queimadela, quer na captação quer na elevação para RQ 01, e na estação elevatória RQ 15. Relativamente ao custo energético, este subsistema tem uma faturação anual estimada em cerca de 130 632 € (com base no novo contrato com a Endesa).

3.3. Nível de operação dos reservatórios

Para a determinação das horas de acionamento das bombas é necessário ter um conhecimento da capacidade de reserva dos reservatórios. Como tal, um inventário dos níveis de operação dos reservatórios, bem como a sua capacidade máxima, Tabelas 7 e 8, foi elaborado, sendo que muitos deles apresentam altimétricas que não permitem que o nível dos reservatórios ultrapasse esse ponto.

Uma das formas possíveis para melhorar a operação bom base nos níveis do reservatório passa pela criação de mais tarifários nos SCADA, i.e., ao longo do dia temos três (inverno) ou dois (verão) intervalos com tarifários em Cheio, visto que o consumo de água varia durante o dia. Desta forma, é possível adotar novos níveis de operação consoante as necessidades de água ao longo do dia. O mesmo acontece para o tarifário de Ponta nos meses de inverno.

Desta forma, encontrar o melhor nível de operação é possível através da implementação de soluções capazes de prever os melhores níveis de operação diários, com base na previsão dos consumos de água para esse dia ou através de uma operação dinâmica com ordens diárias de operação de ligar/desligar as bombas e válvulas.

Tabela 7: Capacidade máxima e nº de células de cada reservatório

Reservatório	Volume (m ³)	nº de células
Eta	560	2
RQ 01	1500	2
RQ02	600	2
RQ04	850	1
RQ05	2000	2
RQ06	250	1
RQ07	300	2
RQ08	200	2
RQ09	500	2
RQ10	1000	2
RQ11	200	2
RQ12	500	2
RQ13	500	2
RQ14	1000	2
RQ15	500	2
RQ16	400	2
RQ17	200	2
RQ18	300	2
RQ20	1000	2
RQ21	800	2
RQ22	230	1
RQZI	330	1
EE01	500	2
EE02	200	2

Tabela 8: Nível de operação dos reservatórios do Subsistema Queimadela

Localização	Nível mínimo (%)	Nível máximo (%)
RQ 01	60	98
RQ 02	Constante a 80	
RQ 04	Constante a 50	
RQ 05	Constante a 33	
RQ 06	Constante a 80	
RQ 07	25	30
RQ08	40	90
RQ09	20	60
RQ 10	Acima de 40	
RQ 11	30	50
RQ 12	65	75
RQ 13	55	60
RQ 14	20	50
RQ 15	30	98
RQ 16	25	33
RQ 17	40	90
RQ 18	25	50
RQ 20	Acima de 50	
RQ 21	45	52
RQ 22	77	82
RQ ZI	Acima de 90	
EE Q01	Acima de 70	
EE Q02	Acima de 75	

3.4. Modulação virtual em EPANET por parte da SCUBIC

Após efetuadas todas as análises de energia e equipamentos prossegue-se para o desenvolvimento do projeto propriamente dito. Durante esta fase de dimensionamento e gestão de um sistema de abastecimento de água, o uso de ferramentas de modulação, que permitam a simulação do seu funcionamento com base em parâmetros pré-definidos, tem provado ser uma mais valia a qualquer gestor ou responsável de operação. Um dos programas de computador mais usados por empresas de abastecimento de água em todo o mundo é o EPANET. Desta forma, é possível simular os diferentes cenários de operação, de modo a encontrar a melhor ordem de operação com o menor custo.

Este software foi desenvolvido pela Agência Norte-Americana de Proteção Ambiental e tem a capacidade de analisar um número ilimitado de reservatórios e bombas. Permite a realização de uma simulação prolongada do desempenho hidráulico e da qualidade da água em redes pressurizadas. Uma rede consiste em tubos, nós, bombas, válvulas e reservatórios. O EPANET rastreia o fluxo de água em cada tubo, a pressão em cada nó, a altura da água em cada reservatório e a concentração de uma

espécie química em toda a rede. É projetado para ser uma ferramenta de pesquisa para melhorar a compreensão do movimento e destino dos constituintes da água potável dentro de sistemas de distribuição. Pode ser usado para muitos tipos diferentes de aplicações na análise de sistemas de distribuição.

O projeto é composto por 5 módulos, o primeiro, e mais demorado, é a previsão de consumo, o segundo consiste na simulação hidráulica, ou seja, apenas se corre o algoritmo da SCUBIC e este através de iterações chegará ao resultado ótimo, depois passa-se para a avaliação do sistema, no quarto ponto analisa-se as perdas por fugas e no quinto e último ponto, completa-se a otimização (ISQ, 2017).

É importante realçar o procedimento da primeira etapa, pois é a mais demorada e a que contém mais informação do sistema. Inicialmente faz-se um esboço do mapa da rede em EPANET, Fig.13, onde se colocam os reservatórios, a ETA, as bombas e a descrição de todos os troços adutores envolvidos no transporte e distribuição de água. Segue-se com a descrição das características de cada infraestrutura, como o tipo de material das tubagens, diâmetro, cotas e volume dos reservatórios, potência, modelo, altura manométrica e o caudal das bombas, perdas de carga, sendo este parâmetro extremamente importante na calibração do modelo pois, por vezes, os consumos podem não coincidir com o histórico e isto deve-se a variadas formas e perdas de carga.

A modelação de sistemas de distribuição de água visa criar uma idealização virtual da rede real, simulando e analisando adequadamente a rede, nós, reservatórios, bombas, tipologia do terreno. Como referido, antes de ligar todos estes componentes, e compreendendo as necessidades de água e restrições físicas do sistema, a dimensão do problema, em termos de número de variáveis, pode tornar-se extremamente complexa. O objetivo é que as simulações hidráulicas reproduzam a melhor aproximação possível do comportamento real do sistema estudado. Para modelar o sistema de água, o simulador hidráulico EPANET 2.0 é utilizado pela sua versatilidade, pois é um programa de domínio público e amplamente testado pela comunidade científica.

Resumindo, os principais dados a implementar no EPANET 2.0 são:

- Estrutura da rede (características de bombas, tubagens, nós, junções, reservatórios e topografia do terreno);
- Restrições hidráulicas;
- Tarifa de eletricidade;
- Previsões de consumo de água e condições iniciais dos tanques;

- Regras de operação.

3.4.1. Previsão de consumo

Depois do sistema estar todo calibrado em EPANET com todas as características devidas encontra-se o padrão de consumo através de balanços mássicos ao sistema. Na Fig. 13 é apresentado um exemplo disso mesmo, neste caso para o reservatório RQ 16, sendo o processo semelhante para os restantes.

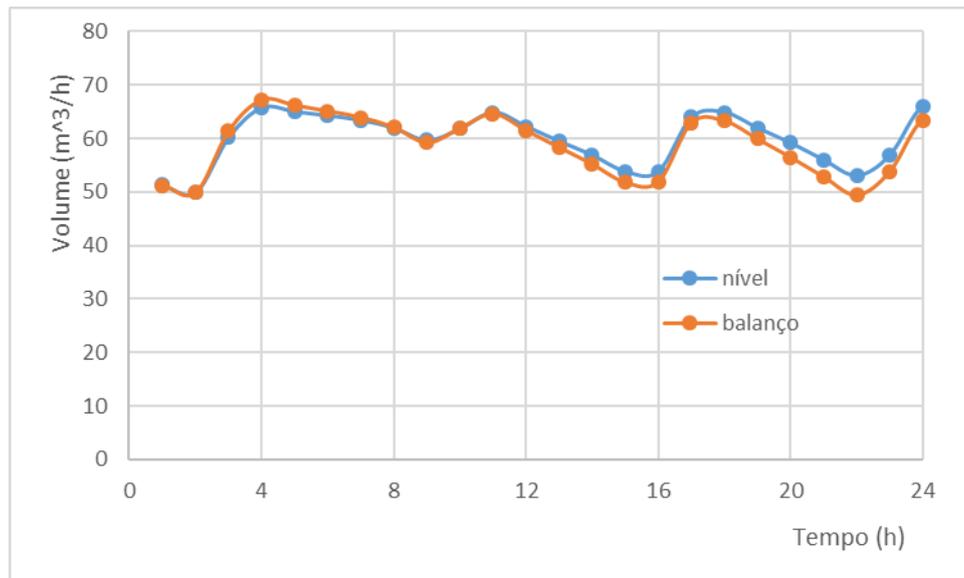


Figura 13: Volume instantâneo de RQ 16 no dia 1 de fevereiro de 2019

No gráfico, nível corresponde ao valor do nível dos reservatórios multiplicado pelo volume máximo para se obter o volume instantâneo de cada dia. Já a curva correspondente ao balanço é calculada pelo balanço mássico, isto é, ao volume no instante anterior soma-se o volume que entra e subtrai-se o que sai, e neste caso concreto, como se observa, as curvas coincidem o que seria o pretendido para se obter o padrão de consumo.

O processo repete-se para todos os reservatórios e em todos eles as curvas coincidem com exceção do reservatório RQ 10 como se observa pela Fig.14. Após feita esta etapa pode-se aplicar o algoritmo da SCUBIC para achar a solução ótima do problema.

Este tipo de gráfico, além de permitir descobrir o padrão de consumo, também permite verificar se os medidores estão a efetuar a leitura devidamente ou a apresentar algum erro associado, caso seja substancial. Neste caso o único a apresentar problema foi o RQ 10. Infere-se, portanto, que um dos medidores está a apresentar um erro de leitura, cerca de 70 m³, podendo ser o medidor do caudal de entrada ou algum de saída.

Em anexo podem ser observados os restantes reservatórios.

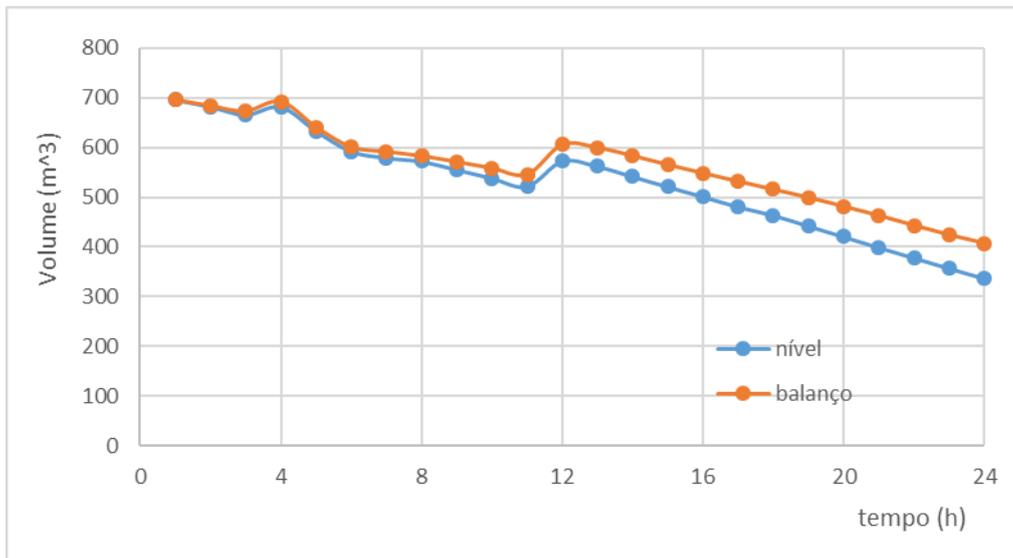


Figura 14: Volume instantâneo do RQ 10

3.4.2. Análise gráfica do comportamento dos reservatórios implementados pela SCUBIC

Nos gráficos seguintes, Fig. 15 a 28, estão representadas as evoluções das variações dos níveis dos reservatórios e os caudais de entrada nos mesmos. Também é possível verificar que as cores de fundo dos gráficos simbolizam os diferentes tarifários ao longo do dia (horário de Inverno), aplicados para o dia 27-02-2019.

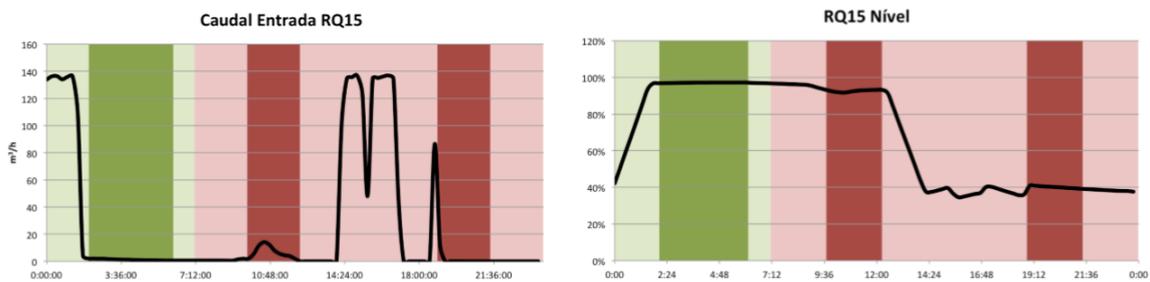


Figura 15: Evolução do nível e caudal do reservatório RQ 15

No Subsistema Queimadela a água é transportada de forma gravítica da ETA de Queimadela até ao reservatório RQ 15 onde é posteriormente elevada para o reservatório RQ 17 e distribuída igualmente de forma gravítica para o reservatório RQ 16. O RQ 15 é controlado através de uma válvula altimétrica, mas também tem a opção de ser controlada remotamente. O RQ 16 é controlado por uma válvula altimétrica a qual em média se abre duas vezes ao dia como é possível visualizar na Fig. 16.

Relativamente ao reservatório RQ 17 este tem a limitação que devido ao elevado ruído e proximidade com a população somente pode operar entre as 9h e as 20h restringindo alguma possível melhoria à operação. O reservatório RQ 17 distribui água de forma gravítica para o reservatório RQ 20 e eleva água para o reservatório RQ 18.

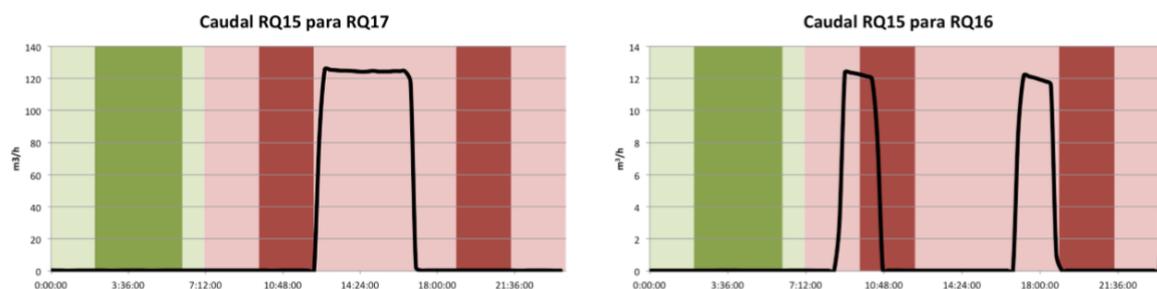


Figura 16: Evolução do caudal de RQ 15 para RQ 16 e RQ 17

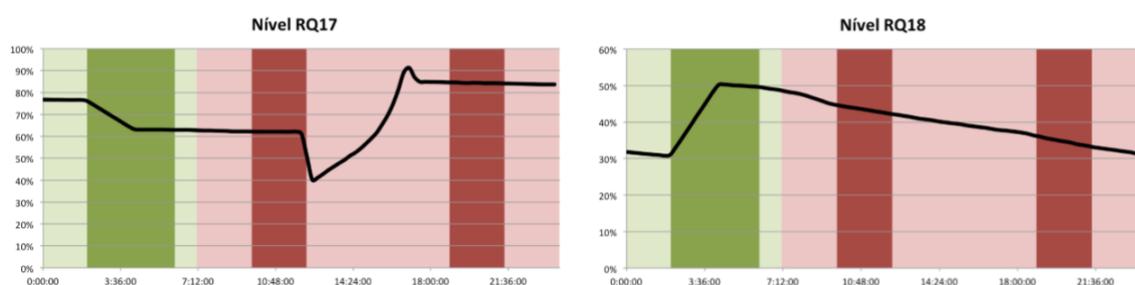


Figura 17: Evolução do nível de RQ 17 e RQ 18

Através da análise das Fig. 17 e 18 é possível concluir que a operação do reservatório RQ 18 se encontra limitada a operar entre os 25% e 50% da capacidade do reservatório, devido a problemas relacionados com o excesso de pressão na rede. Caso fosse possível utilizar toda a capacidade do reservatório RQ 18, este teria a quantidade de água necessária para abastecer a população durante dois dias, reduzindo o custo com esta elevatória nomeadamente no desgaste do grupo de bombeamento. Contudo, visto somente operarem sem os períodos tarifários Super Vazio e Vazio faz com que qualquer melhoria seja mínima.

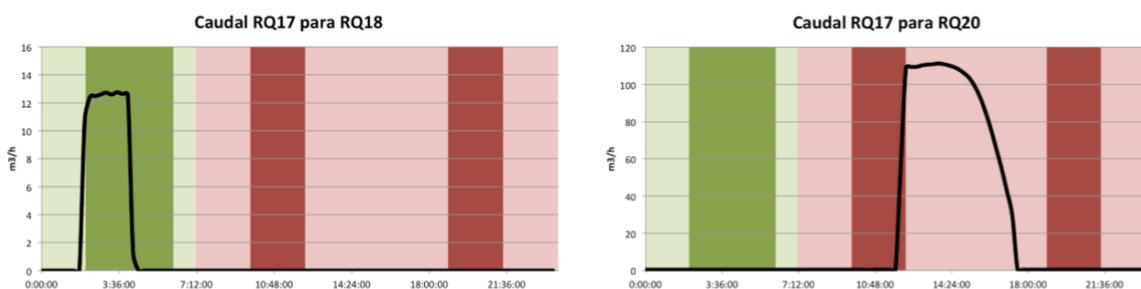


Figura 18: Evolução do caudal de RQ 17 para RQ 18 e RQ 20

O reservatório RQ 20 distribui água para os reservatórios RQ 21 e RQ 22. A abertura da válvula do reservatório RQ 20 está configurada para abrir aos 50% da capacidade do reservatório.

Independentemente dos níveis de operação selecionados para os reservatórios RQ 16, 20, 21 e 22 a baixa capacidade destes reservatórios faz com que qualquer alteração dos padrões de funcionamento irá ter um baixo impacto na melhoria da operação. Nesta secção da rede a grande melhoria passível a ser efetuada, seria melhorar a sonorização da estação elevatória de RQ 15 de modo a operar em Super Vazio e desta forma reduzir os custos operacionais e levar a um menor desgaste dos grupos de elevação.

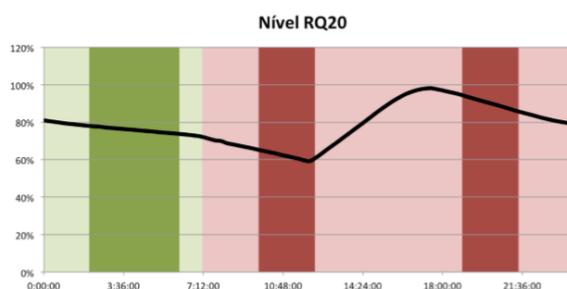


Figura 19: Evolução do nível RQ 20

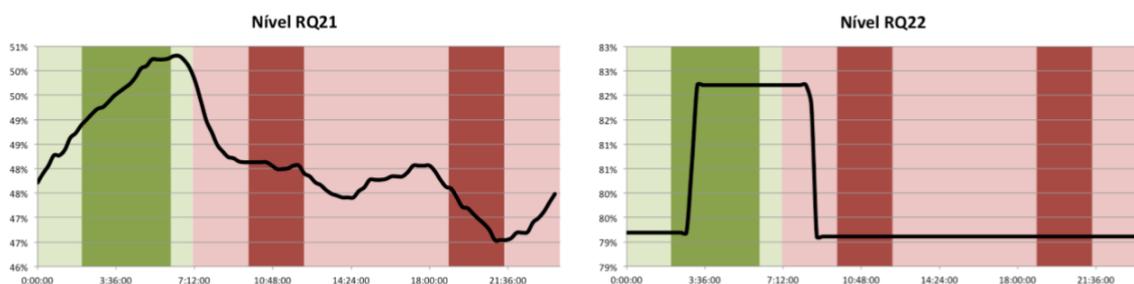


Figura 20: Evolução do nível de RQ 21 e RQ 22

De igual forma à secção anterior, a água também é elevada da ETA da Queimadela para o reservatório RQ 01 com o padrão demonstrado na Fig. 21. Este distribui de forma gravítica a água para os reservatórios RQ 02, RQ ZI e EE01 e eleva água para o reservatório RQ 08.

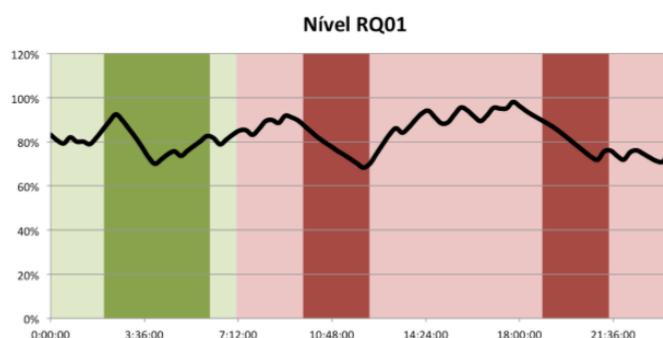


Figura 21: Evolução do nível de RQ 01

Com base na análise da Fig. 21 é possível averiguar que não há elevação da ETA para o RQ 01 nas horas de ponta. Contudo, os níveis de operação estipulados para este reservatório são de 60% a

98%. Com base nisto os níveis deste reservatório devem apresentar valores próximos de 60% às 23:59h de modo a ser possível utilizar ao máximo o tarifário de Super Vazio.

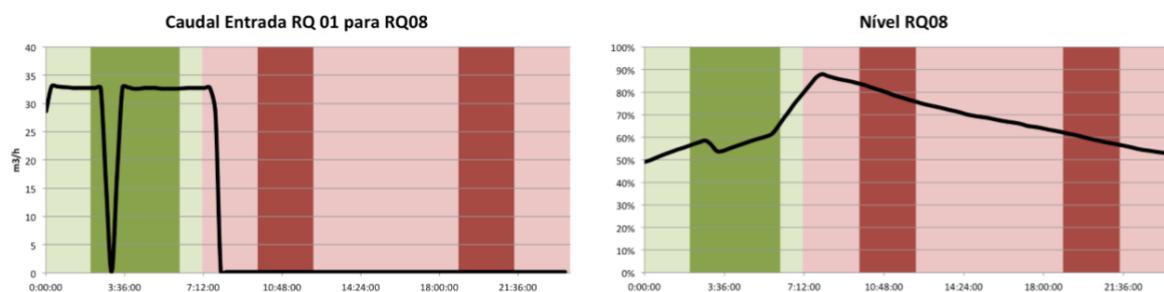


Figura 22: Evolução do caudal de RQ 01 para RQ 08 e do nível de RQ 08

Através da análise da Fig. 22 é possível averiguar que, com base no caudal vs. consumo de água para este reservatório, é possível elevar a água somente em horários de Vazio e Super Vazio, tendo capacidade suficiente para as necessidades de consumo. Desta forma, visto que os níveis de operação estão estipulados entre os 40 a 100%, é possível garantir o nível mínimo às 23:59h e tirar o máximo proveito dos tarifários mais económicos.

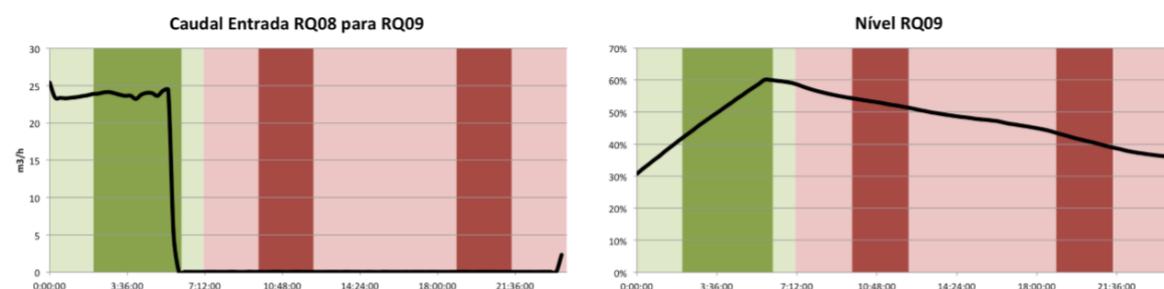


Figura 23: Evolução do caudal de distribuição de RQ 08 para RQ 09 e do nível de RQ 09

Com base na Fig. 23 e tendo em conta que a distribuição efetuada entre RQ 08 e o RQ 09 ser gravítica esta operação pode ser efetuada a qualquer hora do dia não afetando a operação. Como conclusão, é possível afirmar que independentemente do consumo verificado nos reservatórios RQ 02, RQ ZI, e EE 01 o custo operacional do RQ 01 não é afetado.

A Fig. 24 demonstra a evolução do nível do reservatório EE01. Como podemos observar este está estipulado para operar acima dos 70%, valor atingido somente quando se dá a elevação para o RQ 10 como é possível verificar pela Fig. 26.

Observando a Fig. 26 e com base nos níveis operacionais estabelecidos, é possível afirmar que a elevação do RQ 10 para o RQ 11 deve ser efetuada somente durante o período de Vazio e Super Vazio, sendo que, com base no consumo de água do RQ 11, é suficiente para a operação diária.

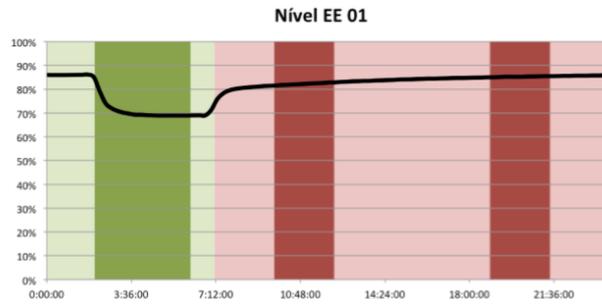


Figura 24: Evolução do nível de EE 01

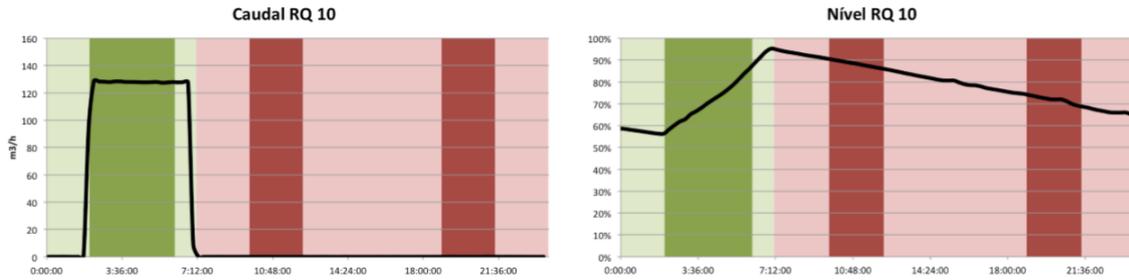


Figura 25: Evolução da distribuição de RQ 10 e do nível de RQ 10

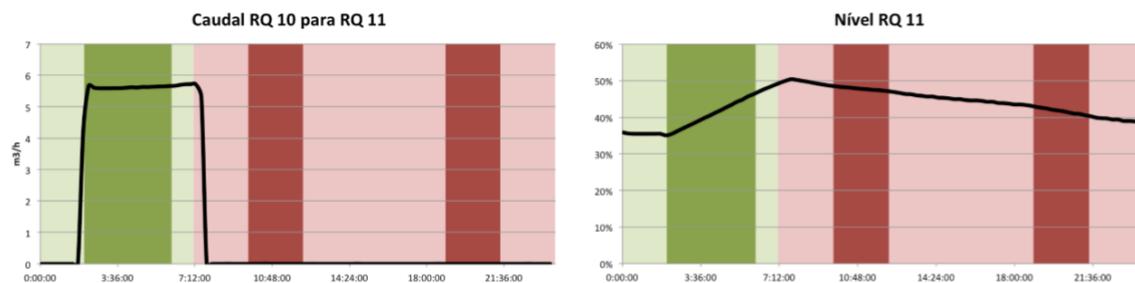


Figura 26: Evolução do caudal de RQ 10 para RQ 11 e do nível de RQ 11

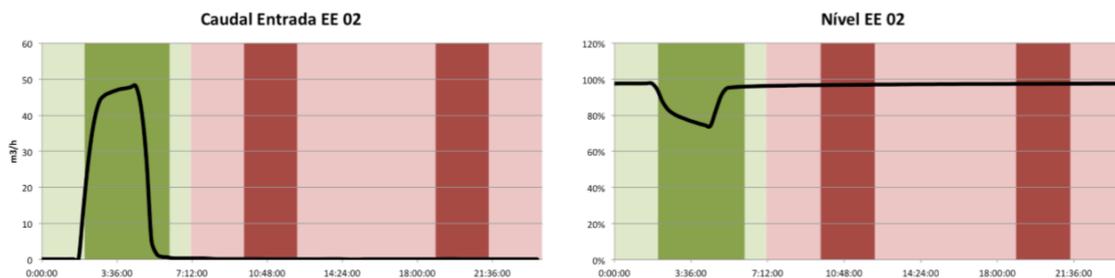


Figura 27 Evolução do caudal de entrada em EE 02 e do nível de EE 02

Como conclusão geral, podemos afirmar que o sistema de distribuição de água da ETA da Queimadela apresenta uma operação próxima do ótimo. Contudo, quando mais os reservatórios se aproximarem dos níveis mínimos às 23:59h todos os dias maior será a utilização dos tarifários de Vazio e Super Vazio e consequentemente menor custo de operação.

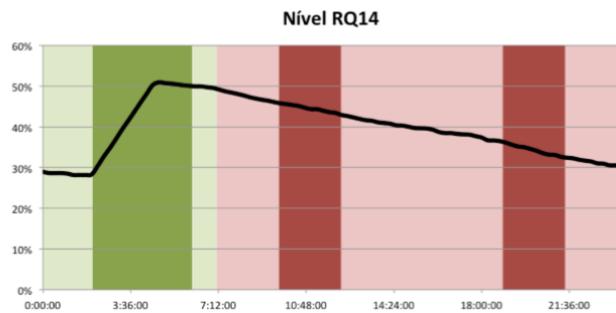


Figura 28: Evolução do nível de RQ 14

Com base nas simulações operacionais já efetuadas, pode-se afirmar que a adoção das sugestões acima descritas assim como a utilização da plataforma analítica SCUBIC será possível reduzir os custos operacionais entre 1,3 a 2% correspondente a uma poupança máxima de 2 600 euros, aproximadamente.

3.5. Análise do “caso” RQ 15

Como visto previamente a elevação de água por parte do RQ 15 só pode ser efetuada no período diurno, mais especificamente, à tarde. Para tal é importante verificar se alterações na infraestrutura de forma a torná-la mais silenciosa compensa para que este possa ser ligado no período noturno.

Após efetuada a análise (Tabela 9) pode-se afirmar que a poupança anual será na ordem dos 11 000 euros trazendo um elevado benefício económico.

Assim, a empresa deve optar o quanto antes pela melhoria desta infraestrutura sendo esta o maior consumidor de energia do sistema logo após a ETA.

Tabela 9: Diferença de custo de operação do RQ 15 comparando o seu funcionamento no período da tarde com o seu funcionamento no período noturno

		Tarde			Noite			poupança (€)
		verão (€)	inverno (€)	Total (€)	verão (€)	inverno (€)	Total (€)	
RQ 15	dias uteis	90,95	67,6	25639	55,04	22,74	14547	11 092
	sábados	72,4	35,06		56,69	39,59		
	domingos	64,48	34,08		37,06	29,54		
	feriados	64,48	34,08		64,48	34,08		

3.6. Programação linear implementada em Excel

Para efeitos de análise e comparação de resultados optou-se por fazer a minimização da função objetivo por programação linear implementada em Excel. Assim será possível comparar o sistema de acionamento das bombas com dois tipos de programação, a linear e a dinâmica, sendo expectável que a última seja a mais vantajosa em termos energéticos.

A programação foi dividida em oito partes, isto porque as tarifas de energia são diferentes para os dias úteis, sábados, domingos e feriados variando também do horário de inverno para o de verão.

Considera-se uma média dos caudais de consumo e de distribuição diários sendo que para a obtenção desta previsão de consumo recorre-se ao histórico. Apesar de não corresponder à realidade num certo ponto do dia, ao fim do dia o erro irá ser diminuto, sendo, por isso, estas previsões para 24 horas. Apenas se considera os reservatórios afetados por ação de bombeamento pois os restantes apresentam um custo bastante reduzido, apenas o custo de funcionamento/manutenção do reservatório, ou seja, apenas se considera a ETA, os reservatórios, RQ 01, RQ 10, RQ 15 e RQ 17, e as elevatórias, EE 01 e EE 02. Importante realçar que todos os sistemas de bombeamento são constituídos por duas bombas, mas apenas se considera o funcionamento com uma bomba ficando a outra de reserva caso surja algum imprevisto. Poderia surgir a dúvida, compensa mais usar as duas bombas em super vazio/vazio ou apenas uma ao longo dos períodos? Mas após análise, não compensa, pois as duas em super vazio sai mais caro do que uma a funcionar em cheia. Para além do facto de que, caso seja necessário usar as duas tem de ser adquirida uma terceira bomba em caso de falha/emergência.

Outro aspeto que se deve ter em atenção na programação é, não deixar as bombas muito tempo paradas, isto porque, em alguns reservatórios consegue-se encher totalmente num dia e este ficar com água para abastecer durante vários dias, mas desta forma, apresenta atenuantes. Em termos energéticos é bastante vantajoso, mas o elevado tempo de paragem das bombas traz certas consequências como, a falta de circulação de água nas tubagens leva ao desenvolvimento de biofilme, ou mesmo, a perda de qualidade da mesma podendo levar a perigos à saúde pública.

Inicia-se a programação com a extração dos dados provenientes do histórico de consumo, no geral, são todos retirados do High-Leight, software semelhante ao SCADA que fornece os caudais pretendidos. Aqueles que o programa não fornece, ou por avaria ou porque não existe sensor de leitura são efetuados por balanços volúmicos para a sua determinação, como é o caso, do caudal de entrada da elevatória EE01, pois é conhecido o caudal de saída de RQ01 e este tem três saídas, uma para RQ02, outra para

RQZI e a última para EE01. Visto que o nível de RQ02 e RQZI se mantêm constante e é conhecido o caudal de saída dos reservatórios facilmente se determina o caudal de entrada de EE01, e o mesmo acontece noutros casos.

Para a construção da função objetivo necessitamos especificar as diferentes tarifas para as diferentes horas do dia. A função objetivo consiste na minimização do custo de acionamento das bombas, tendo em consideração. Assim, a função objetivo corresponde à seguinte representação:

$$F. O. = P \sum_i^{28} \sum_j^4 t_i T_j$$

em que

- i índice correspondente à divisão de 24 horas em 28 períodos conforme Tabela 10;
- j índice correspondente aos 4 tarifários (Tabela 1).

Tabela 10: Correspondência da divisão de 24 horas em diferentes períodos de tarifário

i	Período (h)	i	Período (h)	i	Período (h)	i	Período (h)
1	0-1	8	7-8	15	12-12,25	22	18-18,5
2	1-2	9	8-9	16	12,25-13	23	18,5-19
3	2-3	10	9-9,25	17	13-14	24	19-20
4	3-4	11	9,25-9,5	18	14-15	25	20-21
5	4-5	12	9,5-10	19	15-16	26	21-22
6	5-6	13	10-11	20	16-17	27	22-23
7	6-7	14	11-12	21	17-18	28	23-24

Sujeita às seguintes restrições:

$$V_{min} \leq V_x \leq V_{max}$$

$$V_x = V_a + Q_e n - Q_s \sum_i^{28} t_i$$

$$Q_e \times 24 - Q_s \sum_i^{28} t_i = 0$$

em que

- Q_e Caudal de entrada;
- Q_s Caudal de saída;
- n Hora do dia;

V_x	Volume instantâneo do reservatório x;
V_{\min}	Volume mínimo;
V_{\max}	Volume máximo;
V_a	Volume atual.

Posteriormente é necessário impor diversas restrições como limites dos níveis dos reservatórios, isto é, volume máximo e mínimo de cada reservatório sendo o limite mínimo cerca de 20 % do volume total e o limite máximo o volume total no geral havendo exceções pois alguns reservatórios apresentam altimétricas que mantêm o nível do reservatório constante, balanços de massa para que o volume que entra num reservatório seja igual ao volume que saia após 24 horas, ficando o nível do mesmo igual no fim de cada dia, restrições associadas ao tempo de bombeamento em cada período do tetra horário, etc.

Numa etapa seguinte é simplificada a programação passando a coexistir todos os dados num só ficheiro de fácil leitura e de fácil acessibilidade a alterações futuras, como os caudais de saída ou mesmo, possíveis alterações de bombas. Para tal, otimiza-se por Visual Basic for Applications (VBA), programando macros no ficheiro.

Aqui, considera-se uma folha principal que tem o algoritmo propriamente dito e as variáveis de decisão, sendo o restante colocado em folhas auxiliares.

No final é apresentada uma folha de cálculo simples como se pode observar pela Fig. 29, em que permite a seleção da estação do ano que se pretende e o respetivo dia, depois corre-se a macro e esta altera o quadro em que estão presentes as cinco bombas com período tetra-horário e o número de horas que estas têm de estar ligadas em cada período horário. O solver irá arbitrar da melhor maneira minimizando os custos e cumprindo os requisitos para satisfazer as necessidades de consumo e de distribuição. As variáveis a arbitrar são os caudais de saída das bombas bem como o tempo a que estas estão ligadas. De notar que apenas se considera o custo de funcionamento das bombas, não se considerando o custo de acionamento das mesmas.

Estudo para otimização energética do Subsistema de Queimadela

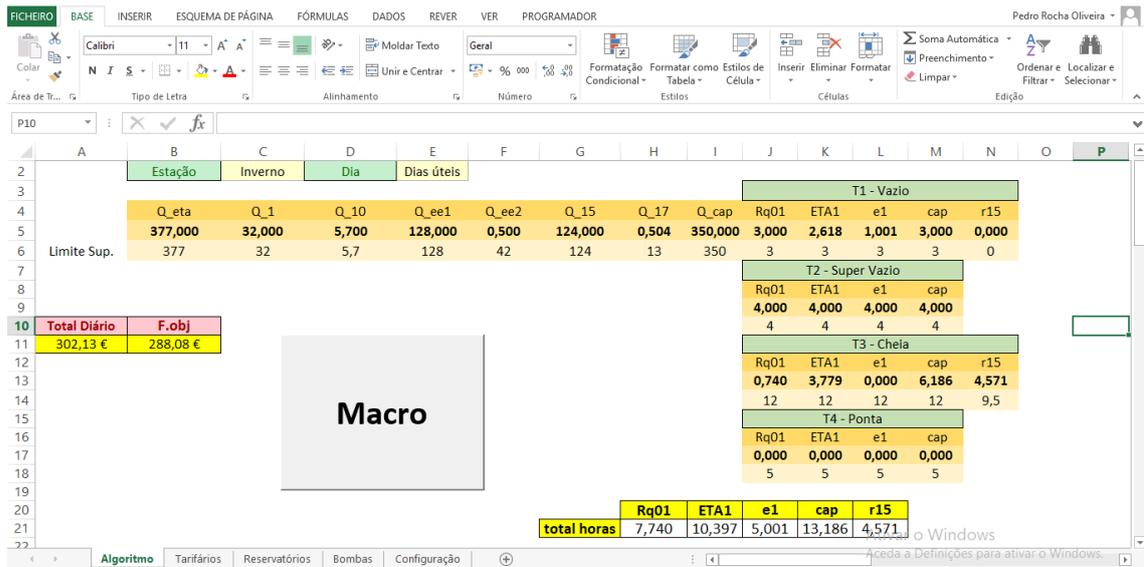


Figura 29: Exemplo do algoritmo em Excel aplicado no Subsistema Queimadela para dias úteis no inverno

A Tabela 11 apresenta os custos energéticos da empresa atualmente (apenas se consideram os custos de bombeamento para efeitos de comparação). Pode-se observar que a empresa gasta 130 633 euros por ano em energia nas elevatórias por isso o objetivo é, com a programação não linear, reduzir este valor e com a programação dinâmica, efetuada pela SCUBIC, apresentar os valores mais baixos possíveis.

Tabela 11: Custos anuais de cada infraestrutura do Subsistema Queimadela

Designação	Custo anual (€)
RQ 01	10 616
RQ 15	25 520
RQ 10	436
RQ 17	1 000
EE 01	17 704
EE 02	2 610
ETA	72 747
Total	130 633

3.7. Resultados

Na Tabela 12 apresenta-se os valores calculados de custo anula para cada reservatório.

Tabela 12: Custos anuais por infraestrutura após o algoritmo em Excel

Reservatório	Custo anual (€)
ETA cap	34 151
ETA ele	37 777
RQ 01	9 873, 93
RQ 10	438
RQ 15	21 660,04
RQ 17	1 000
EE 01	16 739, 80
EE 02	2 628

Constata-se que há uma poupança na generalidade das bombas acentuando-se sobretudo no RQ 15, de cerca de 4 000 euros. Não acontece o que estava inicialmente previsto que seria a poupança ao nível da ETA e assim pode-se constatar que nesta infraestrutura, atualmente, as bombas estão a operar devidamente. Nos restantes reservatórios a poupança acumulada foi de, aproximadamente, 2 000 euros.

Isto deve-se, sobretudo, à deslocação das horas de ponta e algumas de cheia para o período de vazio pois está a ser mal aproveitado. Antes, o acionamento das bombas, não era constante e isso leva a que os reservatórios, por vezes, cheguem ao final do dia praticamente cheios e, assim, desperdiçando as horas iniciais de cada dia onde a energia é mais económica. Após a programação o acionamento é constante e os reservatórios chegam ao final do dia praticamente no nível mínimo usando o período dos tarifários mais caros apenas excecionalmente e quando necessário, como é o caso da captação pois a sua capacidade de reserva é muito curta para as necessidades do sistema.

Deve-se realçar o facto que, não houve grande poupança ao nível da ETA muito devido aos caudais considerados pois, ao fim do ano, a empresa registou cerca de 1 751 934 m³ de água captada enquanto o algoritmo registou 1 943 700 m³, ou seja, o algoritmo, com o mesmo custo associado permite captar mais 200 000 m³ de água, aproximadamente.

Na Tabela 13 apresentam-se os custos de energia obtidos através da otimização correspondentes a cada dia do ano.

Tabela 13: Custos associados aos dias de inverno e verão

Período	Custo diário (€)	
	Inverno	Verão
Dias uteis	267,21	440,33
Sábados	265,13	375,64
Domingos	259,43	358,50
Feriados	268,28	365,88

$$\text{Total}_{\text{inverno}} (6 \text{ meses}) = 48\ 383,35 \text{ Euros}$$

$$\text{Total}_{\text{verão}} (6 \text{ meses}) = 76\ 249,72 \text{ Euros}$$

$$\text{Total anual} = 124\ 633,07 \text{ Euros}$$

$$\text{Poupança} = 130\ 633 - 124\ 633 = 6\ 000 \text{ €/ano}$$

Problemas associados a este tipo de programação:

- Considerando que, nos reservatórios que não apresentem sistemas de bombeamento, isto é, aqueles em que a água entra por ação gravítica, a quantidade de água de entrada é igual à de saída, o que poderá ser falso principalmente naqueles sucedem reservatórios que apresentem tarifa tetra-horária, isto porque, nos de tarifa simples podem distribuir água quando necessário pois o preço energético será o mesmo a qualquer hora do dia.
- Ao fim de 24 horas os reservatórios devem apresentar-se no mesmo nível que no dia anterior e, isto, por vezes não acontece, pois, a taxa de consumo varia de dia para dia tendo de ser efetuadas as iterações novamente.
- Não considera alterações do clima, ou seja, não considera nem o excesso de água em dias chuvosos nem a seca em dias de muito calor.

Ideias para obter uma melhor precisão de resultados:

- Reduzir o tempo de previsão, ou seja, em vez de considerar uma previsão diária fazer de 8 em 8 horas, isto porque, a distribuição ocorre principalmente no período noturno e o consumo no período diurno.
- Melhorar a eficiência das bombas principalmente da elevatória para RQ 01.

- O ideal seria dia após dia alterar os caudais de consumo pois, estes valores são modificados, conforme o dia da semana, o clima, etc.
- Períodos curtos entre elevações - Será que compensa desligar as bombas?
- Bomba menos potente na EE 01 ou mesmo na captação pois pode bombear mais tempo no período mais barato e a potência usada é menor logo existe mais poupança energética.

4. TRABALHO DESENVOLVIDO - SUBSISTEMA DE AREIAS DE VILAR

Após efetuada a elaboração do algoritmo e da análise do Subsistema de Queimadela é efetuado, de forma semelhante, um estudo em três zonas do sistema de Areias de Vilar, sendo elas, o troço de Burgães (Santo Tirso), Cerite (Famalicão) e Lemenhe (arredores de Famalicão). Estes três troços não são selecionados aleatoriamente, apresentando todos as suas particularidades e desafios, sendo, por isso, necessário efetuar alterações ao algoritmo.

4.1.1. Troço de Burgães

Este troço, apresentado na Fig. 30, afeta as zonas de Burgães, Rebordões, Vila das Aves, Negrelos, Roriz, S. Martinho do Campo, S. Pedro e Vilarinho e consideram seis elevatórias em tetra-horário, ou seja, o sistema é mais pequeno que o anterior, mas apresenta mais variáveis de decisão, aumentando-se assim o desafio.

Neste caso, existem mais restrições ao nível dos volumes pois o mínimo permitido em cada reservatório não é de 20% como em Queimadela, variando de reservatório para reservatório. De notar que o reservatório de Vila das Aves possui altimétrica logo o nível do mesmo irá manter-se constante durante todo o período, salvo alguma avaria.

O sistema distribui, aproximadamente, 1300 m³/d variando conforme o dia da semana e altura do ano.

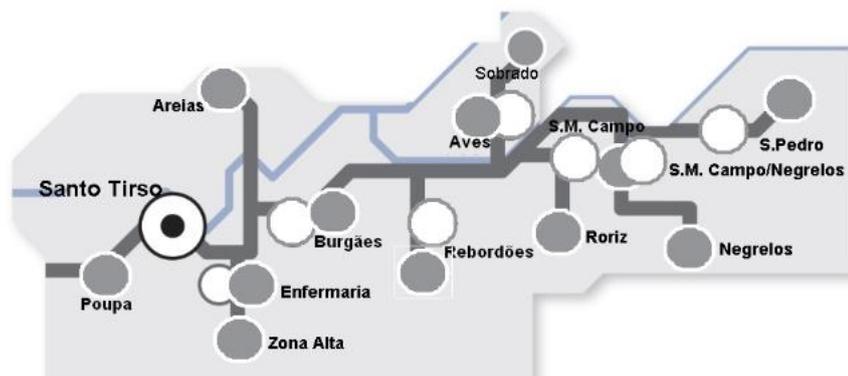


Figura 30: Mapa corresponde ao troço de Burgães

O sistema adutor do respetivo troço é especificado na Fig. 31, onde se pode observar a complexidade do sistema.

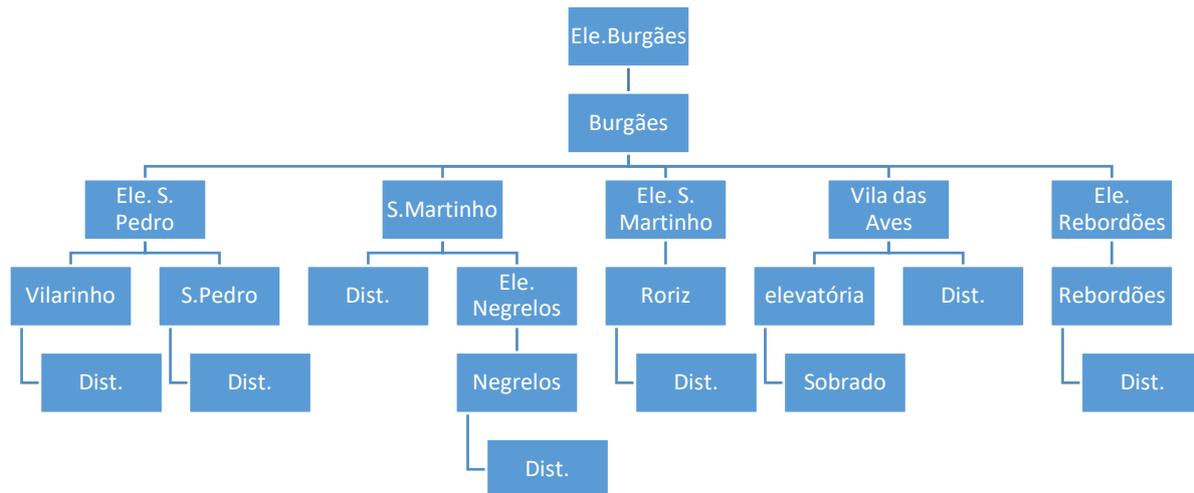


Figura 31: Distribuição do troço de Burgães

Os dados dos caudais necessários para aplicar o algoritmo são retirados do SCADA sendo que, para dois deles é necessário o seu cálculo por balanços mássicos, quer o caudal de entrada de S. Marinho, quer o caudal de Vila das Aves. Os dados fornecidos pelo software são, o caudal de distribuição de Burgães, caudal de adução de Burgães, caudais de distribuição de Rebordões, Roriz, Negrelos, S. Pedro, Vilarinho, Vila das Aves e S. Marinho. Como se pode observar, para obter os dados relativos aos caudais de entrada nos reservatórios de Vila das Aves e S. Marinho é muito simples. Começa-se pelo de Vila das Aves, pois, como se sabe que o nível do reservatório é constante e há dados relativos aos caudais de bombeamento bem como o de distribuição, se consegue determinar o caudal de entrada.

Posteriormente, para a determinação do caudal de S. Marinho, como se tem conhecimento do caudal de adução à saída de Burgães e este “alimenta” cinco saídas distintas sendo quatro delas conhecidas, através de um balanço simples obtém-se o caudal de entrada pretendido.

Destacar que estas elevatórias não possuem reservatórios como a EE01 e EE02 situadas em Queimadela logo não têm capacidade de armazenar água, tendo por isso de se efetuar alterações na folha de cálculo.

É importante não haver grandes variações nos níveis dos reservatórios. Como se está a operar apenas com um troço, não se pode ter a certeza que irá afetar o restante sistema de Areias de Vilar sendo, para tal, necessário mais tempo para os devidos cálculos.

- Interessante poder observar a diferença de períodos de bombeamento entre o bombeamento habitual e o determinado pelo solver. Por exemplo, no dia 13 de janeiro de 2019 a ação de bombeamento está expressa na Tabela 14.

Tabela 14: Ação de bombeamento correspondente ao dia 13 de janeiro de 2019

T1 - Vazio				
bur	reb	s.m	neg	s.p
1,000	1,000	0,000	0,000	0,000
3	3	3	3	13
T2 - Super Vazio				
bur	reb	s.m	neg	s.p
3,000	4,000	2,250	0,500	1,000
4	4	4	4	4
T3 - Cheia				
bur	reb	s.m	neg	s.p
1,300	0,000	0,000	0,000	0,000
12	12	12	12	12
T4 - Ponta				
bur	reb	s.m	neg	s.p
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
5	5	5	5	5

Após a programação do solver, para a distribuição da mesma quantidade de água diária, o quadro de acionamento das bombas é dado pela Tabela 15.

Tabela 15: Ação de bombeamento correspondente ao dia 13 de janeiro de 2019 sugerida pelo solver

T1 - Vazio				
bur	reb	s.m	neg	s.p
0,514	1,040	0,000	0,000	0,000
3	3	3	3	3
T2 - Super Vazio				
bur	reb	s.m	neg	s.p
4,000	4,000	2,250	0,474	1,263
4	4	4	4	4
T3 - Cheia				
bur	reb	s.m	neg	s.p
0,832	0,000	0,000	0,000	0,000
12	12	12	12	12
T4 - Ponta				
bur	reb	s.m	neg	s.p
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
5	5	5	5	5

Em comparação com os dois quadros, observa-se que as bombas trabalham o mesmo período horário, mas em diferentes alturas, e com isto acarretam-se mais benefícios económicos. Neste caso concreto, a poupança será de 0,70 €/dia.

Neste troço as poupanças não são tão visíveis como no sistema de Queimadela porque não se consegue interferir com o restante sistema enquanto, em Queimadela pode-se alterar desde a captação e com isto existe mais folga para otimização.

4.1.2. Troço de Cerite (Famalicão)

Um dos reservatórios com maior distribuição de todo o sistema é o reservatório de Cerite, aplicando-se, o mesmo método para verificar se o bombeamento de Barradas está a ser efetuado de forma mais vantajosa possível. O esquema do referido troço encontra-se na Fig. 32.

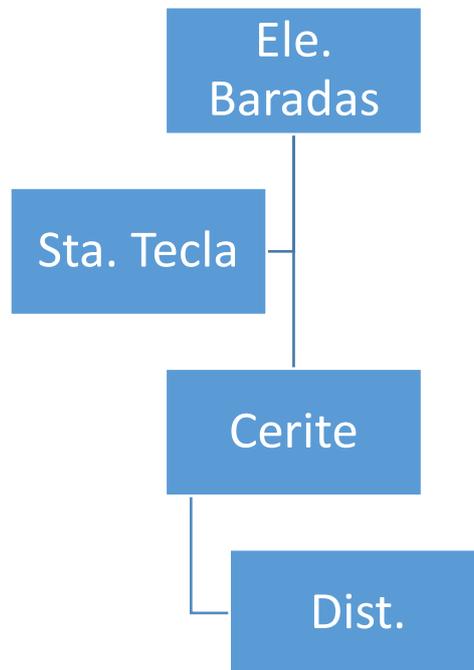


Figura 32: Distribuição de Cerite

Este reservatório, além de ser o mais problemático a nível de distribuição, apresenta uma diferença para com os outros casos analisados. O bombeamento da estação elevatória de Barradas possui um variador de frequência e com isto é possível escolher o caudal de entrada de Cerite, variando de 450 a 650 m³/h. Assim é importante verificar se é mais vantajoso alterar o caudal ao longo do dia ou então mantê-lo constante sabendo que quanto maior for o caudal a bombear, maior será o seu custo energético associado, mas serão menos horas de trabalho.

O reservatório tem capacidade máxima de 3000 m³, mas o limite mínimo a ser considerado é de 1500 m³ pois a distribuição é elevada e mesmo com o nível a 50 % ainda é curto pois só permite ter reserva para três horas.

Na programação considera-se um intervalo de duas horas quer na distribuição, quer no bombeamento, ou seja, efetuam-se médias de duas em duas horas em vez de médias diárias, como se observa na Fig. 33.

Estudo para otimização energética do Subsistema de Queimadela

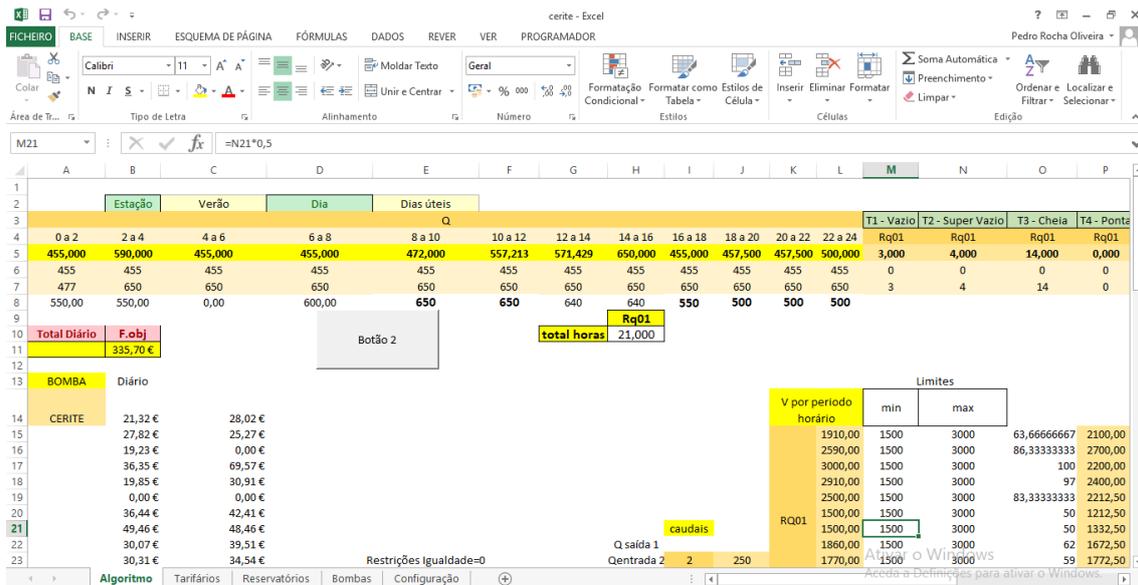


Figura 33: Algoritmo aplicado a Cerite no dia 11 de julho de 2019

A lógica será a mesma dos exemplos anteriores, mas neste caso existem variadores de frequência, sendo que o solver irá escolher os caudais que melhor se ajustam à idealidade. Neste caso observa-se que no quadro inicial, Q corresponderá aos diferentes caudais a aplicar de duas em duas horas. Nas duas linhas abaixo estão apresentados os limites mínimo e máximo da bomba e na terceira abaixo estão apresentados os caudais usados neste respetivo dia.

Assim, observa-se que, atualmente, na ETA, funciona-se da seguinte forma:

- Até ao início da hora de ponta bombeia-se um caudal entre os 550-600 m³/h havendo uma hora de paragem.
- Durante a hora de ponta não se bombeia, caindo o nível do reservatório para os 50 %.
- Após a hora de ponta bombeia-se à capacidade máxima de 650 m³/h até se atingir um limite que permita ter folga, isto é, aproximadamente 70 % e no resto do dia mantém-se com um caudal na ordem dos 500 m³/h.

Após programação verifica-se que o funcionamento ideal seria:

- Até às horas de ponta bombear na ordem dos 455 m³/h e duas horas em super vazio a 550 m³/h atingindo o volume máximo.
- Não bombear nas horas de ponta.

- Após as horas de ponta bombear 600 m³/h nas primeiras 2 horas e depois bombear, aproximadamente, o caudal mínimo até ao fim do dia para que o reservatório chegue às zero horas com o nível a 50 %.

Neste dia, após aplicação do algoritmo, obteve-se uma poupança de 35 euros. Trata-se de uma poupança considerável e, com isto, consegue-se comprovar que compensa muito mais economicamente não parar as bombas, apenas nas horas de ponta, do que efetuar uma paragem como se desempenhava na ETA.

4.1.3. Lemenhe

Este caso foi escolhido pois tratam-se de dois reservatórios em cadeia em que se tem uma distribuição por intermédio de dois bombeamentos seguidos. Este caso concreto ainda não tinha sido desenvolvido anteriormente.

Descrição do troço: sistema pequeno e de pouca distribuição situado nos arredores de Famalicão em que o primeiro reservatório (Lemenhe) recebe a água duma estação elevatória, possui a distribuição para a população e através de outra elevatória transporta água para outro reservatório (Jesufrei), este último possuindo duas saídas para distribuição.

Aquando do desenvolvimento do algoritmo verificou-se que os dados recolhidos não eram os corretos e assim sendo o algoritmo foi incapaz de calcular o desempenho ótimo das bombas. Como visto no capítulo 2.4.1 o gráfico correspondente ao volume instantâneo permite verificar a ocorrência deste tipo de erros sendo efetuado um para Lemenhe.

Como se constata, pela Fig. 34, existe um erro num medidor em cerca de 60 m³ e por isso o algoritmo não consegue cruzar os dados. O medidor em causa será do caudal de entrada pois o de distribuição, como é de faturação, é inspecionado mensalmente, e o de elevação para Jesufrei está correto (nesse dia entraram 407 m³, saíram 398,4 m³ e o nível subiu 1,5 % por isso está correto).

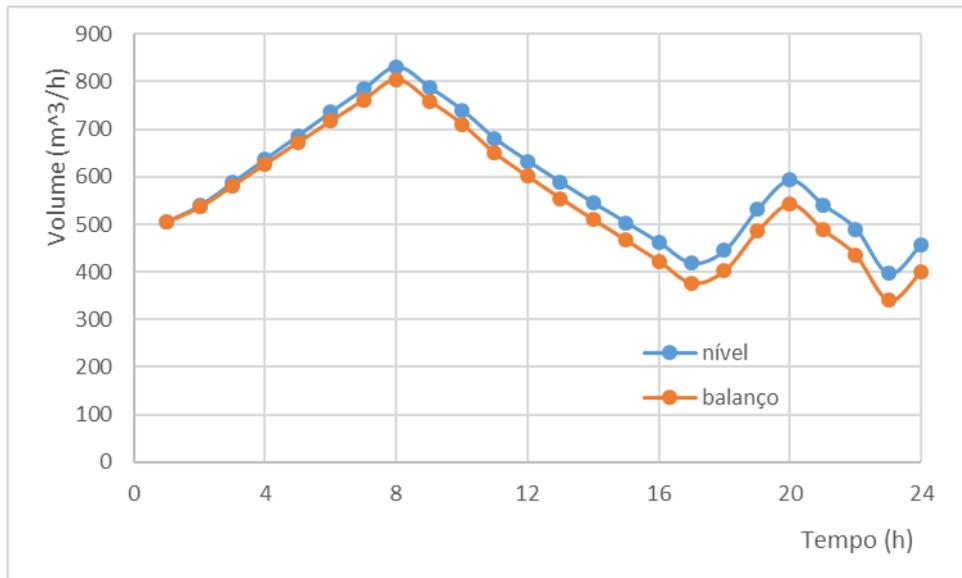


Figura 34: Volume instantâneo do reservatório de Lemenhe

Assim, existem 60 m³ de água que saem do reservatório e não são contabilizados traduzindo-se em prejuízo para a empresa. Este erro de medição acontece há, pelo menos, um ano, ou seja, não foram contabilizados 21 900 m³ no último ano. O algoritmo permitiu duma forma rápida e eficaz detetar o erro e evitar que o prejuízo se acentuasse durante mais tempo.

5. CONCLUSÃO

Relativamente ao Subsistema Queimadela, constata-se que o nível de operação está próximo do ótimo não havendo melhorias significativas a serem efetuadas. Isto acontece porque já existe um bom trabalho diário no aproveitamento das horas noturnas para o enchimento dos reservatórios. Porém, pode existir mais assertividade em colocar os reservatórios que recebem água por bombeamento nos mínimos possíveis e aqueles que recebem por gravidade e distribuem através de elevatória no máximo possível (caso do EE01, por exemplo).

Após resolvido o desafio de otimização energética pode-se verificar que as pretensões iniciais estavam incorretas pois era expectável que um método dinâmico e iterativo (SCUBIC) trouxesse mais vantagens a nível económico do que a programação linear. Na melhor das hipóteses a SCUBIC permite uma poupança de 2 600 euros anuais enquanto o algoritmo implementado em Excel estima uma poupança de, aproximadamente, 6 000 euros.

Outra ilação a ser retirada é que o reservatório RQ 15 deverá ser submetido a alterações na sua estrutura, nomeadamente de insonorização, pois caso tal seja efetuado haverá uma poupança anual de 11 000 euros.

Relativamente à segunda parte, relativa à otimização do sistema de Areias de Vilar, observa-se que, no primeiro caso, de Burgães, a poupança é mínima, 0,7 €/dia, pois este só funciona nos períodos Vazio e Super Vazio.

O caso de Cerite será o mais interessante e o mais interventivo devido ao variador de frequência, obrigando a alterações sucessivas diárias do caudal de bombeamento aplicado. No dia analisado houve uma poupança de 35 euros, comprovando assim, que é mais vantajoso trabalhar sempre seguido, com exceção das horas de ponta, do que trabalhar com caudais mais altos e parar 1 hora por dia como se pensava anteriormente.

O último caso serviu para testar a outra opção do algoritmo e, assim, verificar que o medidor de entrada no reservatório de Lemenhe necessitaria de uma intervenção, ou mesmo, de ser substituído,, pois no desenvolvimento do mesmo os balanços volúmicos não correspondiam à realidade.

6. BIBLIOGRAFIA

- Andrês, Daniel (2016) *Otimização energética de um sistema de abastecimento de água, Análise de um caso prático da Águas do Norte*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia – Universidade do Porto.
- Falkenberg, A.V., Dyminski, A., Ribeiro, E. (2003) Redes neurais artificiais aplicadas à previsão de consumo de água. *VI Congresso Brasileiro de Redes Neurais*, pp. 319–324, 2-5 de junho, São Paulo, Brasil.
- Firmino, M., Albuquerque, A., Curi, W., Silva, N. (2006) Método de eficiência energética no bombeamento de água, via programação linear e inteira. *VI SEREA - Seminário Ibero-americano sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água*. João Pessoa (Brasil), 5 a 7 de junho.
- ISQ (2017) Projeto “*LIFE SWSS*” (Smart Water Supply Systems).
- Martins, Tiago (2014) *Sistemas de Abastecimento de Água para Consumo Humano – Desenvolvimento e Aplicação de Ferramenta Informática para a sua Gestão Integrada*. Tese de Mestrado em Tecnologia Ambiental. Escola Superior Agrária – Instituto Politécnico de Bragança.
- Oliveira, Pedro (2015) *Gestão energética inteligente de operação em redes de abastecimento de água*. Tese de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica. Faculdade de Engenharia – Universidade do Porto.
- Projeto Aqualitrans (2017), *Guia de soluções tecnológicas para a eficiência das ETAR*.
- Rodrigues, Eduardo (2016) *Estratégias para eficiência energética em estações elevatórias de águas residuais*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia – Universidade do Porto.
- Soler, E.M., Toledo, F.M., Santos, M.O., Arenales, M.N. (2016) Otimização dos custos de energia elétrica na programação da captação, armazenamento e distribuição de água. *Production*, 26(2), 385-401.
- Tsutiya, M.T. (2001) Redução do custo de energia elétrica de abastecimento de água, 1º ed – São Paulo: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, XV - 185p.
- Zahed Filho, K. (1990) Previsão de Consumo em Tempo Real no Desenvolvimento Operacional de Sistemas de Distribuição de Água, Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, EPUSP, São Paulo.

7. ANEXO - BALANÇOS VOLÚMICOS AOS RESERVATÓRIOS

