



Andreia Nazaré Canadas

ANÁLISE ENERGÉTICA DE SISTEMAS HIDRÁULICOS — UM MODELO PARA GESTÃO EM TEMPO REAL DO HORÁRIO DE FUNCIONAMENTO DE BOMBAS

ENERGY ANALYSIS OF HYDRAULIC SYSTEMS - A
REAL TIME PUMP SCHEDULING MODEL

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente, na área de Especialização em Território e Gestão do Ambiente, orientada pelo Professor Doutor José Paulo Pereira de Gouveia Lopes de Almeida

Coimbra, Fevereiro, 2017



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Andreia Nazaré Canadas

ANÁLISE ENERGÉTICA DE SISTEMAS HIDRÁULICOS - UM MODELO PARA GESTÃO EM TEMPO REAL DO HORÁRIO DE FUNCIONAMENTO DE BOMBAS

ENERGY ANALYSIS OF HYDRAULIC SYSTEMS - A REAL TIME PUMP SCHEDULING MODEL

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente, na área de Especialização em Território e Gestão do Ambiente, orientada pelo Professor Doutor José Paulo Pereira de Gouveia Lopes de Almeida

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor.
O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC, declina qualquer
responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões
que possam surgir

Coimbra, 7 de fevereiro de 2017

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de agradecer, de uma forma especial ao meu orientador, Professor Doutor José Paulo Pereira de Gouveia Lopes de Almeida, por todos os ensinamentos transmitidos e em especial pela constante motivação, apoio e dedicação demonstrada ao longo da realização deste trabalho.

À minha família, em particular aos meus pais, irmã e avós, agradeço todo o apoio incondicional, carinho e confiança que me transmitiram ao longo de toda a vida e do meu percurso académico.

Aos meus amigos, os de longe e os de perto, os antigos e os recentes, os que estiveram sempre presentes, agradeço a amizade e o companheirismo, a força e a paciência.

A todos os que me acompanharam nesta etapa e me deram ânimo e incentivo, o meu mais sincero agradecimento.

RESUMO

Os consumos energéticos em sistemas de abastecimento de água são bastante elevados e uma grande fatia desse consumo deve-se à operação de grupos motobomba elétricos. Atualmente, estes consumos são muitas vezes menosprezados pelas entidades responsáveis, que, geralmente, utilizam estratégias sem qualquer atenção à variação do custo da energia ao longo do dia. Neste contexto é essencial que exista uma gestão eficiente que pode ser alcançada através de adequadas políticas de exploração reduzindo assim, significativamente, os custos em energia elétrica. As alterações operacionais, de que é exemplo a otimização do horário de funcionamento das bombas, têm a vantagem de não obrigarem à realização de grandes investimentos e já mostraram ter impacto significativo na fatura energética.

O principal objetivo desta dissertação consistiu no desenvolvimento de um modelo de gestão em tempo real do horário de funcionamento de bombas, inspirado num sistema real composto por dois reservatórios entre os quais se localiza uma estação elevatória equipada com múltiplos grupos motobomba. A abordagem implementada consistiu na geração de um determinado número de padrões de consumo e no desenvolvimento de um modelo de otimização que, satisfazendo as solicitações, alocasse a maior parte possível do funcionamento das bombas a períodos onde a tarifa de eletricidade é mais baixa, tendo a capacidade de reagir, durante a operação do sistema, às alterações entre os consumos esperados e os verificados na realidade. Foi também desenvolvido um modelo de simulação sem otimização para comparação dos custos diários de bombeamento. O modelo de otimização permitiu alcançar poupanças entre 9 e 14 %, quando comparado com o modelo de simulação.

Palavras-chave: abastecimento de água, consumo de energia, otimização operacional, gestão em tempo real, horário de funcionamento de bombas.

ABSTRACT

The energy consumption in water supply systems is massive and a big portion of this consumption is due to the operation of pumps. Nowadays, these consumptions are often underestimated by the responsible entities, who generally implement strategies without any consideration to the variation of the energy costs throughout the day. In this context, energy cost management is crucial, which can be accomplished with operational changes, thereby, considerably reducing the energy consumption and the total costs. The introduction of changes in the pumping operational procedures, such as optimization of pump scheduling, have the advantage that do not required any additional investments and already shown to be effective and capable of significant impact on the energy bill.

The main purpose of this dissertation was the development of a real-time pump scheduling operational model to be applied to a real water distribution system composed by a pumping station, a penstock and a reservoir. The approach was to create a certain number of consumption patterns and developing an optimization model that accommodates the most of the electric consumption into the cheapest tariff periods, while satisfying the demand. The developed model has the ability to react, during the implemented policy, to changes between the anticipated consumption demands and the reality. A simulation model was also developed in order to compare daily pumping costs. The optimization model was able to achieve savings between 9 and 14 %, when compared to the simulation model.

Keywords: water supply, energy consumption, operational optimization, real-time operation, pump scheduling.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
ÍNDICE.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE QUADROS	viii
SIMBOLOGIA	ix
ABREVIATURAS	xi
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Estrutura da dissertação	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Consumo de energia e a procura pela eficiência.....	4
2.2 Métodos de otimização e algoritmos	7
2.3 Gestão em tempo real	9
2.3.1 Descrição geral	9
2.3.2 Sistemas SCADA	10
2.3.3 Aplicações informáticas desenvolvidas.....	11
3 METODOLOGIA.....	16
3.1 Estrutura do modelo conceptual	16
3.2 Desenvolvimento do modelo de gestão em tempo real	18
3.2.1 Padronização de dias típicos de consumo	20
3.2.2 Formulação do módulo de otimização.....	21
3.2.3 Formulação do módulo de avaliação de desvios	27
4 CASO DE ESTUDO	28
4.1 Breve descrição	28
4.2 Dados e parâmetros.....	30
5 ESTRATÉGIA DE RESOLUÇÃO DO MODELO	35
5.1 Resolução da padronização dos dias típicos de consumo.....	35
5.2 Resolução do módulo de otimização	37
5.3 Resolução do módulo de avaliação de desvios	39

5.4	Modelo de operação sem otimização.....	43
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
6.1	Descrição dos exemplos de aplicação.....	45
6.2	Análise e discussão de resultados	46
7	CONCLUSÕES E PISTAS PARA FUTUROS DESENVOLVIMENTOS	59
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Representação ilustrativa das flutuações do preço da energia elétrica ao longo do dia no período semanal em horário de Inverno (ERSE@, 2016)	6
Figura 2.2 – Representação gráfica da evolução do preço da eletricidade ao longo dos últimos anos para o período de Verão (ERSE@, 2016)	7
Figura 3.1 – Esquema geral do modelo conceptual a desenvolver.....	17
Figura 3.2 – Exemplo de um sistema simples de abastecimento de água a considerar para o desenvolvimento do modelo matemático	18
Figura 3.3 – Esquema geral da interação do modelo de gestão em tempo real com o sistema de distribuição de água (Adaptado de Odan et al., 2015).....	19
Figura 4.1 - Vista aérea do sistema em estudo (Google Maps@, 2015)	29
Figura 4.2 - Esquema geral do sistema em estudo	29
Figura 4.3 – Curvas características das bombas (Fonte: AdCL)	31
Figura 5.1 – Padrões de consumo adimensionais	35
Figura 5.2 – Hidrogramas de consumos baseados no padrão A	36
Figura 5.3 – Hidrogramas de consumos baseados no padrão B	36
Figura 5.4 – Caudal bombeado ao longo do dia obtido pelo modelo completo e simplificado para otimização dos consumos do Hidrograma I.....	39
Figura 5.5 – Nível de água no reservatório Boavista II ao longo do dia obtido pelo modelo completo e simplificado para otimização dos consumos do Hidrograma I.....	39
Figura 5.6 – Exemplo ilustrativo da Regra 2.....	42
Figura 5.7 – Limites dos níveis de água no reservatório Boavista II	43
Figura 6.1 – Consumo de água real e esperado dado pelo modelo de otimização para o Exemplo 1.....	48
Figura 6.2 – Caudal bombeado ao longo do dia no Exemplo 1 pelo modelo de simulação e pelo modelo de otimização	49
Figura 6.3 – Níveis de água no reservatório ao longo do dia no Exemplo 1 pelo modelo de simulação e pelo modelo de otimização	49
Figura 6.4 – Consumo de água real e esperado dado pelo modelo de otimização para o Exemplo 2.....	50

Figura 6.5 – Caudal bombeado ao longo do dia no Exemplo 2 pelo modelo de simulação e pelo modelo de otimização	50
Figura 6.6 – Níveis de água no reservatório ao longo do dia no Exemplo 2 pelo modelo de simulação e pelo modelo de otimização	51
Figura 6.7 – Consumo de água real e esperado dado pelo modelo de otimização para o Exemplo 3.....	51
Figura 6.8 – Caudal bombeado ao longo do dia no Exemplo 3 pelo modelo de simulação e pelo modelo de otimização	52
Figura 6.9 – Níveis de água no reservatório ao longo do dia no Exemplo 3 pelo modelo de simulação e pelo modelo de otimização	52
Figura 6.10 – Consumo de água real e esperado dado pelo modelo de otimização para o Exemplo 4.....	53
Figura 6.11 – Caudal bombeado ao longo do dia no Exemplo 4 pelo modelo de simulação e pelo modelo de otimização	53
Figura 6.12 – Níveis de água no reservatório ao longo do dia no Exemplo 4 pelo modelo de simulação e pelo modelo de otimização	54
Figura 6.13 – Consumo de água real e esperado dado pelo modelo de otimização para o Exemplo 5.....	54
Figura 6.14 – Caudal bombeado ao longo do dia no Exemplo 5 pelo modelo de simulação e pelo modelo de otimização	55
Figura 6.15 – Níveis de água no reservatório ao longo do dia no Exemplo 5 pelo modelo de simulação e pelo modelo de otimização	55

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 4.1 – Limites mínimos e máximos considerados para o caudal	32
Quadro 4.2 – Coeficientes das funções lineares das curvas características de carga	32
Quadro 4.3 – Coeficientes das funções lineares das curvas características de rendimento.....	32
Quadro 4.4 – Coeficientes a usar na Fórmula de Scimeni (Sá Marques e Sousa, 2011).....	33
Quadro 4.5 – Ciclo semanal e diário para todos os fornecimentos em Portugal Continental (ERSE@, 2016).....	34
Quadro 4.6 – Preço da eletricidade em tarifa de médias utilizações para clientes em MT (ERSE@, 2016).....	34
Quadro 5.1 – Comparação de custos para a otimização do problema para os seis hidrogramas hipotéticos de consumos pelo modelo simplificado e pelo modelo completo	38
Quadro 5.2 – Critérios de paragem da estratégia implementada.....	41
Quadro 5.3 – Regras para a seleção do diagrama mais próximo.....	42
Quadro 5.4 – Regras para o modelo de operação sem otimização	44
Quadro 6.1 – Comparação de caudais bombeados em período de ponta entre o modelo de otimização e o modelo sem otimização para os diferentes exemplos apresentados.....	56
Quadro 6.2 – Comparação de custos diários de bombeamento entre o modelo de otimização e o modelo sem otimização apresentados para os diferentes exemplos	56
Quadro 6.3 – Caudais de água diários consumidos e aduzidos, bem como os níveis de água no reservatório ao final do dia, para os diferentes exemplos dado pelo modelo de simulação e pelo modelo de otimização	57

SIMBOLOGIA

A_b	Coeficiente da curva característica do arranjo de bombas b
B_b	Coeficiente da curva característica do arranjo de bombas b
C	Custo diário de bombagem
C_b	Coeficiente da curva de rendimento para o arranjo de bombas b
$CR1$	Cota de água no reservatório 1 considerada constante
$CR2_t$	Cota de água no reservatório 2 no final do intervalo de tempo t
C_{unid1}	Fator de conversão de unidades de m^3/h para m^3/s
C_{unid2}	Fator de conversão de unidades de l/s para m^3/h
D	Diâmetro da conduta
D_b	Coeficiente da curva de rendimento para o arranjo de bombas b
dt	Duração do intervalo de tempo t
$H_{b,t}$	Carga total para o arranjo de bombas b no intervalo de tempo t
$H_{b,t}$	Troço da curva característica do arranjo de bombas b no intervalo de tempo t
$H_{g,t}$	Altura geométrica da água no intervalo de tempo t
$H_{Sb,t}$	Altura total de elevação correspondente ao caudal $QB_{b,t}$
$J_{b,t}$	Perda de carga unitária para o arranjo de bombas b durante o intervalo t
K	Coeficiente que depende do material da conduta
N_1	Primeiro nível intermédio que representa uma válvula de nível
N_2	Segundo nível intermédio que representa uma válvula de nível
NB	Número de arranjos de bombas
Ne_t	Nível de água (esperado) no final do intervalo t no reservatório 2
N_i	Nível de água no início do dia no reservatório 2
$N_{máx}$	Nível máximo de água admitido no reservatório 2
$N_{mín}$	Nível mínimo de água admitido no reservatório 2
NP	Número de intervalos de tempo em que o dia é discretizado
Nr_t	Nível de água (real) no final do intervalo t no reservatório Boavista II
$PB_{b,t}$	Potência consumida pelo arranjo de bombas b durante o intervalo t
PE_t	Preço da energia elétrica durante o intervalo t
$QB_{b,t}$	Caudal de água bombeado pelo arranjo de bombas b no intervalo de tempo t
QCe_t	Caudal de água consumido (esperado) durante o intervalo de tempo t
QCr_t	Caudal de água (real) que sai do reservatório Boavista II durante o intervalo de tempo t

$Q_{\text{máx } b}$	Caudal máximo bombeado para o arranjo de bombas b
$Q_{\text{mín } b}$	Caudal mínimo bombeado para o arranjo de bombas b
S	Área da secção transversal do reservatório 2
t_f	Último intervalo de tempo considerado
t_i	Primeiro intervalo de tempo considerado para a otimização
$Y_{b,t}$	Variável binária que determina o estado de funcionamento do arranjo de bombas b durante o intervalo t
Z	Cota de soleira do reservatório 2
α	Coefficiente que depende do material da conduta
β	Coefficiente que depende do material da conduta
γ	Peso específico da água
$\eta_{b,t}$	Eficiência energética do conjunto de bombas b no intervalo de tempo t
$\Delta H_{b,t}$	Perdas de carga sofridas na conduta para o caudal $Q_{B_{b,t}}$
$\Delta V_{e,t}$	Diferença entre volumes de água entrados e saídos (esperados) do reservatório 2 no final do intervalo de tempo t
$\Delta V_{r,t}$	Diferença entre volumes de água entrados e saídos (reais) do reservatório Boavista II no final do intervalo t

ABREVIATURAS

AdCL	Águas do Centro Litoral
AG	Algoritmos Genéticos
BONMIN	<i>Basic Open-source Nonlinear Mixed Integer programming</i>
EBMUD	East Bay Municipal Utility District
ERSAR	Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos
ERSE	Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos
ETA	Estação de Tratamento de Água
GAMS	<i>General Algebraic Modelling System</i>
MT	Média Tensão
PIM	Programação Inteira Mista
PL	Programação Linear
PNL	Programação Não Linear
PNLIM	Programação Não Linear Inteira Mista
POWADIMA	<i>Potable Water Distribution Management</i>
SAA	Sistemas de Abastecimento de Água
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
WSSC	Washington Suburban Sanitary Commission

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

A água e a energia são recursos cruciais para o bem-estar e desenvolvimento socioeconómico da humanidade. Estes dois sectores encontram-se extremamente interligados numa relação complexa de recursos, frequentemente referida como o nexus água-energia (Cherchi et al., 2015).

Segundo um relatório das Nações Unidas (WWAP, 2014), nas próximas décadas a procura mundial por água doce e por energia irá continuar a crescer consideravelmente, devido ao aumento da população, ao desenvolvimento das economias e a alterações no estilo de vida e padrões de consumo. Enquanto a disponibilidade de água potável em várias regiões do mundo num futuro próximo se irá tornar cada vez mais escassa, mais energia será necessária para superar este problema, como é o exemplo das alternativas tecnológicas de tratamento de água e o transporte a longas distâncias (Vilanova e Balestieri, 2014; Cherchi et al., 2015). De acordo com o mesmo relatório das Nações Unidas, a energia necessária para fornecer 1 m³ de água potável, não incluindo o transporte ou o nível de eficiência, varia entre 0.31 kWh, quando as fontes são lagos ou rios, até 8.5 kWh, se se tratar de água do mar.

Os Sistemas de Abastecimento de Água (SAA) são grandes consumidores de energia, a qual é consumida em todas as fases de produção e distribuição de água (Feldman, 2009). Cerca de 2 a 3 % do total de energia consumida no mundo é usada nos SAA para bombear, da qual 80 a 90 % é atribuída a grupos motobomba (Vilanova e Balestieri, 2014).

Atualmente, a estratégia operacional nos sistemas de distribuição de água é, geralmente, desenvolvida por profissionais qualificados que, advindo da sua experiência ao longo dos anos, utilizam regras empíricas e políticas repetidas para assegurar um desempenho satisfatório no sistema. Usualmente, a gestão do horário de funcionamento das bombas é feita através de válvulas de nível no reservatório, onde o principal objetivo é assegurar a disponibilidade de água para a população. Esta estratégia não só é de baixa eficiência energética como pode também comprometer a qualidade da água devido ao longo período de permanência no reservatório. (Jung et al., 2014; Odan et al., 2015; Costa et al., 2015).

De acordo com Moreira e Ramos (2013), o consumo de eletricidade na maioria dos sistemas de abastecimento de água em todo o mundo, poderia ser reduzido até 25 %, através de melhorias na eficiência energética.

Tendo em conta tudo isto, existem várias medidas que permitem, potencialmente, aumentar a eficiência energética e reduzir os custos nos SAA. Segundo Ramos et al. (2012), as alterações operacionais, de que é exemplo a otimização do horário de funcionamento de bombas, já mostraram ter impacto significativo nos consumos energéticos e têm a vantagem de não obrigarem à realização de grandes investimentos.

1.2 Objetivos

A motivação para o desenvolvimento desta dissertação teve por base a percepção de que são elevados os custos energéticos associados ao bombeamento de água nas estações elevatórias. Estes custos nem sempre são devidamente considerados pelas entidades responsáveis pelo abastecimento de água. Neste sentido, o principal objetivo desta dissertação é o desenvolvimento de um modelo de apoio à gestão, em tempo real, do horário de funcionamento de bombas, tirando partido da descontinuidade horária do tarifário de venda da energia elétrica e da capacidade de armazenamento do sistema de abastecimento, a fim de alcançar uma redução dos custos energéticos.

Um segundo objetivo é analisar o comportamento dinâmico deste modelo perante diversos cenários que pretendem simular evoluções imprevistas no padrão dos consumos durante o período de operação do sistema, de modo a verificar se fica sempre assegurada a satisfação das necessidades dos consumidores.

Por fim, o modelo desenvolvido irá ser aplicado a um troço do sistema de abastecimento das Águas do Centro Litoral. Este troço é constituído por uma estação elevatória, equipada com quatro bombas, interposta entre dois reservatórios ligados por uma conduta elevatória. Os resultados obtidos comparar-se-ão com os de um modelo de simulação, onde o funcionamento das bombas é essencialmente comandado por válvulas de nível nos reservatórios. Pretende-se, desta forma, avaliar as vantagens e inconvenientes da metodologia apresentada.

1.3 Estrutura da dissertação

Esta dissertação é desenvolvida ao longo de oito capítulos.

No primeiro capítulo, de carácter introdutório, é apresentado um enquadramento do estudo, os objetivos do mesmo e a estrutura da presente dissertação.

No segundo capítulo é efetuada uma revisão bibliográfica sobre o consumo de água e a procura pela eficiência energética nos Sistemas de Abastecimento de Água, incluindo os métodos de otimização e algoritmos aplicados, bem como os trabalhos desenvolvidos relativos ao tema.

O terceiro capítulo aborda a metodologia seguida neste trabalho, compreendendo a estrutura e a formulação do modelo de gestão em tempo real.

No quarto capítulo é feita uma breve descrição do caso de estudo, apresentando-se os dados e parâmetros utilizados.

O quinto capítulo compreende a estratégia de resolução e divide-se em quatro subcapítulos. O primeiro subcapítulo diz respeito à resolução da padronização de “dias tipo” de consumo de água. O segundo e terceiro subcapítulos apresentam a formulação dos dois módulos que compreendem o modelo de gestão, o módulo de otimização e o módulo de avaliação de desvios, respetivamente. No último subcapítulo é apresentado um modelo de gestão sem otimização.

No sexto capítulo são apresentados os resultados obtidos pela aplicação dos dois modelos de gestão a cinco diferentes “dias tipo” de consumo hipotéticos. Estes resultados são também analisados e comentados.

No sétimo capítulo são discutidas as principais conclusões do presente estudo e apresentadas possíveis pistas para trabalhos futuros.

Por último, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas nesta dissertação.

7

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Consumo de energia e a procura pela eficiência

A água e a energia são recursos cruciais para o bem-estar e desenvolvimento socioeconómico das sociedades, estão fortemente interligados e são altamente dependentes, frequentemente referido como o nexus água-energia (Cherchi et al., 2015).

Os SAA são grandes consumidores de energia, a qual é consumida em todas as fases de produção e distribuição de água: desde o bombeamento da água para a estação de tratamento, passando pelo processo de tratamento e enquanto é distribuída pela rede (Feldman, 2009).

Segundo um relatório de 2014 (EEA, 2014) referente à performance dos serviços públicos de água, realizado pela Agência Europeia do Ambiente (AEA), cerca de 5.5 % do consumo anual líquido de eletricidade do sector doméstico é utilizado na gestão de águas urbanas, o que corresponde a cada pessoa ter constantemente ligada uma lâmpada de 10 W.

De acordo com Vilanova e Balestieri (2014) cerca de 2 a 3 % do total de energia consumida no mundo é usada nos SAA para bombear, dos quais 80 a 90 % são atribuídos a grupos motobomba. Dado este facto, e o facto da crescente preocupação sobre desenvolvimento sustentável, seria de esperar que estivessem a ser feitos todos os esforços para assegurar que os grupos motobomba estariam a ser operados de modo eficiente, o que segundo Bunn e Reynolds (2009) não é frequentemente verificado. De acordo com um estudo a respeito da eficiência de bombas realizado pela Comissão Europeia (Reeves, 2001), as prioridades na compra de novos órgãos de bombagem baseavam-se primeiramente em critérios chave como preço, entrega, marca e preocupações imediatas; em segundo lugar estava a fiabilidade e manutenção e só em alguns casos seriam considerados os custos de consumo de energia. O que segundo Bunn e Reynolds (2009) seria contraditório, dado que a energia consumida por uma bomba, ao longo de um período de vida de 30 anos ou mais, é responsável por 90 % dos custos totais do ciclo de vida, enquanto apenas 2 % dizem respeito ao preço de compra e os restantes 8 % a custos de manutenção.

Segundo Moreira e Ramos (2013), o consumo de eletricidade na maioria dos sistemas de abastecimento de água em todo o mundo, poderia ser reduzido até 25 %, através de melhorias

na eficiência energética. Tal também conduz a outros benefícios, como por exemplo a redução da pegada de carbono.

Existem várias medidas que permitem aumentar a eficiência energética e reduzir os custos nos SAA. Mesmo em situações onde não sejam alcançadas reduções de custos energéticos associados ao bombeamento de água, é sempre possível aproveitar a energia disponível da melhor forma possível, o que contribui para um desenvolvimento sustentável (Coelho, 2011). Estas soluções de otimização vão desde modificações estruturais, como instalação de sistemas de velocidade variável (VSD do inglês *Variable Speed Drives*) nas bombas e substituição de equipamento ineficiente, ou alterações operacionais como a gestão do horário de funcionamento das bombas (Feldman, 2009). De acordo com Ramos et al. (2012), as alterações operacionais já mostraram ser bastante eficazes e têm a vantagem de não obrigarem à realização de grandes investimentos e de apresentarem reduções significativas a curto-prazo.

A otimização do horário de funcionamento das bombas tem uma grande influência na fatura elétrica quando está implementada uma estrutura tarifária descontínua (bi-horária e tri-horária por exemplo) e quando existe capacidade de armazenamento nos SAA, que permita satisfazer de igual forma as necessidades de consumo (Bunn e Reynolds, 2009; Feldman, 2009; Zhuan e Xia, 2013; Cherchi et al., 2015). O que torna possível a redução de custos é a flexibilidade que existe em desviar o consumo em períodos de ponta (onde o preço da energia é mais alta) para períodos de vazio. Neste tipo de tarifa elétrica os preços oscilam ao longo do dia, consoante o dia da semana e a época do ano. Na Figura 2.1 pode observar-se um exemplo de tarifa transitória de venda a clientes finais pelos comercializadores de último recurso aos fornecimentos a clientes finais em média tensão, para uma tarifa de médias utilizações (dados da Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos – ERSE).

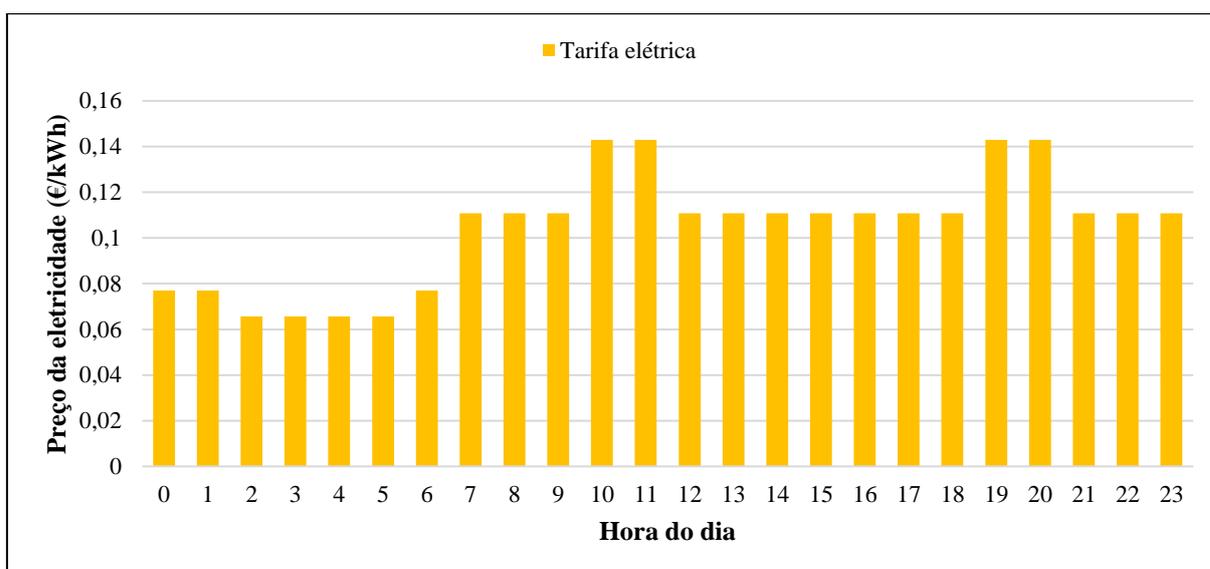


Figura 2.1 - Representação ilustrativa das flutuações do preço da energia elétrica ao longo do dia no período semanal em horário de Inverno (ERSE@, 2016)

É também de grande interesse salientar que, em paralelo com a procura crescente de eletricidade, o seu preço tem vindo também a crescer. No caso de Portugal, no período de 2008 a 2016, o preço por kWh de energia elétrica aumentou uma média de 48 %, para a tarifa de venda a clientes finais em Média Tensão (MT), o que significa um aumento anual superior a 5 %. Este crescimento é mais acentuado nos períodos horários de vazio em comparação com os períodos de ponta ou cheias (ERSE@, 2016). Na Figura 2.2 pode observar-se, para o exemplo dos meses de Verão e para clientes em MT, a evolução anual do preço da eletricidade para quatro períodos horários distintos.

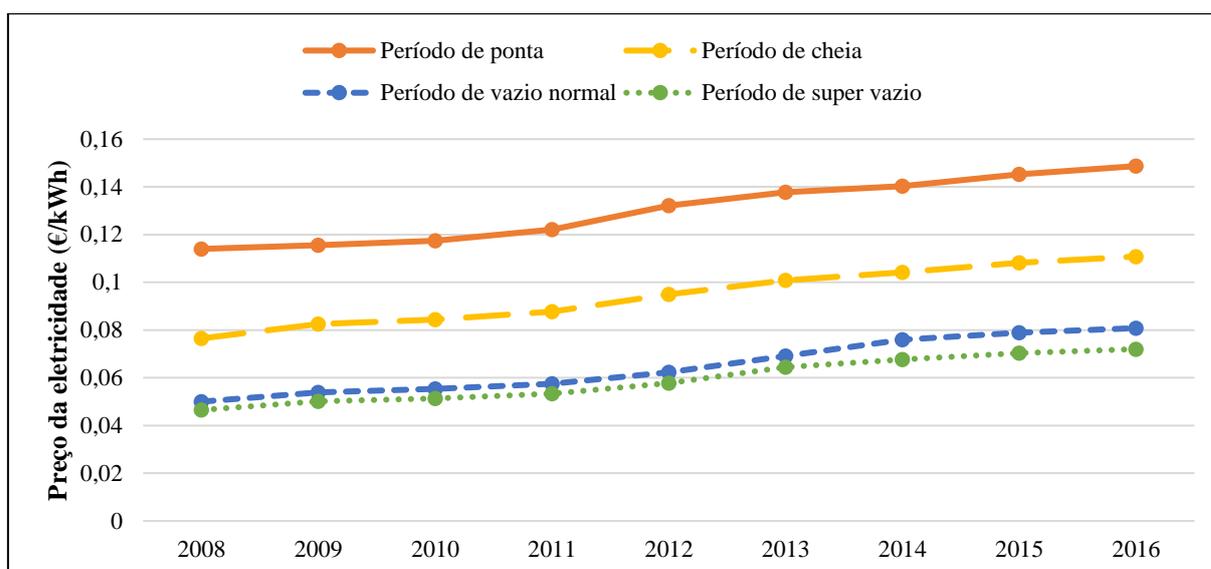


Figura 2.2 – Representação gráfica da evolução do preço da eletricidade ao longo dos últimos anos para o período de Verão (ERSE@, 2016)

2.2 Métodos de otimização e algoritmos

A otimização operacional nos sistemas de abastecimento de água consiste em encontrar a melhor estratégia para os elementos a gerir, minimizando os custos enquanto são satisfeitas as necessidades de consumo e as restrições hidráulicas (Cembrano et al., 1988, citado por Coelho e Andrade-Campos, 2014). Os problemas de otimização podem ser de um único objetivo ou multiobjectivo e a estratégia a utilizar pode ser estática (planeamento para um horizonte de tempo) ou dinâmica (controlo em tempo real). A vantagem da abordagem em tempo real é que permite que o sistema reaja perante variações inesperadas, por exemplo no consumo, ocorridas durante a fase de implementação prática das políticas ótimas de exploração, permitindo assim uma maior flexibilidade. A operação em tempo real aplicada a sistemas de abastecimento de água será desenvolvida mais à frente no texto, na secção 2.3.

Com o crescimento populacional e com o gradual aumento da complexidade das redes de abastecimento foram surgindo dificuldades de gestão e operação nestes sistemas, o que tem aumentado a preocupação e procura de métodos de otimização capazes reduzir os custos energéticos na indústria da água.

Desde os anos setenta que os modelos de otimização, em sistemas de abastecimento de água, têm sido objeto de estudo na literatura. Os métodos usualmente mais aplicados à resolução de problemas deste tipo são: Programação Dinâmica (PD), Programação Linear (PL), Programação Não Linear (PNL), Programação Inteira Mista (PIM) e Programação Não Linear

Inteira Mista (PNLIM). Uma descrição mais detalhada sobre estes métodos pode ser encontrada em Walski et al. (2003).

Mais recentemente, no grupo dos métodos heurísticos, os Algoritmos Genéticos (AG) têm vindo a merecer especial atenção, em particular, pelo seu potencial de incorporação em modelos de gestão em tempo real (Jung et al., 2014), pelo que, uma breve descrição dos mesmos irá ser apresentada. Contudo, Giacomello et al. (2013) afirmam que estes algoritmos isolados não são adequados para aplicações em tempo real quando se trate de sistemas de distribuição de água complexos, onde exista um grande número de bombas envolvidas, devido a questões de eficiência computacional.

Os Algoritmos Genéticos (AG) têm uma vantagem significativa, em relação à maior parte dos métodos de otimização, de conseguir encontrar o ótimo global, ou pelo menos uma solução satisfatória, do problema. Porque, ao contrário de muitos métodos, não requerem simplificações por meio de pressupostos, discretizações ou leis heurísticas. São também eficientes a lidar com não convexidades, que causam dificuldades em técnicas tradicionais. Os AG são um método de otimização estocástica inspirado na teoria de seleção natural de Darwin, que se baseiam na probabilidade e permitem à solução mais apta sobreviver e propagar-se. Neste método é dada uma “população” inicial de soluções individuais, geralmente geradas de forma aleatória, que são sujeitas a mudanças causadas pelos operadores genéticos de seleção, cruzamento e mutação. Cada solução é avaliada e classificada de acordo com a sua aptidão para com a função objetivo, e a mais apta é escolhida para reproduzir a próxima “geração”. A descendência é então introduzida na população e substitui os progenitores, ocasionalmente são também introduzidas mutações na população o que leva a áreas não exploradas no espaço de decisão. Este processo é repetido e quantas mais linhagens existirem, mais provável é encontrar o ótimo global (Rao e Salomons, 2007).

Segundo Coelho e Andrade-Campos (2014), Carrijo et al. (2004), Mackle et al. (1995), Rao e Salomons (2007), Savic e Walters (1997) e Shihu et al. (2010) são exemplos de autores que aplicaram este tipo de algoritmo na resolução de problemas de otimização operacional em SAA.

Mackle et al. (1995) aplicaram um AG simples a um sistema fictício com 4 bombas a distribuir água a um único reservatório com o objetivo de minimizar o custo de bombeamento diário, tirando partido de uma tarifa de eletricidade repartida e da capacidade de armazenamento do reservatório. Neste trabalho foi assumido que o consumo de água seguiria o padrão de um dia típico do histórico e que para efeitos de continuidade o nível de água no final do dia teria de ser igual ou superior ao nível inicial. O dia foi dividido em 24 intervalos de tempo, existindo em cada intervalo 16 combinações possíveis de bombas em funcionamento. Não tendo sido apresentados os resultados neste trabalho, foi apenas mencionado que a melhor solução revelou

que, tal como esperado, a maior parte do bombeamento deveria ser efetuado durante o período noturno, onde a tarifa energética é mais baixa.

Sousa et al. (2002) desenvolveram e implementaram um modelo de otimização a um sistema fictício constituído por estações de tratamento de água, estações elevatórias, condutas adutoras e reservatórios. O modelo de PIM foi resolvido por meio de dois métodos distintos, um método exato (*Branch-and-Bound*) e um método heurístico (Recozimento Simulado), com o objetivo de minimizar os custos energéticos associados ao bombeamento, tirando partido da estrutura tarifária elétrica e para um horizonte de 24 horas. A aplicação do *Branch-and-Bound* tornou-se inexecutável por apresentar demasiado tempo de resolução computacional, enquanto o método de Recozimento Simulado demonstrou ser bastante eficiente pois não só encontra soluções de qualidade em tempo reduzido, como também apresenta a vantagem de incluir restrições adicionais que traduzem de forma mais realista o funcionamento do sistema.

Giacomello et al. (2013) apresentaram um modelo híbrido que combina PL com um algoritmo de procura local, Algoritmo Ávido (*Greedy Algorithm*), para possível aplicação em tempo real (em trabalhos futuros). O método proposto divide-se em duas fases. Na primeira fase o modelo é linearizado e otimizado. A solução obtida é utilizada como ponto de partida para a segunda fase, onde se aplica um algoritmo de procura local para encontrar a solução ótima, ou pelo menos, uma próxima. Com esta metodologia é possível representar o comportamento real de todo o sistema mas com reduções de tempo de cálculo computacional comparando, por exemplo, com os AG. Esta metodologia foi aplicada a dois casos de estudo, uma rede fictícia já conhecida na literatura (Anytown network) e uma rede real (sistema de distribuição de água de Richmond). Para os dois casos foi demonstrado que as soluções encontradas, para minimização de custo diário de bombagem, pelo modelo híbrido se aproximavam bastante de soluções alcançadas por um AG (na ordem de 1 %) mas com muito menor tempo computacional, 23 segundos para o modelo híbrido e 90 minutos para apenas uma reprodução pelo AG.

2.3 Gestão em tempo real

2.3.1 Descrição geral

Para o controlo em tempo real de redes de distribuição de água, o objetivo principal é a otimização de todo o processo de abastecimento, tanto a nível de melhorias no desempenho como a nível de redução de custos. Como a procura de água é uma variável dinâmica, torna-se necessário um acompanhamento e controlo constante da operação se o objetivo for atingir uma política ótima, ou pelo menos próxima, de funcionamento. Isto implica o recurso a um sistema SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) para definir o estado atual do sistema e

transmitir esses dados para um centro de controlo, em intervalos regulares (Jamieson et al., 2007). Uma breve descrição deste tipo de sistemas encontra-se na subsecção 2.3.2.

Quando se trata de gestão em tempo real é importante reagir o mais rapidamente possível à situação atual, sendo então importante antecipar os requisitos futuros que, neste caso, serão os consumos. Todavia, uma vez que é impossível alcançar uma estimativa fiel da realidade e as consequências previstas de diferentes configurações de controlo podem conter pequenos erros, é imprescindível que existam meios para corrigir essas discrepâncias (Jamieson et al., 2007).

Um modelo de gestão em tempo real, aplicado a um sistema real de abastecimento de águas, deve incluir diferentes módulos. De acordo com Cabrera e Vela (1995) esses módulos são os seguintes:

- i. Previsão simulada *online* com dados em tempo real de telemetria, dados estimados de consumo, horários de funcionamento previstos, e outros;
- ii. Sistema de gestão em tempo real com recurso a um algoritmo de otimização;
- iii. Estimativa inicial automática de uma variedade de horários de funcionamento e ações para situações de emergência específicas;
- iv. Simulador hidráulico com resposta rápida;
- v. Cálculo da estratégia operacional ótima ou viável.

Segundo Jamieson et al. (2007), as principais dificuldades que se pode encontrar no desenvolvimento de um sistema de controlo ótimo em tempo real são:

- i. O tamanho e complexidade das redes de abastecimento de água;
- ii. A existência de redes que não foram concebidas na ótica da otimização e do controlo;
- iii. A dificuldade em prever o consumo de água;
- iv. O curto espaço de tempo existente entre as sucessivas alterações nas configurações de controlo;
- v. O enorme número de combinações existentes na configuração de bombas e válvulas;
- vi. O tempo de processamento computacional e os requisitos de memória em redes de grande escala;
- vii. A necessidade de incluir estruturas de tarifas energéticas complicadas.

2.3.2 Sistemas SCADA

Atualmente, a maioria das grandes empresas de água dependem de Sistemas de Supervisão e Aquisição de Dados, ou abreviadamente SCADA (proveniente do nome em inglês *Supervisory Control and Data Acquisition*), para fornecer a interface entre operadores e equipamento e para acompanhar e guardar os registos históricos do comportamento dos sistemas. Estes sistemas permitem ao operador monitorizar e controlar, em tempo real e remotamente, o estado atual da

rede e de dispositivos como válvulas e bombas, contribuindo assim para uma maior eficiência nos serviços de abastecimento de água (Walski et al., 2003).

Segundo Walski et al. (2003) um sistema SCADA deve incorporar:

- i. Um ou vários servidores centrais, geralmente denominados por centros SCADA;
- ii. Sensores, como é o exemplo de medidores de níveis de água em reservatórios;
- iii. Dispositivos de controlo de campo, como por exemplo acionadores de válvulas;
- iv. Dispositivos de interface de campo, usualmente conhecidos como unidades terminais remotas (RTU do inglês *Remote Terminal Units*) ou controladores lógicos programáveis (PLC do inglês *Programmable Logic Controllers*), que servem de interface com os sensores e com os dispositivos de controlo de campo;
- v. Um sistema de comunicações capaz de transmitir informação entre os dispositivos de campo (interface, sensor e controlo) e os computadores no centro SCADA;
- vi. Uma coleção de sistemas de *software*, padrão ou personalizados, normalmente denominados por interface homem-máquina (HMI do inglês *Human Machine Interface*), que permitem ao operador monitorizar e controlar, remotamente, os dispositivos de interface de campo;
- vii. Um sistema de comunicações usado para possibilitar a gestão em estações de trabalho geograficamente afastadas do computador central.

2.3.3 Aplicações informáticas desenvolvidas

Ao longo dos últimos anos, diversos trabalhos lidando com otimização operacional em tempo real em SAA foram já publicados ou desenvolvidos como *softwares* comerciais. De acordo com Coelho e Andrade-Campos (2014), Fallside e Perry (1975) e Coulbeck et al. (1988) foram dos primeiros investigadores a publicar nesta área. POWADIMA (Jamieson et al., 2007) e Neptune (Savic et al., 2008) são exemplos de *softwares* desenvolvidos em projetos com fundos governamentais e da indústria da água. Para além de modelos conceptuais que resultaram de trabalhos de investigação, grandes empresas têm também desenvolvido *softwares* comerciais que têm atingido algum sucesso em redes reais de SAA, como é o exemplo do Derceto Aquadapt (Derceto@, 2016), do Aquis da Schneider Electric (Aquis@, 2016) e do IWLIVE PRO da Innovyze (Innovyze @, 2016).

Fallside e Perry (1975) apresentaram uma abordagem hierárquica para otimização *online* de uma rede de um SAA, aplicada também a um sistema real no Reino Unido.

Coulbeck et al. (1988) descreveram o esquema básico necessário para implementar, com sucesso, uma estratégia automatizada de controlo ótimo em tempo real, tendo sido aplicado a uma rede do Reino Unido.

Cembrano et al. (2000) desenvolveram e apresentaram, no âmbito de um projeto com o mesmo nome, uma ferramenta denominada por WATERNET, que em conjunto e interação com outras ferramentas de gestão hidráulica, em particular com um sistema SCADA, constituem um sistema *online* para controlo ótimo. A ferramenta WATERNET apresenta também uma plataforma de simples interação entre o usuário e o programa de otimização, que incorpora o módulo de resolução CONOPT. Este projeto conta com vários parceiros, incluindo 4 entidades portuguesas (WATERNET@, 2016), e foi testado num protótipo de uma rede em Sintra, resultando numa redução de custos na ordem dos 18 %, comparativamente com a estratégia de exploração convencional.

Pegg (2001) descreveu a aplicação de um algoritmo denominado Derceto na otimização do horário de funcionamento de bombas para a rede de Wainuiomata-Waterloo (Wellington), que abastece 4 cidades com cerca de 85 000 m³/dia. O Derceto foi implementado num computador ligado a um sistema SCADA existente, que recolhia as informações em tempo real, e o algoritmo Derceto devolvia as estratégias de operação, em termos de horários otimizados, para as bombas e estações de tratamento de água. Este sistema estava definido para correr automaticamente a cada meia hora e estava implementado na interface do sistema SCADA.

Segundo Pegg (2001), a operação do Derceto compreende quatro fases principais:

- i. Inicialização de dados conhecidos;
- ii. Resolução do balanço mássico;
- iii. Definição do horário de funcionamento das bombas mais económico;
- iv. Verificação dos resultados através do simulador hidráulico EPANET.

Normalmente são realizadas várias iterações para melhorar a exatidão. No exemplo da rede de Wainuiomata-Waterloo, a resolução de três iterações demorava, normalmente, menos de dois minutos. Os resultados apresentados por Pegg (2001) demonstraram uma poupança de aproximadamente 10 % na fatura elétrica.

Atualmente, este algoritmo é apresentado na forma de *software* comercial, Derceto Aquadapt, que promete às companhias de água uma poupança energética entre 10 e 20 %, para além de ganhos significativos na eficiência de uso e qualidade de água (Derceto@, 2016).

Mais tarde, Bunn (2007) deu a conhecer o resultado da aplicação deste *software* em duas redes distintas dos Estados Unidos: a East Bay Municipal Utility District (EBMUD) e a Washington Suburban Sanitary Commission (WSSC). O sistema Aquadapt de EBMUD foi implementado em 2005, tendo alcançado uma redução nos custos de energia de 12.5 e de 13.1 %, no primeiro e segundo ano de operação, respetivamente. Estas melhorias deveram-se em grande parte à mudança do consumo elétrico para as horas mais baratas. A aplicação do Aquadapt em

EBMUD aumentou também a eficiência energética em todo o sistema, alcançando resultados superiores a 27 % em algumas estações elevatórias, apenas pela correta seleção de bombas em funcionamento. Na rede de WSSC, o sistema Aquadapt foi instalado em 2006 e mostrou reduções de 400 \$/dia, 570 \$/dia e 1 000 \$/dia, na primeira, segunda e terceira semana de implementação, respetivamente.

O projeto de investigação POWADIMA (POtable Water DIstribution MAnagement) surgiu no âmbito de um programa em energia e desenvolvimento sustentável da Comissão Europeia e foi financiado pela mesma (POWADIMA@, 2016). O seu principal objetivo era determinar a viabilidade e eficácia em introduzir um sistema de controlo em tempo real para otimização das redes de distribuição de água (Jamieson et al., 2007). Salomons et al. (2007) apresentaram a implementação deste modelo numa parte da rede de abastecimento de Haifa, Israel (Haifa-A), mostrando um potencial de 25 % na redução de custos.

O projeto Neptune, apresentado por Savic et al. (2008), iniciou-se em 2007 e estava estruturado em três áreas prioritárias de investigação, cada uma com diferentes módulos. O grande objetivo seria promover o conhecimento e compreensão do funcionamento dos sistemas de abastecimento de água, com o intuito de desenvolver novas técnicas e ferramentas de otimização. Os membros do projeto testaram as novas tecnologias desenvolvidas numa área em Yorkshire (Reino Unido).

Cembrano et al. (2011) apresentaram uma ferramenta genérica, PLIO, que permite implementar um controlo operacional em tempo real em SAA. Esta ferramenta possibilita a gestão de grandes redes de abastecimento e distribuição de água, incluindo reservatórios, estações de tratamento, canais a céu aberto e condutas sob pressão. Baseia-se em previsões para gerar estratégias de controlo ótimo, com objetivos de minimização de custos, segurança de armazenamento, estabilidade no funcionamento dos equipamentos e controlo de pressão, que satisfaçam as necessidades de consumo das populações. Adicionalmente, esta ferramenta pode funcionar *offline* (em simulação) e *online* (em tempo real). Foi apresentado o caso de estudo da rede de Santiago-Chile.

Jung et al. (2014) apresentaram um modelo de otimização de tempo real que combina um AG com o simulador hidráulico EPANET, que verifica a viabilidade das soluções obtidas. As condições reais da rede de distribuição são atualizadas em cada intervalo de tempo através de um sistema SCADA (este tipo de sistema é descrito mais à frente) e o modelo de otimização encontra a estratégia ótima de funcionamento das bombas para as seguintes 24 horas. Sendo que apenas as decisões do intervalo de tempo atual é que são enviadas para a estação elevatória para implementação. O caso de estudo escolhido para aplicação deste modelo foi uma pequena parcela de uma rede de distribuição real em Seoul, Coreia do Norte, constituída por um

reservatório, uma estação elevatória com três bombas idênticas que elevam a água a um reservatório de distribuição, que por sua vez, fornece água, por gravidade, a três nós da rede. Foi selecionado um intervalo de tempo de uma hora, por razões de simplicidade computacional. Jung et al. (2014) simularam dois modelos diferentes para comparação, o modelo proposto de otimização e um modelo convencional onde as decisões de bombeamento estavam dependentes do nível de água no reservatório de distribuição. Foram obtidas poupanças entre 19 e 27 % nos custos energéticos, comparativamente com o esquema de operação convencional.

O Aquis é um *software* comercial da Schneider Electric (Aquis@, 2016) que utiliza dados em tempo real de um sistema SCADA e prevê o comportamento da rede de distribuição de água na tentativa de antecipar o impacto de eventos planejados e imprevistos. Foi projetado para melhorar o desempenho hidráulico, a qualidade da água e a segurança de operação enquanto reduz os custos energéticos, com poupanças calculadas até 20%.

A Innovyze (Innovyze@, 2016) é uma empresa de *software* britânica que apresenta uma variedade de ferramentas de gestão e otimização para os SAA. Inclui produtos de controlo, monitorização e otimização de operações em tempo real, entre os quais se destacam o IWLIVE PRO, o BalanceNET, o SCADAMaster, o DemandWatch e o DemandAnalyst. Estas ferramentas auxiliam as companhias de água em funções como a previsão de padrões de consumo de água (DemandWatch e DemandAnalyst) e apoiam na tomada de decisões inteligentes que vão de encontro com o alcance da eficiência energética, a minimização de custos de operação e a redução de fugas e perdas (IWLIVE PRO, BalanceNET e SCADAMaster).

A Universidade de Kentucky tem vindo a desenvolver e a atualizar, nos últimos 40 anos, o Pipe2016 da KYPipe (KYPipe@, 2016). Trata-se essencialmente de um simulador hidráulico, desenvolvido por engenheiros civis dessa Universidade. Este *software* apresenta um módulo que, através de AG, pode ser usado para otimização do horário de funcionamento de bombas.

O Optimizer da Optimatics (Optimatics@, 2016) é um *software* de modelação hidráulica para sistemas de distribuição de água, que analisa e recolhe informação para fornecer soluções de otimização, tendo em conta os diferentes objetivos, sejam eles de minimização de custos e de consumos energéticos, ou de aumento no desempenho hidráulico e na qualidade da água.

A Servelec Technologies, uma divisão da Servelec Group, (Servelec@, 2016) é uma empresa tecnológica que desenvolveu um *software* de apoio à gestão ótima dos serviços de água (MISER) e um *software* de controlo automático em tempo-real do sistema de distribuição de água (OptiMISER). O primeiro inclui um conjunto de ferramentas, altamente configuráveis e flexíveis, de apoio à gestão ótima e compreende um módulo de otimização do horário de

funcionamento de bombas que promete poupanças no consumo de eletricidade na ordem dos 10 %. O segundo utiliza dados de telemetria para prever consumos de água na rede e determina, também, horários de funcionamento de bombas, que satisfazendo as restrições operacionais, obtenham o menor custo.

O WaterGEMS da Bentley (WaterGEMS®, 2016) é outro exemplo de *software* comercial e inclui uma variedade de ferramentas que ajudam na gestão e controlo eficaz do sistema, incluindo a conceção de horários de funcionamento de bombas.

3 METODOLOGIA

3.1 Estrutura do modelo conceptual

No presente trabalho construiu-se um modelo de apoio à gestão em tempo real do funcionamento das bombas de uma estação elevatória. O esquema ilustrativo do modelo conceptual desenvolvido encontra-se representado na Figura 3.1.

O modelo assenta numa filosofia de funcionamento que consiste em:

Fase 1 – Selecionar o “dia tipo” que representa à *priori* o padrão de consumos esperado para as próximas 24 horas;

Fase 2 – Determinar a política ótima de exploração dos grupos elevatórios até ao fim desse “dia tipo” i.e., assumindo que é conhecida de forma determinística a solicitação de consumos ao sistema, sendo que no início do dia o horizonte corresponde a 24 horas;

Fase 3 – Iniciar a implementação da política ótima de exploração e avaliar, a todo o momento, o desvio entre a previsão determinística dos consumos e os consumos que realmente estão a ocorrer. A partir do momento em que este desvio se torne significativo seguir para a fase seguinte, caso contrário continuar nesta fase;

Fase 4 – Selecionar um novo “dia tipo” que se afigure como o que melhor reproduz o padrão de consumos que se verificou até ao momento atual;

Fase 5 – Com base nesse novo “dia tipo” desencadear o cálculo de uma nova política ótima de exploração do sistema em que as condições iniciais são o estado atual do sistema e o objetivo é a minimização dos custos com a energia elétrica para as remanescentes horas do dia, satisfazendo as restrições do problema, ou seja, voltar à fase 2.

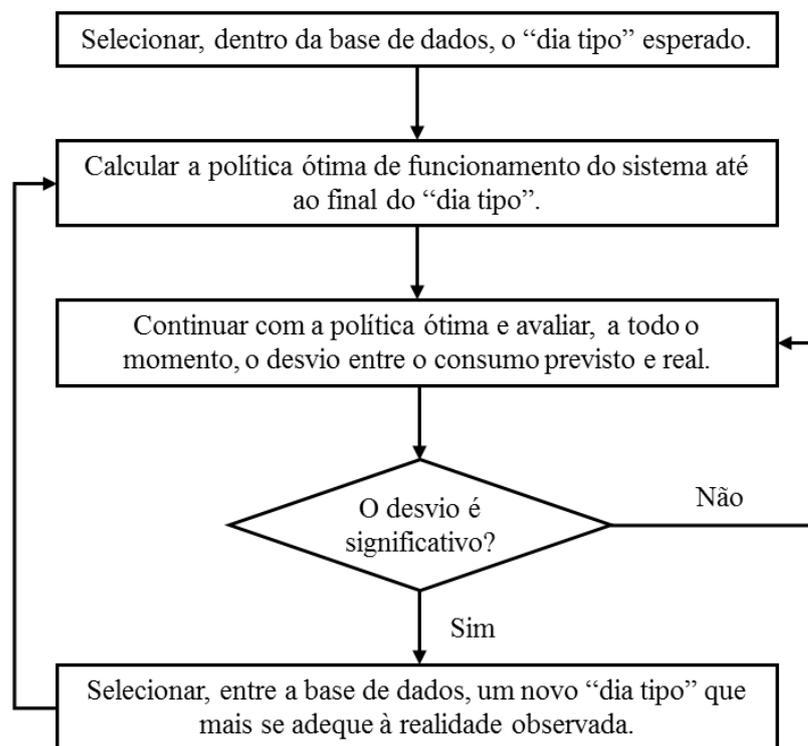


Figura 3.1 – Esquema geral do modelo conceptual a desenvolver

Esta metodologia é realizada com recurso a dois *softwares* distintos: GAMS e Excel. A política ótima de funcionamento do sistema é gerada no GAMS, enquanto as tarefas de avaliação dos desvios e de seleção do novo “dia tipo” são executadas no Excel. Estes dois processos identificados serão designados por diferentes módulos (módulo de otimização e módulo de avaliação de desvios) que juntos constituem o modelo de gestão em tempo real, como iremos descrever mais detalhadamente na seção que se segue.

O modelo de otimização desenvolvido neste trabalho foi desenvolvido para aplicação num sistema simples, tal como apresentado na Figura 3.2, que compreende o bombeamento de água de um reservatório de montante para outro de jusante a partir de uma estação elevatória com múltiplas bombas a funcionar em paralelo.

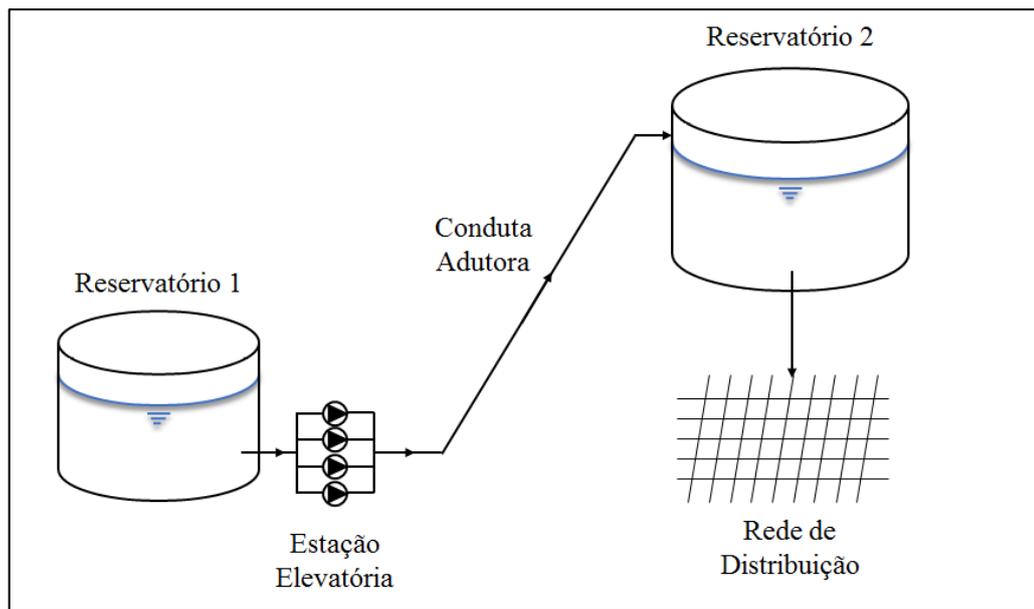


Figura 3.2 – Exemplo de um sistema simples de abastecimento de água a considerar para o desenvolvimento do modelo matemático

3.2 Desenvolvimento do modelo de gestão em tempo real

O desenvolvimento do modelo proposto compreendeu três fases. Na primeira fase tratou-se da construção de uma base de dados de “dias tipo” de consumo de água. Neste trabalho optou-se por criar hidrogramas hipotéticos de consumo ao invés de trabalhar com dados reais de modo a ter maior flexibilidade na fase de testes ao modelo. A segunda fase correspondeu à formulação do problema de otimização, onde se pretende minimizar os custos de bombeamento ao longo de período de tempo variável e para diferentes hidrogramas tipo de consumo de água. Este módulo será formulado com recurso ao modelador do *software* GAMS. A terceira e última fase consiste no cruzamento dos dados projetados e dos dados reais (atualizados em tempo real através do sistema SCADA) para avaliar se a política de funcionamento implementada se adequa ao consumo verificado ou se é necessário alterar os dados a otimizar. No caso de ser necessário alterar a política de gestão do funcionamento das bombas, é também necessário que se encontre o novo “dia tipo”, dentro da base de dados, que mais se aproxima da realidade. Esta última fase corresponde ao módulo de avaliação de desvios e será realizada no *software* Excel.

No início de cada dia será selecionado um hidrograma de consumos, extraído da base de dados, que se pensa ser o que melhor irá espelhar os consumos para esse dia. Os dados reais, consumos e níveis de água verificados, serão atualizados no módulo de avaliação de desvios (Excel), pelo sistema SCADA, em intervalos de tempo regulares escolhidos pelo utilizador.

A Figura 3.3 apresenta o esquema de interação do modelo de gestão em tempo real com o sistema de distribuição de água. Através do sistema SCADA é enviada informação de dados reais, como o nível de água no reservatório e o caudal consumido em cada intervalo de tempo, para o modelo de avaliação dos desvios. No Excel são selecionados os dados a otimizar, sendo eles o consumo de água previsto, o intervalo de tempo em que se inicia a otimização e as condições do sistema. Estas restrições são enviadas para o GAMS onde é gerado um horário de funcionamento das bombas o qual é devolvido ao Excel. A partir deste módulo é enviado para o subsistema de supervisão e controlo a estratégia de operação (número de bombas a ativar) para o intervalo de tempo seguinte, enquanto o modelo continua a avaliar o desvio existente entre o previsto e a realidade observada. Durante o decurso do dia, se o desvio for significativo é ativada nova otimização, se o desvio não for significativo continua-se com a política de operação anteriormente gerada. O critério de paragem escolhido é descrito na secção 5.3.

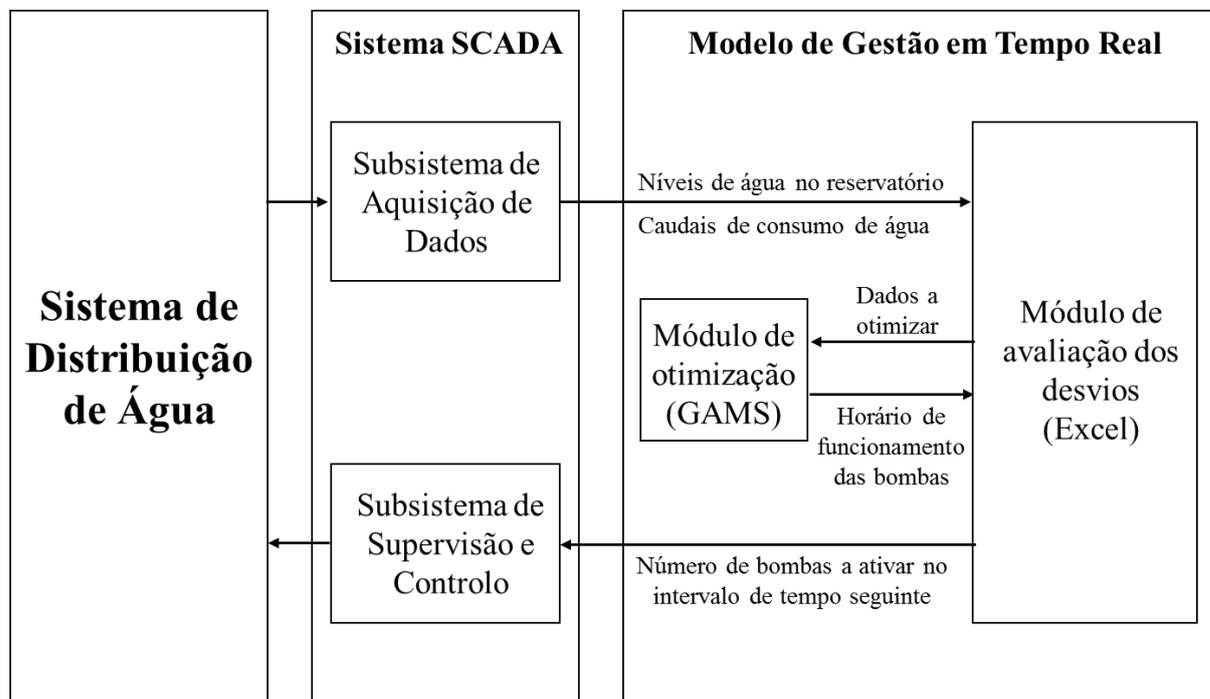


Figura 3.3 – Esquema geral da interação do modelo de gestão em tempo real com o sistema de distribuição de água (Adaptado de Odan et al., 2015)

Tal como mencionado e por observação da Figura 3.3, o modelo de gestão em tempo real é constituído por dois módulos: módulo de otimização e módulo de avaliação de desvios. O último inclui a base de dados de “dias tipo” de consumo.

3.2.1 Padronização de dias típicos de consumo

A previsão das solicitações de um sistema de abastecimento de água é normalmente uma tarefa muito complexa e não pode ser assumida como estática. A quantidade de água necessária para satisfazer uma comunidade é influenciada por inúmeros fatores, de onde se podem destacar: o clima, a qualidade e o custo da água distribuída, a dimensão do aglomerado populacional, o seu nível cultural e económico, a existência de indústria e comércio, as características das construções e o estado de conservação do sistema de abastecimento (Gonçalves, 2014).

No espaço de uma comunidade o consumo de água também não é uma grandeza constante e varia consoante as horas do dia, do dia da semana e da estação do ano. Ao longo do dia e de um modo geral verifica-se que os consumos são praticamente nulos durante a noite e atingem dois picos durante o dia, o primeiro é ao início do dia entre as 7 e as 9 horas da manhã e o segundo ao fim da tarde entre as 18 e as 20 horas. No que diz respeito a variações semanais, em Portugal, observa-se que o consumo de água é superior nos últimos dias da semana em relação aos primeiros dias, atenuando aos sábados e atingindo um mínimo aos domingos. Este padrão habitual poderá sofrer perturbações no caso da ocorrência de sucessivos dias com as temperaturas mais altas ou baixas do que o normal. As variações de consumo ao longo do ano acompanham as condições meteorológicas e a temperatura, de acordo com as estações do ano. Por este motivo a sua amplitude é maior em regiões onde predominam climas continentais, onde são observadas maiores discrepâncias de temperaturas entre o Verão e o Inverno. No caso particular do nosso País a ponta máxima anual de consumo verifica-se nos meses de Julho e Agosto e, usualmente, observa-se uma elevação média mensal de 30 % (Sá Marques e Sousa, 2011).

Um bom modelo de gestão exige uma boa base de dados que consiga refletir as principais características do perfil de consumos na região (Falkenberg, 2005). Para alcançar uma base de dados de confiança o ideal seria trabalhar e estudar os dados históricos da população em apreço mas, na ausência desses dados, é muito abundante a literatura técnica onde é possível encontrar inúmeros métodos e expressões para estimar os consumos de água de uma dada população.

Neste trabalho, ao invés de recorrer a dados históricos optou-se por gerar hidrogramas hipotéticos obtidos através de fatores de consumo encontrados em bibliografia da especialidade. Deste modo, foram criados seis hidrogramas que têm como objetivo representar diferentes dias típicos de solicitações de água à rede os quais serão apresentados detalhadamente mais à frente no texto.

3.2.2 Formulação do módulo de otimização

A formulação matemática do problema consiste em definir um conjunto de equações (função objetivo e restrições) que traduzam o comportamento do sistema físico. Uma descrição matemática mais precisa irá reproduzir de forma mais fiel o comportamento real do sistema hidráulico, mas é importante ter em conta que o aumento na complexidade irá incrementar o tempo de cálculo computacional, o que poderá ser inviável quando se trata de gestão em tempo real.

- Função objetivo

Como já referido anteriormente, os principais custos relativos ao bombeamento num sistema de distribuição de água devem-se aos consumos elétricos ao longo do seu período de vida. Assim sendo, a função objetivo deste modelo expressa a minimização dos custos referentes ao consumo de energia elétrica na operação das bombas. De forma a simplificar o modelo, e por se considerarem valores menos significativos, foi considerado que os custos de manutenção dos grupos motobomba são independentes do seu horário de funcionamento, ou seja serão apenas ditados pelo número total de horas de funcionamento e não pelo horário segundo o qual são postos em funcionamento. Dado que a situação a otimizar é pré-existente não existe controlo sobre a potência a instalar. Isto quer dizer que o número e a potência das bombas estão definidos *a priori* pelo que a parcela fixa do encargo relativo à potência contratada é sempre a mesma independentemente do horário de funcionamento das bombas. Por esta razão também esta parcela do custo de exploração das bombas não será considerada na função objetivo. Tendo em conta que o modelo irá correr várias vezes por dia, e com diferentes horas iniciais, a função objetivo é traduzida pela seguinte equação:

$$\text{Min } C = \sum_{b=1}^{NB} \sum_{t=t_i}^{NP} PE_t \cdot PB_{b,t} \cdot Y_{b,t} \cdot dt \quad (1)$$

A descrição desta equação e das seguintes é acompanhada da indicação das unidades consideradas no modelo implementado.

Onde:

C	Custo diário de bombagem [€/dia];
NB	Número de arranjos de bombas;
NP	Número de intervalos de tempo em que o dia é discretizado;
t_i	Primeiro intervalo de tempo considerado para a otimização;
PE_t	Preço da energia elétrica durante o intervalo t [€/kWh];
$PB_{b,t}$	Potência consumida pelo arranjo de bombas b durante o intervalo t [kW];
$Y_{b,t}$	Variável binária que determina o estado de funcionamento do arranjo de bombas b durante o intervalo t ;
dt	Duração do intervalo de tempo t [h].

- Restrições

Foram utilizadas duas nomenclaturas diferentes tanto para níveis de água, como para caudais de consumo, isto serve para distinguir entre os valores assumidos (esperados) e os valores observados (reais).

O comportamento das bombas centrífugas é descrito pela relação entre quatro parâmetros: caudal, potência, carga e rendimento. Desta relação resultam três curvas, as chamadas curvas características das bombas, que representam graficamente a potência, a carga, e o rendimento em função do caudal e reproduzem as condições operacionais das bombas para uma determinada velocidade de rotação, no caso de bombas de velocidade variável (Sá Marques e Sousa, 2011).

A primeira restrição consiste no cálculo da potência necessária para elevar um determinado caudal através de uma combinação de b motobombas em funcionamento. Uma vez que na transformação de energia mecânica em energia do escoamento existem perdas, é necessário corrigir a potência hidráulica usando o rendimento da bomba. Desta forma, a potência da bomba $PB_{b,t}$ (kW) corresponde ao quociente entre a potência hidráulica e o rendimento global da motobomba, de acordo com a equação apresentada de seguida.

$$PB_{b,t} = \frac{\gamma \cdot (QB_{b,t} \cdot C_{unidade}) \cdot H_{b,t}}{\eta_{b,t}} \quad (2)$$

Onde:

γ	Peso específico da água [kN/m ³];
$QB_{b,t}$	Caudal de água bombeado pelo arranjo de bombas b no intervalo de tempo t [m ³ /h];
C_{unid1}	Fator de conversão de unidades de m ³ /h para m ³ /s;
$H_{b,t}$	Carga total para o arranjo de bombas b no intervalo de tempo t [m];
$\eta_{b,t}$	Eficiência energética do conjunto de bombas b no intervalo de tempo t .

A altura total de elevação é definida pelo somatório entre a altura geométrica da água e as perdas de carga sofridas ao longo da conduta elevatória. As perdas de carga dependem do caudal pelo que a equação seguinte representa a curva da instalação.

$$H_{s_{b,t}} = H_{g_t} + \Delta H_{b,t} \quad (3)$$

Onde:

$H_{s_{b,t}}$	Altura total de elevação correspondente ao caudal $QB_{b,t}$ [m];
H_{g_t}	Altura geométrica da água no intervalo de tempo t [m];
$\Delta H_{b,t}$	Perdas de carga sofridas na conduta para o caudal $QB_{b,t}$ [m].

A altura geométrica da água nos dois reservatórios, em cada período de tempo, é obtida pela diferença entre a cota de água no reservatório 2 (cf. Figura 3.2), que varia consoante o nível de água em cada intervalo t , e a cota de água no reservatório 1 (cf. Figura 3.2). O reservatório 1 representa a captação pelo que neste caso a sua cota de água foi considerada constante. A equação que se segue ilustra este cálculo.

$$H_{g_t} = CR2_t - CR1 \quad (4)$$

Onde:

$CR2_t$	Cota de água no reservatório 2 no final do intervalo de tempo t [m];
$CR1$	Cota de água no reservatório 1 considerada constante [m].

Por sua vez, a cota de água no reservatório 2 é obtida através da soma do nível de água, variável ao longo de t , à cota de soleira do reservatório 2, tal como é apresentado na próxima equação.

$$CR2_t = Z + Ne_t \quad (5)$$

Onde:

- Z Cota de soleira do reservatório 2 [m];
 Ne_t Nível de água (esperado) no final do intervalo t no reservatório 2 [m].

As perdas de carga num sistema hidráulico são usualmente divididas em dois grupos: perdas de carga contínuas e perdas de carga localizadas. As perdas de carga contínuas representam a energia dissipada ao longo da conduta adutora e devem-se a fenómenos de atrito condicionados pelas características das paredes internas da conduta (diâmetro e rugosidade). As perdas de carga localizadas representam dissipações energéticas devidas a singularidades, como por exemplo os órgãos acessórios os quais provocam alterações pontuais no escoamento. Estas últimas são, de um modo geral, pouco significativas comparativamente com as perdas de carga contínuas, pelo que, neste modelo não irão ser consideradas.

As perdas de carga contínuas podem ser admitidas constantes ao longo do comprimento da conduta se estivermos em regime permanente uniforme, pelo que o seu cálculo advém da multiplicação do comprimento total da conduta, L , por um valor de perda de carga unitária, J , de acordo com a equação (6). São inúmeras as fórmulas apresentadas pela comunidade científica para o cálculo destas, sendo que neste trabalho se optou por considerar uma fórmula monómia, mais especificamente a fórmula de Scimeni (Sá Marques e Sousa, 2011), apresentada na equação (7).

$$\Delta H_{b,t} = L \cdot J_{b,t} \quad (6)$$

$$QB_{b,t} = (K \cdot D^\alpha \cdot J_{b,t}^\beta) \cdot C_{unid2} \quad (7)$$

Onde:

- K, α, β Coeficientes que dependem do material da conduta;
 D Diâmetro da conduta [mm];
 $J_{b,t}$ Perda de carga unitária para o caudal associado ao arranjo de bombas b durante o intervalo t [m/Km];
 C_{unid2} Fator de conversão de unidades de l/s para m³/h;

A relação existente entre a carga total e o caudal elevado por uma bomba, a uma dada velocidade de rotação, representa-se graficamente através da sua curva característica. Esta curva pode ser expressa matematicamente, de forma bastante fiel, por um polinómio de segundo grau. No entanto visando alcançar uma maior facilidade de convergência, crucial na otimização em tempo real, optou-se por ajustar ao troço de curva utilizado nos cálculos, um polinómio de primeiro grau, tal como o que se apresenta de seguida.

$$Hb_{b,t} = A_b \cdot QB_{b,t} + B_b \quad (8)$$

Onde:

$Hb_{b,t}$ Troço da curva característica do arranjo de bombas b no intervalo de tempo t [m];
 A_b, B_b Coeficientes da curva característica do arranjo de bombas b .

O rendimento da bomba avalia a eficiência com que a máquina transmite ao escoamento a energia que recebe. O rendimento pode ser representado por um polinómio de segundo grau, mas neste modelo preferiu-se trabalhar com um polinómio de primeiro grau, como o exemplo que se segue.

$$\eta_{b,t} = C_b \cdot QB_{b,t} + D_b \quad (9)$$

Onde:

C_b, D_b Coeficientes da curva de rendimento para o arranjo de bombas b .

A determinação do ponto de funcionamento de uma bomba surge da intersecção entre a curva característica da bomba e a curva característica da instalação, ou seja, do equilíbrio entre a energia fornecida pela bomba e a energia necessária para o escoamento na instalação, o que é traduzido pela equação seguinte.

$$Hb_{b,t} = Hs_{b,t} \quad (10)$$

O conjunto de restrições que se segue diz respeito ao balanço mássico no reservatório 2 em cada período de tempo t , a partir do qual se calculam os níveis de água neste reservatório. O nível de água no reservatório 1 foi considerado constante neste modelo. Assumiu-se que o nível de água no reservatório 2 ao final do dia teria de ser igual ou superior ao nível de água no início do dia. As equações que traduzem estas restrições apresentam-se de seguida.

$$S \cdot Ne_t = S \cdot Ne_{t-1} + \Delta Ve_t, \quad \forall t > 1 \quad (11)$$

$$S \cdot Ne_t = S \cdot N_i + \Delta Ve_t, \quad t = 1 \quad (12)$$

$$\Delta Ve_t = \left[\sum_{b=1}^{NB} QB_{b,t} \cdot Y_{b,t} - QCe_t \right] \cdot dt \quad (13)$$

$$Ne_t \geq N_i, \quad \forall t = t_f \quad (14)$$

Onde:

S	Área da secção transversal do reservatório 2 [m ³];
ΔV_{e_t}	Diferença entre volumes de água entrados e saídos (esperados) do reservatório 2 no final do intervalo de tempo t [m ³];
N_i	Nível de água no início do dia no reservatório 2 [m ³];
QC_{e_t}	Caudal de água consumido (esperado) durante o intervalo de tempo t [m ³ /h];
t_f	Último intervalo de tempo considerado.

As próximas equações dizem respeito a restrições de limites operacionais. As duas primeiras são referentes às condições limite do volume de água no reservatório, traduzidas no modelo através de níveis de água máximos e mínimos a cumprir. A terceira restrição serve para garantir que, em cada intervalo de tempo, exista no máximo um arranjo de bombas em funcionamento.

$$N_{\min} \leq N_{e_t} \leq N_{\max} \quad (15)$$

$$Q_{\min b} \cdot Y_{b,t} \leq QB_{b,t} \leq Q_{\max b} \cdot Y_{b,t} \quad (16)$$

$$\sum_{b=1}^{NB} Y_{b,t} \leq 1 \quad (17)$$

Onde:

N_{\min}	Nível mínimo de água admitido no reservatório 2 [m];
N_{\max}	Nível máximo de água admitido no reservatório 2 [m];
$Q_{\min b}$	Caudal mínimo bombeado para o arranjo de bombas b [m ³ /h];
$Q_{\max b}$	Caudal máximo bombeado para o arranjo de bombas b [m ³ /h].

Este modelo foi desenvolvido com recurso ao *software* GAMS (*General Algebraic Modelling System*) que é um sistema de modelação de alto nível para a programação e otimização matemática, projetado especialmente para resolver problemas em programação linear, não linear e inteira mista (GAMS@, 2016). O problema de otimização foi escrito em linguagem GAMS recorrendo ao manual do utilizador de Rosenthal (2014).

O *software* tem disponível um conjunto de *solvers*, que têm vindo a ser atualizados ao longo das diferentes versões, para os diferentes tipos de programação. Neste caso, tratando-se de um problema de programação não linear inteira mista, o solver utilizado foi o COINBONMIN. Este *solver*, atualmente chamado BONMIN (*Basic Open-source Nonlinear Mixed Integer programming*), surgiu de uma parceria entre a Universidade de Carnegie Mellon e o grupo IBM Research e integra o projeto COIN-OR (*Computational Infrastructure for Operations Research*). BONMIN implementa diferentes algoritmos na resolução de problemas de PNLIM, incluindo um algoritmo simples de *branch-and-bound*, B-BB, um algoritmo de decomposição

baseado em aproximação externa, B-OA, um algoritmo de *branch-and-cut* baseado em aproximação externa, B-QG, e um híbrido, B-Hyb, entre o B-BB e o B-QG (COIN-OR@, 2016). Para problemas convexos estes algoritmos são exatos, caso contrário são heurísticos (GAMS@, 2016).

No desenvolvimento deste modelo foram utilizadas duas ferramentas de interação entre o *software* e o Microsoft Excel: “XLX2GMS” e “GDX2XLS”. A primeira converte, e importa para o modelo, dados de uma folha de cálculo do Microsoft Excel em formato compatível com a linguagem GAMS. A segunda ferramenta realiza a extração do conteúdo desejado para uma folha de cálculo do Microsoft Excel, o que facilita a leitura e análise dos dados de saída.

3.2.3 Formulação do módulo de avaliação de desvios

A fase do modelo de gestão em tempo real onde são avaliados os desvios é realizada numa folha de cálculo que inclui dois passos importantes: o cálculo do indicador de paragem e a seleção do novo “dia tipo” de consumos. O indicador de paragem avalia, em cada intervalo de tempo, a divergência entre o previsto e o real, e de acordo com um critério previamente escolhido dá a ordem de paragem ou continuação da política de operação do sistema. A par deste indicador, é calculado, em cada intervalo, qual o hidrograma existente na base de dados que melhor se aproxima aos consumos reais já verificados. Como vamos verificar mais à frente no capítulo 5, o indicador de paragem é dado pelo desvio do nível de água (entre o esperado e o real), enquanto a procura de um novo “dia tipo” de consumo é dada por aproximação dos caudais observados.

Nas folhas de cálculo que compõem este módulo foi criado um esquema que, através da base de dados de dias típicos de consumo, do tarifário elétrico em vigor e dos dados de consumos reais, atualizados em cada período de tempo considerado, calcula o desvio dos parâmetros assumidos e verificados e dá o “sinal” para paragem ou continuação da política de operação já calculada anteriormente.

Para além de realizar estes cálculos, o módulo do Excel automaticamente cria o *input* necessário para o cálculo da nova otimização a realizar no GAMS. O módulo no GAMS está construído, através de ferramentas de *input*, para ir buscar as informações necessárias para cada otimização à folha de cálculo do Excel, nomeadamente: hora do dia em que se inicia a otimização, nível de água no instante anterior, tarifa elétrica e hidrograma de consumos esperado. E através das ferramentas de *output*, após cada nova otimização ser gerada no GAMS é apenas necessário atualizar o Excel para continuar com a avaliação dos desvios. O operador apenas tem de ir atualizando o módulo do Excel e, aquando da “ordem” de paragem, ir ao módulo do GAMS e alterar apenas duas informações, relativas ao número da otimização do dia que se trata (primeira, segunda, terceira, ...), e gerar novas soluções que automaticamente atualizam o modelo.

4 CASO DE ESTUDO

4.1 Breve descrição

O Sistema Multimunicipal de Abastecimento de Água e Saneamento de Águas Residuais do Baixo Mondego-Bairrada foi criado em 2004 com o objetivo de satisfazer as necessidades populacionais da região ao nível de abastecimento de água e tratamento de águas residuais. A concessão deste sistema para a construção, exploração e gestão foi atribuída, na altura, à empresa Águas do Mondego, constituída no mesmo ano e resultante da parceria entre a Águas de Portugal, estabelecida em 1993, e alguns municípios da região. Em maio de 2015 a sociedade Águas do Mondego em conjunto com a SIMRIA, Saneamento Integrado dos Municípios da Ria, e a SIMLIS, Saneamento Integrado dos Municípios do Lis, agregaram-se e passaram a constituir a empresa Águas do Centro Litoral, AdCL. Esta nova sociedade, que sucede nos direitos e obrigações das três sociedades extintas, fica encarregue da concessão da exploração e gestão do Sistema Multimunicipal de Abastecimento de Água e de Saneamento do Centro Litoral de Portugal, por um período de 30 anos (AdCL@, 2016).

A Estação de Tratamento de Água (ETA) da Boavista e o Complexo da Boavista, que abastece cerca de 60 % da população servida pelo sistema, resultam de um investimento de 50 milhões de euros, realizado em 2010. Em 2015, foram concluídas as obras de abastecimento ao concelho de Leiria que, decorrendo de um investimento de cerca de 31 milhões de euros, possibilitam alcançar mais de 135 mil pessoas (AdCL@, 2016).

Na vertente de abastecimento de água, são providos 12 municípios, incluindo as grandes cidades de Coimbra e Leiria e correspondendo, no total e para o ano horizonte do projeto (2025), uma população de cerca de 339 mil habitantes. Procurando satisfazer as necessidades de água na região tanto em quantidade mas também em termos de qualidade, a empresa dispõe de inúmeras infraestruturas: 11 captações, 4 estações de tratamento de água, 52 reservatórios, 31 estações elevatórias e 256 km de condutas (AdCL@, 2016).

Tal como já mencionado, o presente estudo irá focar-se unicamente num troço deste sistema, composto por uma estação elevatória, com 4 bombas a funcionar em paralelo, um reservatório e as condutas que ligam as duas infraestruturas, tal como se pode observar de seguida, em vista aérea (Figura 4.1) e em esquema geral (Figura 4.2).



Figura 4.1 - Vista aérea do sistema em estudo (Google Maps®, 2015)

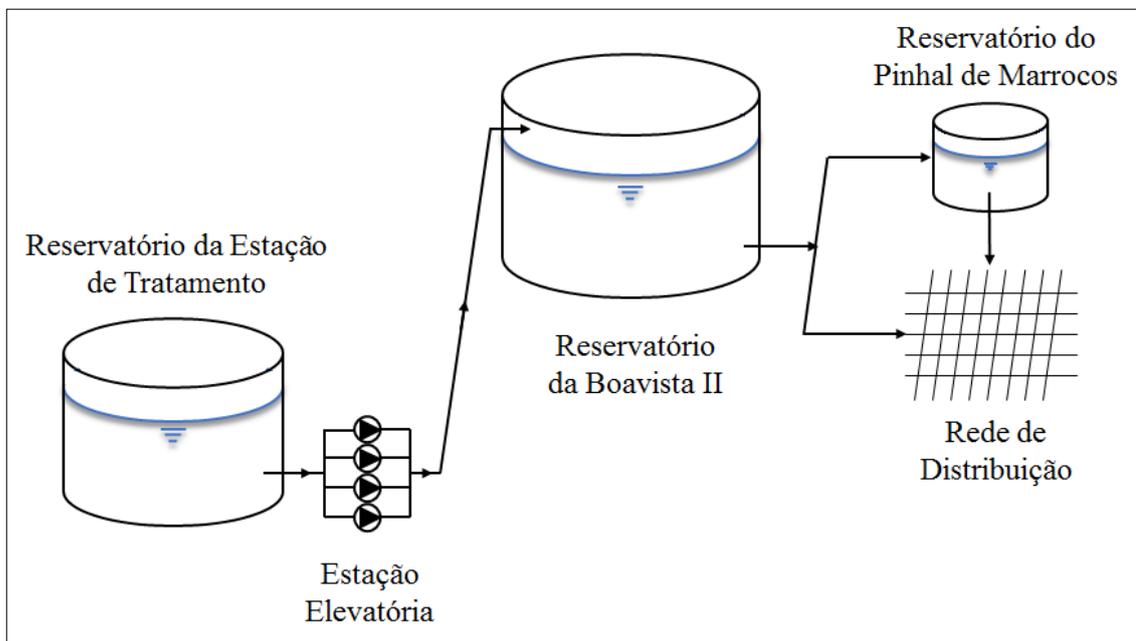


Figura 4.2 - Esquema geral do sistema em estudo

4.2 Dados e parâmetros

A otimização do horário de funcionamento de bombas do troço referido já foi objeto de um anterior estudo numa ótica determinística e em PNL realizado por Detelic (2012). Pelo que, alguns dados e parâmetros desse estudo foram utilizados para o presente trabalho.

O reservatório de montante, da ETA, apresenta uma capacidade de armazenamento de 500 m³ e encontra-se a uma cota de soleira 19.70 m, com uma altura média de água (entre o mínimo e máximo) de 2.5 m. Para simplificar assumiu-se que o valor da cota de água seria constante e igual a 22.20 m, dado que a estação de tratamento tem capacidade para tratar 129 600 m³ de água por dia, o que representa mais de 2.5 vezes a necessidade média diária para o abastecimento a partir de Boavista II (Detelic, 2012).

A estação elevatória tem quatro grupos motobomba iguais instalados em paralelo. Cada bomba apresenta um diâmetro nominal de 460 mm, uma capacidade de bombeamento de cerca de 2100 m³/h. Cada motor detém uma potência de 400 kW e encontra-se ligado a um sistema de velocidade variável, que permite alcançar uma velocidade máxima de rotação, para cada bomba, de 1 500 rpm. Sendo que todos os grupos motobomba são iguais, o número de arranjos possíveis de bombas em funcionamento tem em conta unicamente as combinações possíveis de número total de bombas em operação, existindo neste caso quatro arranjos possíveis.

As curvas características das bombas, relativas ao modelo existente na estação elevatória, encontram-se expostas na Figura 4.3 para quatro diferentes diâmetros, sendo as respeitantes ao diâmetro de 460 mm as únicas relevantes. As curvas representadas são:

- NPSHR-Caudal: curva que traduz a carga absoluta útil mínima necessária (sigla NPSHR do termo inglês *Net Positive Suction Head Required*) para prevenir fenómenos de cavitação;
- Carga-Caudal: curvas que representam, para cada caudal elevado, a energia mecânica total fornecida pela bomba;
- Rendimento-Caudal: isolinhas que retratam a relação entre o rendimento da bomba, a carga total e o caudal bombeado;
- Potência-Caudal: curvas que traduzem a potência necessária para acionar a bomba, consoante o caudal elevado.

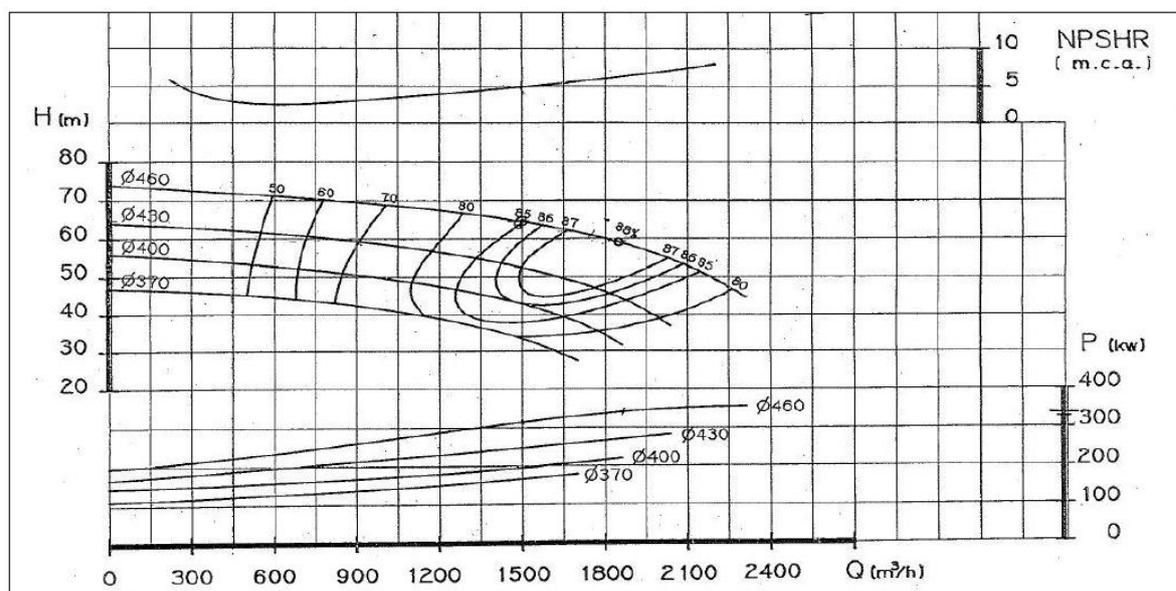


Figura 4.3 – Curvas características das bombas (Fonte: AdCL)

As curvas características para arranjos de duas ou mais bombas em paralelo foram obtidas a partir da curva correspondente a uma única bomba, considerando que para a mesma altura de elevação corresponde a soma dos caudais de cada bomba isolada. Em trabalho anterior sobre esta elevatória Detelic (2012) obteve os polinómios de segundo grau representativos das curvas características para os quatro arranjos de bombas, tendo obtido elevados coeficientes de correlação iguais a 0.989.

Considerando, para cada arranjo de bombas, um limite mínimo e máximo de caudal elevado (Quadro 4.1) determinado por pontos de funcionamento com rendimento superior a 65 %, aplicaram-se os polinómios de segundo grau que aproximam as curvas características de carga para gerar um conjunto de pontos Carga-Caudal. A partir destes pontos foi projetada a linha de tendência para cada curva característica para a qual se determinaram os valores dos coeficientes para aplicação na equação (8), representados no Quadro 4.2. Para estas funções, os valores dos coeficientes de correlação obtidos foram ainda elevados da ordem de 0.970 pelo que esta aproximação linear nestes troços das curvas características continuam a representar um bom ajuste.

Quadro 4.1 – Limites mínimos e máximos considerados para o caudal

Número de bombas (<i>b</i>)	<i>Caudais bombeados por cada arranjo de bombas (m³/h)</i>	
	Limite mínimo	Limite máximo
1	900	2100
2	1800	4100
3	2700	6100
4	3600	8000

Quadro 4.2 – Coeficientes das funções lineares das curvas características de carga

Número de bombas (<i>b</i>)	<i>A_b</i>	<i>B_b</i>
1	-0.014874	85.376855
2	-0.004796	84.802235
3	-0.007262	84.954995
4	-0.003551	84.558995

De forma análoga partindo do polinómio de segundo grau da curva de rendimento de cada bomba obtido em anterior trabalho de Detelic (2012), equação (18), obtiveram-se as funções lineares que aproximam os troços da curva de rendimento de cada arranjo de bombas. No Quadro 4.3 estão expostos os coeficientes representativos para aplicação na equação (9), considerando os mesmos limites para os caudais.

$$\eta_{b,t} = -0.00002434 \left(\frac{Q_{b,t}}{b}\right)^2 + 0.09025328 \left(\frac{Q_{b,t}}{b}\right) + 4.23786037 \quad (18)$$

Quadro 4.3 – Coeficientes das funções lineares das curvas características de rendimento

Número de bombas (<i>b</i>)	<i>C_b</i>	<i>D_b</i>
1	0.017233	55.351860
2	0.009393	53.745305
3	0.006194	54.106416
4	0.004787	53.461121

A conduta que transporta a água entre a estação elevatória e o reservatório da Boavista II apresenta um comprimento de 670 m, um diâmetro de 1.2 m e é composta por ferro fundido revestido. Tal como já mencionado no capítulo anterior, apenas foram consideradas perdas de

carga contínuas por se considerarem pouco significativas as perdas de carga localizadas em comparação com as contínuas, considerando que se trata de uma conduta elevatória relativamente longa (mais de 500 vezes superior ao diâmetro). Assim sendo, para o material da conduta, os valores dos coeficientes a usar na Fórmula de Scimeni, equação (7), para o cálculo das perdas de carga unitárias, encontram-se no quadro que se apresenta de seguida.

Quadro 4.4 – Coeficientes a usar na Fórmula de Scimeni (Sá Marques e Sousa, 2011)

Material	K	α	β
Ferro Fundido	35	2.625	0.535

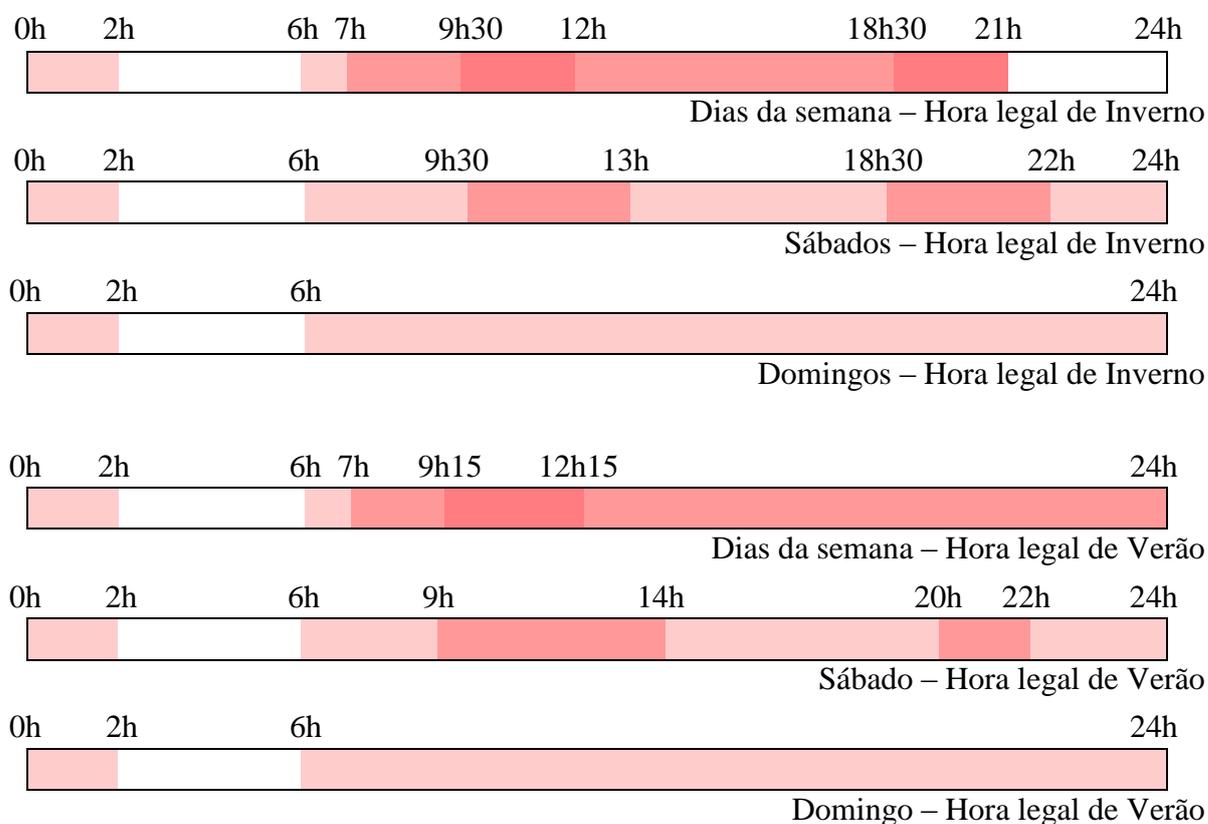
O reservatório da Boavista II, para onde toda a água tratada pela estação é bombeada, detém uma capacidade total de 15 000 m³, composto por dois compartimentos iguais, cada um com uma largura de 33 m, um comprimento de 35 m e uma altura de 6.5 m. Para este modelo considerou-se, para simplificar, uma área de secção, igual à soma dos dois compartimentos, de 2 310 m². Este reservatório encontra-se a uma cota de soleira de 75 m e os níveis de água admissíveis variam entre 1.5 m e 6 m. Foi assumido em todos os modelos um nível de água inicial, N_i , de 3 m, suficiente para permitir algum “espaço de manobra” no arranque da exploração.

A partir do reservatório da Boavista II a água segue para dois destinos: diretamente por gravidade para a rede de distribuição e, mediante bombeamento, para o reservatório Pinhal de Marrocos de onde segue igualmente para a rede de distribuição. Para efeitos de balanços mássicos ao reservatório da Boavista II, considerou-se que o hidrograma de volumes fornecidos por este reservatório compreende a soma destes dois destinos.

No que diz respeito aos tarifários de eletricidade, neste momento, em Portugal, quem aprova as tarifas e preços da energia elétrica é a Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos (ERSE), que veio liberalizar o setor.

A ETA da Boavista consome energia elétrica paga segundo um tarifário descontínuo. O sistema tarifário adotado foi o reportado em Detelic (2012), atualizado com os dados disponibilizados em ERSE@ (2016), que considerou médias utilizações para clientes em média tensão (MT). Este tarifário tem quatro períodos horários (horas de super vazio, vazio normal, cheias e ponta) e dois períodos sazonais (hora legal de inverno e verão). Os horários e preços da eletricidade variam de acordo com o dia da semana e o período sazonal tal como se apresenta nos Quadros 4.5 e 4.6. Estes dados foram retirados da ERSE e dizem respeito às tarifas reguladas para 2016.

Quadro 4.5 – Ciclo semanal e diário para todos os fornecimentos em Portugal Continental (ERSE@, 2016)



Quadro 4.6 – Preço da eletricidade em tarifa de médias utilizações para clientes em MT (ERSE@, 2016)

Período Horário	Período de Inverno (€/kWh)	Período de Verão (€/kWh)
Super vazio	0.0657	0.0720
Vazio Normal	0.0770	0.0808
Cheias	0.1108	0.1108
Ponta	0.1429	0.1487

É de evidenciar a grande discrepância de preços que se observa, em especial, entre o período de ponta e o período de super vazio (aumento superior a 100 %). Existindo, assim, uma expectativa alta em relação a potenciais poupanças em termos económicos.

5 ESTRATÉGIA DE RESOLUÇÃO DO MODELO

5.1 Resolução da padronização dos dias típicos de consumo

Tal como referido na subsecção 3.2.1 foram criados alguns hidrogramas de consumo hipotéticos para servir de base de dados do modelo. Para isso, foram adotados dois padrões de consumos guiados por diferentes fatores multiplicativos: padrão A e padrão B, tal como se pode observar na Figura 5.1. Estes dois padrões traduzem adimensionalmente a distribuição horária de consumos, a partir da qual é necessário multiplicar pelo caudal médio para obter a sequência quantitativa das solicitações à rede. Os dois padrões, A e B, foram adaptados de Coelho et al. (2006) e de Sá Marques e Sousa (2011), respetivamente.

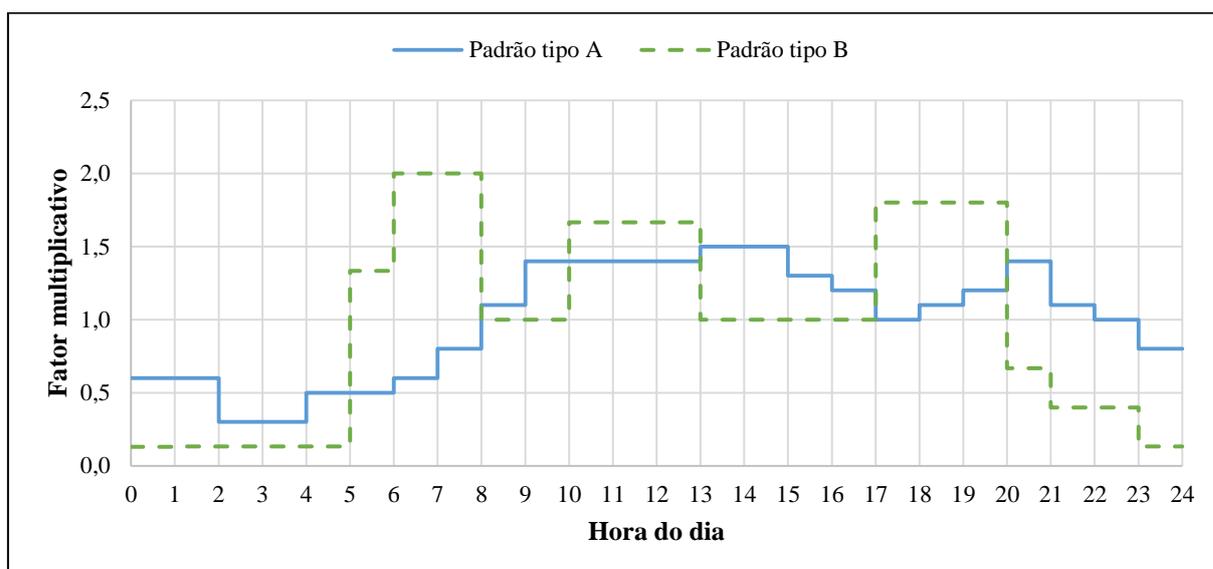


Figura 5.1 – Padrões de consumo adimensionais

Neste trabalho foi adotado um caudal médio diário de 2 062.5 m³/h, obtido através de uma capitação média de 198 l/hab/dia (ERSAR, 2015) para uma população de 250 000 habitantes (Troca, 2014). A partir deste caudal médio e dos dois padrões de consumo adimensionais foram estabelecidos 6 hidrogramas de consumo (I, II, III, IV, V e VI), representados nas Figuras 5.2 e 5.3. Os Hidrogramas I e IV são a multiplicação direta do caudal médio pelos dois padrões de fatores multiplicativos, os Hidrogramas II e V são análogos a I e IV, respetivamente mas com

mais 25 % de consumo em cada instante e os Hidrogramas III e VI têm menos 25 % que os Hidrogramas I e IV.

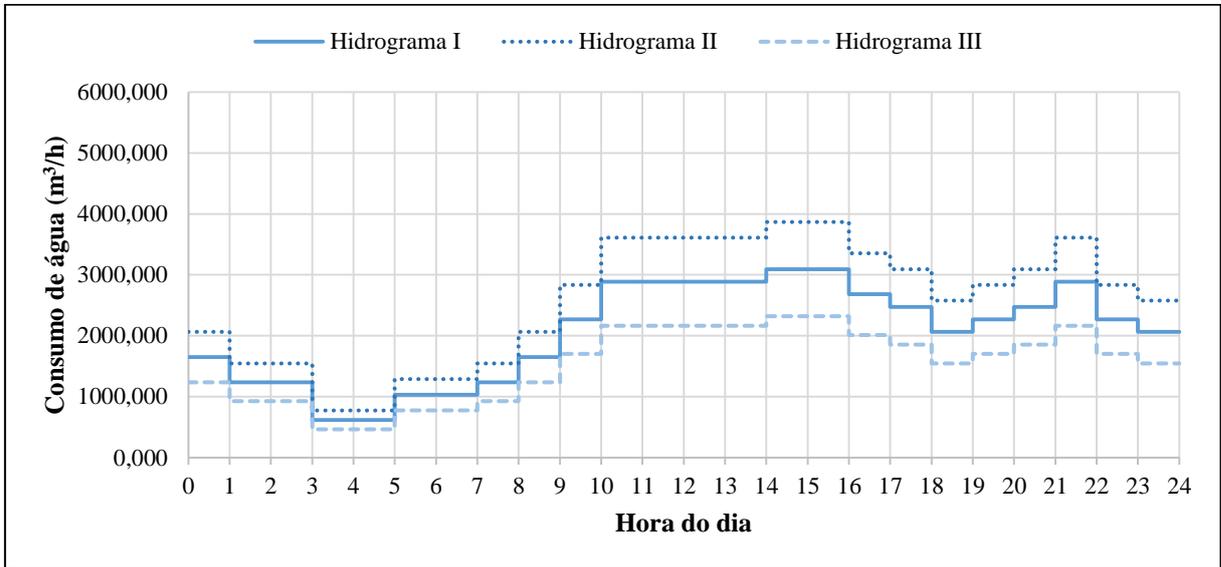


Figura 5.2 – Hidrogramas de consumos baseados no padrão A

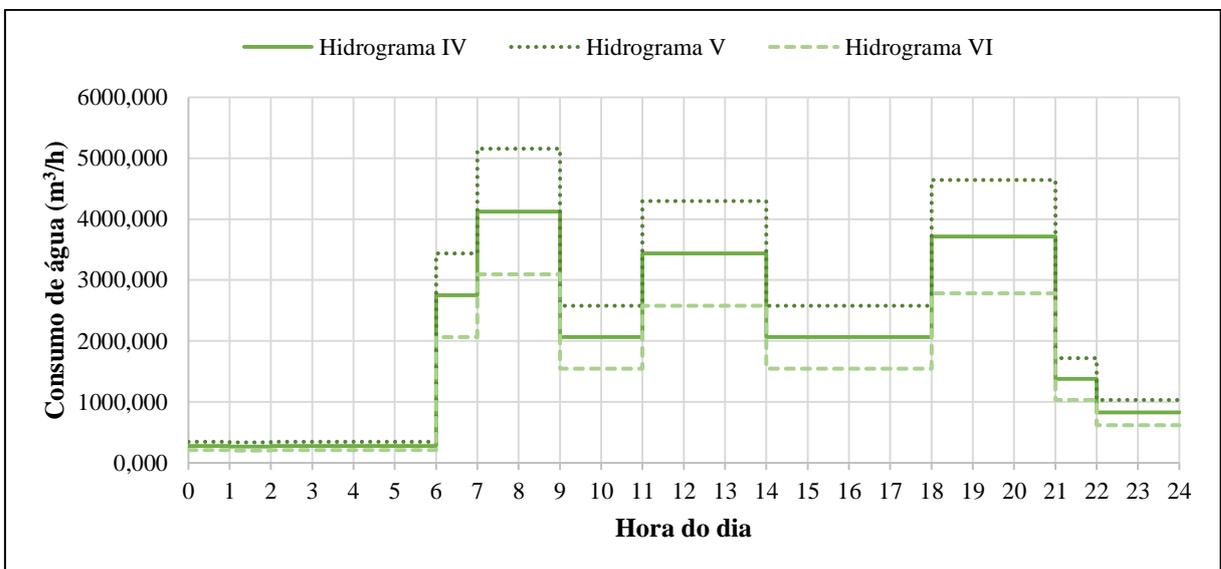


Figura 5.3 – Hidrogramas de consumos baseados no padrão B

5.2 Resolução do módulo de otimização

O modelo apresentado na subsecção 3.2.2 com os dados e parâmetros do caso de estudo, no qual o reservatório 2 corresponde ao reservatório Boavista II, foi testado primeiramente para 24 períodos horários. Apesar das linearizações introduzidas e de terem sido atribuídos valores iniciais, bem como limites mínimos e máximos, à maior parte das variáveis a fim de aumentar a probabilidade de convergência do problema, o modelo foi considerado inviável. Isto porque sempre que ocorria uma alteração nos dados iniciais, como por exemplo o instante de tempo em que se iniciava a otimização e o nível de água inicial, era necessário reformular manualmente grande parte dos valores iniciais e dos limites atribuídos às variáveis, de modo a conseguir afinar o problema e fazê-lo convergir para a nova solução ótima.

Este inconveniente tornou inexecutável a sua adoção como um modelo com resposta rápida e assertiva, pelo que, se optou por simplificar o problema, assumindo um valor médio para a altura de elevação. Em termos concretos, a esta simplificação correspondeu um valor de caudal bombeado por uma bomba de 1 941 m³/h, para uma altura geométrica média de 56.55 m. Esta generalização confere também valores médios às restantes variáveis, nomeadamente aos caudais bombeados por cada arranjo de bombas, à potência de bombagem de cada arranjo e ao rendimento do grupo motobomba. Do ponto de vista energético esta simplificação não reproduz de forma totalmente fiel o sistema pois não leva em consideração a variação, para mais ou para menos, da altura de elevação ao longo do dia. No entanto, do ponto de vista hidráulico, esta variação da altura de água no reservatório Boavista II é tida em conta em resultado do balanço mássico que é efetuado em cada passo de discretização do tempo. São igualmente verificados os níveis mínimos e máximos de exploração sendo que para efeitos dos objetivos pretendidos (definição do horário de funcionamento das bombas e minimização dos custos de bombagem) foi possível verificar que os resultados são satisfatórios quando comparados com os obtidos considerando do ponto de vista energético a variação da altura de elevação.

Para apoiar esta decisão, compararam-se os resultados obtidos pelo modelo completo (igual ao apresentado em 3.2.2) e pelo modelo simplificado (com altura média de elevação entre os reservatórios), para os seis hidrogramas hipotéticos de consumo e com o dia discretizado em 24 intervalos de tempo. Estes resultados são apresentados de seguida.

Do Quadro 5.1 verifica-se que relativamente ao custo diário de bombeamento as diferenças são muito pouco significativas, variando entre 0.57 €, que corresponde a 0.07 % do custo pelo modelo simplificado, e 17.49 €, que representa 2.71 % do custo pelo modelo simplificado.

Quadro 5.1 – Comparação de custos para a otimização do problema para os seis hidrogramas hipotéticos de consumos pelo modelo simplificado e pelo modelo completo

	<i>Custo total</i> <i>(Modelo simplificado) [€]</i>	<i>Custo total</i> <i>(Modelo completo) [€]</i>	$ \Delta\text{Custo} $ <i>[€]</i>	$ \Delta\text{Custo} $ <i>[%]</i>
<i>Hidrograma I</i>	865.76	866.33	0.57	0.07
<i>Hidrograma II</i>	1 084.93	1 093.87	8.94	0.82
<i>Hidrograma III</i>	644.48	627.00	17.49	2.71
<i>Hidrograma IV</i>	910.81	901.88	8.93	0.98
<i>Hidrograma V</i>	1 132.99	1 142.55	9.56	0.84
<i>Hidrograma VI</i>	659.09	656.14	2.94	0.45

Em termos de caudais a bombear em cada intervalo de tempo e níveis de água no reservatório ao longo do dia, obtiveram-se por vezes valores pontualmente diferentes para o bombeamento, mas andamentos muito idênticos do nível de água no reservatório Boavista II, tal como se observa nas Figuras 5.4 e 5.5 relativas ao exemplo do Hidrograma I.

Pode assim concluir-se que os resultados gerados pela otimização simplificada se aproximam bastante (divergência máxima de 2.71 %) dos obtidos sem simplificação e é então plausível que, para os efeitos deste trabalho, seja feita esta aproximação. Apesar de não ser garantido encontrar o ótimo global com o modelo simplificado, por desconsiderar algumas soluções que poderiam ser viáveis, pode afirmar-se que se uma solução próxima (com uma pequena percentagem de desvio) é encontrada rapidamente, então os benefícios da celeridade de cálculo podem ser balançados com as imprecisões introduzidas pela simplificação (Pasha e Lansley, 2009).

Assim sendo, o modelo de gestão em tempo real e os resultados apresentados em diante foram obtidos com a adoção de uma altura de elevação constante entre os dois reservatórios. Foram também considerados 48 intervalos de tempo horários, isto é, o dia é discretizado em períodos de 30 minutos.

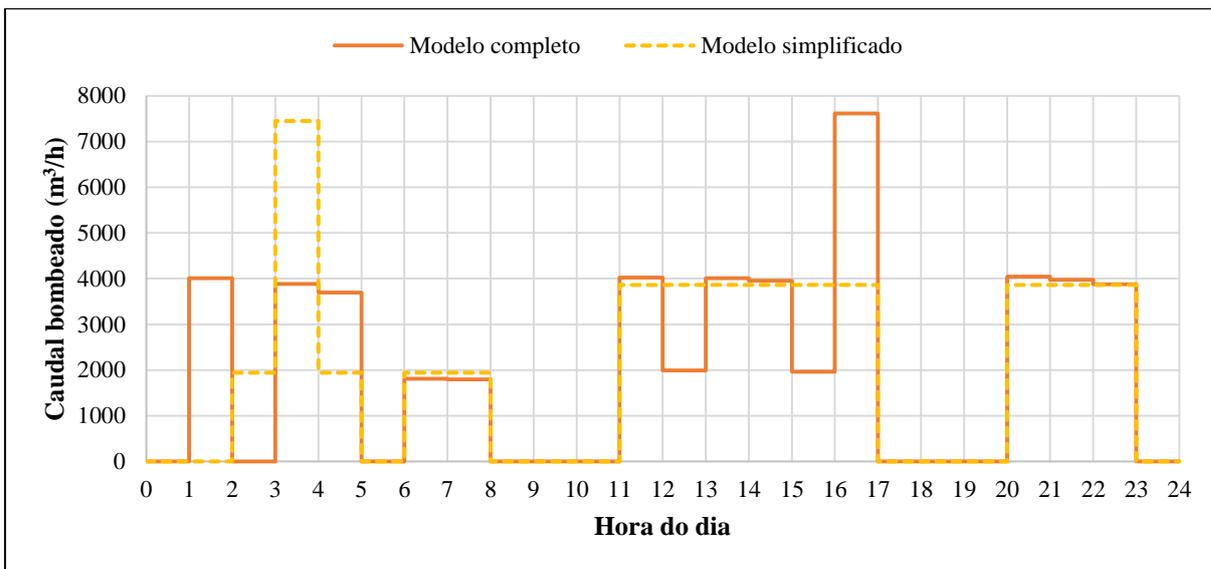


Figura 5.4 – Caudal bombeado ao longo do dia obtido pelo modelo completo e simplificado para otimização dos consumos do Hidrograma I

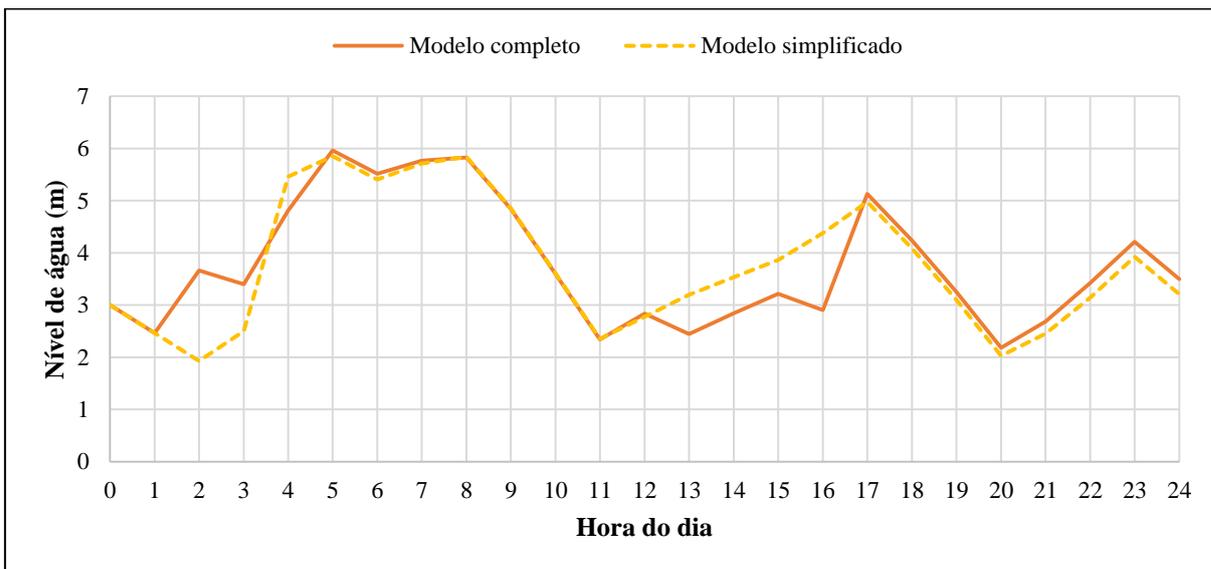


Figura 5.5 – Nível de água no reservatório Boavista II ao longo do dia obtido pelo modelo completo e simplificado para otimização dos consumos do Hidrograma I

5.3 Resolução do módulo de avaliação de desvios

Num modelo de gestão em tempo real é fulcral que se avalie se a estratégia definida se adequa corretamente à realidade. Para isso é necessário avaliar, em cada intervalo de tempo, o desvio

existente entre os caudais de consumo esperados e os efetivamente verificados e eleger, se necessário, um novo padrão de consumos que se assemelhe mais à realidade observada.

O indicador de desvio selecionado para incorporar o modelo foi o desvio quadrático dos níveis de água, real e esperado, pois foi o indicador que se revelou o mais adequado para antecipar as divergências entre as expectativas e a realidade observada. Este indicador é calculado, no Excel, de acordo com as equações (11), (12), (13) e (14) e as que se seguem.

$$S \cdot Nr_t = S \cdot Nr_{t-1} + \Delta Vr_t \quad , \quad \forall t > 1 \quad (19)$$

$$S \cdot Nr_t = S \cdot Ni + \Delta Vr_t \quad , \quad t = 1 \quad (20)$$

$$\Delta Vr_t = \left(\sum_{b=1}^{NB} QB_{b,t} - QCr_t \right) \cdot dt \quad (21)$$

$$\text{Indicador de desvio}_t = (Nr_t - Ne_t)^2 \quad (22)$$

Onde:

Nr_t	Nível de água (real) no final do intervalo t no reservatório Boavista II [m];
ΔVr_t	Diferença entre volumes de água entrados e saídos (reais) do reservatório Boavista II no final do intervalo t [m ³];
QCr_t	Caudal de água (real) que sai do reservatório Boavista II durante o intervalo de tempo t [m ³ /h].

A ordem de paragem da política de exploração ótima em curso e a seleção de uma nova estratégia de operação é dada no final do intervalo de tempo em análise, caso se verifique ser verdadeiro algum dos critérios apresentados no Quadro 5.2. A percentagem de desvio máxima que se permitiu foram 10 %, dado que este valor provou ser eficaz em reconhecer desvios consideráveis e ignorar desvios insignificantes. Foi também necessário acrescentar cinco critérios para cobrir a eventualidade, causada pelas imprevisibilidades do nível de água no reservatório ultrapassar o limite máximo ou mínimo admitido.

Quadro 5.2 – Critérios de paragem da estratégia implementada

Critério 1	Indicador de desvio superior a 10 % no intervalo de tempo em análise;
Critério 2	Se no intervalo de tempo que se segue está projetado bombear caudal através de uma bomba e se a variação máxima que o nível de água pode sofrer com o caudal bombeado por uma bomba somada ao nível de água real exceder o máximo admitido no reservatório;
Critério 3	Se no intervalo de tempo que se segue está projetado bombear caudal através de duas bombas e se a variação máxima que o nível de água pode sofrer com o caudal bombeado por duas bombas somada ao nível de água real exceder o máximo admitido no reservatório;
Critério 4	Se no intervalo de tempo que se segue está projetado bombear caudal através de três bombas e se a variação máxima que o nível de água pode sofrer com o caudal bombeado por três bombas somada ao nível de água real exceder o máximo admitido no reservatório;
Critério 5	Se no intervalo de tempo que se segue está projetado bombear caudal através de quatro bombas e se a variação máxima que o nível de água pode sofrer com o caudal bombeado por quatro bombas somada ao nível de água real exceder o máximo admitido no reservatório;
Critério 6	Se no intervalo de tempo que se segue não está projetado bombear água e se o nível de água no reservatório estiver suscetível de ficar abaixo do mínimo admitido*.

* Se o nível de água no reservatório for inferior a 2.62 m considera-se que está suscetível de descer abaixo do mínimo admitido. Este valor limite foi calculado pela variação máxima que o nível de água pode sofrer no reservatório num intervalo de tempo de 30 minutos, considerando para este efeito um consumo máximo de 5 156 m³/h.

Por variação máxima que o nível de água pode sofrer com o caudal bombeado para as quatro diferentes combinações de bombas entende-se a maior elevação que o nível de água no reservatório pode sofrer durante um intervalo de tempo de 30 minutos. Para este efeito foi utilizado um caudal de entrada (consumo) mínimo de 206 m³/h e um caudal de saída (bombeado) correspondente ao número de bombas associado.

Qualquer um dos critérios, caso se verifique a sua veracidade, dá um “sinal” de paragem da estratégia de operação implementada, pela anterior otimização, e indica ao operador a necessidade de gerar uma nova otimização com os dados da situação atual.

Por último, a escolha do hidrograma que mais se aproxima dos consumos verificados, dentro da base de dados existente, é realizada, por ordem sequencial, de acordo com as regras que se apresentam de seguida (Quadro 5.3).

Quadro 5.3 – Regras para a seleção do hidrograma mais próximo

Regra 1	Se nos últimos três intervalos de tempo o hidrograma mais próximo foi sempre o mesmo, então é esse o escolhido;
Regra 2	Se durante o intervalo de tempo t o segundo hidrograma mais próximo apresenta uma diferença inferior a 15 % e é o hidrograma que mais se aproximou em algum dos dois intervalos anteriores, então é esse o hidrograma de consumos selecionado;
Regra 3	Se nos últimos três intervalos de tempo o hidrograma mais próximo, em valor acumulado, foi sempre o mesmo, então é esse o hidrograma de consumos elegido;
Regra 4	Caso nenhuma das regras anteriores se verifique é selecionado o hidrograma mais repetido, por primeira aproximação, nos últimos três intervalos.

Por hidrograma mais próximo entende-se o hidrograma contemplado na base de dados que mais se aproxima, em consumos, durante o intervalo de tempo.

A Figura 5.6 ilustra um exemplo hipotético para aplicação da Regra 2 onde, tal como se observa, para o intervalo de tempo em análise, $t=3$, o hidrograma que mais se aproxima do consumo real (Hidrograma Y) não corresponde ao que mais acompanha os consumos nos dois períodos antecedentes (Hidrograma X).

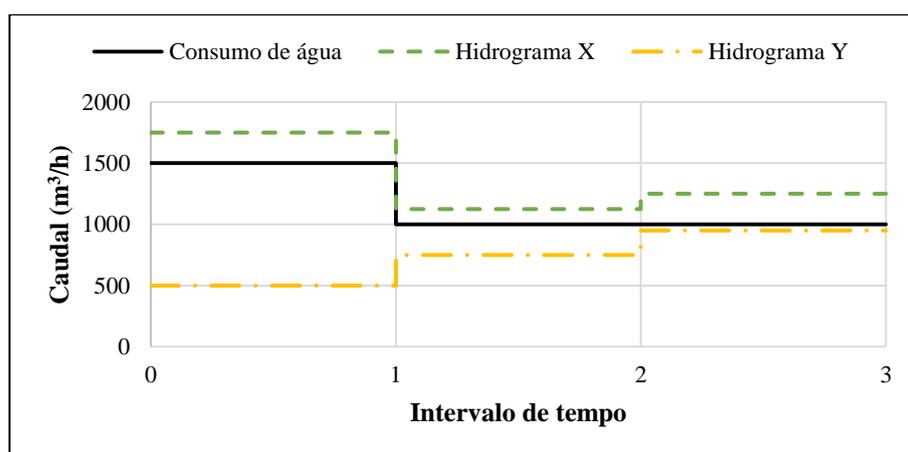


Figura 5.6 – Exemplo ilustrativo da Regra 2

5.4 Modelo de operação sem otimização

Para fins de comparação de custos diários de bombagem desenvolveu-se um modelo, recorrendo ao *software* Excel, para a operação sem otimização no sistema em estudo. O objetivo deste modelo é simular uma política de funcionamento onde as bombas são essencialmente comandadas por válvulas de nível nos reservatórios. Dado que não foi possível obter em tempo útil informação sobre a parametrização dos níveis de água no reservatório Boavista II que comandam o arranque e paragem dos grupos elevatórios, esta foi convencionada como de seguida se apresenta. Esta opção foi considerada admissível dados os propósitos meramente demonstrativos do exemplo comparativo em causa.

Os níveis limite que de seguida se apresentam resultaram de inúmeros testes, dos quais se procurou a solução que conduzia a menores custos.

Assim sendo, este modelo é governado por quatro níveis limite que pretendem representar o funcionamento das válvulas de nível: o nível mínimo admissível, o nível máximo admissível e dois níveis intermédios. De acordo com o nível de água no reservatório verificado no final do instante anterior estes limites ativam o funcionamento de uma, duas ou três bombas, considerando que a quarta bomba seria apenas ativada em situações de emergência. A Figura 5.7 ilustra um esquema dos níveis, onde o primeiro nível intermédio, N_1 , é igual a 2.25 m (que corresponde a 37.5 % do máximo do reservatório) e o segundo nível intermédio, N_2 , é igual a 3 m (correspondendo a 50 % do máximo do reservatório).

Para este exemplo ilustrativo foram utilizadas as mesmas condições que no modelo com otimização, nomeadamente, o mesmo número de intervalos de tempo, a mesma tarifa elétrica e a mesma condição média da altura total de elevação.

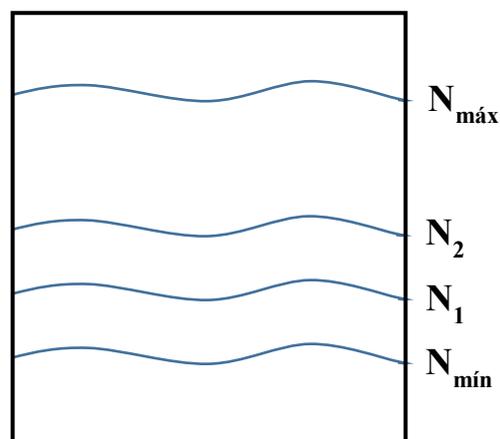


Figura 5.7 – Limites dos níveis de água no reservatório Boavista II

A escolha do número de bombas a ativar em cada intervalo de tempo segue de acordo com as regras apresentadas no Quadro 5.4.

Quadro 5.4 – Regras para o modelo de operação sem otimização

Regras	Nº de bombas em funcionamento
Nível de água entre N_{\min} e N_1	3
Nível de água entre N_1 e N_2	2
Nível de água entre N_2 e N_{\max}	1
Reservatório cheio	0
No período imediatamente anterior as bombas estavam desligadas e o nível de água está acima de N_2 *	0

* O objetivo desta regra é impedir que haja uma resposta demasiado repentista quando tal não é necessário uma vez que na meia hora anterior o reservatório atingiu o pleno armazenamento.

Para efeitos de deixar legítima a comparação de desempenho entre o modelo de simulação e o modelo de gestão otimizada obrigou-se o modelo de simulação a terminar o dia com um nível de água no reservatório Boavista II próximo do nível de água inicial, tal como acontece com o modelo de otimização. A nova regra imposta atua nas últimas três horas do dia, forçando a paragem das bombas, caso necessário, para impedir que o reservatório termine o dia com um volume de água excedente. Esta imposição deve-se ao facto de em primeiras simulações se ter obtido níveis elevados ao final do dia, o que iria penalizar os custos diários totais do modelo de simulação face ao modelo de otimização.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Descrição dos exemplos de aplicação

Com o objetivo de testar o funcionamento do modelo apresentado anteriormente e comparar os custos diários foram criados cinco cenários fictícios. Estes exemplos são apresentados de seguida para o modelo sem otimização e para o modelo de otimização em tempo real considerando 48 períodos diários. Para todos eles o início do dia é as 00h00 e o nível inicial igual a 3 m.

No Exemplo 1 prevê-se um consumo que segue o Hidrograma de consumos III, enquanto na realidade o consumo segue o Hidrograma I até às 12h00 e o Hidrograma IV nas restantes horas do dia.

No Exemplo 2 ao iniciar do dia é esperado um consumo igual ao do Hidrograma VI, mas na realidade verifica-se que os consumos são iguais a 90 e a 110 % do Hidrograma VI, das 00h00 até às 10h00 e das 10h00 às 24h00, respetivamente.

No Exemplo 3 o consumo real oscila, entre cada intervalo de tempo (meia hora), entre 110 e 90 % do consumo do Hidrograma I e prevê-se ao início do dia que o consumo siga o Hidrograma I.

No Exemplo 4 é esperado que siga os consumos do Hidrograma I, mas na realidade verifica-se que o consumo durante todo o dia é igual a 90 % do consumo no Hidrograma I.

No Exemplo 5 prevê-se ao iniciar do dia um consumo igual ao do Hidrograma IV, no entanto, verifica-se que os consumos são iguais a 95 % do Hidrograma V até às 6h00 e nas remanescentes horas é igual a 105 % do consumo do Hidrograma VI.

Os cinco exemplos pretendem testar a resposta do modelo a diferentes mudanças extremas de padrões de consumo ao longo do dia.

6.2 Análise e discussão de resultados

As otimizações foram geradas num computador portátil com um processador Intel Pentium de 2.30 GHz, com 4.00 GB de memória RAM e um sistema Windows de 64 bits e levaram no máximo 30.4 segundos a obter a solução ótima para o horário de funcionamento das bombas para um período de 24 horas, discretizado em intervalos de 30 minutos.

Nesta secção são apresentados os resultados obtidos pelo modelo de otimização e pelo modelo de simulação para os cinco exemplos descritos. As soluções do modelo de otimização incluem o consumo de água esperado e real, o caudal aduzido/bombeado, o nível de água esperado e real e as sucessivas otimizações realizadas ao longo do dia. As soluções do modelo de simulação (simulador comandado por níveis de água) são calculadas com o consumo de água real, sendo apresentados os correspondentes valores do caudal bombeado e do nível de água no reservatório Boavista II ao longo do dia.

Por “consumo esperado” entende-se o consumo projetado pelo modelo para os períodos temporais imediatos. Esta projeção está constantemente a ser refeita com base na análise do passado recente dos consumos. O modelo de otimização só pode tomar as suas decisões com base no “consumo esperado” uma vez que desconhece *à priori* o consumo real que irá ocorrer ao longo do dia.

Por “consumo real” entende-se o consumo que efetivamente está a ocorrer ao longo do dia e que o modelo de otimização desconhece *à priori*. O “consumo real” é utilizado pelo modelo de simulação do funcionamento das bombas comandado pelas sondas de nível de água no reservatório.

Por “nível de água esperado” entende-se o nível de água existente no reservatório Boavista II por consequência dos caudais de entrada, dados pela política de bombeamento gerada pela otimização, e dos caudais de saída correspondentes ao “consumo esperado”.

Por “nível de água real” entende-se o nível de água existente no reservatório Boavista II por consequência dos caudais de entrada, dados pela política de bombeamento gerada pela otimização, e dos caudais de saída correspondentes ao “consumo real”.

Nas Figuras 6.1, 6.4, 6.7, 6.10 e 6.13 estão representados, para os cinco exemplos, os consumos de água reais e esperados obtidos pelo modelo de otimização, bem como, o momento em que foram geradas novas otimizações e quais os Hidrogramas de consumo da base de dados que mais se aproximam do consumo.

As Figuras 6.2, 6.5, 6.8, 6.11 e 6.14 apresentam, para cada exemplo, além da tarifa energética aplicada, os caudais aduzidos ao longo do dia pelos dois modelos, para comparação da gestão de bombeamento.

Nas Figuras 6.3, 6.6, 6.9, 6.12 e 6.15 está representado o nível de água no reservatório ao longo do dia, real e esperado pelo modelo de otimização, e real dado pelo modelo de simulação, para os diferentes exemplos introduzidos.

No Exemplo 1 o consumo real até às 12h00 é igual ao consumo do Hidrograma I, mas ao iniciar o dia foi previsto um consumo de acordo com o Hidrograma III. Observa-se na Figura 6.1 que o modelo levou apenas uma hora para realizar uma nova otimização que corrigiu o desvio existente entre o consumo real e o esperado. Às 12h00 o padrão de consumos é alterado e começa a seguir os consumos do Hidrograma IV. Observa-se ainda na Figura 6.1 que esta mudança levou o modelo de gestão a efetuar nova otimização às 12h30, mas não escolheu o hidrograma certo, daí o desvio obtido das 12h00 às 14h30, onde houve nova otimização que já encontrou o hidrograma correto. A partir da Figura 6.2 constata-se que o bombeamento é totalmente evitado durante os períodos de ponta.

No Exemplo 2 o consumo real não é igual a nenhum hidrograma mas acompanha o Hidrograma IV com um desvio negativo de 10 % até as 10h00 e com um desvio positivo de 10 % nas seguintes horas. A partir da Figura 6.4 observa-se que o consumo esperado vai seguindo os consumos dos Hidrogramas III, IV e VI, mas sem nunca se desviar seriamente do consumo real verificado. Na Figura 6.5 é possível verificar que o ocorre bombeamento das 19h30 às 20h00 que corresponde a um período de ponta e que apesar do nível de água real se encontrar perto dos 2.5 m esse período correspondeu ao início de nova otimização o que despoletou o bombeamento para minimizar o desvio do previsto.

No Exemplo 3 o consumo altera o padrão às 8h00 e novamente às 16h00 o que levou a desvios entre o consumo esperado e o real. O primeiro foi resolvido após 1h30 com uma nova otimização que encontrou prontamente o hidrograma de consumos realmente verificado. Para a segunda alteração de padrão foram necessárias duas novas otimizações, já que a primeira como foi apenas meia hora após o desvio ainda não conseguiu encontrar o hidrograma correto (devido às regras de escolha de novo diagrama se basearem na última 1h30). A partir da Figura 6.5 verifica-se que houve um período de meia hora durante a tarifa de ponta onde existiu bombeamento, e apesar do nível de água no reservatório se encontrar próximo do pleno houve um afastamento substancial do previsto e foi gerada nova otimização que forçou o bombeamento para minimizar o desvio.

No Exemplo 4 o consumo real ao longo do dia é igual a 90 % do consumo do Hidrograma I e observa-se através da Figura 6.10 que é quase sempre selecionado o Hidrograma I para o consumo esperado, à exceção do período entre as 12h30 e as 14h00 onde o modelo selecionou o Hidrograma VI, mas após um desvio considerável do nível de água real no reservatório em relação ao previsto (cf. Figura 6.12), foi gerada uma nova otimização que elegeu novamente o Hidrograma I. Observa-se ainda a partir da Figura 6.12 que o nível de água real se encontra constantemente desviado do estimado e foram desencadeadas seis novas otimizações ao longo do dia, mas não ocorreu bombeamento durante a tarifa mais elevada (cf. Figura 6.11).

No Exemplo 5, o consumo real é igual a 95 % do consumo do Hidrograma V até às 6h00 e igual a 105 % do consumo do Hidrograma VI no restante dia. Verifica-se que o consumo esperado segue sempre pelo hidrograma de consumos mais próximo, à exceção do período entre as 6h00 e as 7h30, onde se pode observar a partir da Figura 6.13 que foram precisas três novas otimizações para o modelo reagir corretamente à mudança de padrão de consumos que se deu. Em semelhança ao Exemplo 2, existiu meia hora de bombeamento durante o período de ponta, das 20h30 às 21h00, (cf. Figura 6.14) causado por um desvio do nível de água real do esperado que gerou uma nova otimização (cf. Figura 6.15).

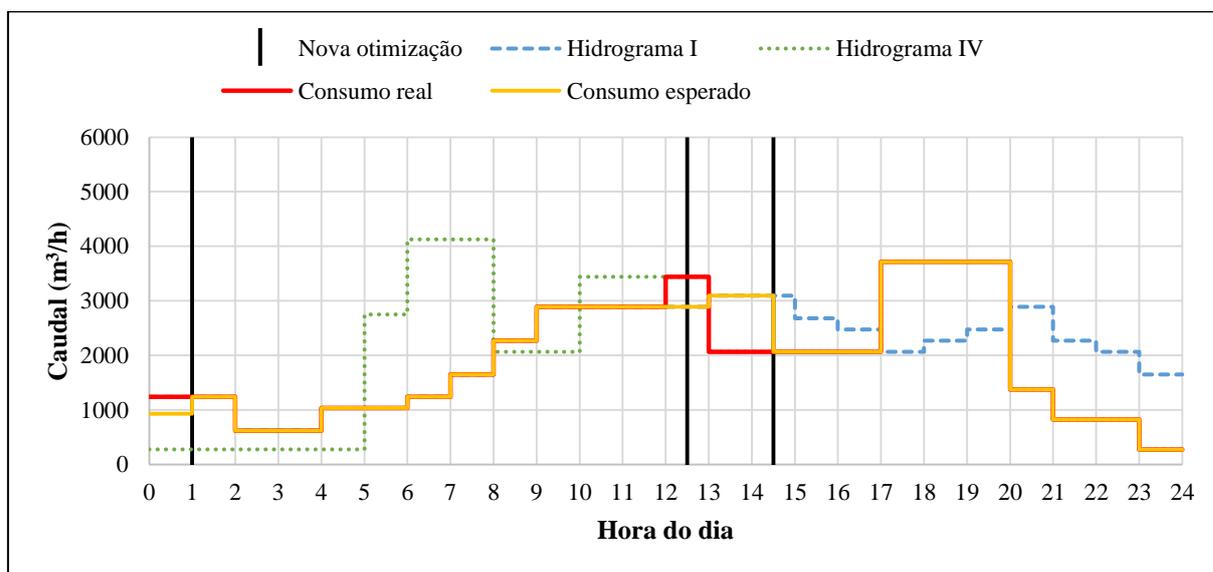


Figura 6.1 – Consumo de água real e esperado dado pelo modelo de otimização para o Exemplo 1

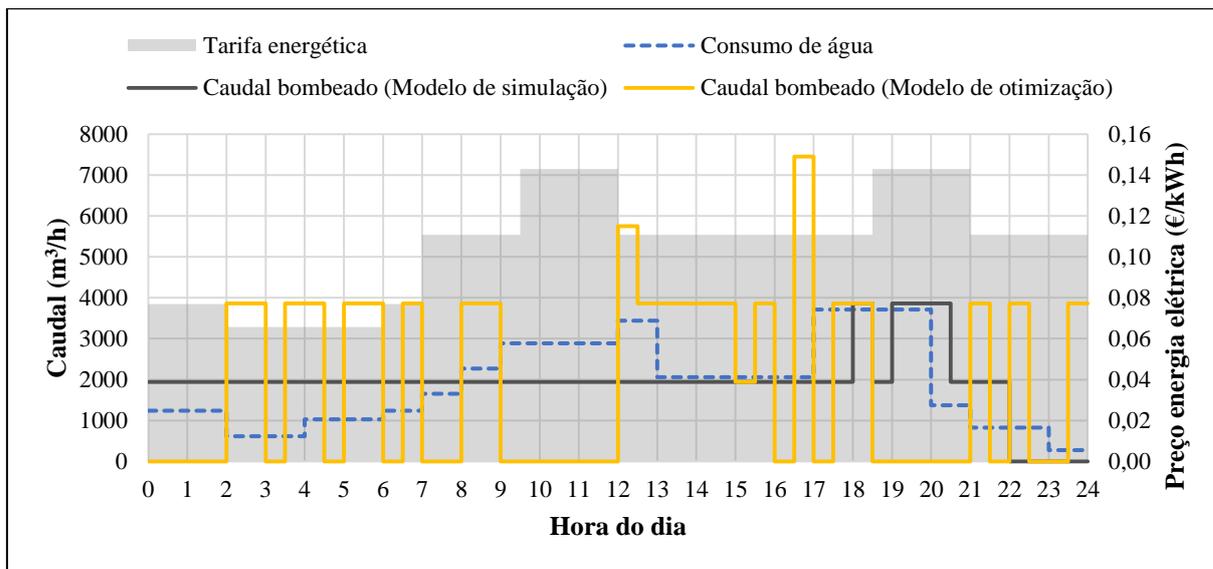


Figura 6.2 – Caudal bombeado ao longo do dia no Exemplo 1 pelo modelo de simulação e pelo modelo de otimização

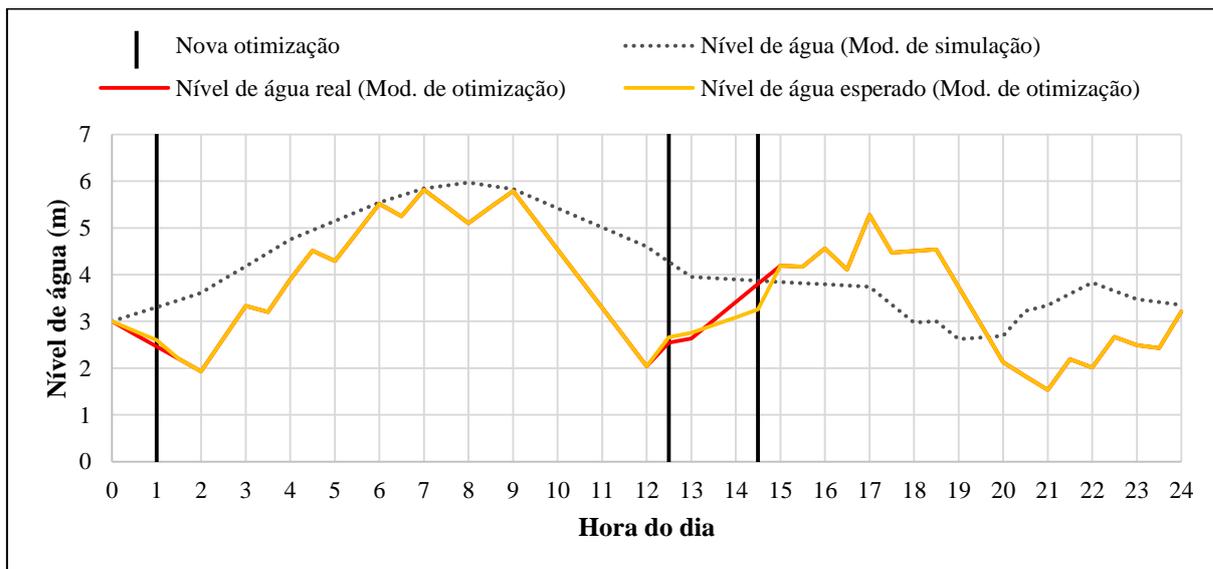


Figura 6.3 – Níveis de água no reservatório ao longo do dia no Exemplo 1 pelo modelo de simulação e pelo modelo de otimização

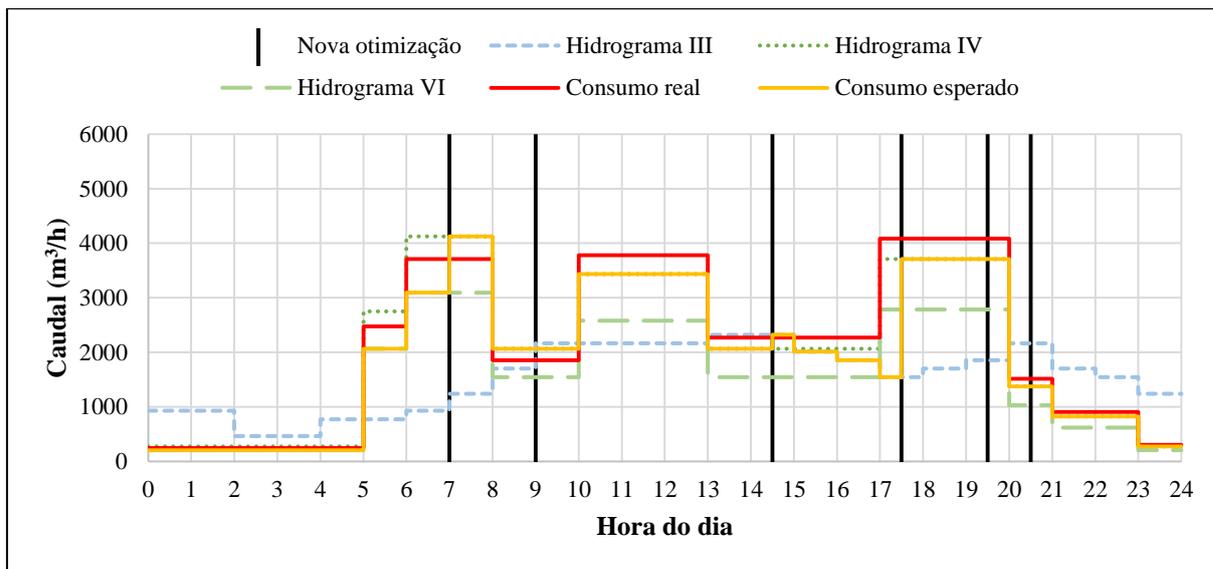


Figura 6.4 – Consumo de água real e esperado dado pelo modelo de otimização para o Exemplo 2

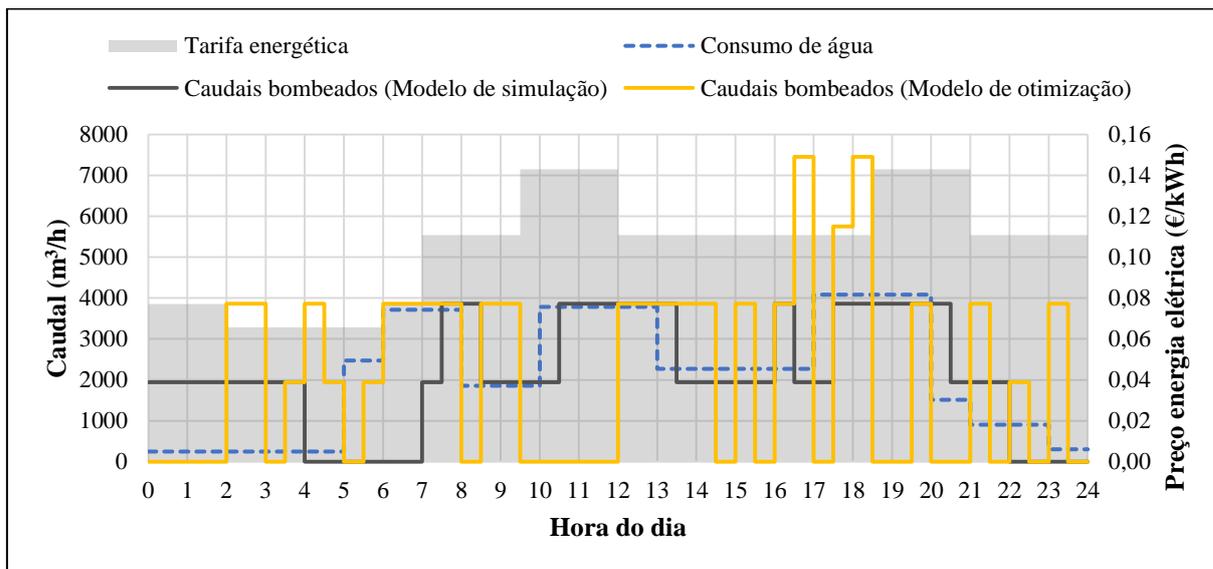


Figura 6.5 – Caudal bombeado ao longo do dia no Exemplo 2 pelo modelo de simulação e pelo modelo de otimização

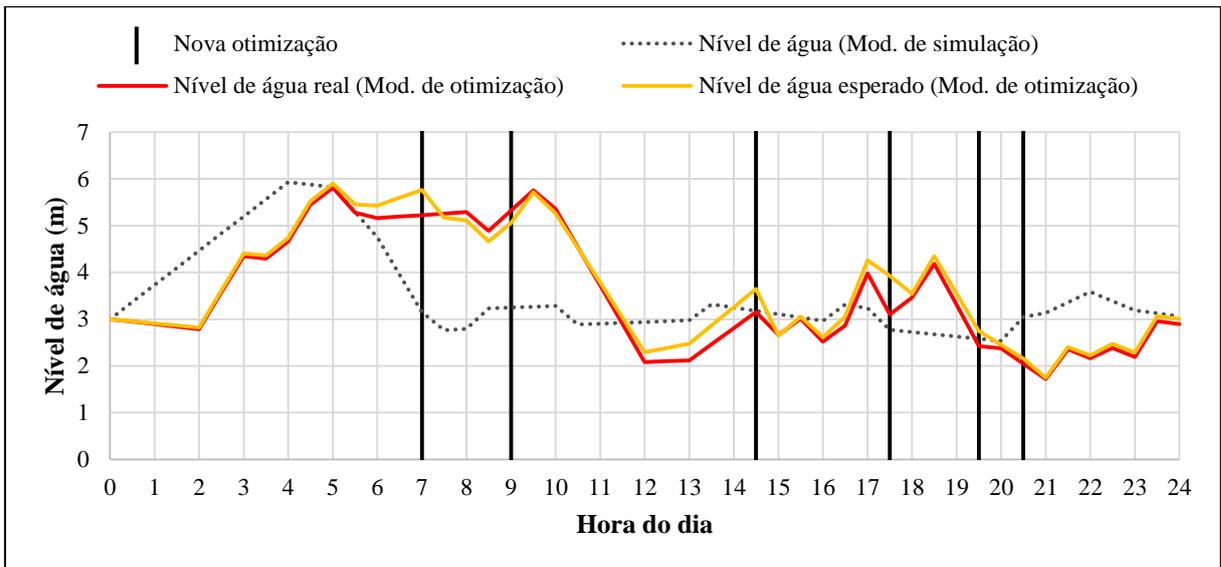


Figura 6.6 – Níveis de água no reservatório ao longo do dia no Exemplo 2 pelo modelo de simulação e pelo modelo de otimização

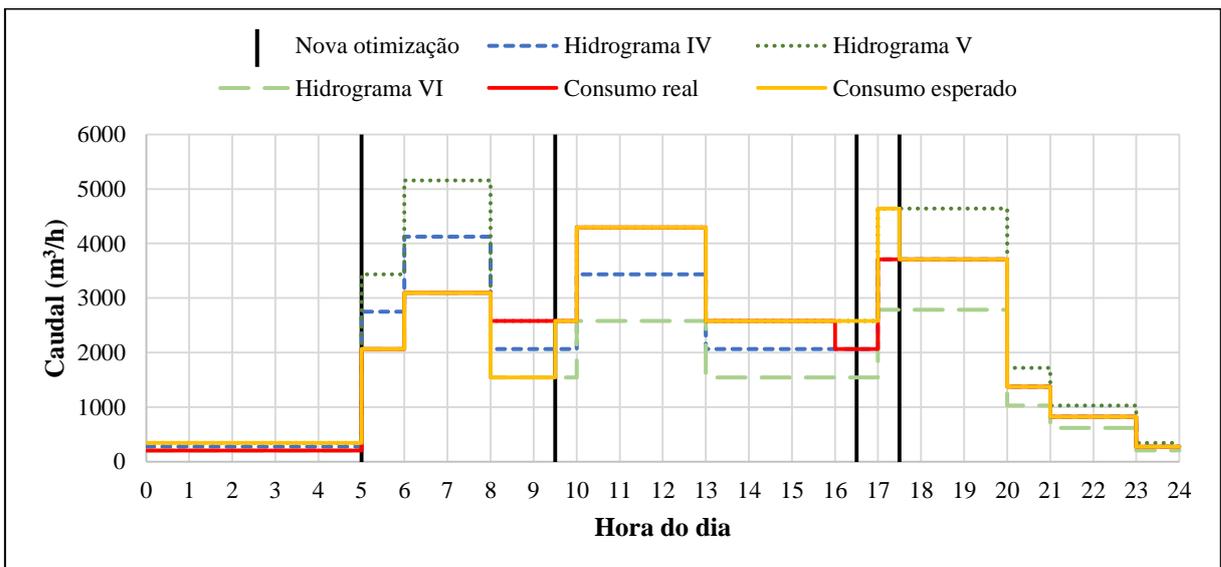


Figura 6.7 – Consumo de água real e esperado dado pelo modelo de otimização para o Exemplo 3

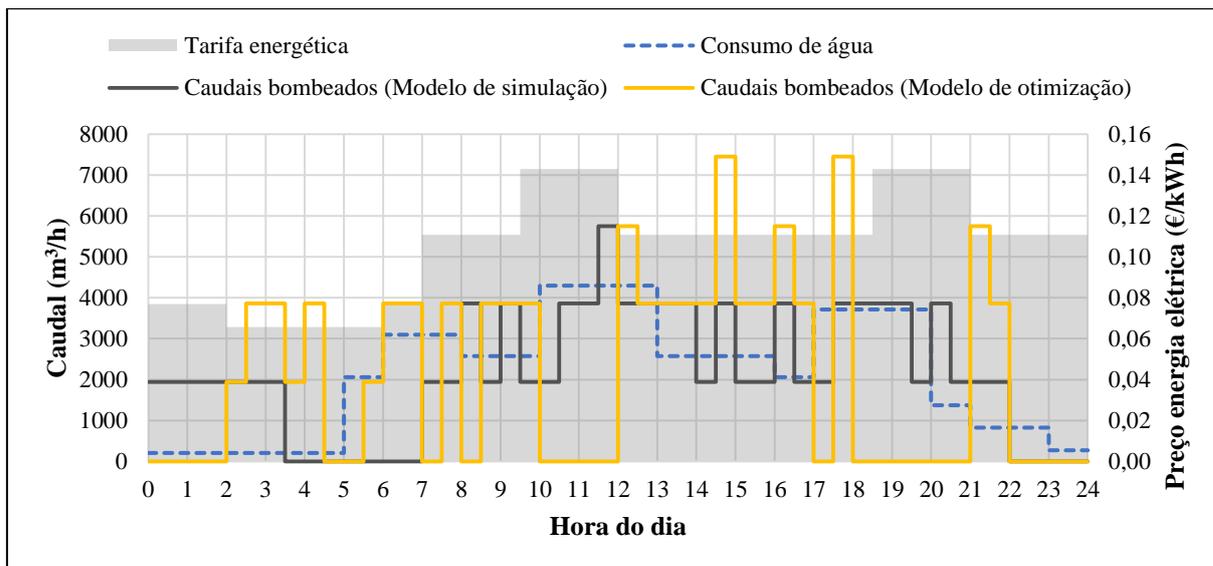


Figura 6.8 – Caudal bombeado ao longo do dia no Exemplo 3 pelo modelo de simulação e pelo modelo de otimização

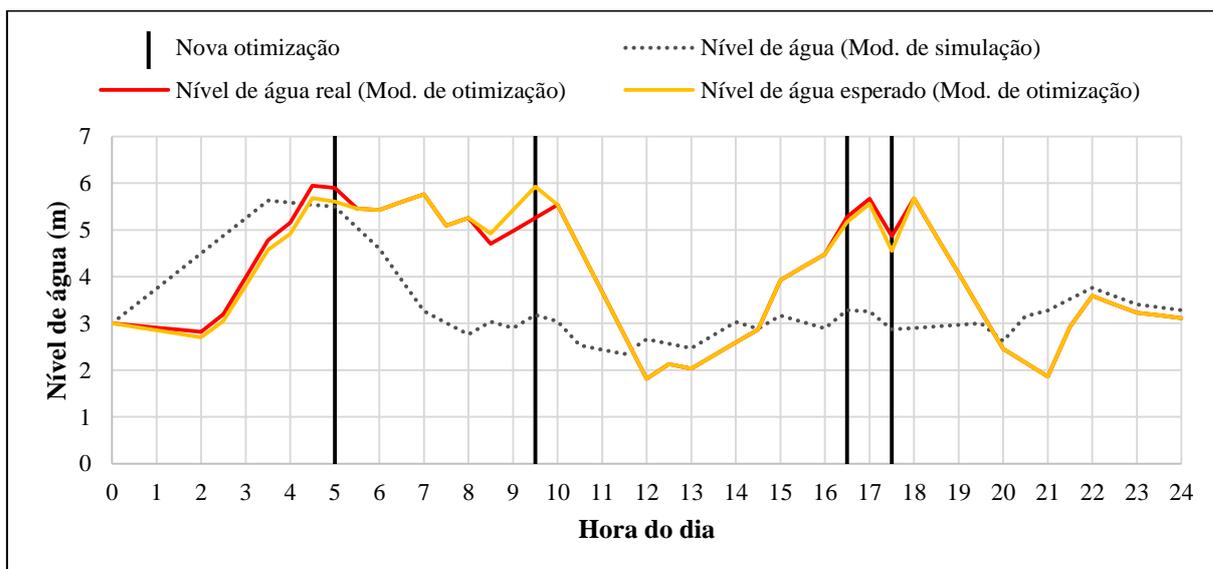


Figura 6.9 – Níveis de água no reservatório ao longo do dia no Exemplo 3 pelo modelo de simulação e pelo modelo de otimização

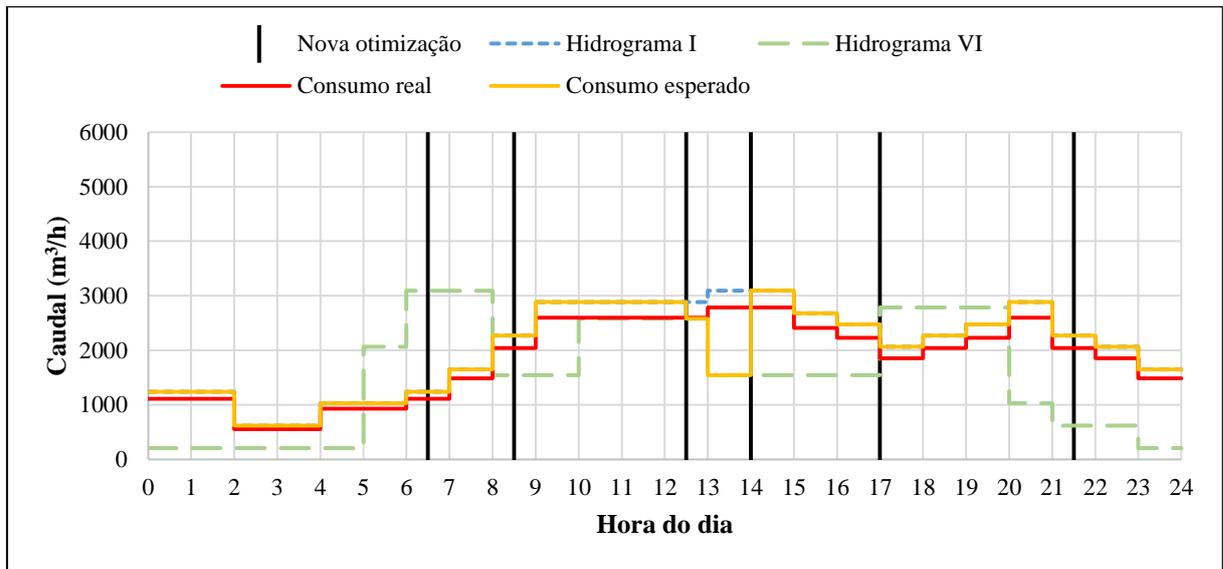


Figura 6.10 – Consumo de água real e esperado dado pelo modelo de otimização para o Exemplo 4

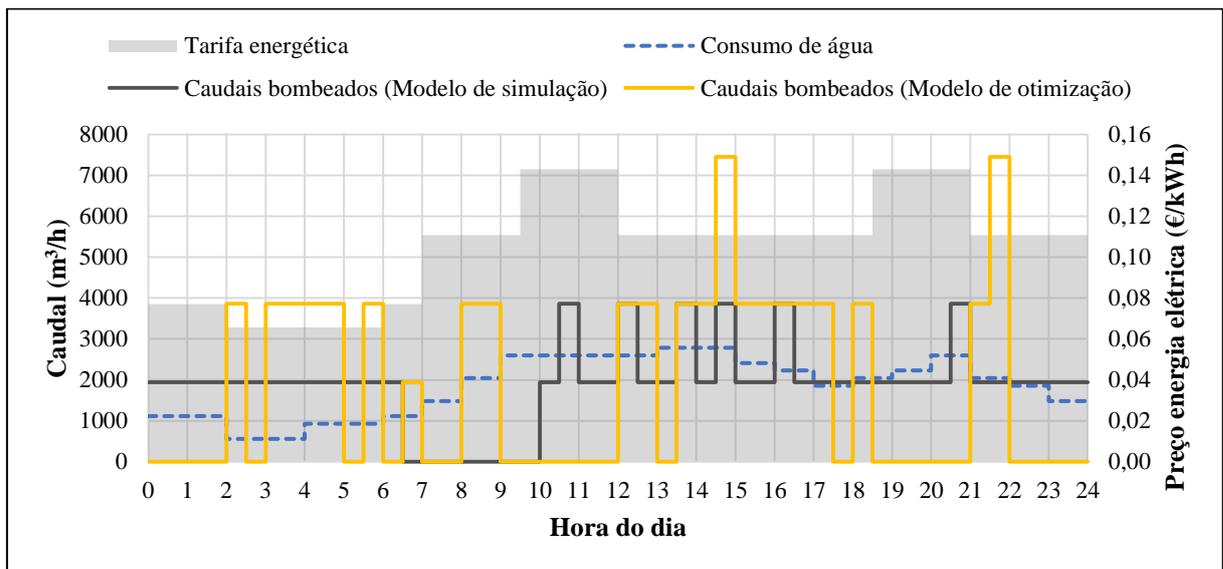


Figura 6.11 – Caudal bombeado ao longo do dia no Exemplo 4 pelo modelo de simulação e pelo modelo de otimização

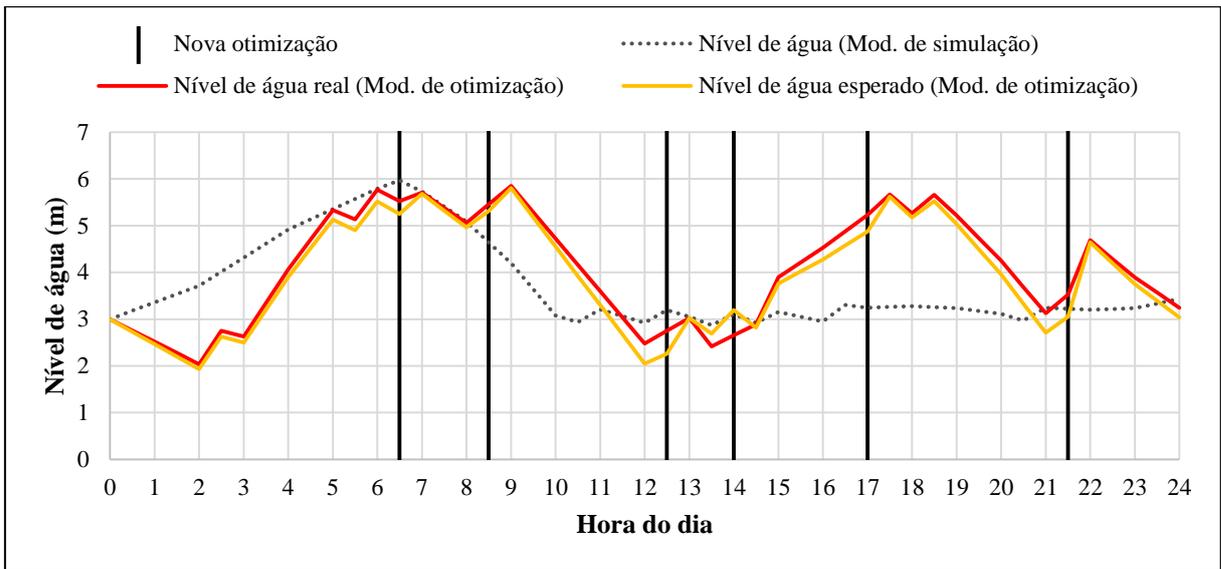


Figura 6.12 – Níveis de água no reservatório ao longo do dia no Exemplo 4 pelo modelo de simulação e pelo modelo de otimização

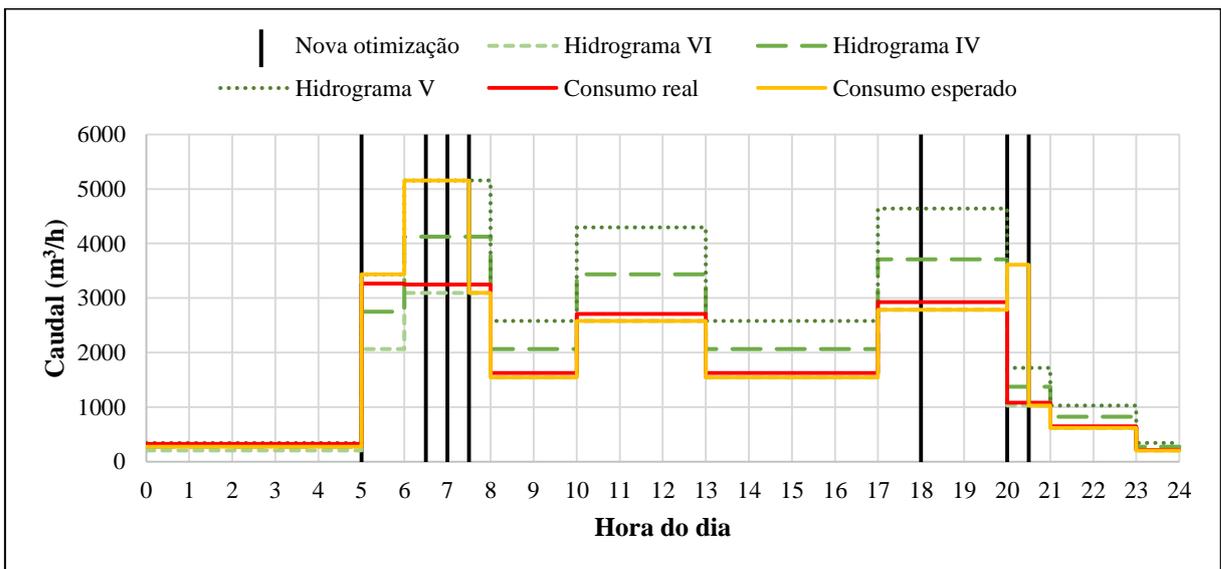


Figura 6.13 – Consumo de água real e esperado dado pelo modelo de otimização para o Exemplo 5

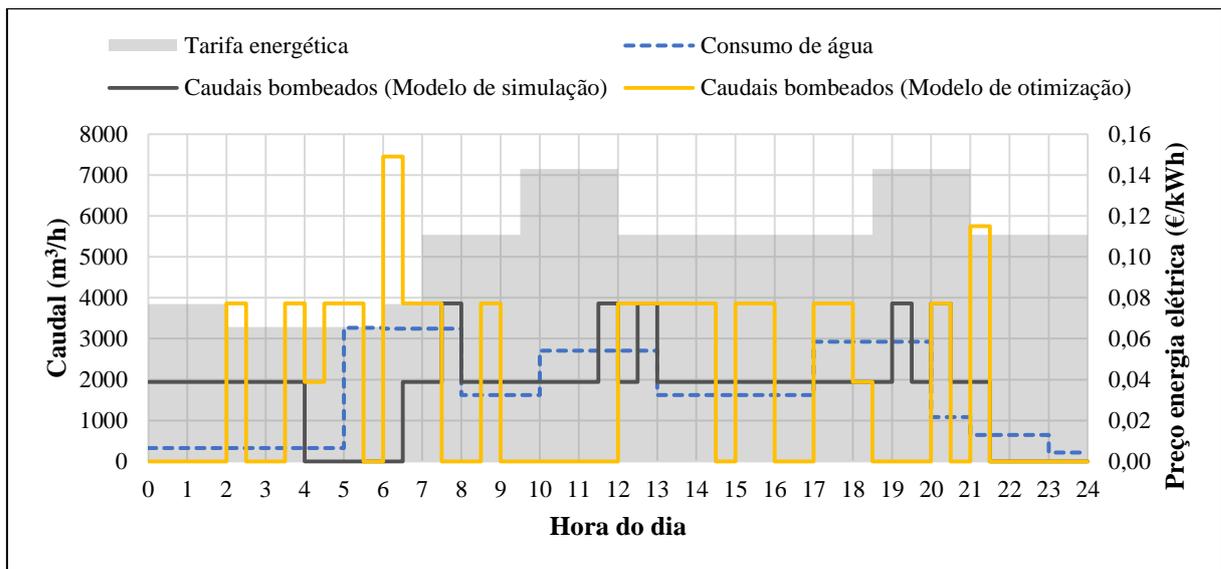


Figura 6.14 – Caudal bombeado ao longo do dia no Exemplo 5 pelo modelo de simulação e pelo modelo de otimização

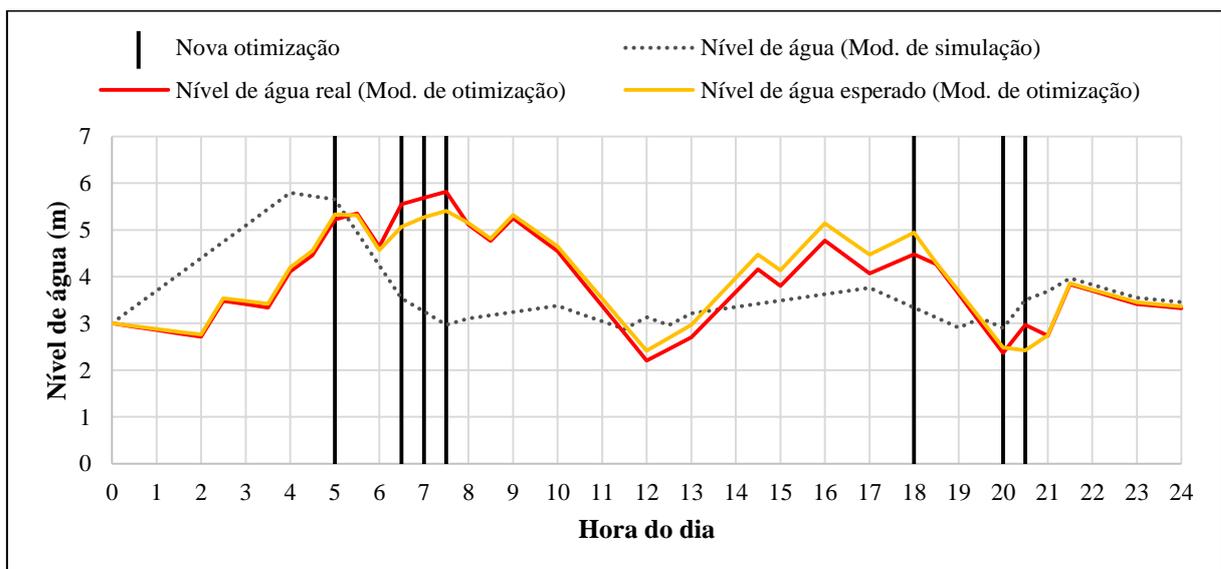


Figura 6.15 – Níveis de água no reservatório ao longo do dia no Exemplo 5 pelo modelo de simulação e pelo modelo de otimização

Uma primeira observação que se tira a partir das figuras alusivas aos níveis de água ao longo do dia é que o modelo de simulação apresenta sempre o mesmo padrão de resposta: inicia o dia a encher o reservatório até atingir o pleno e de seguida começa a descer, continuando o restante dia a oscilar muito próximo do nível médio. Já no modelo de otimização os níveis de água no reservatório tendem a atingir dois picos durante o dia de exploração. Observa-se também que o

modelo de gestão otimizada usufrui da capacidade de reserva do reservatório, ao contrário do modelo de simulação que apresenta um padrão mais conservativo e raramente permite que o nível de água no reservatório desça a valor muito inferior a 3 m.

Analisando as figuras referentes aos caudais aduzidos pelos dois modelos, podemos verificar que o modelo de otimização alterna o bombeamento entre as quatro bombas, enquanto no modelo de simulação o bombeamento é mais constante e predominantemente de uma bomba.

Constata-se ainda que o modelo de gestão otimizada toma partido da estrutura tarifária, permitindo que o bombeamento durante os períodos de ponta seja evitado ou reduzido, compensando quando a tarifa é mais baixa. No Quadro 6.1 estão apresentados os caudais totais bombeados durante a tarifa mais cara (período de ponta) pelo modelo de gestão em tempo real e pelo modelo sem otimização. É possível verificar que na estratégia sem otimização, ao contrário da estratégia otimizada, não existe tentativa em evitar o bombeamento de água durante os períodos de ponta.

Quadro 6.1 – Comparação de caudais bombeados em período de ponta entre o modelo de otimização e o modelo sem otimização para os diferentes exemplos apresentados

<i>Exemplos</i>	<i>Caudal diário total bombeado em período de ponta (m³/s)</i>				
	1	2	3	4	5
<i>Modelo de otimização</i>	0	1 931	1 931	0	1 931
<i>Modelo de simulação</i>	12 586	16 431	16 413	10 655	12 586

No Quadro 6.2 pode observar-se os custos diários de bombeamento, para os diferentes exemplos apresentados, pelo modelo de gestão em tempo real e pelo modelo sem otimização. Verifica-se que através do modelo de otimização apresentado é possível reduzir os custos energéticos até 14 %, quando comparado com uma estratégia de operação sem otimização.

Quadro 6.2 – Comparação de custos diários de bombeamento entre o modelo de otimização e o modelo sem otimização apresentados para os diferentes exemplos

	<i>Custo otimizado (€)</i>	<i>Custo sem otimização (€)</i>	<i>Poupança (€)</i>	<i>Poupança (%)</i>
<i>Exemplo 1</i>	780.03	866.74	86.70	10
<i>Exemplo 2</i>	893.42	1 016.65	123.23	12
<i>Exemplo 3</i>	911.90	1 042.39	130.49	13
<i>Exemplo 4</i>	766.28	842.09	75.81	9
<i>Exemplo 5</i>	699.27	809.09	109.82	14

Em termos anuais a poupança média correspondente aos exemplos diários simulados pode ascender aproximadamente a 60 000 €. Note-se que dado o elevado valor da fatura energética anual, quaisquer poupanças relativas por menor que sejam traduzem-se em elevados valores absolutos de poupança monetária.

Para se poder tirar melhores conclusões dos resultados obtidos é também importante saber quais os caudais diários totais consumidos e aduzidos para cada exemplo pelos dois modelos, bem como o nível de água no reservatório ao final do dia. Estes valores encontram-se expostos no Quadro 6.3.

Quadro 6.3 – Caudais de água diários consumidos e aduzidos, bem como os níveis de água no reservatório ao final do dia, para os diferentes exemplos dado pelo modelo de simulação e pelo modelo de otimização

	<i>Exemplo 1</i>	<i>Exemplo 2</i>	<i>Exemplo 3</i>	<i>Exemplo 4</i>	<i>Exemplo 5</i>
<i>Caudal diário consumido [m³]</i>	45 719	51 150	51 563	44 550	40 631
<i>Caudal diário aduzido (Modelo de otimização) [m³]</i>	46 199	50 904	51 820	45 118	41 375
<i>Caudal diário aduzido (Modelo de simulação) [m³]</i>	46 538	51 288	52 222	45 549	41 677
<i>Nível de água final (Modelo de otimização) [m]</i>	3.21	2.89	3.11	3.25	3.32
<i>Nível de água final (Modelo de simulação) [m]</i>	3.35	3.06	3.29	3.43	3.45

A primeira conclusão que se tira por observação do Quadro 6.3 é que o caudal diário total aduzido pelo modelo de simulação é ligeiramente superior ao aduzido pelo modelo de otimização, o que também é traduzido pelos níveis finais no reservatório. Este volume de água remanescente que fica no reservatório pelo modelo de simulação face ao modelo de otimização é um fator que poderá inflacionar os ganhos do modelo de otimização. Mas pode-se afirmar que não é um fator determinante, pois o nível de água final excedente no modelo de simulação que varia entre 0.13 e 0.18 m (cf. Quadro 6.3) não é proporcional à poupança existente nos vários exemplos para o modelo de otimização (cf. Quadro 6.2). Isto é, aos exemplos a que corresponde um maior excedente de água no reservatório pelo modelo de simulação não correspondem aos exemplos onde existe menor diferença de custos entre os dois modelos, verificando-se até o oposto no caso do Exemplo 4. Concluindo-se desta forma que o fator determinante será a realocação dos consumos.

Outra conclusão que se tira por observação do Quadro 6.2 é que a maior poupança percentual se encontra no Exemplo 5 mas no Exemplo 2 e 3 existe maior poupança monetária, o que é justificado pelo facto de nos Exemplos 2 e 3 existir um maior consumo de água diário, logo uma maior necessidade de bombeamento (cf. Quadro 6.3).

No Exemplo 2 o reservatório termina o dia com o nível de água ligeiramente inferior à condição imposta de 3 m, isto porque o consumo esperado não correspondeu à realidade e não foi adicionada nenhuma regra para executar uma nova otimização nestes casos, existindo apenas a restrição para o nível de água final esperado ser superior a 3 m.

7 CONCLUSÕES E PISTAS PARA FUTUROS DESENVOLVIMENTOS

Esta dissertação apresenta uma contribuição para a análise de estratégias de gestão visando a redução dos elevados custos energéticos associados ao bombeamento de água nas estações elevatórias. Atualmente, a gestão do horário de funcionamento de bombas é geralmente comandada através de sondas de nível no reservatório, tendo como principal objetivo assegurar a disponibilidade de água para a população. Dado que 80 a 90 % da energia consumida nos SAA é atribuída a grupos motobomba (Vilanova e Balestieri, 2014) qualquer poupança por mais reduzida de seja terá sempre uma considerável expressão, pelo que o presente estudo se encontra justificado do ponto de vista da oportunidade e pertinência do assunto abordado.

O modelo aqui proposto teve como objetivo implementar um processo de otimização, em tempo real, do horário de funcionamento das bombas numa estação elevatória. Elegendo como critério primordial os custos operacionais que derivam do bombeamento, foi possível criar e implementar uma estratégia de cálculo consistindo em sucessivas otimizações guiadas por um processo de previsão/correção, a qual atende às variações no consumo de água e que tira partido da descontinuidade da estrutura tarifária da eletricidade bem como da capacidade de armazenamento do reservatório de jusante.

Com base nos exemplos efetuados verificou-se que dada a variabilidade no consumo e a dificuldade da sua previsão é importante ajustar atempadamente a operação do sistema ao longo do dia. Nesse sentido o passo de discretização no tempo teve de ser reduzido o que aliado a uma inicialmente mais complexa modelação matemática do problema se verificou conduzir a um processo de resolução que exigia ajustes manuais caso a caso dos parâmetros propiciadores de adequada convergência. Dado o objetivo de implementar uma otimização em tempo real, tornou-se crucial garantir que a solução ótima fosse alcançada em reduzido tempo computacional independentemente das condições particulares de cada exemplo. Tal justificou a opção pela simplificação de considerar a altura de elevação igual ao seu valor médio.

Para efeitos de comparação foi desenvolvido e implementado um modelo de simulação da operação das bombas comandado unicamente por sondas de nível de água no reservatório da Boavista II. Este modelo de simulação não implementa portanto qualquer estratégia de otimização perante a estrutura descontínua do tarifário da energia elétrica. A comparação dos resultados obtidos com este modelo de simulação e com o modelo de otimização em tempo real

mostraram uma redução de custos com aquisição de energia elétrica entre 9 a 14 %, o que anualmente pode corresponder a uma poupança até 60 000 €. Isto demonstra que o modelo de otimização em tempo real poderá ter uma boa aplicabilidade em sistemas reais com a vantagem de que não implicaria a realização de grandes investimentos nem alterações estruturais dado que se trata essencialmente de *software* de apoio à decisão. Mesmo em situações onde não é possível reduzir os consumos energéticos associados ao bombeamento de água, verificou-se que o modelo de otimização em tempo real tentou sempre realocá-los no tempo de forma o mais favorável possível tendo em conta a estrutura descontínua do tarifário da energia elétrica. Isto revela-se vantajoso também do ponto de vista da sustentabilidade ambiental dos SAA, uma vez que corresponde a colocar os seus consumos energéticos nos períodos temporais em que a rede elétrica nacional apresenta maiores excedentes de produção aumentando portanto a eficácia da sua gestão.

O algoritmo utilizado (COINBONMIN) mostrou ser eficiente e veloz para o caso de estudo apresentado. No entanto, para situações mais complexas seria interessante testar outros tipos de modelos de otimização, como por exemplo, um modelo híbrido que combine PL com um algoritmo de procura local, como o apresentado em Giacomello et al. (2013), que alia a celeridade necessária para aplicação em gestão em tempo real com a possibilidade de representar fielmente todo o sistema.

Neste trabalho não foi tido em conta o número de vezes que cada bomba é ligada e desligada, o que pode ser um fator importante para a manutenção das bombas, sendo que existe um risco de estas se deteriorarem se forem excessivas as solicitações intermitentes ao longo do dia. Neste aspeto os resultados obtidos pelo modelo de simulação têm vantagem sobre o modelo de otimização, pois o bombeamento é mais constante e não envolve tantas interrupções. Seria por isso interessante, num trabalho futuro, incorporar restrições ou penalidades que traduzissem a importância deste aspeto nos resultados finais do modelo de otimização.

Uma outra sugestão para trabalho futuro seria processar os dados históricos de consumo de água da população detidos pelas entidades gestoras de SAA, de modo a desenvolver um conjunto de hidrogramas que representassem de modo o mais fiel possível o consumo de água para uma maior diversidade de dias “típicos”.

Por último, do ponto de vista informático, seria também interessante fundir as duas plataformas (Excel e GAMS) em que assenta o modelo de otimização em tempo real, numa única interface o que se revelaria mais cómodo do ponto de vista do utilizador.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AdCL@ (2016). *Águas do Centro Litoral*. Consultado a 13 de agosto de 2016, de <http://www.aguasdocentrolitoral.pt/>.
- Aquis@ (2016). *Aquis Software - Schneider Electric Corporate*. Consultado a 24 de novembro de 2016, de <http://software.schneider-electric.com/products/aquis/>.
- Bunn, S. (2007). *Closing the Loop in Water Supply Optimisation*. The IET Water Event.
- Bunn, S. e Reynolds, L. (2009). *The energy-efficiency benefits of pump-scheduling optimization for potable water supplies*. IBM Journal of Research and Development, Vol. 53, No 3, Paper 5, pp 1-13.
- Cabrera, E. e Vela, A. (1995). *Improving efficiency and reliability in water distribution systems*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Carrizo, I. B., Reis, L. F. R., Walters, G. A., Savic, D. (2004). *Operational optimization of WDS based on multiobjective genetic algorithms and operational extraction rules using data mining*. ASCE, ed. Critical Transitions in Water and Environmental Resources Management. Salt Lake City, UT.
- Cembrano, G., Quevedo, J., Puig, V., Pérez, R., Figueras, J., Verdejo, J., Escaler, I., Ramón, G., Barnet, G., Rodríguez, P., Casas, M. (2011). *PLIO: a generic tool for real-time operational predictive optimal control of water networks*. Water Science & Technology, Vol. 64, No 2, pp 448-459.
- Cembrano, G., Wells, G., Quevedo, J., Pérez, R., Argelaguet, R. (2000). *Optimal control of a water distribution network in a supervisory control system*. Control Engineering Practice, Vol. 8, No 10, pp 1177-1188.
- Cherchi, C., Badruzzaman, M., Oppenheimer, J., Bros, C., Jacangelo, J. (2015). *Energy and water quality management systems for water utility's operations: A review*. Journal of Environmental Management, Vol. 153, pp 108-120.
- Coelho, B. C. (2011). *Optimização de Recursos Energéticos em Redes de Abastecimento de Água*. Dissertação de Mestrado em Sistemas Energéticos Sustentáveis. Departamento de Economia, Gestão e Engenharia Industrial, Universidade de Aveiro, Aveiro.
- Coelho, B. e Andrade-Campos, A. (2014). *Efficiency achievement in water supply systems—A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol 30, pp 59-84.
- Coelho, S. T., Loureiro, D., Alegre, H. (2006). *Modelação e Análise de Sistemas de Abastecimento de Água*, Série Guias Técnicos nº4, IRAR.

- COIN-OR@ (2016). *COIN-OR Projects*. Consultado a 18 de agosto de 2016, de <https://projects.coin-or.org/Bonmin>.
- Costa, L., de Athayde Prata, B., Ramos, H., de Castro, M. (2015). *A Branch-and-Bound Algorithm for Optimal Pump Scheduling in Water Distribution Networks*. *Water Resources Management*, Vol. 30, No 3, pp 1037-1052.
- Coulbeck, B., Orr, C. H., Brdys, M. (1988) *Real-time optimized control of water distribution systems*. International Conference on Control - CONTROL 88, pp 634-640. Oxford.
- Derceto@ (2016). *Derceto Aquadapt*. Consultado a 24 de novembro de 2016, de <http://www.derceto.com/Products-Services/Derceto-Aquadapt>.
- Detelic, D. (2012). *Operational Optimization of the Pumping Station Scheduling at the Boavista Water Treatment Plant*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Área de especialização de Hidráulica. Departamento de Engenharia Civil e do Ambiente, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- EEA (2014). *Performance of water utilities beyond compliance*, EEA Technical report No 5/2014, p. 52, European Environment Agency, Copenhagen, Denmark. Disponível em: <http://www.eureau.org/images/img/Performance-of-water-utilities-beyond-compliance.pdf>
- ERSAR (2015). *Relatório Anual dos Serviços de Águas e Resíduos em Portugal (2014) – Sumário Executivo*, Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos. Disponível em: <http://www.ersar.pt/website/ViewContent.aspx?SubFolderPath=%5CRoot%5CContents%5CSitio%5CMenuPrincipal%5CDocumentacao%5CPublicacoesIRAR&Section=MenuPrincipal&FolderPath=%5CRoot%5CContents%5CSitio%5CMenuPrincipal%5CDocumentacao&BookTypeID=3&BookCategoryID=1>.
- ERSE@ (2016). *Portal ERSE -Tarifas e Preços*. Consultado a 7 de junho de 2016, de <http://www.erse.pt/pt/electricidade/tarifaseprecos/Paginas/default.aspx>.
- Falkenberg, A. V. (2005). *Previsão de Consumo Urbano de Água em Curto Prazo*. Dissertação de Mestrado em Métodos Numéricos em Engenharia. Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- Fallside, F. e Perry, P. (1975). *Hierarchical optimisation of a water-supply network*. IEE-IERE Proc. India UK, Vol 13, No 3, pp 98-99.
- Feldman, M. (2009). *Aspects of Energy Efficiency in Water Supply Systems*. Proceedings of the 5th IWA Water Loss Reduction Specialist Conference. Cape Town, South Africa.
- GAMS@ (2016). *GAMS Home Page*. Consultado a 17 de outubro de 2016, de <http://www.gams.com/>.
- Giacomello, C., Kapelan, Z., Nicolini, M. (2013). *Fast Hybrid Optimization Method for Effective Pump Scheduling*. *Journal Of Water Resources Planning And Management*, Vol 139, No 2, pp 175-183.
- Gonçalves, J. (2014). *Tipificação e Caracterização de Consumos em Reservatórios de Distribuição – Influência na Exploração e Capacidade*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil,

- Especialização em Hidráulica. Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Google Maps@ (2015). *Google Maps* Consultado a 10 de julho de 2015, de <https://www.google.pt/maps/>.
- Innovyze@ (2016). *Innovyze - Innovating for Sustainable Infrastructure*. Consultado a 24 de novembro de 2016, de <http://www.innovyze.com/>.
- Jamieson, D., Shamir, U., Martinez, F., Franchini, M. (2007). *Conceptual design of a generic, real-time, near-optimal control system for water-distribution networks*. Journal of Hydroinformatics, Vol 9, No 1, pp 3-14.
- Jung, D., Kang, D., Kang, M., Kim, B. (2014). *Real-time pump scheduling for water transmission systems: Case study*. KSCE Journal of Civil Engineering, Vol 19, No 7, pp 1987-1993.
- KYPipe@ (2016). *Optimal Pump Scheduling / KYPipe*. Consultado a 24 de novembro de 2016, de <http://kypipe.com/kypipe>.
- Mackle, G., Savic, D., Walters, G. (1995). *Application of genetic algorithms to pump scheduling for water supply*. 1st International Conference on Genetic Algorithms in Engineering Systems: Innovations and Applications (GALESIA).
- Moreira, D. e Ramos, H. (2013). *Energy Cost Optimization in a Water Supply System Case Study*. Journal of Energy, Vol 2013, pp 1-9.
- Odan, F., Ribeiro Reis, L., Kapelan, Z. (2015). *Real-Time Multiobjective Optimization of Operation of Water Supply Systems*. Journal Of Water Resources Planning And Management, Vol 141, No 9, pp 1-11.
- Optimatics@ (2016). *OPTIMATICS, Plan Smarter*. Consultado a 24 de novembro de 2016, de <http://optimatics.com/software/>.
- Pasha, M. F. K. e Lansley, K. (2009). *Optimal Pump Scheduling by Linear Programming*. World Environmental and Water Resources Congress 2009: Great Rivers.
- Pegg, S. (2001). *An Online Optimised Pump Scheduling System*. Proceeding of the 38th Annual ORSNZ Conference. New Zealand.
- POWADIMA@ (2016). *POTable WATER DIstribution MAnagement*. Consultado a 22 de abril de 2016, de <http://research.ncl.ac.uk/powadima/Project.html>.
- Ramos, H., Costa, L., Gonçalves, F. (2012). *Energy Efficiency in Water Supply Systems: GA for Pump Schedule Optimization and ANN for Hybrid Energy Prediction*. Water Supply System Analysis - Selected Topics.
- Rao, Z. e Salomons, E. (2007). *Development of a real-time, near-optimal control process for water-distribution networks*. Journal of Hydroinformatics, Vol 9, No 1, pp 25-37.
- Reeves, D. T. (2001). *Study on improving the energy efficiency of pumps*. European Comission, United Kingdom.
- Rosenthal, R. E. (2014). *GAMS – A user´s guide*. GAMS Development Corporation, Washington, DC, USA.

- Sá Marques, J. A. A. e Sousa, J. J. O. (2011). *Hidráulica Urbana – Sistemas de Abastecimento de Água e de Drenagem de Águas Residuais* (3ª ed.). Coimbra: Imprensa da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Salomons, E., Goryashko, A., Shamir, U., Rao, Z., Alvisi, S. (2007). *Optimizing the operation of the Haifa-A water-distribution network*. Journal of Hydroinformatics, Vol 9, No 1, pp 51-64.
- Savic, D. A., Walters, G. A., Schwab, M. (1997). *Multiobjective genetic algorithms for pump scheduling*. Evolutionary Computing, Lecture Notes in Computer Science, Vol 1205, pp 227–235.
- Savic, D., Boxall, J., Ulanicki, B., Kapelan, Z., Makropoulos, C., Fenner, R., Soga, K., Marshall, I., Maksimovic, C., Postlethwaite, R. (2008). *Project Neptune: Improved Operation of Water Distribution Networks*. Proceedings of the 10th Annual Water Distribution Systems Analysis Conference. Kruger National Park, South Africa.
- Servelec@ (2016). *Business Optimisation | Servelec Technologies*. Consultado a 24 de novembro de 2016, de <https://www.servelec-group.com/technologies/products-and-services/business-optimisation/>.
- Shihu, S., Dong, Z., Suiqing, L., Ming, Z., Yixing, Y., Hongbin, Z. (2010). *Power saving in water supply system with pump operation optimization*. Proceedings of Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). Asia-Pacific.
- Sousa, J. J., Cunha, M. C., Sá Marques, J. A. (2002) *Otimização do Funcionamento Integrado de Sistemas Adutores e Estações de Tratamento de Água*. Revista da Associação Portuguesa de Recursos Hídricos, 6º Congresso da Água, Vol. 23, No 1, pp 111-119.
- Troca, P. A. R. S. (2014). *Empresarialização de um bem público: A água como produto e a comunicação integrada - O caso das Águas do Mondego, S.A.*. Relatório de Estágio Curricular de Mestrado, Faculdade de Letras da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Vilanova, M. N. e Balestieri, J. P. (2014). *Energy and hydraulic efficiency in conventional water supply systems*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol 30, pp 701-714.
- Walski, T. M., Chase, D. V., Savic, D. V., Grayman, W., Beckwith, S., Koelle, E. (2003). *Advanced Water Distribution Modeling and Management*. 1st Edition, Haestad Methods. Waterbury, CT USA.
- WaterGEMS@ (2016). *Water distribution modeling and management – WaterGEMS de Bentley*. Consultado a 24 de novembro de 2016, de <https://www.bentley.com/en/products/product-line/hydraulics-and-hydrology-software/watergems>.
- WATERNET@ (2016). *WATERNET — Centro de Investigación en Supervisión, Seguridad y Control Automático — UPC. Universitat Politècnica de Catalunya*. Consultado a 20 de abril de 2016, de <https://cs2ac.upc.edu/es/proyectos-de-investigacion/proyectos-ue/WATERNET>.
- WWAP (2014). *The United Nations World Water Development Report 2014: Water and Energy*. UNESCO, Paris.
- Zhuan, X. e Xia, X. (2013). *Optimal operation scheduling of a pumping station with multiple pumps*. Applied Energy, Vol 104, pp 250-257.