Uma perspetiva para a gestão eficiente de redes de distribuição de água

O caso da Beloura

Guilherme José Pereira Martins

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

Orientador: Professora Helena Margarida Machado da Silva Ramos

Júri

Presidente: Professor Rodrigo de Almada Cardoso Proença de Oliveira

Orientador: Professora Helena Margarida Machado da Silva Ramos

Vogal: Professor António Bento Franco

Maio 2017

Agradecimentos

À Professora Helena Ramos, por todo o apoio e disponibilidade. Obrigado pela confiança demonstrada ao longo da execução do trabalho, pela transmissão de conhecimento, por não ter duvidado das minhas escolhas e pelo constante incentivo.

Ao Departamento de Estudos e Planeamento dos SMAS de Sintra, em especial à Engª Rute Parente e ao Engª André Duarte, pela disponibilidade constante, interesse e abertura revelados.

Ao Modesto Pérez-Sánchez, impulsionador do presente trabalho, pela disponibilidade demonstrada.

À KSB, Bombas e Válvulas, S.A., e em particular à Engª Raquel Silva, pela informação e disponibilidade prestadas.

Aos meus pais, a quem tudo devo, pelo amor e por serem o meu maior apoio desde sempre, à família e amigos. Por último, mas não menos importante, à Christine pelo amor, paciência, compreensão e constante apoio.

Resumo

A água é vital para o desenvolvimento humano. O crescimento da população e a urbanização elevaram substancialmente o consumo de água e energia a nível global. A gestão eficiente das infraestruturas e recursos hídricos adquire especial relevância no contexto da sustentabilidade futura.

As redes de distribuição de água (RDA) são caracterizadas pela variação significativa das suas condições hidráulicas e por pressões elevadas, associadas a fugas de água, decorrentes da necessidade de garantir o correto fornecimento às populações. As Válvulas Redutoras de Pressão (VRP) são amplamente usadas na gestão de RDA para o controlo de pressões, reduzindo as perdas de água na distribuição, com a desvantagem de dissiparem energia hidráulica na sua operação. Neste contexto, a utilização de Bombas como Turbinas (BT) surge como uma oportunidade, transformando o potencial hidráulico em energia hidroelétrica de uma forma limpa, reduzindo os custos energéticos, aumentando a eficiência e fiabilidade das RDA.

O estudo visa apresentar uma solução integrada de controlo da pressão e aproveitamento hidroelétrico numa RDA real, dotada de variabilidade de consumo sazonal, através de simulação informática. Partindo de uma estratégia baseada na eficácia global do sistema, nomeadamente a avaliação dos parâmetros de capacidade, sustentabilidade e flexibilidade, bem como da eficiência de BT define-se, uma solução que permite simultaneamente a redução de pressão e perdas e o aproveitamento energético da rede. Articula-se uma análise económica da solução encontrada, permitindo inferir que ainda que com bons índices de desempenho, o custo dos equipamentos torna a solução pouco apelativa.

A água e energia são interdependentes, sendo que a gestão eficiente de RDA, partindo destes pressupostos, contribui para o desenvolvimento sustentável.

Palavras-chave: Redes de Distribuição de Água (RDA), Válvula Redutora de Pressão (VRP), Bomba como Turbina (BT), gestão da pressão, controlo de fugas, produção de energia

Abstract

Water is vital to ensure human development. Water and energy consumption rose significantly with population growth and urbanization at a global scale. Water resources and infrastructures management is of high importance regarding future sustainability.

Water Distribution Networks (WDN) tend to reach high water pressure levels, associated with leakage, as they operate in diverse hydraulic conditions, needed to guarantee the quality of water supply to the population. Pressure Reducing Valves are widely used in WDN management to control the excess of pressure, reducing water losses. They operate by dissipating the excess of hydraulic energy in the network. Pump as Turbines (PaT) implementation offers an opportunity for energy recovery, by transforming hydraulic power into electrical production. This clean source enables costs reduction, improving the reliability and overall efficiency of WDN.

The work aims on presenting an integrated solution in relation to pressure and leakage control and energy recovery by software modelling of a real WDN endowed with seasonal consumption variability. The design approach comprises the application of PRV and PaT, evaluating their performance in terms of system capability, sustainability and flexibility and PaT efficiency, allowing simultaneously adequate pressure and leakage control and energy recovery in the WDN. Additionally, it is presented an economic analysis to assess its feasibility, concluding that despite the good performance overall, equipment costs are still a major drawback.

Acknowledging the synergy between water and energy and taking advantage of these methods regarding WDN management contributes to achieve the sustainable development.

Key-words: Water Distribution Networks (WDN), Pressure Reducing Valve (PRV), Pump as Turbine (PaT), Pressure Management, Leakage Control, Energy Production

Índice

AGRADECIMENTOS iii

RESUMO iv

ABSTRACT v

LISTA DE FIGURAS viii

LISTA DE TABELAS x

ACRÓNIMOS xi

NOTAÇÃO E SÍMBOLOS xii

1. INTRODUÇÃO 1

1.1. ENQUADRAMENTO GERAL 1
1.2. OBJETIVOS 2
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO 2

2. CARACTERIZAÇÃO DO SETOR DA ÁGUA 4

2.1. ENQUADRAMENTO GERAL 4
2.1.1. PREVISÃO DO CRESCIMENTO DA POPULAÇÃO MUNDIAL 4
2.1.2. DISPONIBILIDADE E SUSTENTABILIDADE HÍDRICA A NÍVEL GLOBAL 5
2.1.3. INFRAESTRUTURAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA 6
2.2. O SETOR DA ÁGUA EM PORTUGAL 7
2.2.1. O PAPEL DA GOVERNAÇÃO 8
2.2.2. ESTADO ATUAL DAS INFRAESTRUTURAS DE ÁGUA 9

3. GESTÃO DE REDES DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA 11

3.1. ZMC – ZONAS DE MEDIÇÃO E CONTROLO 11
3.2. GESTÃO DE PERDAS 13
3.2.1. FATORES QUE INFLUENCIAM AS PERDAS DE ÁGUA REAIS 15
3.2.2. METODOLOGIAS PARA O CONTROLO DE PERDAS REAIS DE ÁGUA 16
3.3. GESTÃO DA PRESSÃO 18
3.3.1. VÁLVULAS REDUTORAS DE PRESSÃO E BOMBAS COMO TURBINAS 18
3.4. PRODUÇÃO DE ENERGIA EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA 21
3.5. EFICÁCIA DA INSTALAÇÃO DE BT EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA 24
3.6. GESTÃO INTELIGENTE DE ÁGUA 26
3.6.1. REDES INTELIGENTES DE ÁGUA - SMART WATER GRIDS 26
3.6.2. TECNOLOGIAS INTELIGENTES DE GESTÃO DE ÁGUA 27
3.6.3. DESAFIOS E OPORTUNIDADES DAS REDES INTELIGENTES DE ÁGUA 29
3.7. PERSPETIVAS FUTURAS E SUSTENTABILIDADE 29
3.7.1. RELAÇÃO ÁGUA-ENERGIA 30
3.7.2. RELAÇÃO ENTRE REDES INTELIGENTES DE ÁGUA E ENERGIA 31
3.7.3. ENERGIA HIDROELÉTRICA E CRESCIMENTO SUSTENTÁVEL 31

4. APRESENTAÇÃO DO CASO DE ESTUDO E METODOLOGIA 33

4.1. ENQUADRAMENTO GERAL 33
4.2. A ZMC DA BELOURA 33

4.3. DADOS DE CONSUMO 33
4.4. NORMAS REGULAMENTARES DAS RDA EM BAIXA 38
4.5. SIMULAÇÃO HIDRÁULICA 39
4.6. EQUIPAMENTO HIDRÁULICO 40
4.7. PRODUÇÃO DE ENERGIA E ANÁLISE ECONÓMICA 42
4.8. SÍNTESE DA METODOLOGIA ADOTADA 44

5. EXPERIMENTAÇÃO E RESULTADOS 46

5.1. ENQUADRAMENTO GERAL 46
5.1.1. PLANEAMENTO E DEFINIÇÃO 46
5.1.2. TIPOS DE CONSUMO E IMPLEMENTAÇÃO 47
5.2. CALIBRAÇÃO E OTIMIZAÇÃO 48
5.2.1. MEDIDAS DE CONTROLO 49
5.2.2. AVALIAÇÃO DE PERDAS DE ÁGUA 50
5.3. TIPIFICAÇÃO DE CENÁRIOS E ALTERNATIVAS 51
5.4. APLICAÇÃO DO EQUIPAMENTO HIDRÁULICO 53
5.5. EFICIÊNCIA E EFICÁCIA DE BT NA REDE 62
5.6. ANÁLISE ENERGÉTICA E ECONÓMICA 65
5.7. CARACTERIZAÇÃO DA SOLUÇÃO 70
5.7.1. EFICÁCIA E EFICIÊNCIA 70
5.7.2. VERIFICAÇÃO DAS VELOCIDADES NAS CONDUTAS DA RDA 71
5.7.3. VERIFICAÇÃO DO NÍVEL DE PERDAS REAIS NA ZMC 72

6. CONCLUSÕES E PERSPETIVAS FUTURAS 73

6.1. CONCLUSÕES 73
6.2. PERSPETIVAS FUTURAS 74

BIBLIOGRAFIA 75

ANEXOS 79

ANEXO A – LEI DE POTÊNCIA DA FUNÇÃO PRESSURE DEPENDENT DEMAND 79
ANEXO B – DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÕES MÁXIMA E MÍNIMA NA REDE 79
ANEXO C – CURVAS CARACTERÍSTICAS E DE RENDIMENTO DAS BT ETANORM 82
ANEXO D – PREÇO DA VRP FLUCON 83
ANEXO E – ANÁLISE ECONÓMICA 84

Lista de Figuras

Figura 1 - Distribuição mundial da percentagem de pop. urbana e cidades com milhões de habitantes 4
Figura 2 - Evolução da taxa de urbanização 5
Figura 3 - Previsão do Stress Hídrico em 2040 6
Figura 4 - Eixos e objetivos operacionais do PENSAAR 2020 9
Figura 5 - Percentagem de água não faturada; perdas reais de água em Portugal continental 10
Figura 6 – Setorização de um sistema de distribuição de água 12
Figura 7 – Diferentes tipos de perdas num sistema de abastecimento de água 13
Figura 8 - Estimativa percentual das perdas reais nos componentes de uma RDA 14
Figura 9 - Estimativa percentual das perdas reais nos ramais de ligação 14
Figura 10 – Nível económico de perdas reais 17
Figura 11 - Modo genérico de funcionamento de uma VRP do tipo convencional 19
Figura 12 - Modo de funcionamento ativo de diferentes sistemas de VRP 19
Figura 13 - Curvas típicas do desempenho de bombas (esquerda) e bombas como turbinas (direita) 20
Figura 14 - Esquema para modos de RH e RE 22
Figura 15 - Condições de operação de BT para o modo RH, RE e RHE 22
Figura 16 - Esquema de instalação para o modo SSP 23
Figura 17 - (a) Pontos de operação $(Q; Hu)$; (b) Variabilidade temporal de Q, Hu e P, dada uma CP 24
Figura 18 – Valores de fiabilidade para modo normal e modo turbina 25
Figura 19 - Conceito esquemático de Rede Inteligente de Água 27
Figura 20 – Sistema de conduta inteligente e sensores wireless 28
Figura 21 - Medidor e Data-Logger 34
Figura 22 - Vista aérea da ZMC e localização dos dispositivos 34
Figura 23 - Padrão de consumo anual 34
Figura 24 –Distribuição do consumo anual da ZMC da Beloura 35
Figura 25 - Distribuição do consumo para tipo de consumo normal 35
Figura 26 - Distribuição do consumo para tipo de consumo elevado 36
Figura 27 - Distribuição do consumo para tipo de consumo muito elevado 36
Figura 28 - Padrão de consumo horário médio semanal – tipo de consumo normal 37
Figura 29 - Padrão de consumo horário médio semanal – tipo de consumo elevado 37
Figura 30 - Padrão de consumo horário médio semanal – tipo de consumo muito elevado 37
Figura 31 - Condições de funcionamento de uma BT 41
Figura 32 - Curvas características das bombas como turbinas 41
Figura 33 - instalação correspondente a duas VRP Flucon200.02.03 DN65 na ZMC em estudo 42
Figura 34 – Metodologia de Análise 45
Figura 35 – Reservatório do Linhó 47
Figura 36 - Diâmetros de condutas na rede 47
Figura 37 - Padrão de consumo horário médio diário para os tipos de consumo analisados 47
Figura 38 – Distribuição de pressão atual da RDA da Beloura 48
Figura 39 – Representação da localização das VRP na rede da Beloura 49
Figura 40 – Caudal escoado pelas VRP, período de consumo normal 52
Figura 41 - Caudal escoado pelas VRP, período de consumo elevado 52
Figura 42 - Caudal escoado pelas VRP, período de consumo muito elevado 53
Figura 43 - Esquema de instalação das (a) VRP; e (b) BT 54
Figura 44 – Regiões de funcionamento, modo RH 54

Figura 45 - Esquema de instalação dos dispositivos hidráulicos a considerar 56
Figura 46 – Distr. de pressões máxima (esq.) e mínima (dir.) diárias, cenário 1, período 1, alt. A..... 57
Figura 47 – Valores horários de queda e caudal para a BT e VRP, cenário 1, período 1, alternativa A 57
Figura 48 - Valores horários de queda e caudal para a BT e VRP, cenário 1, período 1, alternativa B 57
Figura 49 - Valores horários de queda e caudal para a BT e VRP, cenário 1, período 2, alternativa A 58
Figura 50 - Valores horários de queda e caudal para a BT e VRP, cenário 1, período 2, alternativa B 58
Figura 51 - Valores horários de queda e caudal para a BT e VRP, cenário 1, período 3, alternativa A 58
Figura 52 - Valores horários de queda e caudal para a BT e VRP, cenário 1, período 3, alternativa B 59
Figura 53 - Valores horários de queda e caudal para a BT e VRP, cenário 2, período 1, alternativa A 59
Figura 54 - Valores horários de queda e caudal para a BT e VRP, cenário 2, período 1, alternativa B 60
Figura 55 - Valores horários de queda e caudal para a BT e VRP, cenário 2, período 2, alternativa A 60
Figura 56 - Valores horários de queda e caudal para a BT e VRP, cenário 2, período 2, alternativa B 60
Figura 57 - Valores horários de queda e caudal para as BT e a VRP, cenário 2, período 3, alternativa A 61
Figura 58 - Valores horários de queda e caudal para a BT e VRP, cenário 2, período 3, alternativa B 61
Figura 59 - Valores horários de queda e caudal para a BT e VRP, cenário 2, período 3, alternativa C 61
Figura 60 - Valores horários de queda e caudal para a BT e VRP, cenário 2, período 3, alternativa C 62
Figura 61- Energia disponível e produzida (esq.), Eficácia e Capacidade (dir.): Cenário 1, Período 1 63
Figura 62 - Energia disponível e produzida (esq.), Eficácia e Capacidade (dir.): Cenário 1, Período 2 63
Figura 63 - Energia disponível e produzida (esq.), Eficácia e Capacidade (dir.): Cenário 1, Período 3 64
Figura 64 - Energia disponível e produzida (esq.), Eficácia e Capacidade (dir.): Cenário 2, Período 1 64
Figura 65 - Energia disponível e produzida (esq.), Eficácia e Capacidade (dir.): Cenário 2, Período 2 65
Figura 66 - Energia disponível e produzida (esq.), Eficácia e Capacidade (dir.): Cenário 2, Período 3 65
Figura 67 – Produção diária de energia para cada padrão de consumo, solução 1, cenário 1 67
Figura 68 - Produção diária de energia para cada padrão de consumo, solução 1, cenário 2 67
Figura 69 - Fluxos Monetários: Cenário 1 (esq.), Cenário 2 (dir.) 68
Figura 70 - Produção diária de energia para cada padrão de consumo, solução 2 69
Figura 71 - Fluxos Monetários – Solução 2 70
Figura 72 - Rendimento mecânico da Etanorm 32-160 71
Figura 73 – Velocidades das condutas na rede para a solução encontrada 71

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Dados de fugas de água na ZMC, estimados no modelo hidráulico..... 51
Tabela 2 – Características das BT..... 55
Tabela 3 – Eficácia, capacidade, fiabilidade e sustentabilidade da solução..... 71
Tabela 4 – Dados de fugas de água na ZMC, estimadas no modelo hidráulico para a solução..... 72

Acrónimos

AMI – *Advanced Monitoring Infrastructure*
AMR – *Automated Meter Reading*
BT – Bomba como Turbina
CC – Curva característica
CCBT – Curva Característica da Bomba como Turbina
CMN – Caudal Mínimo Noturno
EG – Entidades Gestoras
EPS – *Extended Period Simulation*
ERSAR – Entidade Reguladora dos Serviços de Água e Resíduos
MIA – Medidores Inteligentes de Água
NEPr – Nível Económico de Perdas Reais
PENSAAR – Plano Estratégico de Abastecimento de Água e Saneamento de Águas Residuais
PMR – Ponto de Melhor Rendimento
RDA – Redes de Distribuição de Água
RE – Regulação Elétrica
RH – Regulação Hidráulica
RHE – Regulação Hidráulica e Elétrica
RIA – Redes Inteligentes de Água
SAA – Sistemas de Abastecimento de Água
SIG – Sistemas de Informação Geográfica
SMAS – Serviços Municipalizados de Abastecimento de Águas de Sintra
TIC – Tecnologias de Informação e Comunicação
TIR – Taxa Interna de Rentabilidade
TMF – Tempo Médio de Falha
VAL – Valor Atualizado Líquido
VP – Valor Presente
VRP – Válvula Reguladora de Pressão
WG – WaterGEMS
ZMC – Zona de Medição e Controlo

Notação e Símbolos

$\mathrm{B/C}$ – Índice Benefício-Custo

C - Coeficiente de Hazen-Williams

D – Diâmetro interno

DN – Diâmetro nominal

E – Eficácia

E_{nergia} – Energia

g – Aceleração gravítica

GW – GigaWatt

H – Pressão mínima admissível

H_d ou CP – Contrapressão

H^dou ΔH^d - Queda disponível no sistema

H_i – Queda disponível

h_l – Perda de carga total

$H_{mín}$ – Pressão mínima admissível

H_{PMR} – Queda no ponto de melhor rendimento

H^tou H_u– Queda útil da BT

H_{VRP} – Carga de definição da VRP

$H_{válvula}$ – Queda na válvula de regulação

I – Custos de investimento

K – Coeficiente função do orifício e do expoente da lei de vazão

kPa – Kilo Pascal

kWh – Kilowatt-Hora

MWh – Megawatt-Hora

n – Número de pisos acima do solo ou Anos ou Expoente da lei de vazão

O – Custos de operação

p – Pressão

P – Potência

P_h – Potência hidráulica da BT

P_m – Potência mecânica da BT

P_{mo} – Pressão a montante do orifício

P_u – Potência útil da BT

Q_{bypass} – Caudal no bypass

Q^d ou Q – Caudal escoado

Q^i – Caudal horário registado

Q_{IN} – Caudal afluente ao nó

Q^f – Caudal de fuga nodal

Q_{ma} – Caudal médio anual

Q_{mh} – Caudal médio horário

Q_{OUT} – Consumo no nó

Q_{PMR} – Caudal no ponto de melhor rendimento

Q_t – Caudal turbinado pela BT

R – Receitas

S – Custos de reposição

t – Taxa de atualização

Δt_i – Intervalo de tempo

T – Período de retorno

U_i – Velocidade

V – Velocidade máxima em condutas de distribuição

ΔV_S – Diferença no volume armazenado

z – Elevação

α – Coeficiente que influencia a redução de eficácia

γ – Peso volúmico da água

Γ – Binário do motor

η – Rendimento

η_i^t – Rendimento da BT

η_p – Eficiência da instalação

η_p^i – Capacidade

μ_p^i – Fiabilidade

ϕ_p^i – Flexibilidade

χ_p^i – Sustentabilidade

ω – Velocidade Angular

1. Introdução

1.1. Enquadramento geral

A água é o constituinte fundamental do desenvolvimento sustentável. A exploração dos recursos hídricos e dos serviços que lhes estão associados fomenta a redução da pobreza, o crescimento económico e a sustentabilidade ambiental [1].

A água é, assim, parte essencial na economia local e global, ajudando à criação e manutenção de emprego em todos os setores da economia. Como tal, a gestão da água e das infraestruturas adjacentes, assim como o acesso a água potável e a um sistema de águas residuais, eleva sobremaneira o nível de vida das populações [2].

Existe água suficiente para colmatar as necessidades crescentes futuras mundiais, porém é necessário que a humanidade mude drasticamente a forma como a utiliza, gere e partilha. A crise de água mundial é reflexo da governação e não da sua disponibilidade [1]. Negligenciar estas problemáticas resulta em impactes negativos na economia e subsistência humana a nível global, associados a danos irreparáveis nas sociedades quer em termos económicos, quer em termos sociais [2].

A procura de água potável é grandemente influenciada pelo crescimento da população e pela urbanização [1]. Metade da mão-de-obra a nível mundial está empregada em indústrias dependentes da água como recurso natural, como a agricultura, a construção ou a energia. A urbanização e o desenvolvimento da indústria e tecnologia aumentam o nível de vida das populações e consequentemente a procura de água e energia [2]. De relevar que o consumo mundial energético aumentou 600% desde o início do séc. XX [3].

Este crescimento dá origem ao aumento do *stress* sobre os recursos e sobre as infraestruturas de água. Estas deverão assim ser exploradas tendo em conta otimização de eficiência e produtividade, criando a mesma quantidade de bens, através da utilização de menos recursos de água [2].

Para tal, focam-se as atenções em fontes de energia alternativas, em particular as energias renováveis, a ser implementadas a uma escala global, de modo a atingir a sustentabilidade. Esta deve ser conseguida através da utilização de estratégias que não aumentem a pegada de carbono, em todas as escalas de produção. O desenvolvimento destas estratégias está, portanto, diretamente relacionado com a implementação de novas tecnologias, nomeadamente a recuperação de energia, que origina vantagens ambientais e económicas apelativas. De entre estas fontes renováveis, destaca-se a produção hidroelétrica pela sua viabilidade [3].

As redes de distribuição de água (RDA) são caracterizadas por serem sistemas em constante variação dos seus parâmetros hidráulicos e por enfrentarem diversos problemas relacionados com fugas de água e pressões elevadas [4].

A forma de otimizar a eficiência e produtividade das RDA prende-se com o aproveitamento da energia residual dissipada e com a redução da pressão. Assim, a otimização das RDA engloba os processos da implementação de equipamentos que transformem esse excesso energético em energia elétrica, as Bombas como Turbinas (BT), dissipada pelos dispositivos de controlo, entre os quais as válvulas redutoras de pressão (VRP) [4]. As VRP adquirem igual relevância, uma vez que são responsáveis pela redução e controlo da pressão em RDA, resultando na diminuição de perdas de água [5].

1.2. Objetivos

O presente trabalho pretende recordar o papel preponderante da água no desenvolvimento humano e transmitir a sua importância como recurso económico. Pretende-se consciencializar para o problema da escassez de água, agravado pelas novas dinâmicas demográficas e conhecer os esforços governativos presentes e futuros no que respeita as políticas de gestão de água.

O trabalho foca-se na gestão, cada vez mais desafiante, das infraestruturas que compõem uma rede de distribuição de água, caracterizadas por uma constante variabilidade hidráulica e um excesso de pressão disponível, associado a perdas de água, que deve ser controlado e que pode ser aproveitado na produção de energia.

O excesso de pressão é controlado pela introdução de válvulas redutoras de pressão (VRP) através da dissipação do excesso de energia hidráulica. Esta energia residual pode ser transformada em energia elétrica utilizando bombas como turbinas (BT). A viabilidade da introdução destes dispositivos hidráulicos é estudada em termos de redução de perdas de água, produção de energia, eficácia da rede e avaliação económica numa RDA abastecida por forma gravítica e com variabilidade de consumo sazonal elevada, no concelho de Sintra.

1.3. Estrutura da Dissertação

A dissertação está dividida em seis capítulos. O primeiro refere a importância do tema e aborda os objetivos do mesmo e a sua estrutura.

O capítulo 2 aborda a caracterização do setor da água a nível mundial e nacional e elabora um resumo do estado das infraestruturas de água em Portugal, enunciando também os esforços por parte do governo e das entidades gestoras na otimização das mesmas, através de novas políticas e regulamentos.

O capítulo 3 inicia com uma síntese de conhecimentos sobre RDA e zonas de monitorização e controlo (ZMC), onde se dá ênfase à gestão de perdas e gestão de pressões em RDA, nomeadamente pela introdução de VRP e sua substituição por BT, explicando as suas vantagens de aplicação e modos de operação com vista à produção de energia elétrica. Consequentemente é abordado o tema de gestão inteligente da água, que dá origem ao conceito de *Smart Water Grids* (SWG), ou Redes Inteligentes de Água (RIA), seus desafios e oportunidades. Por fim remete-se para o conceito de Nexo água-energia e a importância do seu entrosamento na gestão da água, remetendo depois para a importância das energias renováveis e o papel das RDA no seu contexto.

No capítulo 4 faz-se a apresentação do caso de estudo onde são enunciadas as características de uma RDA no concelho de Sintra, nomeadamente o seu padrão de consumo anual. São também discriminadas as normas regulamentares das RDA, os princípios de cálculo hidráulicos que servem como base à modelação da rede, replicada no software WaterGEMS (WG), assim como os tipos de equipamento hidráulico a utilizar na mesma. São ainda apresentadas as variáveis utilizadas na análise económica. Finalmente, é sintetizada a metodologia aplicada no trabalho.

O capítulo 5 expõe os resultados detalhados dos processos e opções tomadas ao longo da análise, em particular as fases de calibração e otimização da rede e as premissas que regem o controlo da mesma. É apresentado o resultado da avaliação do nível de perdas de água atual, que serve como termo de comparação, depois de encontrada a solução. Seguidamente, são definidos cenários e alternativas passíveis de ser estudados e comparados, com vista à maximização da produção de energia, coligada à redução de perdas de água na ZMC. É então exposta a análise exaustiva das características da RDA, apresentando-se os resultados da aplicação dos dispositivos hidráulicos (VRP e BT) a cada um dos cenários e alternativas. Determinam-se assim as alternativas passíveis de serem estudadas, para cada um dos cenários e efetua-se a respetiva análise de viabilidade económica.

O capítulo 6 faz o resumo das conclusões decorrentes do trabalho realizado, expondo a importância da redução das perdas e exploração energética em redes de distribuição de água e aferindo da sua viabilidade de implementação. Finalmente, apresentam-se perspetivas de trabalhos futuros.

2. Caracterização do Setor da Água

Este capítulo tem como função a introdução da perspetiva do crescimento populacional e consciencializar acerca da sua repercussão na disponibilidade hídrica mundial e nacional. Aborda-se também o estado das infraestruturas de água no plano nacional e indicam-se os esforços que têm sido feitos no sentido de mitigar as problemáticas da água, um bem escasso, por parte das instituições públicas e governo.

2.1. Enquadramento geral

2.1.1. Previsão do crescimento da população mundial

Verificou-se um crescimento exponencial da população mundial ao longo do século XX, acompanhado de uma intensificação da urbanização e industrialização, devido em grande parte à redução da taxa de mortalidade e aumento da esperança média de vida. Como consequência, o número de aglomerados urbanos cresceu em número e dimensão, em detrimento do meio rural. A figura 1 traduz este fenómeno, expressando a percentagem de população urbana e a distribuição de cidades com elevado número de população pelo globo.

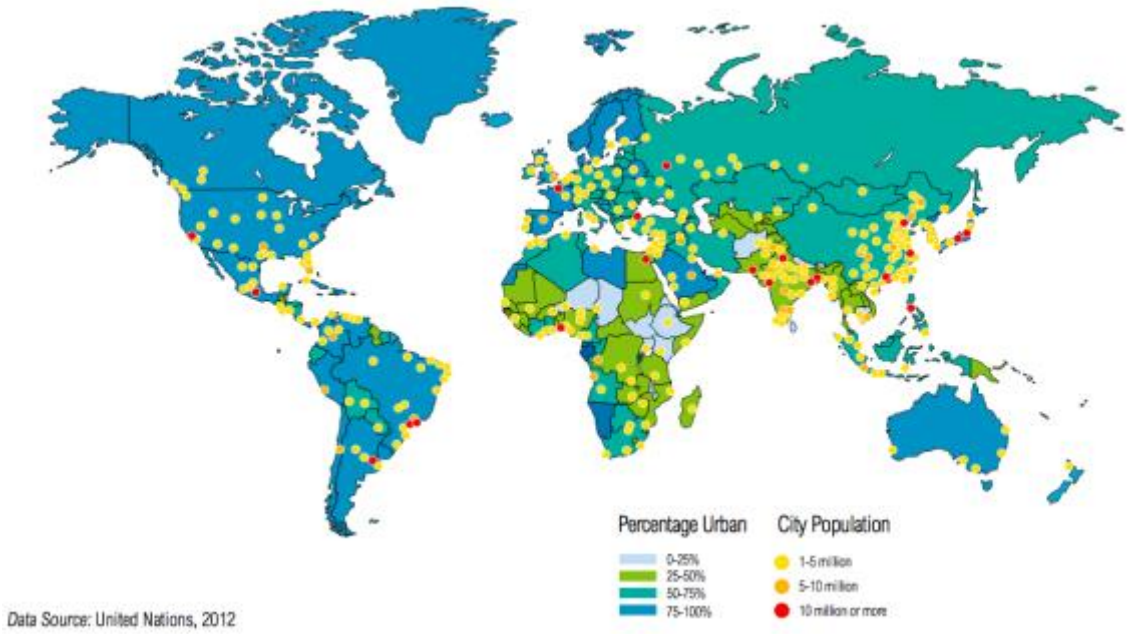

Figura 1 - Distribuição mundial da percentagem de pop. urbana e cidades com milhões de habitantes [6]

Estima-se atualmente que a população mundial se situe nos 7,4 mil milhões. De acordo com as previsões das Nações Unidas é expectável que este número atinja os 9,7 e os 11,2 mil milhões, em 2050 e 2100, respetivamente [7]. Para além desta tendência, notou-se pela primeira vez na história da humanidade, no ano de 2007, a existência de maior número de população urbana do que população rural, estimando-se que assim prevaleça [8]. Acompanhada desta previsão, destaca-se o papel das economias emergentes, nomeadamente nos continentes Africano,

Asiático e ainda a América do Sul que têm um impacto significativo no aumento do número da população, e das regiões desenvolvidas, que ainda que associadas a um decréscimo de natalidade, apresentam estimativas de um envelhecimento populacional, mantendo praticamente constante o respetivo número de habitantes.

Posto este cenário, tendo presente que a taxa de urbanização aumenta a nível global, aponta-se para que, em 2050, 66% da população mundial se concentre em meio urbano [7]. Na figura 2 poderá visualizar-se a evolução da taxa de urbanização projetada até 2050 no mundo e em algumas economias emergentes.

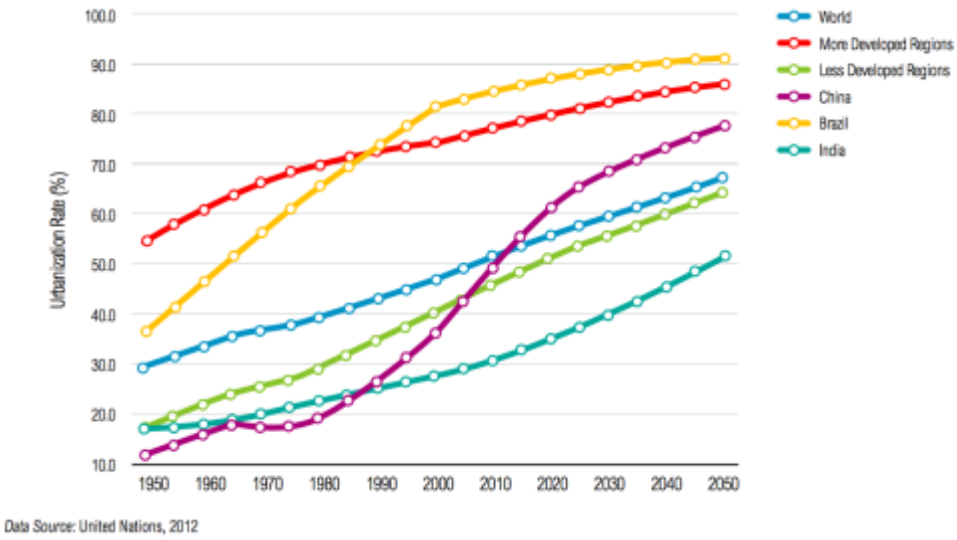

Figura 2 - Evolução da taxa de urbanização [6]

2.1.2. Disponibilidade e Sustentabilidade Hídrica a Nível Global

O globo terrestre é coberto na sua maioria por água, sendo esta um dos elementos mais abundantes na sua superfície. Estima-se que 99% da água se encontre nos oceanos, mares e glaciares, pelo que apenas 1% se distribui pelos rios, lagos, lençóis freáticos, seres vivos e atmosfera. Desta parcela pequena de água doce disponível para uso humano, cerca de 70% encontra-se em lençóis freáticos de grande profundidade, pelo que a sua acessibilidade é reduzida e dispendiosa [9].

Desequilíbrios entre a procura e a oferta de água, a degradação e poluição da água doce disponível, conflitos entre nações e as alterações climáticas são responsáveis pela diminuição da disponibilidade da água [10]. Dois terços da humanidade deverão experienciar as consequências de défice hídrico no ano 2025 [11]. Em 2050, os impactes negativos das alterações climáticas serão superiores aos benefícios provocados pelo aumento do escoamento global [10].

A água é, portanto, um recurso natural escasso nos dias que correm. A tendência será para que este cenário se agrave, uma vez que aumenta a pressão sobre os recursos naturais e ecossistemas, com a finalidade de acompanhar o processo evolutivo do Homem, cada vez mais exigente. Assimetrias provocadas pelo rápido crescimento da população, aliadas à consequente degradação ambiental decorrente do uso dos recursos naturais que poluem os solos e as massas de água, conduzem a um crescimento insustentável que põe em causa a subsistência dos ecossistemas e o futuro da espécie humana [10]. Numa perspetiva de crescimento económico e social corrente, o agravamento do stress hídrico é apresentado na figura 3. Este indicador está diretamente relacionado com a procura de água, no mesmo horizonte temporal [12].

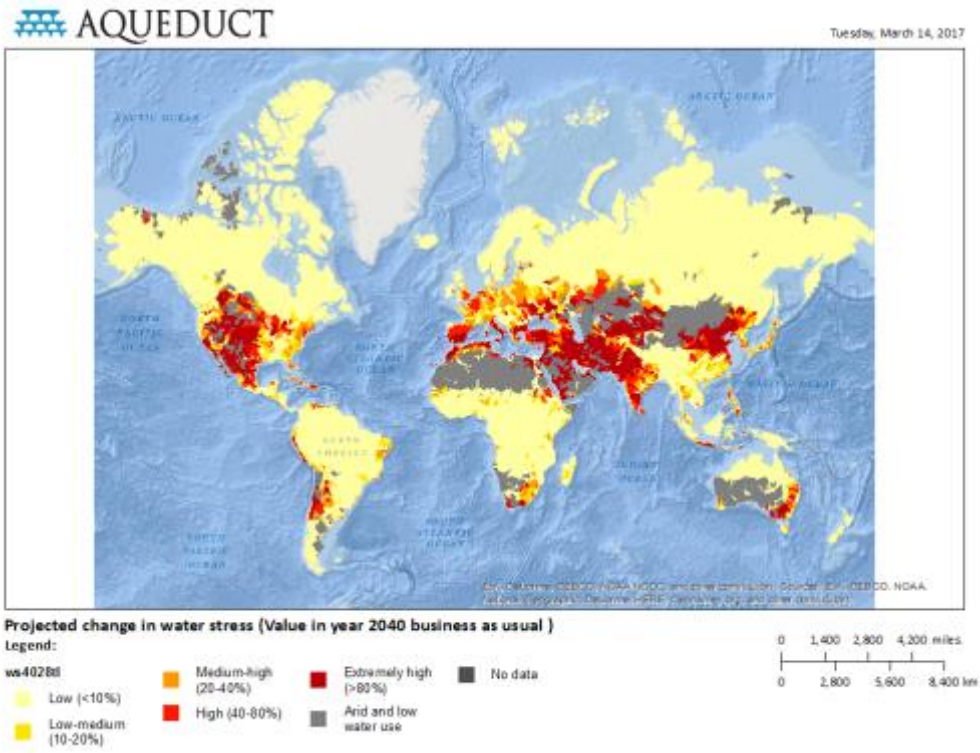

Figura 3 - Previsão do Stress Hídrico em 2040 [12]

Nestas circunstâncias, torna-se imperativo adotar estratégias que permitam preservar os recursos naturais, explorando-os de uma forma sustentável, de modo a obter a estabilidade dos ecossistemas. No caso da água, criar e desenvolver soluções adaptadas ao novo paradigma dos grandes aglomerados urbanos, tendo em vista gestão e operação inteligentes da água como uma ferramenta importante no apoio à sustentabilidade futura.

2.1.3. Infraestruturas de abastecimento de água

A disponibilidade de água potável é um fator determinante no crescimento da população, à escala mundial. A capacidade de criar grandes sistemas de abastecimento e distribuição de água é um dos grandes feitos da história da engenharia. No entanto, muitos países em desenvolvimento ainda não possuem essas infraestruturas e os que as têm comportam perdas

de água consideravelmente altas [5]. O maior desafio das infraestruturas de água modernas centra-se então em fornecer a água necessária a tarifas comportáveis pela população [13]. No entanto, são serviços públicos essenciais pouco valorizados, uma vez que são tidos como garantidos pelas populações. Para além disso, os serviços "são dependentes de infraestruturas de elevado custo, de elevada durabilidade, e de baixa visibilidade por serem maioritariamente enterradas" [14].

Ainda, algumas infraestruturas de água são antigas e estão deterioradas. Sendo constituídas por vários componentes, incluindo condutas, válvulas e bombas que variam em idade, estado e tipo de material, a eficiência tende a baixar e as falhas e perdas tendem a ser mais propícias. Como as infraestruturas abrangem grandes áreas e são de difícil acesso, os municípios poderão não ter o inventário completo desses sistemas, desconhecendo assim possíveis fugas de água. Numa altura em que o financiamento é limitado, devido à situação económica atual, as infraestruturas tendem a ter uma atenção reduzida no que toca à sua reabilitação e manutenção, o que pode causar interrupções no abastecimento de água, bem como agravar as situações de perdas de água [15].

Se se tiver em conta que, sendo um monopólio natural, não existem grandes incentivos relativos à melhoria na eficiência relacionada com a concorrência de mercado [14] sabe-se que estes problemas compreendem uma perda económica elevada, bem como exacerbam problemas de escassez de água [15].

Em Portugal, a gestão de infraestruturas tem sido pouco racional. Se se mantiver inalterada, conduzirá a uma degradação dos níveis de qualidade de serviço. A sensibilização para o tema tem vindo a aumentar e a inovação é notória, sendo um bom indicador para uma mudança futura, existindo motivos de confiança para que a situação se altere [16].

2.2. O Setor da água em Portugal

Portugal viveu vários ciclos de políticas públicas nos serviços de água. O último, de grande expressão, iniciou-se em 1993, ano em que, assente no Decreto-Lei nº 372/93, de 29 de outubro e o Decreto-Lei nº 379/93, de 5 de novembro, foi realizada uma reforma do setor para garantir o desenvolvimento sustentável dos serviços de águas. Os principais vetores da reforma compreenderam um enquadramento legislativo e institucional de estratégia nacional para a água, organização territorial, proteção dos consumidores, qualidade do serviço e um quadro regulatório. Atualmente e em conformidade com a revolução iniciada em 1993, Portugal dispõe da proposta do PENSAAR 2020 – Uma nova Estratégia para o Setor de Abastecimento de Água e Saneamento de Águas Residuais, que serve de apoio aos Planos Estratégicos de Abastecimento de Água e Saneamento de Águas Residuais (PEAASAR I e II), que estiveram em vigor de 2000 a 2006 e de 2007 a 2013, respetivamente.

O Setor das águas subdivide-se em dois serviços distintos: o de abastecimento de água para

consumo humano e o de saneamento de águas residuais urbanas, constituindo um serviço público de carácter estrutural, essencial ao bem-estar geral. Como estrutura do mercado, o Setor comporta-se como estrutura de rede, configurando a gestão destas infraestruturas uma situação de monopólio natural, necessitando de ser regulado, na medida em que não é concorrencial, sob pena de não estarem sujeitos aos mecanismos de incentivo de melhoria de eficiência, decorrentes de um monopólio natural [17].

Em Portugal, a maioria da água doce disponível encontra-se na precipitação, na que escoa superficialmente e na que se infiltra nos aquíferos, na que está armazenada nas albufeiras e naquela que se encontra nos escassos e pequenos lagos naturais [18]. Devido à grande dispersão populacional verificada em Portugal e da atribuição de competências às autarquias, a gestão técnica e económica dos sistemas é dificultada e agravada ainda pelo elevado número de entidades gestoras (EG) de pequena dimensão, incapazes de assegurar níveis adequados de qualidade do serviço e economias na exploração [17].

2.2.1. O papel da governação

Existe água suficiente para atender às necessidades crescentes no mundo. Para tal, no entanto, é necessário mudar a forma como a água é utilizada, gerida e partilhada. A crise mundial da água é um reflexo da governação e não da disponibilidade de recursos [1].

Para fazer face à realidade portuguesa, onde os recursos naturais dependem das infraestruturas e que estas dependem de uma eficiente gestão por parte das EG, têm-se feito investimentos notórios nas últimas duas décadas, permitindo uma evolução notável nos serviços. O objetivo da governação, materializado pelos trabalhos elaborados em conjunto pela Agência Português do Ambiente (APA), Águas de Portugal (AdP), Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia (MAOTE) e Entidade Reguladora dos Serviços de Água e Resíduos (ERSAR), passa por assegurar a sustentabilidade dos investimentos realizados a longo prazo, garantindo a melhoria do ambiente, bem como o aumento da eficiência, fomentando o crescimento da economia verde em Portugal. Hoje em dia, a gestão eficiente dos recursos naturais sobrepõe-se à construção de infraestruturas como o objetivo principal para a política da água, por forma a prestar um serviço de qualidade sustentável em termos sociais, económica e financeiramente [19].

O grupo de trabalho do PENSAAR 2020 visa aperfeiçoar os esforços feitos até à data e define 5 objetivos estratégicos que sustentam a visão do Setor: A Proteção do ambiente e melhoria da qualidade das massas de água, a Melhoria da qualidade dos serviços prestados, a Otimização e gestão eficiente dos recursos, Sustentabilidade económico-financeira e social e Condições Básicas e transversais. Estes eixos compreendem 19 objetivos operacionais dos quais se salientam, uma vez que estão diretamente relacionados com a temática deste trabalho, a redução de perdas de água, a redução da quantidade de água não faturada, o controlo de

afluência indevida, a otimização e/ou redução dos custos operacionais, que conduzem a uma melhoria significativa da qualidade do abastecimento de água [19].

Figura 4 - Eixos e objetivos operacionais do PENSAAR 2020 [19]

2.2.2. Estado atual das infraestruturas de água

Os relatórios técnicos divulgados pelo grupo operacional do PENSAAR 2020, com o apoio dos dados fornecidos pela Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos (ERSAR) indicam uma taxa de cobertura dos sistemas de adução e distribuição de água na ordem dos 95% no ano de 2011. De salientar que o número era da ordem dos 80% em 1993, quando as políticas interventivas se intensificaram. Em consonância com esta evolução, notou-se que em 2016 praticamente toda a água de abastecimento sob a tutela da ERSAR, que engloba a maioria das EG em Portugal é segura para consumo. Em 1993, o valor situava-se nos 50%.

Segundo o Relatório Anual do Setor de Água e Resíduos em Portugal (RASARP), publicado em dezembro de 2016, das 91% da EG avaliadas pela ERSAR, 29,8% da água captada, tratada e distribuída pelas redes não é faturada. Esse valor, que corresponde a cerca de 243 milhões de metros cúbicos de água, compreende perdas reais e perdas aparentes de água, mais concretamente possíveis consumos não autorizados e/ou ligações ilegais. Em 2011, o panorama estava ligeiramente menos favorável (figura 5) [19], remetendo para a importância da avaliação de perda de água, presente como objetivo operacional do PENSAAR, ao longo do trabalho.

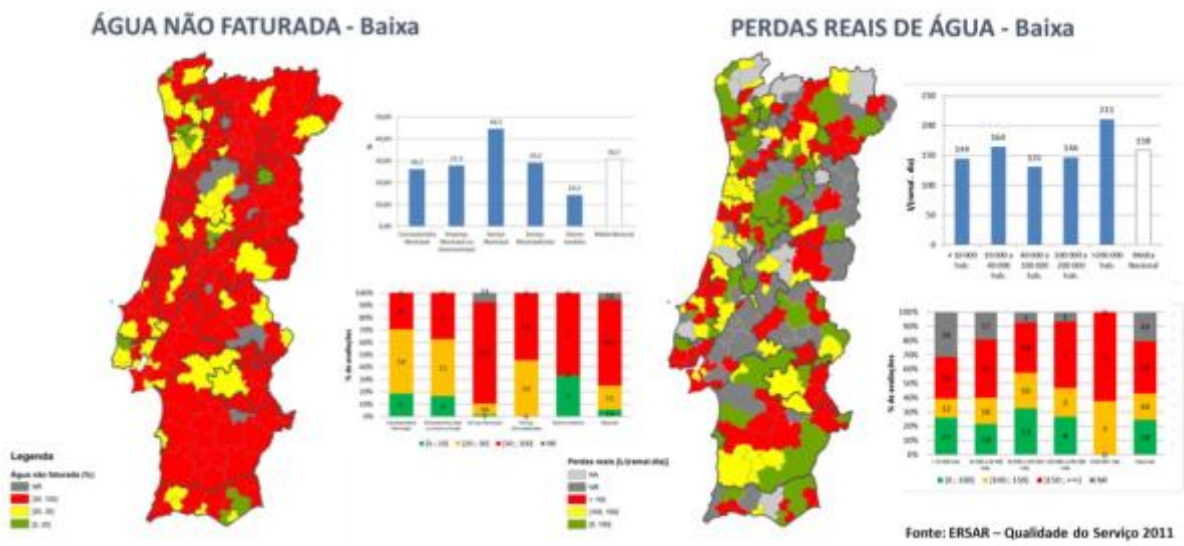

Figura 5 - Percentagem de água não faturada; perdas reais de água em Portugal continental [20]

Ainda de acordo com o grupo do PENSAAR 2020, destacam-se outros constrangimentos mais relevantes e cujo presente trabalho visa estudar: o grau de utilização das infraestruturas e adesão dos utilizadores ao serviço “em baixa” e consequente desconhecimento de gastos e não aproveitamento de recursos, como o aproveitamento energético, com prejuízos ao nível do aproveitamento eficiente da água. De um modo geral cresce a consciencialização por parte das EG e Governo na necessidade de otimização das redes [19].

3. Gestão de redes de abastecimento de água

O abastecimento público de água compreende as componentes de captação, o tratamento, a elevação, o transporte, o armazenamento, a distribuição e a utilização da água. Nesta atividade, diferenciam-se sistemas “em alta”, os constituídos por um conjunto de componentes a montante da rede de distribuição e que fazem a ligação do meio hídrico aos sistemas “em baixa”, destes últimos, constituídos por um conjunto de componentes que permitem prestar aos consumidores o serviço de abastecimento de água [19].

Os utilizadores da água estão cada vez mais exigentes no que respeita ao serviço público de abastecimento de água. Numa altura em que o desenvolvimento do setor tem ainda como objetivo a sua sustentabilidade económica, o uso de indicadores de desempenho constitui uma referência a nível internacional no que se refere à avaliação do desempenho das EG.

É nos sistemas “em baixa” que existe o maior potencial de ganho de eficiência, dada a extensão e complexidade das redes. De entre os vários problemas identificados no capítulo 2, a redução do volume total de perdas é aquela que tem maior influência em termos de ganho de eficiência para as EG. Torna-se assim indispensável identificar os riscos nestas operações e trabalhar no sentido de os mitigar [9].

Este capítulo aborda uma síntese de conhecimentos acerca da setorização de redes de distribuição de água (RDA), onde também se dá ênfase a conceitos relacionados com a gestão de perdas e gestão da pressão nas redes. De seguida, reporta-se às técnicas de obtenção de energia em redes de distribuição de água e introduz-se o conceito de gestão de água inteligente, bem como se mencionam os atuais avanços no que respeita a ideias e políticas inovadoras com vista à sustentabilidade e crescimento verde.

3.1. ZMC – Zonas de Medição e Controlo

É no contexto exposto em cima que, tendo como meta a resolução dos constrangimentos existentes ao nível da gestão da água, numa primeira fase, a divisão em captação, tratamento, adução, armazenamento e distribuição permite analisar cada componente do sistema e definir intervenções preventivas ou corretivas no mesmo. Para tal foram criadas as Zonas de Medição e Controlo, as ZMC, introduzidas no Reino Unido no final da década de 1970, que têm como função a simplificação do estudo de RDA, através da setorização dos sistemas em subsistemas de menor dimensão, e são uma importante ferramenta no apoio à redução das perdas de água.

As ZMC variam em tamanho, uma vez que dependem de fatores como a topografia e a densidade de ramais na rede. Quanto mais complexa a rede, mais onerosa é a sua conceção e mais mão-de-obra especializada necessita. A sua implementação deve ser um processo gradual e criterioso, uma vez que apesar das vantagens inerentes à setorização das RDA, “existem alguns

problemas que dificultam a sua implementação, nomeadamente, a falta de cadastro atualizado das infraestruturas de abastecimento de água, os problemas relacionados com a qualidade da água, a escassez de recursos humanos especializados e a dificuldade em obter financiamento. Além do mais, é um processo dispendioso e demorado, para o qual as EG devem estar motivadas, já que, durante a fase de implementação, poderão ocorrer dificuldades ao nível do fornecimento de água e eventuais queixas dos utilizadores" [9].

A conceção de ZMC permite estabilizar as pressões máxima e mínima nos sistemas. Para tal, deve começar por se dividir a rede em setores de pressão, dando especial atenção aos limites do alcance de operação dos reservatórios, o desnível topográfico e o estado de conservação das infraestruturas. Sempre que possível e de forma a reduzir o número de extremidades dos sistemas, deve-se ter em conta as condições de fronteira naturais e a existência de grupos elevatórios, reservatórios, válvulas redutoras de pressão, entre outros dispositivos hidráulicos. Desta forma, minimizam-se as consequências da alteração do comportamento hidráulico do sistema, nomeadamente interligando troços com diferentes padrões de consumo e diferente estado de conservação das infraestruturas e também se adequa o custo do transporte da água a uma tarifa comportável pelo utilizador. Cada setor do sistema pode ser abastecido a partir de um ponto único, alimentado de um reservatório, com vista ao controlo expedito das variações de caudal e pressões na rede, a montante e jusante do ponto único (figura 6) [5].

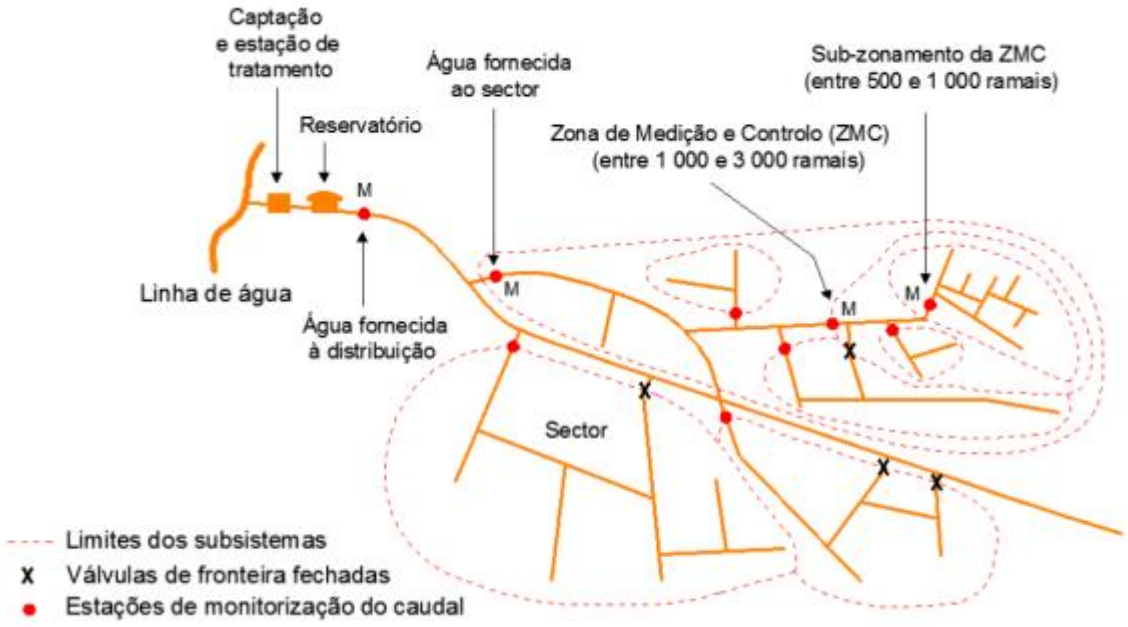

Figura 6 – Setorização de um sistema de distribuição de água [9]

A dimensão das ZMC está normalmente relacionada com o número de ramais e/ou a extensão da rede, consoante a topografia e a disponibilidade financeira das EG. À medida que a dimensão da ZMC aumenta, a gestão do sistema torna-se mais complexa e dispendiosa, se bem que quanto maior o número de pequenas ZMC, maiores serão os custos relacionados com a monitorização do caudal e colocação de válvulas de fronteira. Em regra, para zonas com baixa

densidade de rede, costuma adequar-se o tamanho da ZMC pela extensão da rede, uma vez que o custo de fugas depende do comprimento dos troços e não tanto com o número de ramais.

Finalmente, o acréscimo de condutas de extremidade que podem provocar alterações no comportamento hidráulico dos sistemas, no que se refere a fugas no sistema, e na qualidade da água, bem como a manutenção geral e sustentabilidade a longo prazo das ZMC constituem as principais desvantagens associadas à sua implementação [21] [9].

A setorização de redes de distribuição de água tem várias vantagens, já demonstradas pela experiência, sobretudo ao nível da monitorização do caudal e da pressão, do controlo dos níveis operacionais dos reservatórios, modos de operação das válvulas e ainda parâmetros relacionados com a água. Para além de, assim, reduzir a complexidade da gestão e exploração dos sistemas, permite analisar a situação atual e prever a futura, avaliando os padrões de consumo, volumes de perdas e de faturação, motivo pelo qual representa para as EG a principal atividade exercida atualmente no âmbito dos sistemas de água [9].

3.2. Gestão de perdas

A correta caracterização das perdas de água, de foro inevitável, constitui um dos principais desafios das EG e simultaneamente um dos principais indicadores de desempenho das mesmas, uma vez que representam por um lado o desperdício de um recurso natural (avalia a eficiência da rede) e, por outro, um desperdício económico associado (permite aferir do cumprimento de metas por parte da EG) [9]. Para o presente trabalho, a definição de perdas reais é essencial, para que se possa estimar com certeza o possível aproveitamento energético. Os tipos de perdas existentes num sistema de abastecimento de água apresentam-se na figura 7.

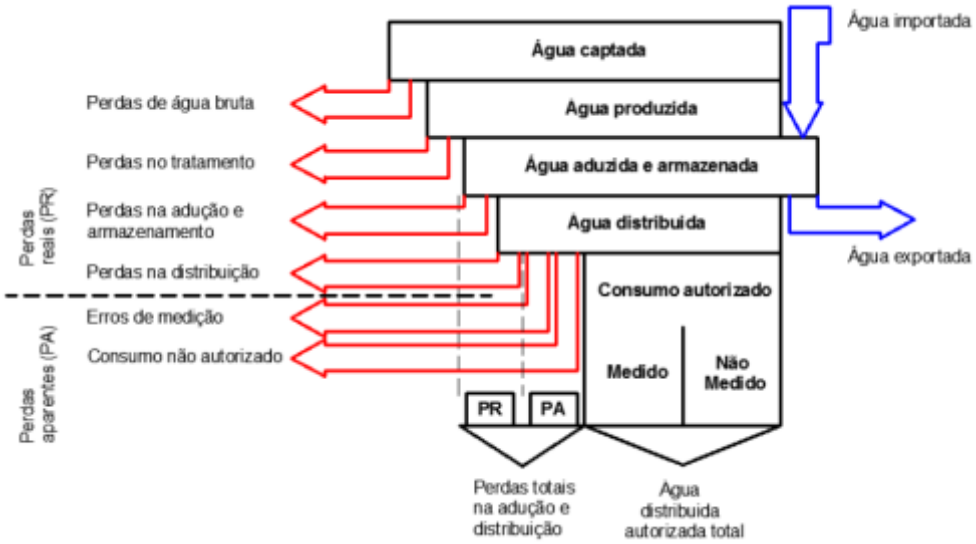

Figura 7 – Diferentes tipos de perdas num sistema de abastecimento de água [22]

Ilustram-se, nas figuras abaixo, esquemas de uma rede de abastecimento de água e as respetivas estimativas de perdas reais associadas a cada um dos componentes da rede (figura 8) e mais concretamente na zona dos ramais (figura 9).

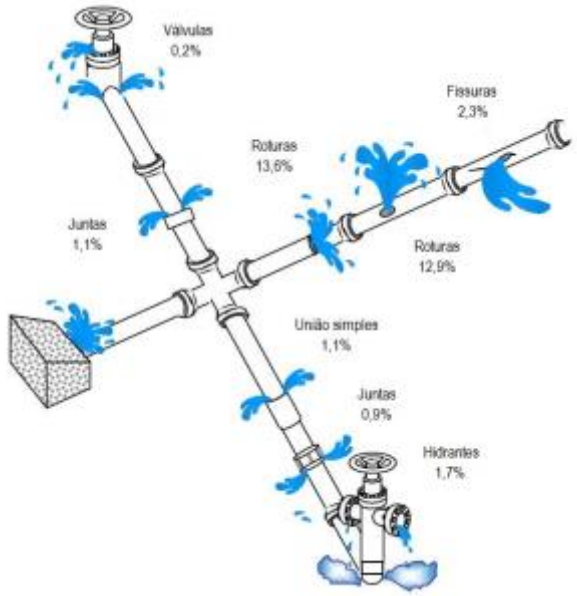

Figura 8 - Estimativa percentual das perdas reais nos componentes de uma RDA [9] , adaptado de [23]

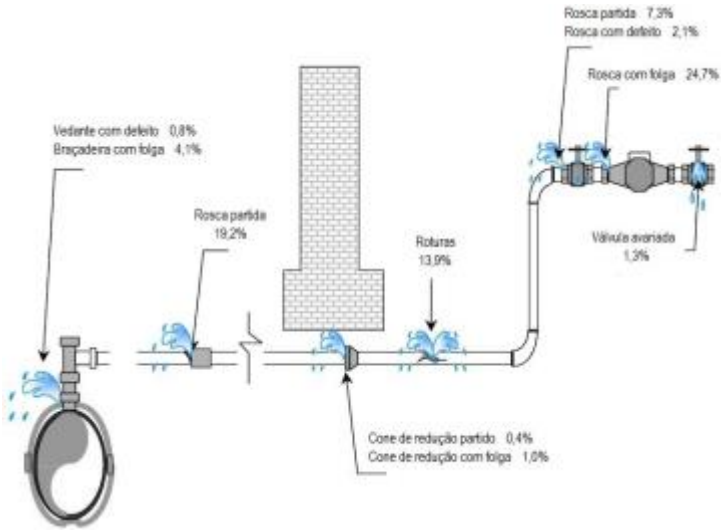

Figura 9 - Estimativa percentual das perdas reais nos ramais de ligação [9], adaptado de [23]

A perdas de água reais acontecem mais frequentemente nos ramais de ligação, em redes com maior densidade de ramais, em comparação com as condutas de distribuição [23]. Em termos de volume de água perdido, porém, este é mais expressivo nas condutas de distribuição, ainda que não contribuam necessariamente para um grande volume de água perdida na medida em que podem ocorrer quebras de pressão acentuadas. Simultaneamente, as perdas de água que ocorrem através de pequenos orifícios podem conduzir também a um maior volume de água perdida, se por um longo período de tempo [24].

3.2.1. Fatores que influenciam as perdas de água reais

Os fatores que contribuem para a existência de perdas de água compreendem a pressão de serviço, a disponibilidade de recursos e tudo aquilo que se relaciona com a frequência das roturas, nomeadamente o estado de conservação das infraestruturas hidráulicas.

i. **Pressão de serviço**

O caudal escoado numa rede depende essencialmente da pressão existente (pressão de serviço) e da dimensão do orifício, como seja o diâmetro da conduta de distribuição, bem como o respetivo consumo exigido em cada instante.

Quanto maior a pressão de serviço, maior o volume de perdas de água e consequentemente o custo de manutenção. É, portanto, conveniente manter um nível de pressão de serviço adequado, ou seja, permitindo uma utilização confortável de acordo ainda com a imposição legal. A flutuação da pressão ao longo do tempo também adquire relevância, em termos de uso eficiente de água, na medida em que está diretamente relacionada com a diminuição da resistência das condutas e junções da rede [9].

ii. **Disponibilidade de recursos**

A disponibilidade de recursos contempla os recursos hídricos, recursos financeiros e recursos humanos. Os recursos hídricos estão relacionados com a quantidade de reservas de água disponíveis na zona em questão e com a facilidade de acesso às mesmas. No que concerne os recursos financeiros, estes devem garantir a sustentabilidade do serviço, não descorando a gestão de perdas, atualização tecnológica, financiar a manutenção constante das infraestruturas e investimento nos recursos humanos especializados, entre outros. Em última análise, o tarifário praticado depende em grande parte da correta alocação de recursos financeiros. Os recursos humanos são responsáveis pelo desenvolvimento de estudos, acompanhamento dos programas de monitorização, controlo e manutenção das redes [9].

iii. Frequência com que ocorrem as roturas

A frequência com que ocorrem roturas está relacionada com o estado de conservação e idade das infraestruturas, na medida em que estas se tornam mais suscetíveis às variações de pressão. A vida útil das condutas e acessórios depende ainda do tipo de material, condições do solo, tipo de água e modo de operação do sistema.

Para além do estado de conservação, o planeamento e execução das infraestruturas também influencia a ocorrência de roturas, nomeadamente na fase de instalação, no que diz respeito quer às condutas e acessórios utilizados, quer às características do solo e a possível existência de tráfego e consequentes vibrações e cargas excessivas e ainda movimentações de terreno, que poderão aumentar as tensões instaladas nas infraestruturas constituintes das redes [9].

3.2.2. Metodologias para o controlo de perdas reais de água

Dá-se ênfase às metodologias de controlo de perdas reais de água, que englobam um controlo passivo e ativo. O controlo ativo requer uma caracterização do sistema e definição de objetivos, onde seguidamente se calculam os custos associados à implementação das medidas de controlo ativa, com a finalidade de aferir da sua viabilidade. Comparam-se os níveis de roturas, perdas e pressões da situação atual com as alternativas consideradas, sobre as quais se efetuam análises de monitorização, avaliação e revisão das estratégias [25] [14].

As metodologias centram-se na reabilitação da rede, na gestão da pressão e no controlo ativo de fugas, correspondente à sua deteção e localização periódicas, conseguidas após o zonamento das RDA em ZMC. Esta avaliação para a determinação e monitorização de perdas concentra duas abordagens, mencionadas em baixo.

3.2.2.1. Abordagem *Top-down*

Esta abordagem parte da execução de um balanço hídrico, ao nível das ZMC. Através deste processo é possível conhecer o volume de não faturado, que engloba não só as perdas reais e as perdas aparentes (água consumida não autorizada ou perda decorrente de um erro de medição) mas também a água consumida e autorizada não faturada pela EG, permitindo uma avaliação das necessidades de intervenção [14].

3.2.2.2. Abordagem *Bottom-up*

Esta abordagem, que permite estabelecer os limites de uma ZMC, contempla dois métodos complementares: o método dos caudais totais e o método do caudal mínimo noturno (CMN). O primeiro baseia-se na medição dos volumes do balanço hídrico ao longo de um período de tempo (geralmente uma semana) aos quais se subtrai a estimativa do consumo (autorizado e não autorizado), retornando o volume de perdas aparentes e reais. O segundo, o método do CMN, mais adequado no âmbito da monitorização contínua da rede, permitindo resultados mais precisos, tem por base a observação do comportamento do caudal nas horas de menor consumo, geralmente entre as 1 e as 5 horas, durante as quais se considera lícito que a maior parte do caudal se deve a perdas de água, permitindo assim acompanhar o comportamento dos caudais noturnos e detetar qualquer aumento súbito (normalmente associado a novas fugas). As fugas podem variar com pressão instalada no sistema, idade e estado de conservação das condutas ou restantes infraestruturas. Uma vez reparadas e depois de medido o caudal, é possível estimar o volume total de perdas de água, reais e aparentes, subtraindo ao volume total de água que entra no sistema o volume de consumo autorizado medido e/ou estimado [14] [9].

Em zonas maioritariamente residenciais, como é o caso do *case study* a ser abordado, a variação de consumo depende da sazonalidade ao longo do ano e da possível existência de atividades comerciais, industriais e serviços públicos. Para além destas abordagens “clássicas”, faz-se referência a outra abordagem *top-down* a ser utilizada na metodologia deste trabalho. Esta

abordagem admite a distribuição do volume anual de água consumido, partindo da leitura do ponto de medição à entrada da ZMC, pela rede de abastecimento de água. O valor de perdas de água será estimado admitindo que cada nó possui uma fuga dependente da pressão instalada.

3.2.2.3. Nível económico de perdas

As perdas de água em redes de distribuição de água são inevitáveis. Não sendo razoável admitir a possibilidade de atingir valores nulos de perda, os esforços concentram-se em reduzi-los [26]. No entanto, a partir de um determinado nível, o custo do controlo ativo de perdas ultrapassa o valor de benefício obtido pela sua redução, o Nível Económico de Perdas Reais – NEPr.

O NEPr (figura 10) terá obrigatoriamente de ter em conta a quantidade de recursos de cada EG, uma vez que nem todas possuem a mesma disponibilidade humana e financeira, de modo a saber até que ponto é viável a implementação de medidas para redução de perdas reais e aparentes. Para além disso, varia também com a regulamentação oficial ou das EG, com o tipo de acessórios presentes na rede e sua operação [14].

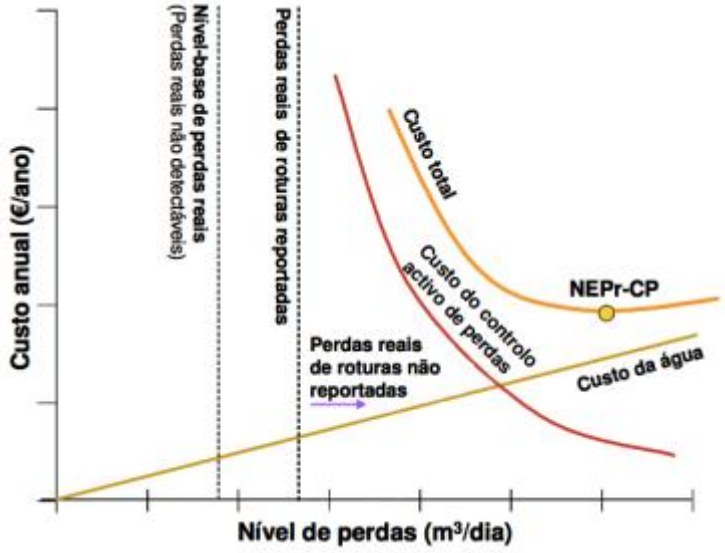

Figura 10 – Nível económico de perdas reais [14]

Observando o gráfico, é possível perceber que, com o aumento das perdas, reais ou aparentes, o custo total da água perdida aumenta, em contraste com os custos relativos ao controlo ativo de perdas, dado que o investimento na redução de perdas é reduzido. Para além disso, a redução do nível de perdas aumenta com o custo do seu controlo de uma maneira exponencial. O NEPr corresponde ao mínimo da curva de custo (somando as parcelas de controlo e custo de água perdida), ou seja, obter um nível de perdas aceitável, ao menor custo [14].

3.3. Gestão da pressão

A experiência recente, nos últimos 30 anos, mostra que a redução e estabilização da pressão num sistema de distribuição de água afeta positivamente quer o volume real de perdas reais, quer a frequência com que as fugas ocorrem [5] reduzindo os custos de reparação de roturas em condutas, contribuindo para a poupança de água e ainda ajudando a manter um nível de serviço constante [27]. A gestão da pressão, sendo mais uma das ferramentas para redução das perdas de água, deve ser utilizada em paralelo com outras técnicas e metodologias de redução de perdas reais e aparentes, e de forma continuada, de modo a incorporar componentes como a análise custo benefício, a disponibilidade de recursos e o período de recuperação do investimento [9] [5].

A gestão da pressão deve ter em vista uma redução da pressão na rede tão significativa quanto possível, garantindo níveis de fornecimento de água adequados, reduzindo as interrupções ao abastecimento, quantitativa e qualitativamente [28]**.** A maior parte das redes de distribuição de água não possuem controlo ativo de perdas. Através da divisão das redes através das ZMC e dos recentes avanços no que toca ao controlo por válvulas, é possível um controlo de pressão mais sofisticado [29].

3.3.1. Válvulas Redutoras de Pressão e Bombas como Turbinas

As válvulas redutoras de pressão (VRP) são dispositivos utilizados em redes de distribuição de água para o controlo e uniformização da pressão. As VRP dão origem a uma perda de carga localizada, mediante a dissipação de energia hidráulica, obtendo-se a jusante da mesma um abaixamento do valor da pressão. Em termos genéricos, o princípio de funcionamento de uma VRP consiste em acionar o dispositivo de obturação sempre que a pressão a jusante for excessiva, reduzindo o seu valor até ao valor pretendido, ou seja, até ao valor designado por carga de definição da VRP – H_{VRP}. Quando o valor de pressão descer consideravelmente, a válvula abre, diminuindo assim a perda de carga e aumentando a linha de energia até se atingir o valor de pressão a jusante pretendido [30].

As VRP devem minimizar o custo total do fornecimento de água (incluindo perdas), satisfazer os requisitos regulamentares de pressão em todos os nós da rede (incluindo os pontos críticos) e garantir o correto controlo operacional da rede [29].

Existem três tipos de funcionamento das VRP do tipo convencional: (1) a válvula provoca uma perda de carga localizada no sistema, reduzindo o valor da pressão a jusante – estado ativo da válvula (figura 11 (i)); (2) a pressão a montante é inferior à carga de definição da VRP, a válvula abre totalmente – estado passivo (figura 11 (ii)); (3) a pressão a jusante é maior que a pressão a montante. A válvula fecha totalmente funcionando como uma válvula de retenção que impede a inversão do escoamento – estado passivo da VRP (figura 11 (iii)).

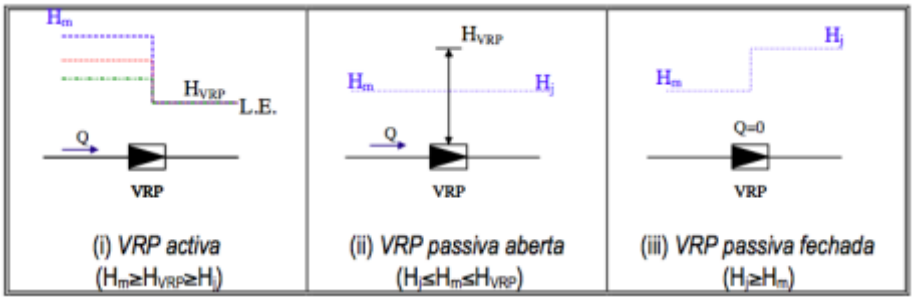

Figura 11 - Modo genérico de funcionamento de uma VRP do tipo convencional [30]

As VRP podem funcionar para diversos patamares de pressão, ao invés de apenas para um valor único, permitindo assim uma gestão mais eficiente dos níveis de serviço. Existem quatro sistemas de funcionamento de VRP que melhoram o desempenho de todo o sistema: (1) VRP com carga constante - a válvula reduz e estabiliza a pressão a jusante da mesma, mantendo a pressão constante e igual ao valor de carga de definição H_{VRP}, qualquer que seja a pressão a montante e o débito de caudal no sistema (figura 12 (i)); (2) VRP com queda constante - a válvula reduz pressão a jusante da mesma, mediante a introdução de uma perda de carga localizada constante e independente da pressão a montante, pelo que a pressão a jusante da válvula varia com a pressão a montante, mantendo constante a diferença ΔH entre elas (figura 12 (ii)); (3) VRP com carga constante variável no tempo - o comportamento deste sistema é análogo ao sistema (1), no entanto, a pressão é mantida constante em intervalos no tempo, pré-definidos, variando entre intervalos (figura 12 (iii)); (4) VRP com carga ajustável automaticamente em função da variação do consumo - a válvula reduz a pressão a jusante em função do caudal debitado ou da variação de pressão em secções críticas da rede (secções com menores pressões). No caso de a pressão ser regulada pelo caudal, é necessário equipar a válvula com um sistema de medição de caudal, para que qualquer variação do caudal seja acompanhada pela respetiva variação de pressão a jusante (desde que a pressão a jusante se mantenha inferior à de montante). (figura 12 (iv)). A situação mais comum é a utilização de um patamar de pressão para o período diurno e outro para o noturno [30].

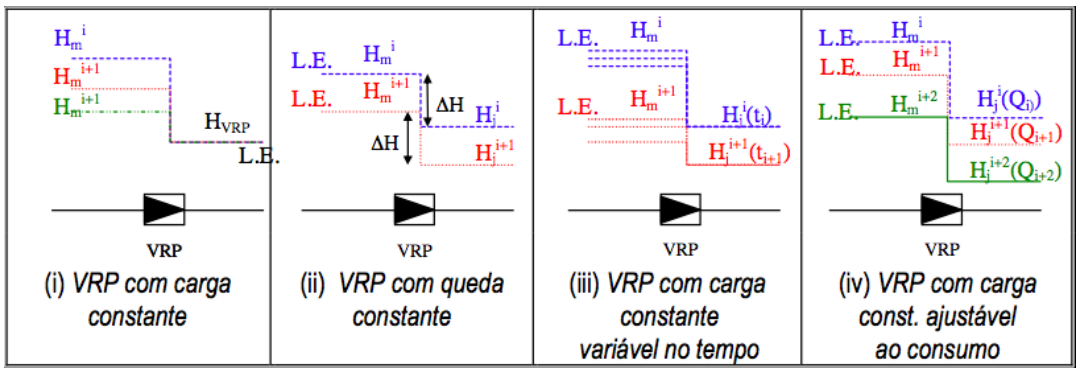

Figura 12 - Modo de funcionamento ativo de diferentes sistemas de VRP [30]

A gestão de sistemas de distribuição de água usando VRP foi abordada por diversos autores. Os estudos têm como objetivo propor alternativas que otimizem a utilização de VRP nos sistemas, nomeadamente estudando algoritmos e métodos para cálculo da localização e número ótimos das VRP, bem como avaliar os modos de funcionamento das VRP e suas repercussões nos restantes dispositivos hidráulicos.

Mais recentemente e com o objetivo de combinar a poupança de água com ganho energético, estuda-se a substituição das PRV por bombas como turbinas (BT). As BT aproveitam o excesso de energia potencial dissipado pela VRP, convertendo-o em energia elétrica [31].

As BT funcionam incorporando nas RDA uma bomba hidráulica centrífuga a funcionar de forma inversa. Esta opção aplica-se nos casos em que exista excesso de energia, típica em RDA, devido à constante variabilidade hidráulica a que estão sujeitas. A inversão gera energia na bomba, fazendo-a rodar de forma inversa e transferindo parte dessa energia ao seu motor [32]. Em regime permanente, as VRP e as BT comportam-se de maneira semelhante, no entanto desconhece-se a sua resposta dinâmica, quando existem variações transitórias do escoamento [30] As BT constituem uma opção económica muito mais viável do que as turbinas de reação, potenciada ainda quando se refere à geração de energia a escalas *mini* e *micro* [33].

As curvas de funcionamento das bombas ilustram a relação entre caudal e queda, sendo que um aumento de caudal se traduz numa diminuição da queda. É crucial identificar o ponto de melhor rendimento (PMR), que varia de acordo com cada BT e que varia normalmente entre os 40 e os 80%. Em modo turbina, o caudal aumenta com o aumento da queda, sendo possível estudar a relação entre os modos de funcionamento para o cálculo das respetivas curvas características [31]. Pode observar-se as curvas características do funcionamento de bombas e BT, que caracterizam a variação da potência P, queda útil H e rendimento η com a variação de caudal Q.

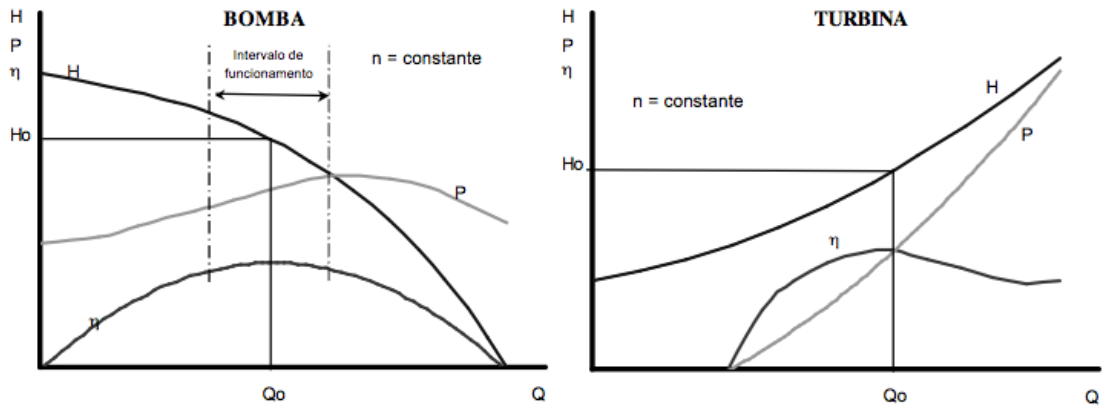

Figura 13 - Curvas típicas do desempenho de bombas (esquerda) e bombas como turbinas (direita) [30]

Como vantagens, destacam-se o seu baixo custo, fácil aquisição, instalação e reparação e o facto de não terem impactes ambientais significativos. No entanto, o intervalo de valores de

caudal nos quais estas podem operar é muito mais estreito, em comparação com as turbinas convencionais e deve, portanto, ser cuidadosamente selecionado por forma a obter o máximo rendimento [31]. Ainda, a principal desvantagem das BT é não contemplar um dispositivo de medição do caudal, não permitindo a otimização da eficiência caso este varie. Em RDA, os padrões de caudal e/ou queda hidráulica podem levar a redução da quantidade de energia gerada devido à variabilidade intrínseca, uma vez que estas operam para intervalos estreitos de valor de caudal e ainda porque pode não ser possível muitas vezes garantir a queda necessária para o seu funcionamento [4] [34].

Apesar dos obstáculos inerentes à sua implementação, as BT constituem uma alternativa viável em termos de geração de energia elétrica no contexto das energias renováveis, melhorando a eficiência do sistema. A existência de desníveis acentuados favorece a utilização desta solução, evitando assim classes de pressão demasiado elevadas nas condutas. Para além disso, este tipo de solução reduz a dependência de outras fontes de energia e os custos operacionais das RDA, contribuindo para um futuro sustentável [35] [30].

3.4. Produção de Energia em Sistemas de abastecimento de água

As condutas presentes num sistema de abastecimento de água (SAA), onde se incluem as RDA, possuem potencial hidráulico. No entanto, a queda hidráulica e o caudal são muito variáveis ao longo da rede, devido à variação do regime hidráulico, que é dependente do padrão de consumo. Conhecer os padrões de consumo e saber avaliar a sua variabilidade é uma ferramenta fulcral para estimar a disponibilidade energética de um sistema, permitindo através do correto aproveitamento da energia dissipada produzir energia e obter benefício económico [36].

Para contornar esta problemática foi desenvolvido um novo processo, denominado *Variable Operating Strategy* (VOS), ou Estratégia de operação variável (EOV), que tem por objetivo lidar com as variações no caudal e pressão nos SAA, utilizando BT e otimizando assim a produção de energia [36].

Para operar, a BT necessita de um sistema de controlo, de modo a poder lidar com a variabilidade hidráulica dos SAA. As condições de funcionamento de uma BT são a regulação hidráulica (RH) e a regulação elétrica (RE). No modo de RH a BT funciona por dois ramos: no primeiro, uma válvula de controlo (VC) e uma BT em série com a mesma – ramo de produção e dissipação – e no segundo é instalada uma VC em bypass (em paralelo) – ramo de regulação. Neste modo, se a queda disponível ΔH^d for superior à queda útil H^t da BT, ou seja, os pontos acima da sua curva característica (CC), a válvula A dissipa o excesso de pressão. Se o caudal escoado Q^d for superior, pontos acima na sua CC, a BT produz maior queda do que a disponível, pelo que a válvula de bypass B abre para reduzir o caudal escoado na BT, para que esta opere para Q^t. Esta válvula B previne que a BT trabalhe acima da queda disponível (figura 14). No modo RE, o esquema de instalação contempla uma BT e um inversor (figura 14). Neste modo, o volume de

rotação do gerador é fixado para igualar o caudal e queda instantâneos (figura 15), ou seja, a CC da BT adapta-se à queda disponível. O modo REH agrega os dois anteriores [37] [38] [39].

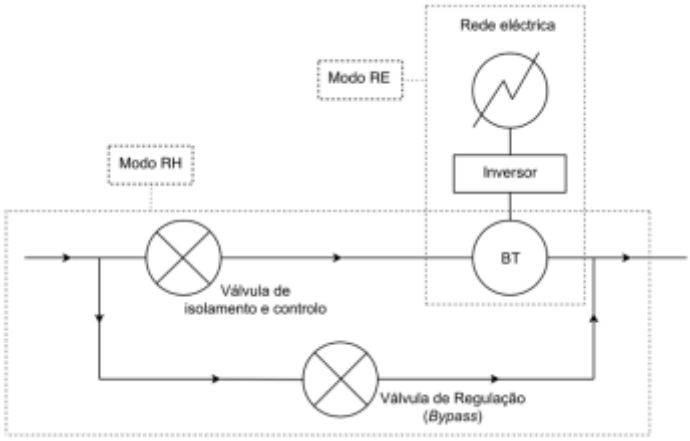

Figura 14 - Esquema para modos de RH e RE, adaptado de [38]

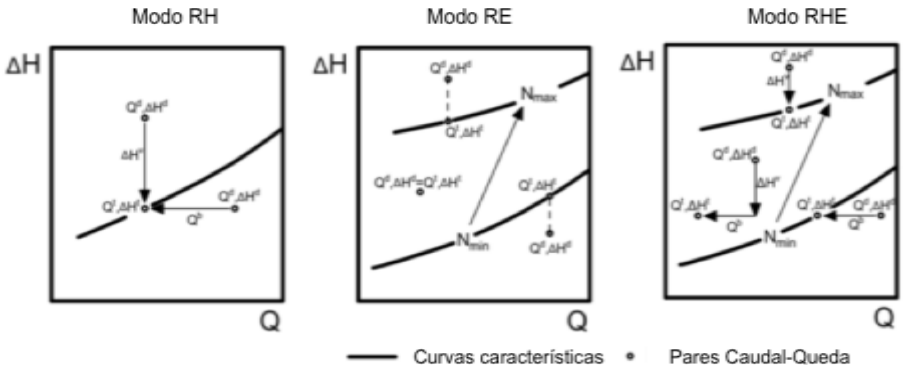

Figura 15 - Condições de operação de BT para o modo RH, RE e RHE, adaptado de [39]

No modo RH, as válvulas A e B e o bypass possibilitam que a BT trabalhe continuamente no PMR, no entanto, apenas parte da energia é transformada em energia elétrica. No modo RE toda a energia é convertida em energia elétrica, mas a BT funciona longe do seu PMR. O modo RHE combina os primeiros [39] [38].

Geralmente, o modo de RH tem menor período de retorno, é mais eficiente e mais flexível em comparação com o modo RE, na medida em que se adapta melhor face à existência de diferenças entre as condições de funcionamento de dimensionamento e as condições reais, nomeadamente pela alteração do padrão de consumo [38]. Ainda, entre o modo RHE (que maximiza a produção de energia nas RDA) e o modo RH sabe-se que estes não apresentam grandes diferenças em termos de viabilidade de implementação, sendo que o modo RH, quando sujeito a uma análise económica, se revela mais apelativo em comparação com o modo RHE, este muito mais oneroso [40].

A escolha da BT recai naquela que possui maior rendimento, aumentando a eficiência da instalação no sistema. A eficiência da instalação traduz quantidade de energia existente que pode ser transformada em energia elétrica (equação 1) [37].

$$\eta_p = \frac{\sum_{i=1}^{n} H_i^t Q_i^t \eta_i^t \Delta t_i}{\sum_{i=1}^{n} H_i Q_i \Delta_i} \quad (1)$$

Onde $Q^t \leq Q$ e $H^t \leq H$, Q^t é o caudal turbinado (m^3/s), Q é o caudal escoado (m^3/s), H^t é o valor de queda na BT (m), H_i a queda disponível (m), Δt_i é a duração do i-ésimo intervalo de tempo com características hidráulicas constantes (h) e η_i^T é o rendimento mecânico da BT [37].

Para fazer face às limitações das BT em ZMC residenciais de escoamento reduzido foi criado um novo modo de regulação de BT, o *Single-Serial-Parallel Regulation* (SSP), ou modo de regulação individual, em série e em paralelo. O modo compreende três tipos de funcionamento de um grupo constituído por duas BT e três válvulas de controlo de baixo custo, consoante o esquema de instalação da figura 16: (1) Válvula I aberta, BT A em funcionamento, válvulas II e III fechadas. Apenas uma BT está a produzir energia; (2) Válvula II e III abertas, BT A e B em funcionamento, válvula I fechada. Ambas as BT produzem energia em série; (3) Válvulas I e III abertas, BT A e B em funcionamento e válvula II fechada. Ambas as BT produzem energia em paralelo. No modo (2) a valor de queda das BT em série é o dobro do valor no modo individual (1), No modo (3), as BT operam com um valor de caudal que equivale a metade do valor no modo (1) [39].

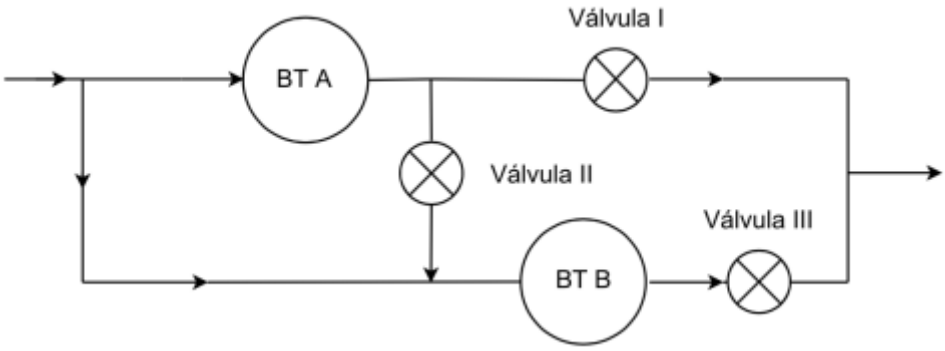

Figura 16 - Esquema de instalação para o modo SSP [39]

A vantagem da solução passa pelo seu baixo custo de instalação, reduzindo para um terço os custos de implementação em comparação com as restantes abordagens. No entanto, a eficácia é menor em comparação com o modo RH, uma vez que esta abordagem é mais difícil garantir a manutenção temporária das condições de queda e caudal, o que faz com que as BT operam longe do seu PMR [39].

3.5. Eficácia da instalação de BT em redes de distribuição de água

A eficácia de uma BT, dispositivo sujeito a constantes variações de caudal e queda provocados pelo padrão de consumo, recorrente em RDA, pode ser avaliada baseada no seu rendimento, fiabilidade mecânica e na flexibilidade do sistema em que está inserida [4].

A variabilidade hidráulica é avaliada tendo em conta os valores de caudal (Q), queda (H_u) e contrapressão $(H_d \; ou \; CP)$. A contrapressão é o valor da pressão a jusante da instalação. A queda útil é a diferença entre a queda e a contrapressão (figura 17) [4].

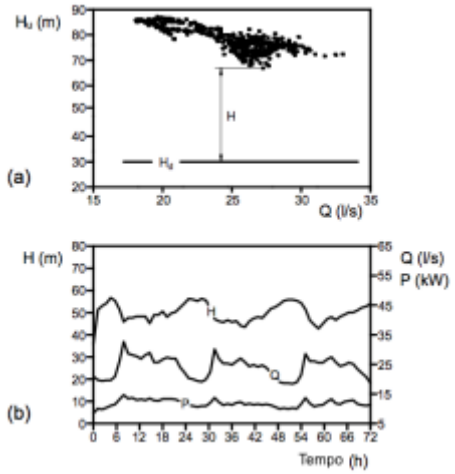

Figura 17 - (a) Pontos de operação $(Q; H_u)$; (b) Variabilidade temporal de Q, H_u e P, dada uma CP, adaptado de [4]

A escolha da BT deve favorecer a maximização da eficácia da rede. A eficácia (E) de uma rede traduz o grau com que esta satisfaz o seu propósito. O seu valor varia entre 0 e 1 e pode ser expresso tendo em consideração os parâmetros de capacidade (η_p^i), flexibilidade (ϕ_p^i), fiabilidade (μ_p^i) e sustentabilidade (χ_p^i) (equações 2 e 3) [4] [39].

$$E = \eta_p^i \phi_p^i \, \mu_p^i \tag{2}$$

$$E = \eta_p^i \chi_p \mu_p^i \tag{3}$$

A capacidade de um sistema é definida como sendo o quociente entre a energia elétrica produzida e a energia hidráulica disponível, para cada ponto de operação que compõe o padrão de consumo. Expressa, portanto, o aproveitamento energético expectável. É uma forma similar de exprimir a eficiência (equação 4) [4].

$$\eta_p^i = \frac{\sum_{i=1}^{n} H_i^t Q_i^t \eta_i^t \Delta t_i}{\sum_{i=1}^{n} H_i Q_i \Delta t_i}; \; Q_i^t \leq Q_i, \;\; H_i^t \;\leq\; H_i \tag{4}$$

Onde n representa o número de pontos de operação para um determinado padrão de consumo, Q^t é o caudal turbinado (m^3/s), Q é o caudal escoado (m^3/s), H^t é o valor de queda

útil na BT (m), H_i é a queda disponível (m), Δt_i é a duração do i-ésimo intervalo de tempo com características hidráulicas constantes (h) e η_i^t é o rendimento mecânico da BT [39].

Como se sabe, o valor de caudal e pressão nas RDA varia com o tempo. Alterações na contrapressão ocorrem, devido à variação no padrão de consumo. A implementação de VRP e BT alteram significativamente as condições das RDA, pelo que durante o ciclo de vida dos dispositivos que compõem toda a produção de energia é expectável que a eficiência das BT seja inferior ao projetado. A flexibilidade ϕ_p^i do sistema permite efetuar uma estimativa da capacidade de uma RDA, considerando variações de ±10% na contrapressão. Assim, a flexibilidade pode ser definida como o mínimo quociente entre a eficiência da rede e ±10%H_d. (equação 4), ou seja, descreve a resposta do sistema para variações de H_d em relação ao valor de dimensionamento. Quanto mais aproximado o seu valor for de 1, menor a diferença entre os valores de contrapressão obtidos, em relação aos valores de dimensionamento de eficiência obtidos e os valores de dimensionamento (equação 5) [4] [39].

$$\phi_p^i = min\left(\frac{\eta_p^{+10\%}}{\eta_p^i}, \frac{\eta_p^{-10\%}}{\eta_p^i}\right) \tag{5}$$

A fiabilidade μ_i^p de um sistema traduz a probabilidade de um componente da rede operar sem falha, para um período específico de tempo, sob determinadas condições. A fiabilidade pode ser expressa através de uma distribuição exponencial de probabilidade (equação 6).

$$R(t) = e^{-\lambda t} \tag{6}$$

onde λ é a taxa de ocorrência de falha, que corresponde ao inverso do tempo médio de falha ($1/\mathrm{TMF}$). A fiabilidade pode ser expressa pelo quociente entre o TMF para o caudal adimensionalizado no PMR (TMF_{PMR}) e o TMF para outro existente (equação 7). Quanto mais aproximado for o ponto de operação de uma BT ao seu PMR, maior fiabilidade terá [4] [39].

$$\mu_p^i = \frac{TMF\left(Q/_{Q_{PMR}}\right)}{TMF_{PMR}} \tag{7}$$

Uma curva *standard* que expressa a fiabilidade tem a sua representação gráfica na figura 18.

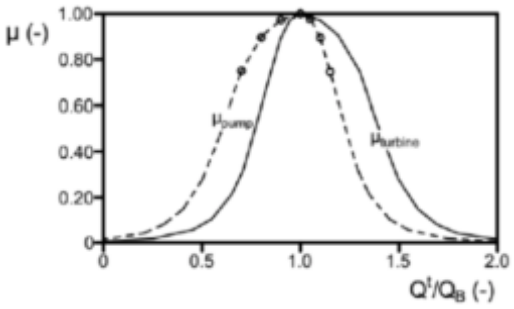

Figura 18 – Valores de fiabilidade para modo normal e modo turbina [39]

A sustentabilidade é outro parâmetro que permite aferir da eficácia do sistema. Esta considera a diferença entre carga fornecida e a carga disponível e é expressa pela equação 8:

$$\chi_p^i = \left(1 + \alpha \frac{|H^t - \Delta H^d|}{CP}\right)^{-1} \quad (8)$$

onde α é o coeficiente que influencia a redução de eficácia quando a carga líquida produzida é diferente do seu valor de dimensionamento, H^t é a queda útil da BT (m), ΔH^d é a queda disponível no sistema (m) e CP é a contrapressão (m) [39].

3.6. Gestão Inteligente de Água

A indústria da água confronta-se com um novo paradigma no que diz respeito à gestão sustentável da água. Os impactes negativos das mudanças climáticas, o crescimento da população e sua congregação em centros urbanos têm implicância direta na necessidade das EG adotarem alternativas na gestão da água, sendo que os grandes desafios existentes se prendem com assegurar a procura de água a um preço justo, face ao crescente custo da água [41].

3.6.1. Redes Inteligentes de Água - Smart Water Grids

Como já referido ao longo da dissertação, a gestão de água é geralmente condicionada pela pouca disponibilidade de recursos económicos existentes, que influenciam diretamente a avaliação e alocação eficiente de recursos que contribuam para a evolução dos sistemas de água. Para avaliar a validade do serviço de oferta de água, bem como aferir quanto aos custos de gestão e eficiência dos sistemas inteligentes que têm por base uma visão holística do ciclo da água, existem as *Smart Water Grids*, ou Redes Inteligentes de Água.

Para ultrapassar as dificuldades, a gestão de água tem de combinar a utilização de vários recursos por forma a responder à procura, preservando a qualidade ambiental. A implementação de Redes Inteligentes de Água (RIA), combina a gestão otimizada dos recursos com tecnologias de informação e comunicação (TIC). As RIA consistem num conjunto de dispositivos inteligentes instalados no terreno, que fazem a medição, controlo e diagnóstico remoto de problemas nas RDA [15] e tem por objetivo garantir o fornecimento de água e um aumento na qualidade para os utilizadores. A otimização da produção e distribuição de água são fatores-chave numa RDA eficiente [42] [43]. A figura 19 ilustra um esquema de uma RIA.

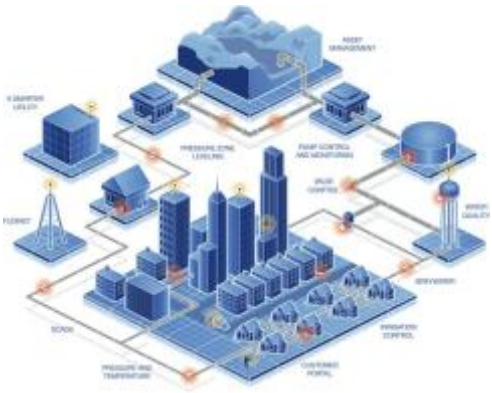

Figura 19 - Conceito esquemático de Rede Inteligente de Água [42]

A plataforma de gestão que compõe as RIA, e que tem por base as TIC, deve integrar cinco áreas de investigação: (1) Configuração da plataforma na RDA e nas redes de TIC, (2) garantir a utilização de recursos naturais (3) o controlo inteligente do escoamento de água usando comunicação bidirecional nas infraestruturas de água, ou seja, do lado da procura pelo utilizador e do lado da oferta por parte da própria RDA (4) minimizar a o risco nas infraestruturas de água e (5) garantir a operação e manutenção eficiente das infraestruturas de água do ponto de vista energético [44].

3.6.2. Tecnologias Inteligentes de Gestão de Água

- Condutas, Sensores e Medidores Inteligentes de Água

O objetivo das Condutas Inteligentes de Água (CIA), *Smart Water Pipes*, dos Sensores Inteligentes de Água (SIA), ou *Smart Water Sensors* e dos Medidores Inteligentes de Água (MIA), ou *Smart Water* Meters, passa por obter uma gestão eficiente da oferta de água, minimizando fugas e perdas de água.

Os MIA monitorizam o caudal, pressão, temperatura e qualidade da água e utilização de energia. A informação recolhida pelos MIA é transmitida via *wireless* para as EG várias vezes por dia, pelo que estas conseguem avaliar o consumo em tempo real e a qualidade da distribuição de água. Para além disso, é possível fazer a análise de dados *a posteriori*, permitindo a deteção de padrões inabituais de água ou variações repentinas em termos de consumo, por exemplo [15].

Quando comparados com os medidores de caudal convencionais, estes têm a vantagem de oferecer um maior número de dados com mais detalhe, sem necessidade de leitura manual. Para além disso pode levar ao uso mais eficiente de água, uma vez que contribui para a consciencialização dos consumidores no que concerne aos consumos efetuados [45].

Os sensores são programados com valores pré-definidos de caudal, pressão e qualidade da água, assegurando uma distribuição e simultaneamente uma monitorização contínua da água [44]. Um esquema de uma conduta inteligente e rede de sensores *wireless* é ilustrado na figura 20.

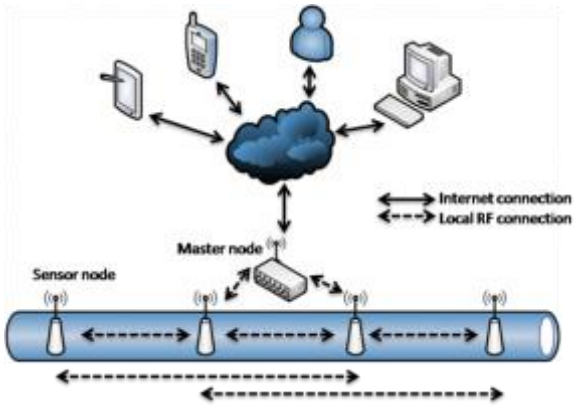

Figura 20 – Sistema de conduta inteligente e sensores wireless [46]

- Tecnologias de Informação e Comunicação

Como qualquer rede ou sistema, as RDA necessitam de manutenção e pessoal. Os medidores convencionais necessitam de um operador que faça leituras periódicas dos consumos de água [15]. Alternativamente, os MIA funcionam combinando o *Automated Meter Reading* (AMR), ou Leitura de medidor automatizada, que consiste num método de obter leituras de medição de água sem ser necessária a leitura manual, normalmente via transmissão rádio, com a *Advanced Metering Infrastructure* (AMI) ou Infraestrutura avançada de medição, um sistema que recolhe contínua e remotamente informação de vários utilizadores e que funciona para vários de redes, cujo objetivo é enviar informação nos dois sentidos e executar comandos específicos nas redes [45] [15].

  - Supervisão, Controlo e Gestão de Dados – SCADA

Supervisory Control And Data Acquisition (SCADA), ou Supervisão, Controlo e Gestão de Dados é um sistema com múltiplas finalidades controlado informaticamente que ajuda no controlo e monitorização de redes. O sistema surgiu com a necessidade crescente de integrar sistemas de controlo com modelos de simulação informáticos, com vista a uma gestão proactiva das RDA em tempo real, servindo ainda de base ao desenvolvimento de uma RIA [47], [48]. A SCADA utiliza informações dos dispositivos hidráulicos como válvulas, bombas ou transmissores e utiliza *software* e mão-de-obra humana para os controlar remotamente [15].

- Sistemas de Informação Geográfica (SIG)

O SIG é um sistema que permite e facilita a análise espacial. O SIG adquire especial relevância quando aplicado a redes inteligentes de água, uma vez que permite conhecer a distribuição espacial do inventário que as compõe. Fazendo cruzar a informação com os dados de comunicação da rede inteligente é possível gerir de forma eficiente e inteligente a distribuição de água, ou ainda analisar a possibilidade de criar novas infraestruturas que melhorem o funcionamento das RIA [47].

3.6.3. Desafios e oportunidades das Redes Inteligentes de Água

O desenvolvimento das RIA está dependente de financiamento e investimento. Normalmente, os constrangimentos que surgem na implementação destas novas tecnologias prendem-se sobretudo com questões políticas ou institucionais. Em termos gerais, não existe incentivo ao desenvolvimento e inovação das tecnologias inteligentes, pelo que muitos serviços não estão dispostos a suportar custos associados à sua implementação, não lhes dando o respetivo mérito, apesar de se reconhecerem os benefícios económicos, energéticos e ambientais gerados. Para além disso existe relutância da parte da população em geral, que não quer acarretar com os custos necessários para a manutenção destas redes, traduzida pelo aumento da tarifa praticada pelas EG [49].

Outros constrangimentos estão relacionados com a falta de conhecimento da crise da água e benefícios das RIA por parte da população em geral, do possível carácter invasivo associado a estas tecnologias, bem como da falta de informação fidedigna dos parâmetros de qualidade e quantidade de água existente [2] [15].

Apesar destes desafios as RIA apresentam diversas vantagens, nomeadamente a prevenção e deteção de perdas e fugas de água, a melhoria na capacidade de gestão por parte das EG, a monitorização dos parâmetros das redes, avaliar o nível de desempenho das infraestruturas e, a longo prazo, soluciona problemas de escassez de água. Ainda, através do conhecimento dos níveis de procura e tendo em consideração as perdas de água, é possível reduzir-se a produção de água, traduzida numa redução de custos de energia e conservação da água [15].

Assim, as RIA serão capazes de integrar diversas tecnologias já existentes, tirando melhor partido em termos de desempenho conjunto das mesmas, com a finalidade de obter maior eficiência e menores impactes ambientais, bem como criar oportunidades nos mercados da indústria, contribuindo assim para um futuro sustentável em termos económicos e ecológicos [50].

3.7. Perspetivas Futuras e Sustentabilidade

Tendências como a urbanização, as mudanças climáticas e crescimento populacional que se verificam hoje em dia representam desafios sérios para o desenvolvimento sustentável.

A relação entre a procura, a disponibilidade de recursos e a sua qualidade, bem como constrangimentos económicos e espaciais podem ser avaliados hoje em dia. No entanto, não existem políticas de integração entre recursos, ou seja, não se interpreta de forma integral a gestão de água, solo e resíduos, ou seja, os modelos correntes de gestão possuem muitas limitações no que concerne as questões ambientais e económicas. Assim, começa a criar-se uma nova abordagem no que toca à gestão dos recursos naturais.

Este novo paradigma, o *Nexus*, ou Nexo, salienta a interligação e interdependência, com vista a uma gestão integrada dos recursos e dos seus diferentes usos, avaliando-os em conjunto, e é baseada em conceitos como a otimização e as sinergias.

O sucesso desta abordagem depende de uma ação coletiva entre governação e EG, onde estes adquirem um papel relevante em fazer chegar este novo conhecimento ao público, nomeadamente na aceitação da mudança e na necessidade de mudar comportamentos [51].

O aumento da produtividade dos recursos, a utilização de resíduos nos sistemas como recurso, o estímulo de desenvolvimento através dos incentivos económicos, o aumento da consciencialização, capacidade de reduzir a pobreza e crescimento verde são algumas das vantagens apontadas a esta nova abordagem de gestão [52].

3.7.1. Relação Água-Energia

Os sistemas de água e energia estão diretamente entrelaçados. A água é usada em todas as fases da produção de energia e criação de eletricidade. Por outro lado, é necessária energia para extrair, transportar e distribuir água às populações, bem como para tratar a água residual decorrente da sua utilização. As interações existentes entre água e energia são consideradas a nível local ou regional. A nível nacional ou internacional, os sistemas de água e de energia são desenvolvidos e geridos de maneira independente.

Atualmente, têm sido feitos esforços no sentido de avaliar possíveis conexões entre estes sistemas, sendo que a discussão atual se foca em perceber as vantagens de uma abordagem de gestão interligada centralizada ou não centralizada, perceber que estruturas institucionais e que mecanismos de gestão multissetoriais são relevantes para a implementação da estratégia e em que medida se tornam eficientes, bem como perceber o âmbito de ação das mesmas. Para além disso, estuda-se a viabilidade e que tipos de incentivos financeiros são requeridos [51].

Apesar ser começar a ser um termo bastante utilizado, não há uma definição consensual da "*water-energy nexus*", a relação água-energia. A avaliação da interconexão entre água e energia e as relações de causa-efeito existente entre ambas é uma definição possível. Isto implica que uma mudança numa refletir-se-á na outra [53].

Os objetivos desta abordagem compreendem: (1) Otimizar a eficiência da água em termos energéticos na sua produção e na geração de energia elétrica, nos sistemas finais; (2) Otimizar a energia consumida na gestão da água; (3) Aumentar a fiabilidade e a resiliência dos sistemas de água e energia; (4) Aumentar a produtividade de água vinda de fontes não convencionais; (5) Promover a correta exploração de energia com respeito pelo ambiente e ecossistemas [54].

Hoje em dia existe pouca informação concreta acerca da conexão entre água e energia nos sistemas e nas cidades. Os estudos existentes focam-se normalmente em aspetos individuais do problema, existindo, portanto, pouco conhecimento bem assente. A literatura fornece poucas

ideias do ponto de vista da avaliação do cada vez maior consumo de energia nas RDA, avaliando temáticas do ponto de vista da salvaguarda energética ou da água em separado. A falta de aplicação de princípios teóricos e de métodos consistentes é grande constrangimento atual [53].

3.7.2. Relação entre Redes Inteligentes de Água e Energia

Considerar a água como uma fonte de energia renovável requer uma melhoria na tecnologia, na gestão e nas políticas existentes. Se tal se verificar, será possível reduzir os consumos energéticos e consequentemente a dependência de água como recurso.

As RIA permitem uma gestão proactiva da água e permitem tomar decisões ao nível de todo o sistema, em tempo real. A eficiência energética é obtida integrando sistemas de energia nas RIA, que para além de reduzirem o consumo de água e energético, aumentam a sua fiabilidade [44].

A implementação da abordagem depende de um conhecimento profundo dos dados e dos indicadores existentes. Compreendendo-os, conseguir-se-á satisfazer a procura de forma sustentável. [52] Como se viu, esta abordagem de gestão é baseada não na experiência, mas sim na capacidade de tomar decisões inovadoras, acarretando risco associado. Saber lidar com as interdependências é uma maneira de lidar com a incerteza. Em suma, a relação água-energia cria oportunidades para melhorar a qualidade de vida e resiliência dos ecossistemas, desde que haja abertura a novas aprendizagens e uma mudança por parte dos decisores políticos e instituições [54].

3.7.3. Energia Hidroelétrica e Crescimento Sustentável

O consumo de energia, associado ao desenvolvimento humano, aumentou significativamente desde a revolução industrial. Hoje e no futuro, é esperado que as energias renováveis sejam um importante contributo na produção elétrica à escala mundial, estimando-se em 2035 uma potência disponível superior a 1400 GW [3].

As entidades de gestão têm vindo cada vez mais a preocupar-se com a redução do consumo de energia nos sistemas de distribuição de água. O aumento da variabilidade climática e a subida de preços dos combustíveis fósseis levam à procura de alternativas viradas para o uso de energias renováveis na produção de energia [55].

Na Europa, no período compreendido entre 2002 e 2013, a geração de energia renovável aumentou 96,17%, sendo que a energia produzida por centrais hidroelétricas aumentou 16,38%, ainda que menos que energias como a solar, eólica e de biomassa [3].

Em Portugal, segundo o boletim da APREN referente ao primeiro trimestre de 2017, as fontes de energia renovável contribuíram para abastecer a totalidade do território nacional continental por

um período de 4 dias. As fontes renováveis hidroelétricas contribuíram com uma produção de 3140 GWh, em período homólogo [56].

O desenvolvimento das energias renováveis possui um futuro promissor, com impactes positivos no ambiente e geração estável de eletricidade, geração esta que beneficia e permite o desenvolvimento dos sistemas de água [3]. A melhoria da eficiência destes sistemas através do aproveitamento de energia é assim uma realidade. Os seus objetivos passam pela redução de emissões de carbono, o aumento do lucro e a conservação do ambiente [55].

Ao aplicar a produção de energia a RDA, partindo do aproveitamento do seu potencial energético intrínseco, é possível reduzir a utilização de recursos naturais e custos de operação. A sua viabilidade de implementação depende fundamentalmente do volume de água consumido, da topografia e características físicas e operacionais das infraestruturas que os compõem e repercute-se na sua análise de viabilidade económica. Compreender de que forma estes parâmetros se relacionam e funcionam, contribuirá num futuro próximo para a sustentabilidade e eficiência destes sistemas. Assim, sobressai a relevância do aproveitamento energético em RDA com vista ao crescimento sustentável [3].

4. Apresentação do Caso de Estudo e Metodologia

4.1. Enquadramento Geral

Este capítulo tem como objetivo a definição e sintetização da informação recolhida, a ser utilizada *a posteriori*, aquando da materialização do modelo hidráulico e cálculo dos diferentes cenários a analisar. Estuda-se a possibilidade de aproveitamento de uma RDA, "em baixa", em termos energéticos, com vista ao aumento da sua fiabilidade e eficiência. Pretende-se ainda avaliar o resultado do controlo de pressões na rede, provenientes da adoção de uma solução final, comparando as perdas reais atuais com as advindas dessa nova solução.

Para tal, é necessário atentar em primeiro lugar às características da rede (morfologia, topografia, padrão de consumo, comportamento hidráulico). Depois, interessa conhecer os meios e métodos para o processo de simulação hidráulica, bem como as normas e regulamentos existentes na fase de operação de RDA. Também será dada ênfase à metodologia de calibração e otimização adotada e finalmente será abordado o procedimento de análise de custos das possíveis soluções encontradas.

Assim, para aferir da capacidade de aproveitamento de energia residual do sistema, quantitativa e qualitativamente, tendo em conta as suas características, vantagens e inconvenientes, bem como do resultado da gestão de pressão, tem-se por base as hipóteses descritas no capítulo.

4.2. A ZMC da Beloura

Os Serviços Municipalizados de Água e Saneamento de Sintra (SMAS) são a maior entidade autárquica distribuidora de água do país, com cerca de 182 000 clientes distribuídos por 320 km^2. Os SMAS são responsáveis pela gestão da água no concelho de Sintra, com uma rede de distribuição que se estende por 1784 km de condutas de água, divididas em 52 ZMC, entre as quais a Quinta da Beloura, na Freguesia de Sintra. A ZMC da Beloura, contruída no início dos anos 2000, agrega 15,4 km de condutas de água e serve uma população que se estima na ordem dos 4000 habitantes, correspondentes a 1335 clientes.

Foi proposto pela EG a verificação do diâmetro das condutas, no sentido de aferir do seu correto dimensionamento, bem como um estudo do nível de pressões e velocidades do escoamento na rede e possíveis melhorias a implementar. Em contrapartida, foi proposta a avaliação da capacidade da rede de produzir energia elétrica, mediante o aproveitamento do potencial hidráulico da rede. São excluídos do estudo a avaliação dos parâmetros de qualidade da água e a situação de incêndio.

4.3. Dados de consumo

No sentido de melhor perceber e analisar os padrões de consumo e poder precaver situações de perda de água, os SMAS iniciaram a instalação de dispositivos de medição nas suas ZMC.

No caso da ZMC em estudo, foi então colocado um medidor de caudal *Hydrins*. Este medidor, de inserção, eletromagnético, que regista o caudal escoado em intervalos de uma hora, num ponto a montante do início da distribuição de água na rede (figura 21), possui um erro de +- 1% na leitura. Os dados são registados e enviados via GSM para o sistema informático da EG através de um *data-logger Multilog* (figura 21). A sua localização em planta na rede observa-se na figura 22. O estudo do padrão de consumo estimado é realizado para toda a rede tendo por base estas leituras, no período que abrange os primeiros 366 dias funcionamento dos dispositivos, correspondente às datas entre 12 de outubro de 2015 e 11 de outubro de 2016.

Figura 21 - Medidor e Data-Logger

Figura 22 - Vista aérea da ZMC e localização dos dispositivos

O caudal médio anual registado situa-se nos 12,12 l/s, o que corresponde a uma capitação média de cerca de 260l/dia. Importa referir que este valor elevado decorre do tipo de utilização da ZMC, que se estende para além do seu caráter residencial, nomeadamente com a existência de muitos serviços. O padrão de consumo horário anual, que expressa o quociente entre o valor de caudal horário registado, Q_i, e o valor do caudal médio anual, Q_{ma}, é assim definido (figura 23).

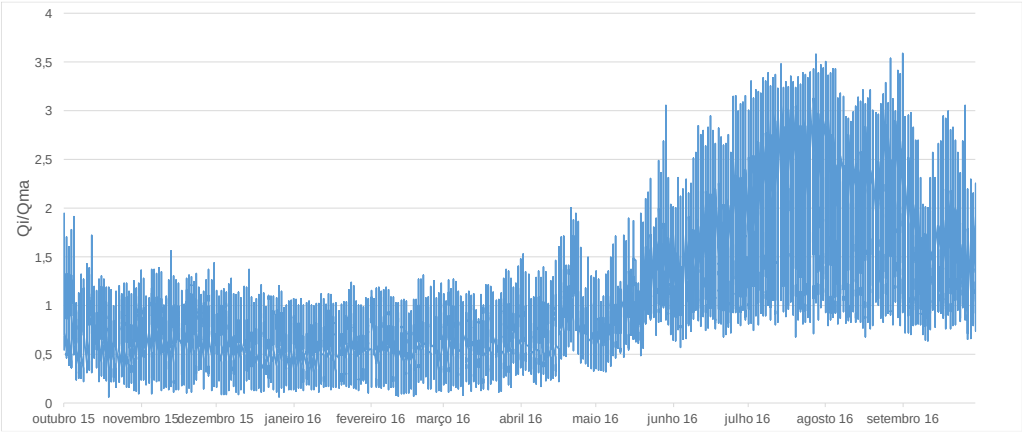

Figura 23 - Padrão de consumo anual

A primeira conclusão que se retira através avaliação dos dados prende-se com a grande variabilidade sazonal do consumo nesta ZMC. O intervalo de consumos horários varia entre os 1,5 e os 43 l/s. A frequência com que estes ocorrem (organizada em blocos de $2\ l$) observa-se,

para o período em análise, bem como a percentagem cumulativa do total do volume de água a que corresponde cada patamar de consumo (figura 24).

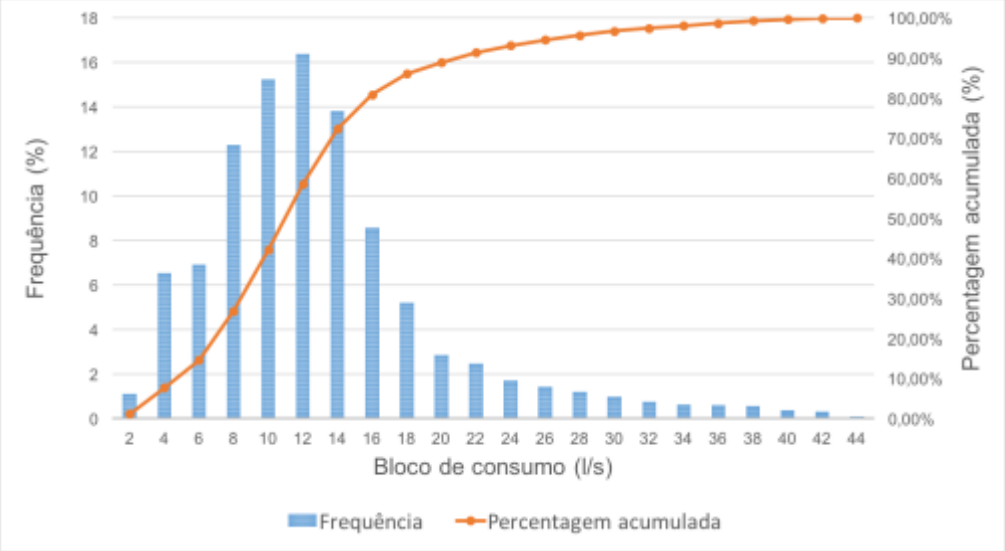

Figura 24 –Distribuição do consumo anual da ZMC da Beloura

Face à disparidade quer do número de blocos horários com consumo distinto, quer da sua quantidade absoluta, torna-se necessário verificar em que período temporal estes ocorrem e como é que estes se distribuem e relacionam ao longo do dia.

Assim, começa-se por estudar os dados em intervalos mensais, esta abordagem permite definir três grandes grupos de tipos consumo: (1) normal, (2) elevado e (3) muito elevado. O consumo tido como normal agrega o consumo registado nos meses de novembro a abril (figura 25); o consumo elevado os meses de maio e outubro (figura 26) e o consumo muito elevado reporta aos consumos registados nos meses de junho a setembro (figura 27).

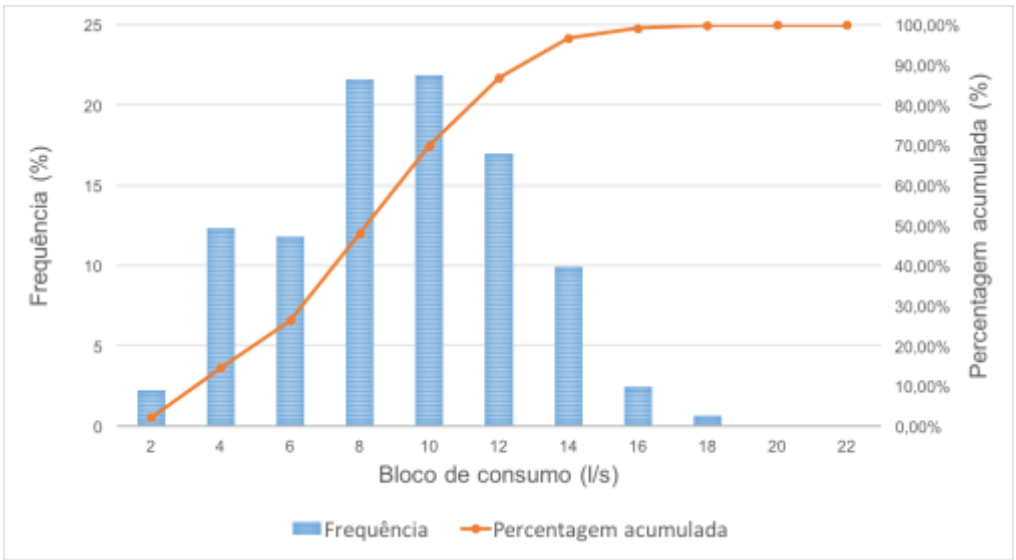

Figura 25 - Distribuição do consumo para tipo de consumo normal

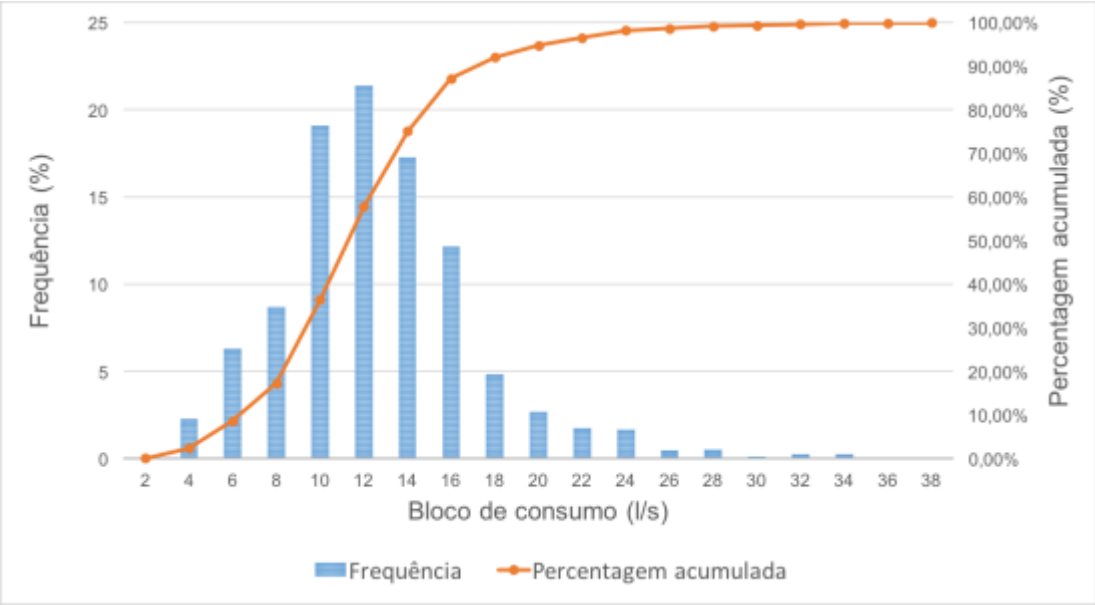

Figura 26 - Distribuição do consumo para tipo de consumo elevado

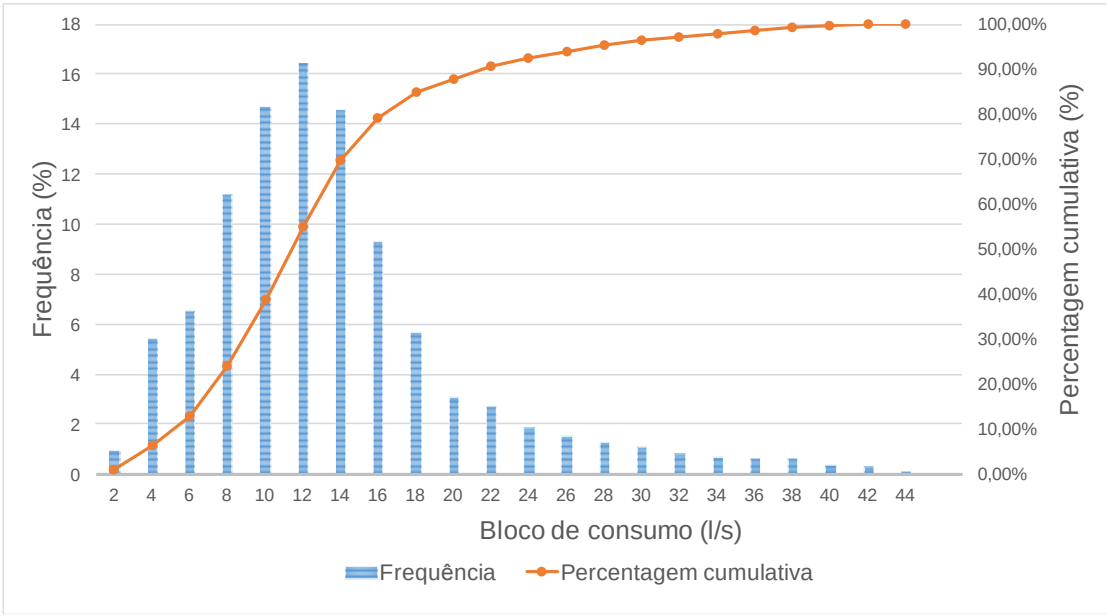

Figura 27 - Distribuição do consumo para tipo de consumo muito elevado

Finalmente, estabelecidos estes três tipos de consumo anual, efetua-se a análise semanal para cada um destes períodos, de forma a prever com mais detalhe a sua. Para tal, organizaram-se os dados horários médios para cada dia da semana, em cada um dos períodos referentes a cada tipo de consumo: (1) normal (figura 28), (2) elevado (figura 29) e (3) muito elevado (figura 30).

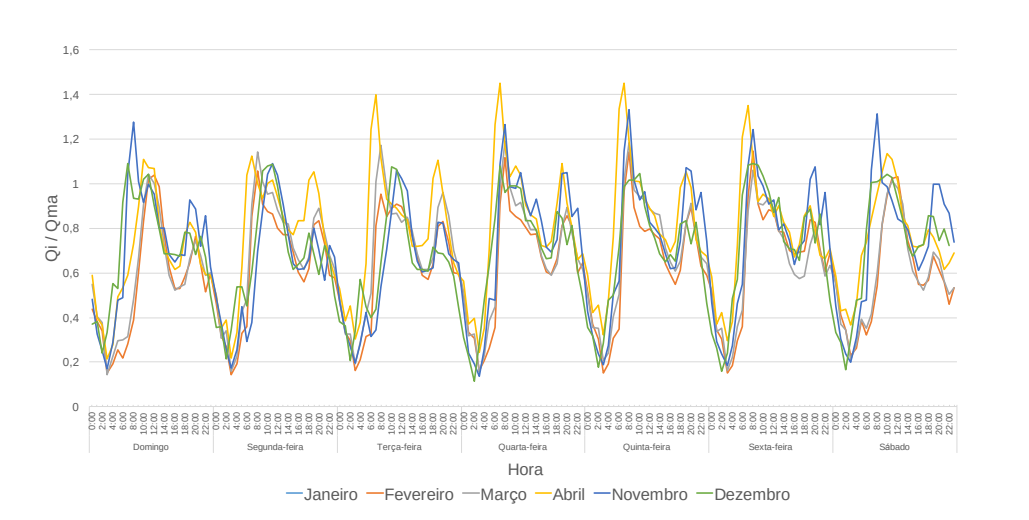

Figura 28 - Padrão de consumo horário médio semanal – tipo de consumo normal

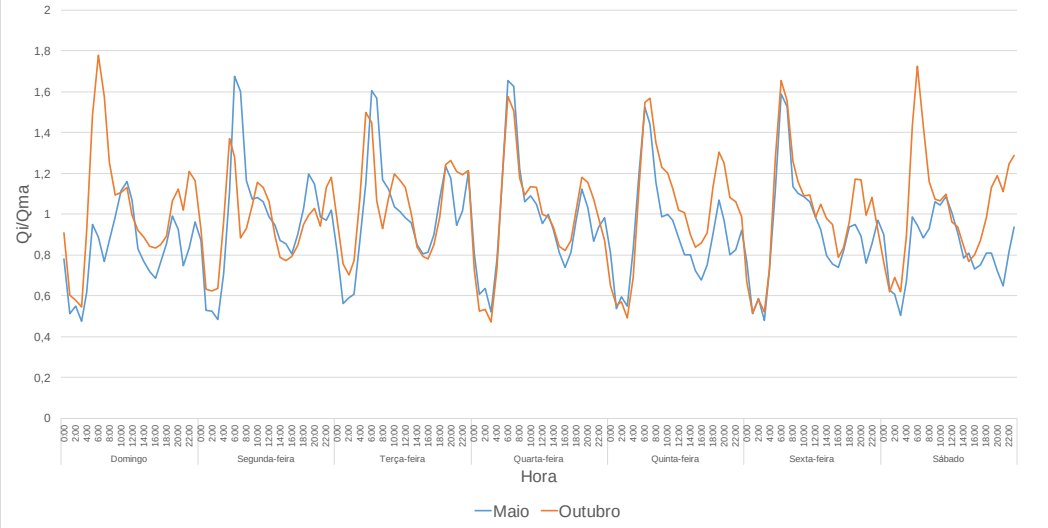

Figura 29 - Padrão de consumo horário médio semanal – tipo de consumo elevado

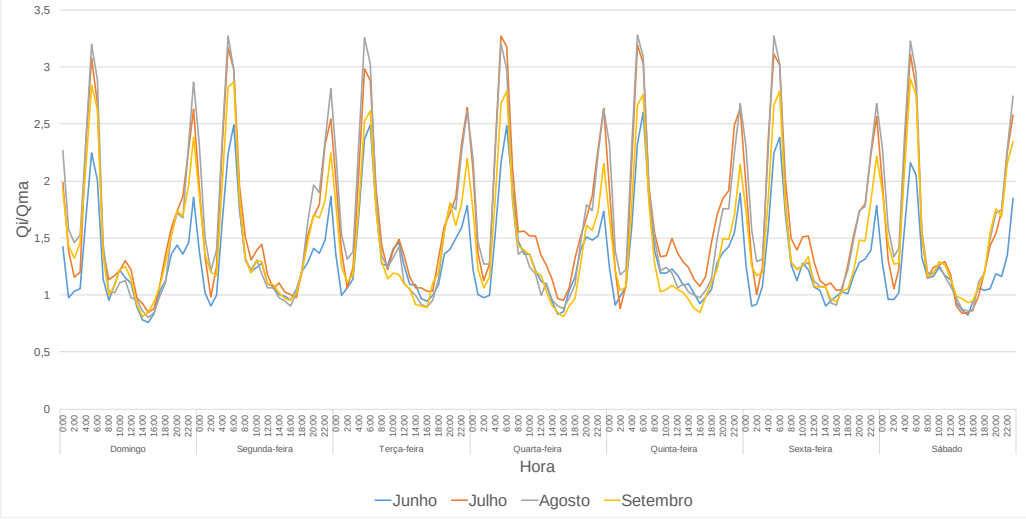

Figura 30 - Padrão de consumo horário médio semanal – tipo de consumo muito elevado

É possível constatar que o padrão de consumo diário se admite similar ao longo de todos os dias da semana, verificando-se ainda picos de consumo entre as 6 e as 7h e entre as 19 e 20h em todo o ano, bem como um acréscimo significativo do consumo noturno na época do Verão (período de consumo muito elevado). Verificando a coerência entre valores de consumo horários entre dias da semana é possível traçar um padrão de consumo médio diário, para cada um destes três tipos de consumo e que servirá de base para a avaliação da RDA.

A caracterização do padrão de consumo constitui a primeira ferramenta para o estudo a desenvolver e adquire caráter essencial na definição da implementação e calibração dos parâmetros hidráulicos a modelar. Assim, para além se estudar a variação temporal do consumo, torna-se também necessário distinguir diferentes tipos de uso de água no diferente edificado englobado na ZMC. Pretende-se alocar a cada tipo de uso um determinado grau de consumo, avaliando a sua influência nas condições hidráulicas de todo o sistema, por forma a melhor o descrever e modelar. Os resultados destas parametrizações são abordados no capítulo seguinte.

4.4. Normas regulamentares das RDA em baixa

As RDA são sistemas de utilidade pública. Assim, as suas infraestruturas devem garantir a procura de água com qualidade, salvaguardando valores adequados de pressão e quantidade. A componente adutora dos sistemas, onde ocorre a captação e tratamento de água opera em pressões elevadas e a rede distribuidora funciona tipicamente a pressões reduzidas. Normalmente, os sistemas "em baixa", responsáveis pela distribuição, são projetados e dimensionados aproveitando o desnível topográfico por forma a funcionarem por gravidade [57].

Os sistemas "em baixa" devem respeitar critérios de velocidade e pressão e dimensão das condutas de distribuição. Por norma, estas são tidas em conta na fase de projeto. Por forma a garantir um bom desempenho global da ZMC, estes parâmetros serão avaliados no presente, tendo como critérios os dispostos na legislação, no Decreto Regulamentar (DR) nº 23/95, de 23 de agosto.

De acordo com o DR, a velocidade máxima nas condutas para o período de projeto não deve exceder o valor obtido através da equação 9,

$$V = 0{,}127 D^{0{,}4} \tag{9}$$

onde V é a velocidade máxima (m/s) e D corresponde ao diâmetro interno da conduta de distribuição (mm). Para situações onde o valor mínimo de velocidade do escoamento (0,30 m/s) não seja satisfeito, terão de ser instaladas válvulas de descarga.

A pressão máxima estática, ou de serviço não deverá exceder 600 kPa ao nível do solo. A máxima variação de pressão diária não deverá exceder 300 kPa. A pressão de serviço não deverá ser inferior a 100 kPa, sendo que toma o valor mínimo dado pela equação 10, sempre que existe consumo em construção elevada.

$$H_{mín} = 100 + 40n \quad (10)$$

onde H representa assim a pressão mínima admissível (kPa) e n o número de pisos acima do nível do solo, incluindo o piso térreo.

O diâmetro nominal mínimo varia de acordo com a população a servir em cada rede: 60 mm para aglomerados populacionais com menos de 20000 habitantes e 80 mm para aglomerados com mais de 20000 habitantes [58].

4.5. Simulação hidráulica

Para atestar o modelo de definição dos pontos de consumo estimados e posterior calibração, ferramenta base para efetuar um estudo energético, bem como toda a componente experimental sequente, faz-se uso da modelação esquemática da rede preconizada no trabalho, recorrendo-se ao software WaterGEMS (WG), desenvolvido pela Haestad Methods e distribuído pela Bentley Systems.

O WaterGEMS parte dos princípios de Conservação da Massa e de Conservação da Energia para resolver o equilíbrio hidráulico de um sistema de água. Utilizando o *Gradient Algorithm* (Algoritmo do Gradiente), método que permite resolver equações em redes de distribuição de água funcionando em malha, é possível resolver em função da distribuição do caudal e da perda de carga, quer em *Steady-state Conditions*, que traduz a análise em regime permanente, quer em *Extended Period Simulation* (EPS) ou Simulação em Período Estendido, que permite ter em consideração o padrão de consumo e os controlos operacionais.

O princípio de Conservação da Massa é aplicado nos nós da rede. A água em redes de pressão comporta-se como um fluido incompressível e, como tal, sabe-se que o volume afluente a um nó deverá igualar o volume efluente subtraindo o seu consumo. Esta igualdade pode ser expressa em termos de caudal através da equação 11:

$$\sum Q_{IN}\,\Delta t = \sum Q_{OUT}\,\Delta t + \Delta V_S \quad (11)$$

onde Q_{IN} é o caudal total afluente ao nó (m^3/s), Q_{OUT} o consumo no nó (m^3/s), Δt o intervalo de tempo (h) e ΔV_S a diferença no volume armazenado (m^3).

O princípio da Conservação de Energia estipula que entre dois nós da rede a perda de carga tem de ser a mesma, qualquer que seja o caminho entre eles. O balanço de energia entre dois pontos, 1 e 2, obedece à equação da Energia (equação 12):

$$\frac{p1}{\gamma} + z_1 + \frac{U_1^2}{2g} = \frac{p2}{\gamma} + z_2 + \frac{U_2^2}{2g} + h_l \quad (12)$$

onde p é a pressão (N/mm^2), γ é o peso volúmico da água (N/m^3), z a elevação (m), U_i a

velocidade (m/s), g a aceleração gravítica (m/s^2), h_l a perda de carga total (m).

As perdas de carga contínuas, energia perdida por unidade de peso ao longo do escoamento da água na unidade de comprimento das condutas, são avaliadas no programa através da fórmula de Hazen-Williams, que se baseia na aplicação de um coeficiente relacionado com a rugosidade das condutas de distribuição [59].

4.6. Equipamento hidráulico

Como já foi abordado anteriormente, a solução de incorporar bombas como turbinas (BT) em RDA permite o aproveitamento do potencial hidráulico residual da rede, para além de garantir simultaneamente as funções de uma VRP. As BT serão modeladas no WG como turbinas.

Os parâmetros hidráulicos relevantes de uma BT são a sua potência hidráulica P_h (equação 13) e a sua potência mecânica P_m (equação 14):

$$P_h = \gamma Q^t H_u \tag{13}$$

$$P_m = \omega \Gamma \tag{14}$$

onde γ é o peso volúmico da água (N/m^3), Q^t é o caudal turbinado (m^3/s), H_u é a queda útil da BT (m), ω a velocidade angular (rad/s) e Γ é o binário do motor (Nm).

O rendimento de uma BT, η_i^t, resulta então do quociente entre a potência mecânica e a potência hidráulica, equação 15:

$$\eta_i^t = \frac{P_m}{P_h} = \frac{\omega \Gamma}{\gamma Q^t H_u} \tag{15}$$

Estudos demonstram que o comportamento de bombas a funcionar em modo turbina apresentam melhores valores de rendimento, em comparação com o modo de funcionamento normal, como bomba [60]. No entanto, o intervalo de valores a que uma BT opera é substancialmente inferior, em comparação com uma turbina normal. Assim, a escolha da bomba a ser usada em modo turbina deve ser criteriosa, de modo a obter a maior eficiência possível no sistema [61].

No caso de a BT contemplar um gerador que forneça energia à rede elétrica, a velocidade de rotação deverá manter-se constante, obtendo-se uma relação entre o caudal turbinado e a queda existente [32]. Requisitam-se à empresa KSB as curvas características das suas bombas a funcionar em modo turbina, depois de ter sido analisado o seu catálogo previamente cedido. Para os intervalos de queda útil e caudal obtidos para as diferentes alternativas, pede-se, nas condições descritas, a velocidade de rotação que maior gama de rendimentos possui.

As BT adaptam-se às condições hidráulicas, a queda e caudal instalados no sistema (região de

operação), alterando as suas condições de funcionamento (figura 31). Os regimes de funcionamento das BT traduzem-se pela sua curva característica.

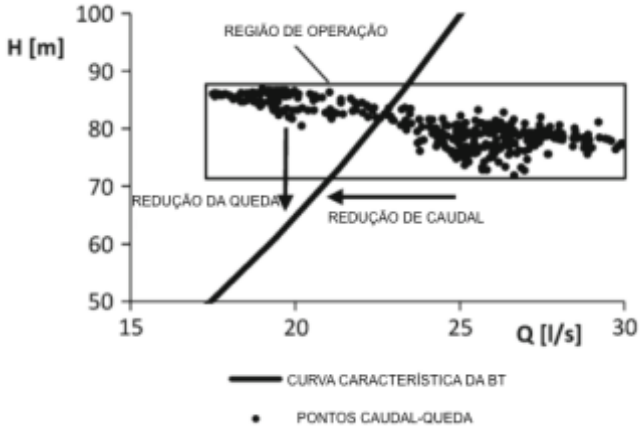

Figura 31 - Condições de funcionamento de uma BT, adaptado de [36]

São ainda definidas outras duas curvas características (CC): a CC para N=0, que representa os pontos de queda útil e caudal acima dos quais é produzido binário, e a CC M=0, que define o lugar geométrico (pontos abaixo da curva) onde o binário não é transmitido para o gerador (figura 32).

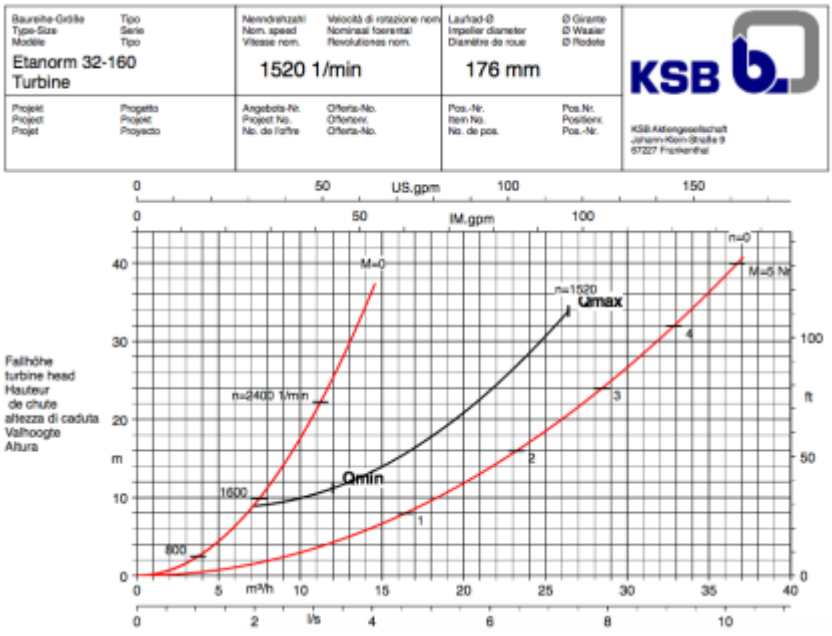

Figura 32 - Curvas características das bombas como turbinas

Para além das BT a instalar, existem ainda 4 VRP existentes na rede. Três *Flucon* 200.02.03 DN65 (figura 33) e uma *Flucon* 200.02.03 DN100.

Figura 33 - Instalação correspondente a duas VRP Flucon200.02.03 DN65 na ZMC em estudo

4.7. Produção de Energia e Análise Económica

O contributo dos considerados micro aproveitamentos hidroelétricos, como é o caso do aproveitamento de energia em RDA, é irrisório face às necessidades energéticas num país. No entanto, a sua implementação e exploração em grande escala permite reduzir significativamente os impactes ambientais decorrentes da redução da componente térmica do sistema electroprodutor nacional. Para além disso, a exploração pode ser encarada por parte das EG do ponto de vista económico, uma vez que esta solução aproveita energia que poderá ser vendida à rede nacional ou usada na operação e exploração própria RDA, reduzindo os custos com a energia [62].

A produção de energia (E_{nergia}) num sistema depende do caudal e do padrão de consumo, equação 16:

$$E_{nergia} = \sum \eta \gamma Q^t H_u \Delta t = \sum P_u \Delta t \tag{16}$$

onde E_{nergia} é a energia (kWh), P_u é a potência útil (kW) e Δ_t o intervalo de tempo (h).

Os objetivos de cada projeto condicionam os critérios a adotar na avaliação do mesmo. Se o objetivo for apenas a maximização de receitas, a solução que conduz a um maior benefício económico pode não corresponder à solução que otimiza a relação custo-benefício. Assim, os projetos de análise energética passíveis de serem executados devem ser acompanhados de um estudo de viabilidade técnica e económica, dependente dos objetivos a que estes se propõem, e devem ser posteriormente alvos de análise comparativa [63].

Os fluxos monetários, reportados sempre ao fim do ano a que se referem, ocorrem em espaços

temporais distintos e, por isso, não são diretamente comparáveis. Neste sentido, utiliza-se a taxa de atualização anual t, que permite calcular o valor atribuído a uma componente num determinado instante a um fluxo monetário ocorrido num instante diferente, tendo em conta a variabilidade da taxa de juro do mercado, a disponibilidade de capital, o risco associado, entre outras incertezas. Se n representa o período em anos, o valor de uma unidade monetária no presente irá ser afetada de $(1+t)^n$ unidades monetárias no ano n.

O valor presente (VP) representa o valor acumulado atualizado para o início do primeiro ano de uma sequência de fluxos monetários. No caso de os fluxos monetários serem constantes, i.e., que abrangem o período de um ano, o VP é dado pela equação 17:

$$VP = C_i * \frac{(1+t)^n - 1}{(1+t)^n * t} \tag{17}$$

Para avaliar a viabilidade económica de um projeto ou da comparação entre alternativas num projeto de forma correta faz-se uso de indicadores económicos, o valor atualizado líquido (VAL), índice benefício-custo (B/C); a taxa interna de rentabilidade (TIR) e o período de recuperação do investimento (T).

Os custos associados a estes projetos dividem-se em três categorias: custos de investimento (I), equação 18, custos de exploração (O) anuais, equação 19 e custos de reposição (S), equação 20. Os custos de investimento estão relacionados com o investimento inicial, incluindo estudos, equipamentos e construção civil e têm, por isso, caráter pontual. Os custos de exploração contemplam os encargos anuais relativos à operação e manutenção das obras. Por sua vez, os custos de reposição prendem-se com a substituição de equipamentos cujo ciclo de vida se verifica inferior ao ciclo de vida do projeto. Em contrapartida existem os benefícios anuais (R), equação 21.

$$I = \sum_{i=1}^{m} \frac{1}{(1+t)^i} I_i \tag{18}$$

$$O = \frac{\sum_{i=1}^{n-m} \frac{1}{(1+t)^i} O_i}{(1+t)^m} \tag{19}$$

$$S = \frac{S_i}{(1+t)^i} \tag{20}$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{n-m} \frac{1}{(1+t)^i} R_i}{(1+t)^m} \quad (21)$$

onde n corresponde ao período da análise económica (vida útil do projeto); m o período de implementação física do projeto (onde ocorrem os investimentos); t a taxa de atualização; I_i, O_i, S_i os custos de investimento, operação e reposição, respetivamente, no ano i; e R_i a receita no ano i.

O VAL traduz a soma acumulada atualizada da diferença entre benefícios – receitas R – e custos esperados durante o período de vida do projeto, equação 22.

$$VAL = R - I - O - S \quad (22)$$

Na análise económica a ser executada, consideram-se constantes os preços de mercado, com referência aos praticados no presente, ano de início da análise. Desta forma, evita-se a consideração da inflação, ou, visto por outro prisma, que esta afeta igualmente todas as componentes do projeto.

Se o VAL é negativo, deve rejeitar-se o projeto, uma vez que o valor atualizado dos benefícios não compensa o valor atualizado dos custos.

Por sua vez, o índice benefício-custo representa o valor presente gerado por "unidade de recurso utilizado", equação 23. Se o seu valor for superior à unidade, então o projeto apresenta viabilidade:

$$B/C = \frac{R - O}{I + S} \quad (23)$$

Finalmente, a taxa de rentabilidade é a taxa de atualização que conduz a um VAL nulo (e B/C unitário). Se a TIR ultrapassar a taxa de atualização, então o projeto é viável. Quanto maior a TIR, mais vantajoso economicamente será o projeto. O período de recuperação do investimento T representa o número de anos até que os benefícios compensem os custos, ambos acumulados e atualizados. Quanto menor T, mais vantajoso o projeto [63].

4.8. Síntese da metodologia adotada

É objetivo da dissertação a implementação de BT com vista ao máximo proveito energético e à minimização das perdas de água. Para tal, é essencial uma boa implementação do modelo, a sua correta calibração, que deve exprimir de forma mais aproximada possível a realidade, e uma metodologia de otimização da rede e dos dispositivos hidráulicos a conceber e considerar. O organograma abaixo descreve o processo de análise efetuado no capítulo seguinte (figura 34).

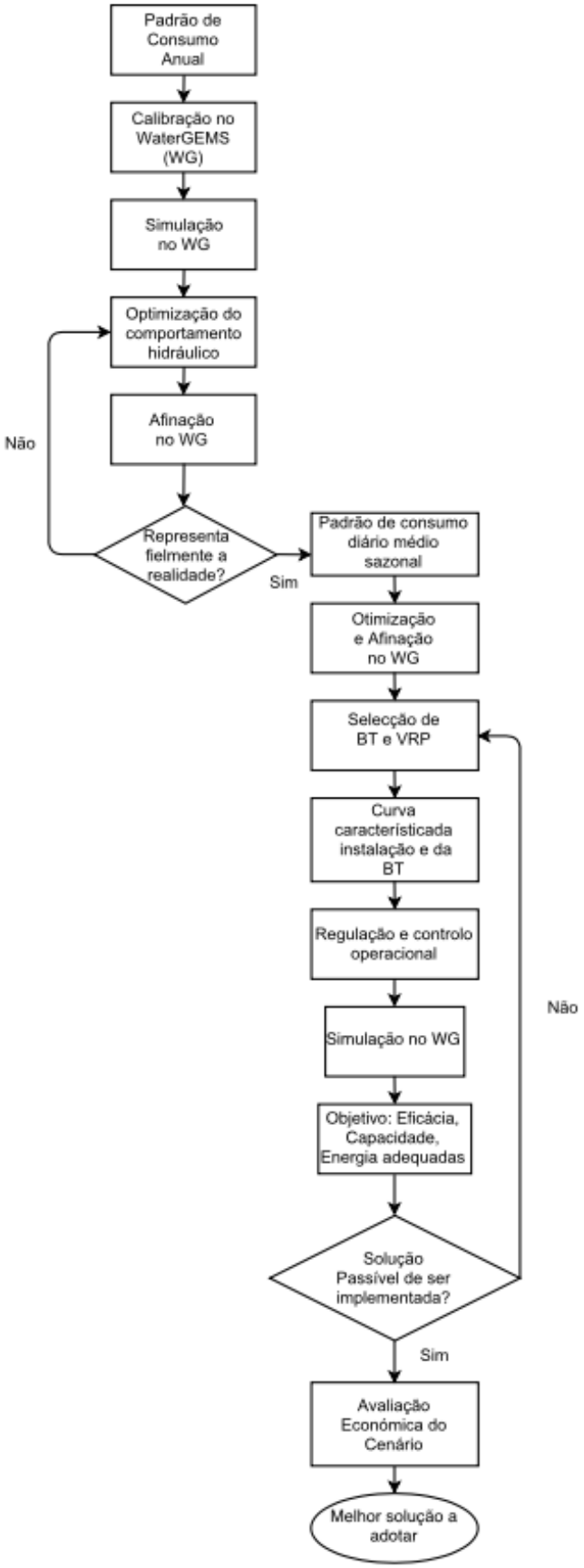

Figura 34 – Metodologia de Análise

5. Experimentação e Resultados

5.1. Enquadramento Geral

A metodologia adotada, que engloba os processos de implementação, calibração e otimização, é determinante na obtenção de resultados para este caso de estudo real. Assim, definem-se quatro premissas a ser cumpridas antes da calibração do modelo, sobre as quais se resume e justifica a intervenção efetuada.

- Planeamento do modelo: disponibilidade de dados de cadastro e dados operacionais (nível de regulação do reservatório, modo de funcionamento de válvulas);
- Definição da rede a modelar: localização e caracterização física (i) de condutas, (ii) dos elementos acessórios que compõem a rede (medidores de caudal, diferentes válvulas)
- Tipos de consumo: especificação de padrões de consumo temporais; alocação espacial de caudal aos nós ao longo da rede;
- Implementação do modelo: calibração da rede.

5.1.1. Planeamento e Definição

Os dados referentes à disposição espacial (comprimento e elevação) e caraterísticas físicas (tipo de material, diâmetro, estado de conservação, entre outros) de condutas, nós de ligação, nós finais de consumo, bem como todos os dispositivos hidráulicos, que incluem o reservatório e as válvulas indispensáveis para a materialização da rede em suporte informático, foram adquiridos em formato *GIS* à EG. A importação dos dados foi feita diretamente no WG através da ferramenta *ModelBuilder*, onde se fez corresponder a cada tipo de infraestrutura da rede os parâmetros requeridos para a sua completa definição.

A rede é abastecida na sua totalidade por via gravítica através um ponto de entrada, o reservatório do Linhó, abastecido por sua vez por bombagem pela estação elevatória de Ranholas e com capacidade para 4000 m^3, cuja cota de água se admite constante para efeitos de estudo (figura 35). Mais concretamente, a rede de distribuição é constituída por 2 grandes troços adutores – circular externa e interna – onde se ligam 587 ramais.

Os diâmetros nominais das condutas são representados no esquema da rede, figura 36, com valores em milímetros. Os diâmetros dos ramais de ligação finais variam entre os 32 e os 50 mm (figura 36).

Figura 35 – Reservatório do Linhó

Figura 36 - Diâmetros de condutas na rede

5.1.2. Tipos de consumo e Implementação

Os padrões de consumo são definidos consoante o seu objetivo. Para estudo de afinação e calibração o padrão de consumo representa os caudais registados em parcelas de 1h durante 365 dias; para a avaliação da solução de aproveitamento energético são criados três padrões de consumo médios diários, definidos também em intervalos de 1h, correspondentes a cada um dos três tipos de consumo observado (figura 37). Em termos de alocação de consumo aos nós, representativos das infraestruturas existentes, e após cuidadosa observação do local, estima-se um peso de consumo unitário no caso de habitações unifamiliares. Sempre que existir uma habitação multifamiliar a ponderação será dez vezes superior para efeitos de cálculo, valor que também é utilizado para edificado que tenha como função a prestação de serviços, englobando escritórios e infraestruturas com finalidade comercial. Para edifícios especiais, os grandes clientes, foi pedida informação adicional à EG, que forneceu dados de consumo anual horário para um ginásio, um edifício que engloba vários serviços e um hotel e que foram especialmente tidos em conta, uma vez que ao grande consumo associado, existe um padrão horário de consumo distinto.

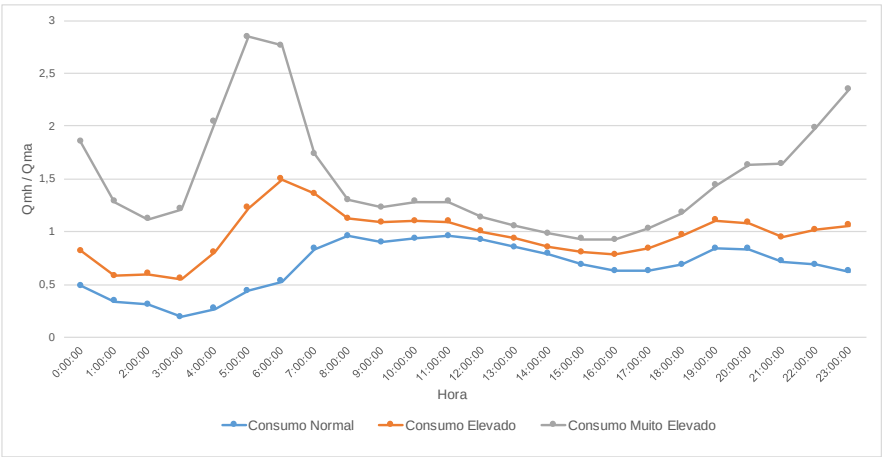

Figura 37 - Padrão de consumo horário médio diário para os tipos de consumo analisados

A implementação da rede foi concluída com uma afinação, processo no qual se identifica e elimina dados irrelevantes para o estudo e se corrige possíveis erros de importação. Para além disso, foi efetuado um processo de afinação e exploração das capacidades do modelo, permitindo adquirir sensibilidade.

5.2. Calibração e Otimização

Findo o processo de importação, tratamento de dados e esquematização da rede procede-se à primeira calibração. Aqui são identificados os objetivos do modelo e caracterizam-se os pontos de monitorização em termos de pressão e caudal e refinam-se os parâmetros de análise. Para obter uma correta comparação entre a rede real e a sua simulação, recorre-se à representação no programa do estado atual real em *EPS*. Esta etapa é crucial no trabalho, uma vez que uma correta representação da realidade resulta numa maior certeza dos resultados da simulação, permitindo assim confiança nas decisões a tomar.

Os resultados da simulação são assim avaliados, recorrendo à comparação dos valores de pressão nos pontos de monitorização com os valores obtidos pela EG, partindo dos pressupostos de estimativa de consumo enunciados. Procura-se efetuar a comparação para períodos de alto consumo, a que correspondem pressões menos elevadas e onde existe maior caudal escoado e maior perda de carga associada. Obtém-se a validação do modelo através de uma reunião com os SMAS e correlação de resultados. O modelo da rede revela-se uma boa aproximação do regime hidráulico real.

A observação e calibração dos dados permite tirar as primeiras conclusões do estudo:

- A generalidade da rede funciona sob pressões superiores ao máximo regulamentar por lei, entre 65 e 70 m c.a. (zona vermelha) – figura 38 – e muito superiores à pressão de conforto (que se fixa nos 15 m c.a.);
- O modelo de estimativa do caudal, baseado na leitura e tratamento de dados de um medidor de caudal com *data-logger*, e considerando as diversas finalidades das infraestruturas de consumo, oferece uma boa aproximação aos dados reais da RDA.

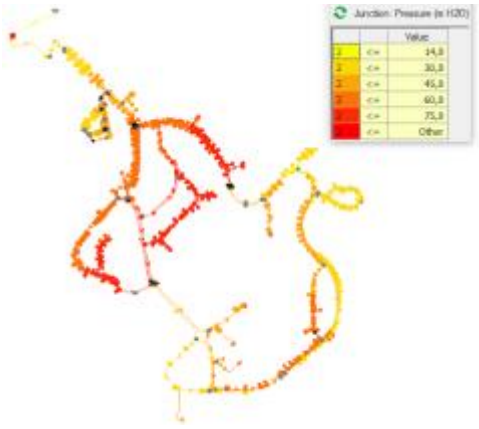

Figura 38 – Distribuição de pressão atual da RDA da Beloura

Por forma a poder quantificar a energia residual recuperável do sistema, efetuando o seu balanço energético, é necessária ainda a sua otimização, de modo a encontrar soluções passíveis de serem estudadas. A otimização consistiu nos seguintes passos:

- Na abertura das duas VRP que se encontram fechadas;
- Na fixação da pressão mínima a jusante das quatro VRP existentes, tendo como critério a verificação da pressão mínima regulamentar (14 m c.a.) nos pontos críticos da rede. Assim, introduz-se a maior perda de carga localizada nas válvulas.
- Na implementação de duas novas VRP, em local estratégico, de modo a controlar as pressões na rede até às zonas imediatamente a montante das existentes e simultaneamente estudar o seu possível aproveitamento energético.
- Na avaliação da simulação de fugas na rede. Uma vez que o procedimento que permitiu obter o consumo estimado em cada um dos nós finais da rede parte de uma abordagem *top-down*, ou seja, existe a distribuição do caudal a partir de um ponto localizado antes de qualquer consumo, pelo que o volume de água distribuído já contempla as perdas de água reais. É então necessário garantir a viabilidade dos valores do consumo alocado.

5.2.1. Medidas de Controlo

Na situação atual e apesar de existirem quatro VRP na rede, apenas 2 estão em funcionamento, no modo de carga constante, à cota de 165,7m. No caso da VRP1 – Flucon200.02.03 DN100, instalada na conduta de diâmetro 200mm, o valor da pressão a jusante é fixado nos 34 $\mathrm{m\,c.a.}$ e no caso da VRP2 – Flucon200.02.03 DN65, instalada na conduta de diâmetro 140 mm, fixado nos 15 $\mathrm{m\,c.a.}$. As duas restantes VRP (3 e 4) (Flucon200.02.03 DN65) estão fechadas, impedindo a circulação de água. Nas condições de otimização os valores da pressão ajustam-se, por modo de regulação por carga constante: VRP1 e VRP2 com valores a jusante de 15 $\mathrm{m\,c.a.}$ e VRP3 e VRP4 com valores fixados 17 $\mathrm{m\,c.a.}$. As VRP criadas, VRP5 e VRP6 funcionam com pressão a jusante com o valor de 15 $\mathrm{m\,c.a.}$. Desta forma, é respeitada a pressão mínima de 14 $\mathrm{m\,c.a.}$ em todos os nós da rede (figura 39). Assim, estipula-se o teto máximo de queda a considerar aquando da avaliação do equipamento hidráulico a utilizar.

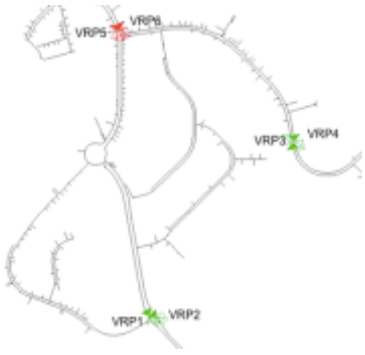

Figura 39 – Representação da localização das VRP na rede da Beloura

5.2.2. Avaliação de perdas de água

A visão estratégica dos SMAS inclui um esforço no sentido de medir e controlar os dados de caudal, tendo sido recentemente incorporado um sistema, o *Waternet*, que retorna vários indicadores de desempenho da rede, os quais são utilizados maioritariamente na deteção imediata de fugas e perdas reais, melhorando a eficiência dos sistemas e os custos associados à perda de água. Segundo a EG, na ZMC da Beloura as perdas admitem-se em cerca de 2,5%, devido ao bom estado geral da sua RDA. Na simulação hidráulica, o coeficiente C de *Hazen-Williams*, associado à perda de carga contínua, toma o valor 140, indicado para condutas em PEAD (Polietileno de Alta Densidade) em bom estado de conservação [59].

Para atestar a precisão da estimativa dos consumos recorre-se a análise de simulação de fugas de água na rede, através da função "*Pressure Dependent Demands*" (PDD). Assim, admite-se que o caudal de fuga de um nó depende da pressão aí instalada, para um determinado *time-step*, sendo que a maiores pressões corresponderão maiores valores do caudal de fuga. Pretende-se verificar: (1) que as perdas reais não são significativas, por forma a atestar a viabilidade do grau de consumo estimado a utilizar nas simulações e (2) que uma redução da pressão, conseguida através das medidas de controlo nas VRP, contribui para uma redução do nível de perda e consequente aumento da eficiência da rede. Efetua-se a verificação do ponto (2) aquando da instalação da solução final de BT.

A função PDD estipula uma relação exponencial entre o caudal de fuga de um nó e a pressão aí instalada (equação 24):

$$Q^f = K * P_{mo}^n \tag{24}$$

onde Q é o caudal escoado pelo nó em condições de fuga (l/s), K é um coeficiente função da área do orifício e função do expoente da lei de vazão $(l/s/m^n)$, P_{mo} é a pressão a montante do orifício (m.c.a) e n é o expoente da lei de vazão (-) [64].

Para o exponente n utiliza-se o valor de $0{,}5$, adequado quando se pretenda simular fugas cujo orifício se considera fixo no período de análise [65]. O gráfico da lei de expoente utilizada no WG encontra-se no Anexo A.

Para a situação atual, definidos os três padrões de consumo médios diários, distribui-se o valor do consumo médio respetivo igualmente pela totalidade da rede. Desta forma, faz-se corresponder a cada nó (nó de consumo, nó de ligação, junta na mudança de diâmetro de conduta, etc.) a mesma probabilidade de ocorrência de fuga. Esta hipótese oferece a distribuição de fugas mais realista na rede [65].

Para a definição da pressão de referência individual nodal, uma vez que não se conhece o valor da pressão máxima para o qual o caudal de fuga deixa de depender da pressão, utilizam-se os

valores médios diários da pressão em cada nó considerado correspondentes à sua simulação na rede em modo *steady-state*. Os valores do caudal médio lidos pelo medidor e os resultados do valor de fuga diária estimada apresentam-se na tabela 1.

Tabela 1 – Dados de fugas de água na ZMC, estimadas no modelo hidráulico

Tipo de consumo	Caudal médio distribuído no período (l/s)	Volume de fuga diário (m^3)	Volume de fuga total no período (m^3)	Volume de fuga total anual (m^3)
Normal	8,12	30,64	5576	11623
Elevado	11,74	30,99	1921	
Muito Elevado	18,28	33,82	4126	

O valor de perdas estimadas representa cerca de 3,03% de toda a água distribuída no ano. Este valor, considerado muito razoável, vai ao encontro das previsões da EG. Pode assim inferir-se que os modelos de base construídos e os valores de caudal estimados a utilizar na metodologia de análise energética e económica não necessitam de sofrer alteração. Como tal, aplica-se a metodologia descrita no capítulo anterior nos cenários a considerar.

5.3. Tipificação de Cenários e Alternativas

Uma vez atingido um nível de garantia adequado na modelação, e de acordo com as imposições hidráulicas existentes, nomeadamente os regulamentos e intervalos de valores de caudal e queda de funcionamento das bombas em modo turbina, procede-se à construção de cenários e alternativas a serem tidas em conta na avaliação energética, para cada período de consumo existente. Constata-se que nas análises efetuadas o valor do caudal escoado na VRP3 é nulo.

Período de consumo normal: meses novembro, dezembro, janeiro, fevereiro, março e abril

Verifica-se que, para as condições de funcionamento hidráulicas atuais da rede, os caudais que atravessam as VRP1 e VRP2, existentes e em funcionamento, são muito reduzidos. O mesmo ocorre no caso das VRP4 e VRP5. Não existe no mercado uma BT que permita retirar energia nestas condições; analisando a VRP 6, verifica-se que existem condições hidráulicas propícias à instalação de uma BT (figura 40).

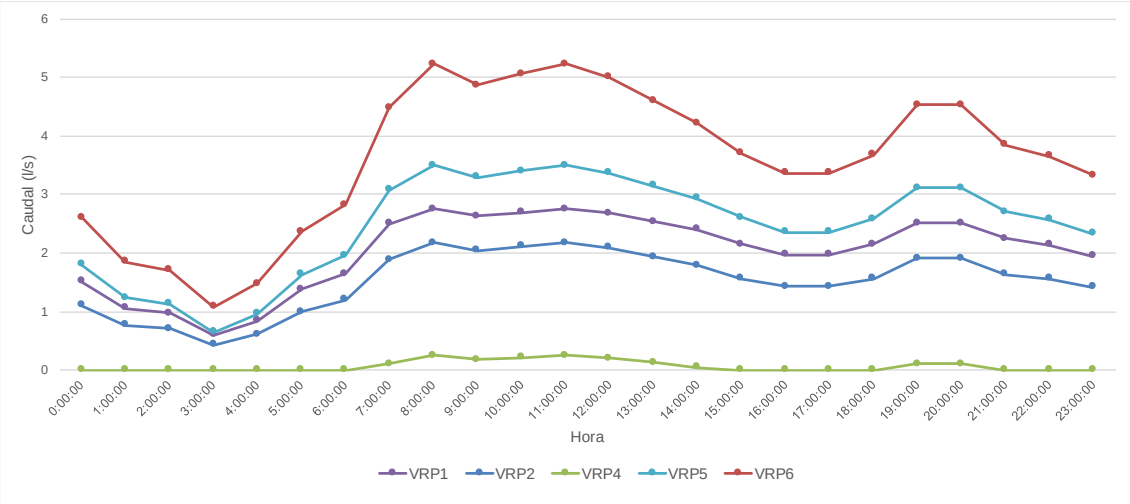

Figura 40 – Caudal escoado pelas VRP, período de consumo normal

Período de consumo elevado: meses maio e outubro

Não é possível retirar aproveitamento energético, dadas as características da rede neste período na situação atual para as VRP 1 a 4. Uma vez mais, a gama de caudais médios existentes é muito reduzida; é analisada a substituição de BT nas VRP 5 e 6 (figura 41).

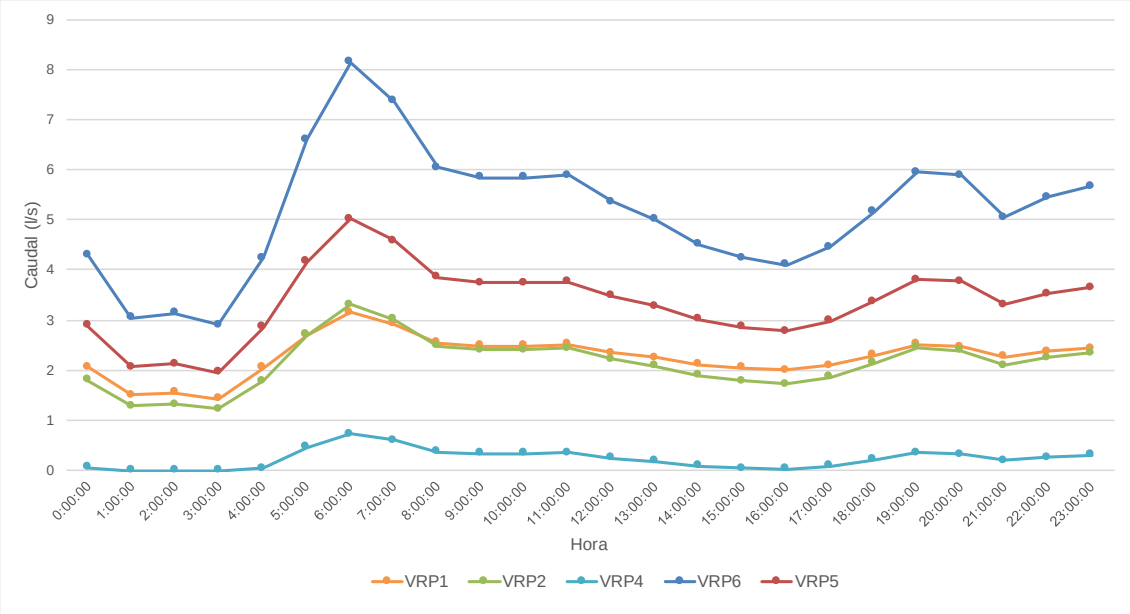

Figura 41 - Caudal escoado pelas VRP, período de consumo elevado

Período de consumo muito elevado: meses junho, julho, agosto e setembro

O consumo registado nas VRP existentes apenas torna viável a recuperação de energia durante 7h diárias nas VRP 1 e 2, para as BT consideradas, motivo pelo qual se exclui igualmente esta possibilidade; no que respeita as VRP 5 e 6, pretende-se quantificar a energia passível de ser aproveitada, figura 42.

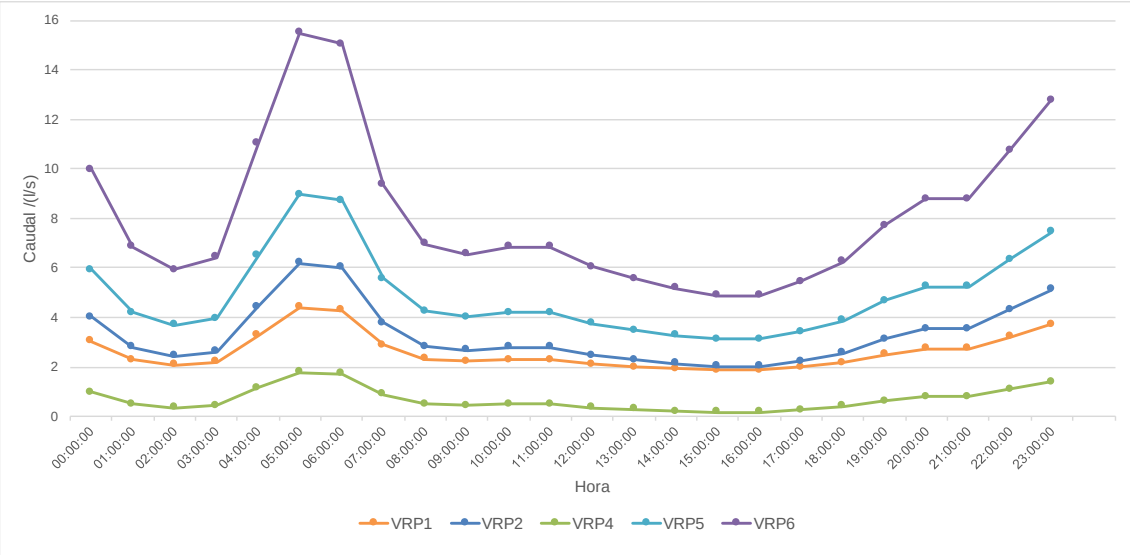

Figura 42 - Caudal escoado pelas VRP, período de consumo muito elevado

Tendo em conta esta conjuntura, traça-se o primeiro cenário, o cenário otimizado atual. Neste, estuda-se a substituição das VRP criadas (VRP 5 e VRP 6) por BT – Cenário 1;

Um aumento no consumo traduz-se num aumento de energia. Para conhecer a resposta da rede quando sujeita a uma maior procura, no que toca à produção energética, avalia-se outro cenário que reflete a hipótese de o consumo aumentar em 50% – Cenário 2. Esta asserção materializa-se admitindo que o consumo nodal segue a mesma tendência verificada ao longo da toda a rede. Uma vez que tal cenário se enquadra numa perspetiva futura admite-se ainda na modelação um deterioramento do estado das condutas (traduzido num aumento em 10% na perda de carga contínua), que reflete o caráter futuro da mesma. Este cenário tem como objetivo perceber até que ponto um aumento no consumo apreciável beneficia a produção de energia na ZMC da Beloura, permitindo projetar resultados de uma possível situação futura.

5.4. Aplicação do equipamento hidráulico

Para cada um dos dois cenários avalia-se a CC de cada uma das BT requisitadas que melhor se adapta às condições hidráulicas da rede – caudal e pressão instalados. De acordo com as bombas requisitadas e para os intervalos de valor de caudais e quedas obtidos nas simulações, foi pedido à KSB que fornecesse as velocidades de rotação a que correspondessem maiores rendimentos. Assim, estudam-se as BT a funcionar no modo de RH. As VRP são estudadas em modo de carga constante. Os esquemas de instalação das VRP e das BT estão representados, respetivamente, na figura 43.

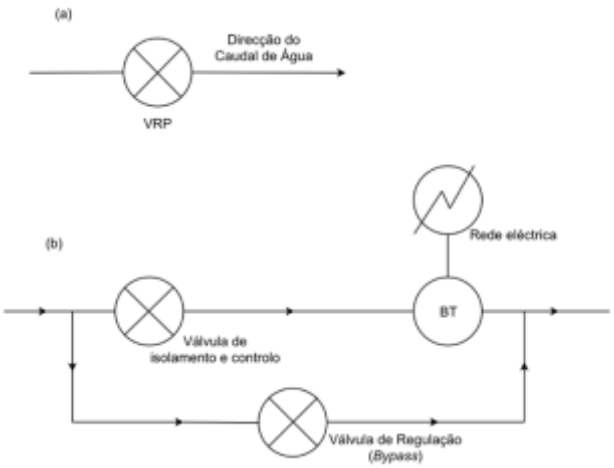

Figura 43 - Esquema de instalação das (a) VRP; e (b) BT, adaptado de [36]

No modo de regulação hidráulica, quando o caudal que atravessa a BT é reduzido, a queda a montante da mesma é mais elevada, valor que pode exceder o limite de funcionamento da BT. Neste caso, a válvula de regulação dissipa a queda em excesso. Se o caudal for muito elevado, a queda da BT será igualmente elevada e possivelmente superior ao intervalo de valores de queda de operação da BT. Neste caso, a válvula de regulação dissipa o caudal em excesso. Neste modo, a velocidade de rotação da BT é fixa (equação 24).

$$\begin{cases} H^d = H^t(Q^t) + H_{válvula} \\ Q^d = Q^t + Q_{bypass} \\ H_{válvula} > 0, Q_{bypass} = 0 \; se \; H^t(Q^t) < H_d \\ H_{válvula} = 0, Q_{bypass} > 0 \; se \; H^t(Q^t) > H_d \end{cases} \quad (24)$$

onde H^d é a queda disponível (m), H^t é a queda da BT (m), $H_{válvula}$ é a queda da válvula de regulação (m), Q^d é o caudal escoado (l/s), Q^t é o caudal turbinado (l/s), Q_{bypass} é o caudal que atravessa a válvula de regulação (l/s) [66].

A energia produzida no modo de regulação hidráulica está dependente das características do sistema e da BT. A figura 44 apresenta as quatro regiões que regem a produção de energia.

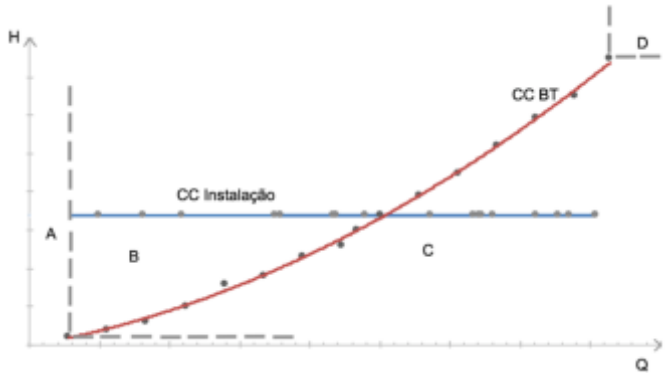

Figura 44 – Regiões de funcionamento, modo RH, adaptado de [40]

- Região A - $Q^d < Q^t_{mín}\ ou\ H^d < H^t_{mín} : Energia = 0$
- Região B - $Q^t_{mín} < Q^d < Q^t_{máx}\ e\ H^d > H^t(Q^d) : Energia = P(Q^d)\Delta t_i$
- Região C - $Q^t_{mín} < Q^d < Q^t_{máx}\ e\ H^t_{mín} < H^d < H^t_{máx} : Energia = P\big(Q^d(H^d)\big)\Delta t_i$
- Região D - $Q^d > Q^t_{máx}\ e\ H^d > H^t_{máx} : Energia = P(Q^t_{máx})\Delta t_i$

onde Q^d é o caudal escoado (m^3/s), H^d é a queda disponível na parcela de tempo i (m), $Q^t_{mín}$ é o mínimo caudal turbinado pela BT (l/s), $Q^t_{máx}$ é o máximo caudal turbinado pela BT (l/s), $H^t_{mín}$ é a mínima queda da BT (m), $H^t_{máx}$ é a máxima queda da BT (m), P é a potência (W) e Δt_i é o intervalo de tempo de operação (h) [40].

As características da BT requisitadas a utilizar, considerando a velocidade de rotação do motor fixa com valor igual a 1520 rpm são as seguintes (Q_{PMR} representa o caudal no ponto de melhor rendimento (l/s) e H_{PMR} a queda no melhor ponto de rendimento) (tabela 3).

Tabela 2 – Características das BT

BT	$\boldsymbol{Q^t_{mín}(l/s)}$	$\boldsymbol{Q^t_{máx}\ (l/s)}$	$\boldsymbol{H^t_{mín}\ (m)}$	$\boldsymbol{H^t_{máx}(m)}$	$\boldsymbol{Q_{PMR}(l/s)}$	$\boldsymbol{H_{PMR}\ (m)}$	$\boldsymbol{\eta^t_i\ (-)}$
Etanorm 32-160	3,33	7,31	11	34	5,55	21	0,6
Etanorm 32-200	3,33	7,78	17,5	52,5	6,05	32,5	0,52
Etanorm 40-200	5,56	13,4	16	52,5	10	32	0,57
Etanorm 50-250	9,17	21,4	17,5	60	16,8	44	0,62

Verifica-se que a ZMC da Beloura tem pressões instaladas muito superiores à pressão de conforto e em zonas da rede superiores inclusive à pressão máxima admissível. No entanto, para o consumo observável, o caudal escoado na rede é muito reduzido, devido à tipologia construtiva das condutas da rede, bastante sobredimensionada. Para além disso, as VRP 5 e VRP 6 estão localizadas especificamente em pontos onde, para além de normalizarem a pressão na rede, admitem os maiores valores de queda e caudal para retirar proveito hidráulico.

Posto isto, partindo da observação das características das BT a utilizar (as mais pequenas existentes no mercado), para além de já se ter verificado não existir caudal passível de ser turbinado nas VRP existentes (1, 2, 3 e 4), repara-se que o caudal escoado nas VRP 5 e 6 permite no máximo a implementação de uma BT, na localização da VRP 5 ou VRP 6. A

implementação de duas BT revela-se imperfeita, na medida em que os valores de caudal mínimo e máximos diários a escoar em cada uma destas não se enquadram nos intervalos de funcionamento de nenhuma das BT a utilizar. Verifica-se ainda que a queda máxima admissível nas VRP 5 e 6, que assegura a pressão mínima de conforto, toma o valor de 32,1 m, abaixo do menor valor máximo de queda passível de ser turbinada (correspondente à Etanorm 32-160, igual a 34 m), não existindo períodos em que se tenha de ajustar excessos de queda na zona da BT.

Neste contexto, opta-se por utilizar a VRP 5 como dispositivo regulador do caudal, em detrimento da válvula reguladora. Sempre que o caudal é inferior ou superior, respetivamente, ao caudal mínimo e máximo turbinado pela BT, a VRP está ativa e a funcionar em modo de carga constante. Caso contrário, a VRP fecha e o escoamento dá-se todo pela BT. Desta forma, assegura-se o abastecimento total à rede, permite escoar-se o caudal em excesso que inviabilizaria a utilização de BT, mas que seria insuficiente para a utilização de duas BT e garante ainda a redução de pressão na rede, o que origina menores perdas de água. O novo esquema de implementação é assim ilustrado na figura 45.

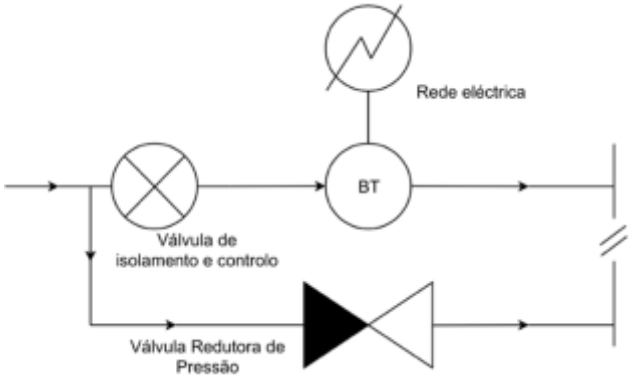

Figura 45 - Esquema de instalação dos dispositivos hidráulicos a considerar

Assim, apresentam-se os valores horários de caudal e queda ao longo do dia dos dispositivos a incorporar, para cada um dos cenários e alternativas consideradas, tendo sempre em conta a gama de funcionamento dos caudais e quedas das BT. Pretende retirar-se proveito energético e diminuir a pressão no sistema. A distribuição de pressões na rede, mínima e máximas diárias, são apresentadas em figura para a primeira alternativa considerada. As restantes figuras serão apresentadas no Anexo B, bem como as curvas características das BT utilizadas, no Anexo C.

Cenário 1

- *Período de consumo normal (Período 1)*

Alternativa A – Substituição da VRP 6 pela Etanorm 32-160

A queda útil máxima da BT vem igual a 31,92 m e o máximo caudal turbinado toma o valor de

7,1 l/s. A BT funciona próxima do PMR. Não há aproveitamento energético no período noturno (0 às 6h). A pressão máxima na rede é igual a 55,3 m.c.a (figuras 46 e 47).

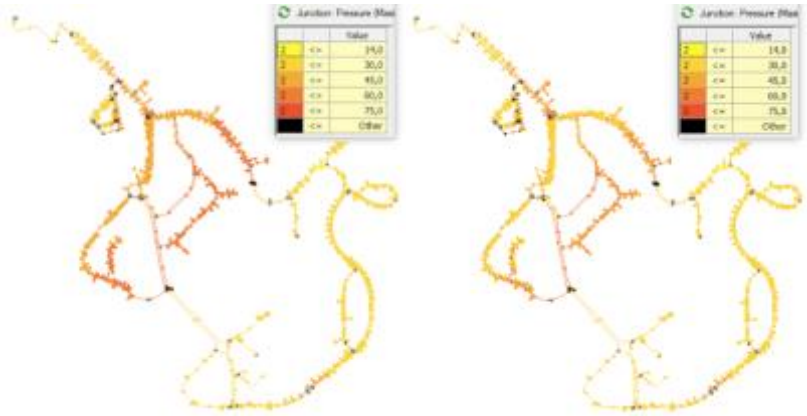

Figura 46 – Distr. de pressões máxima (esq.) e mínima (dir.) diárias, cenário 1, período 1, alt. A

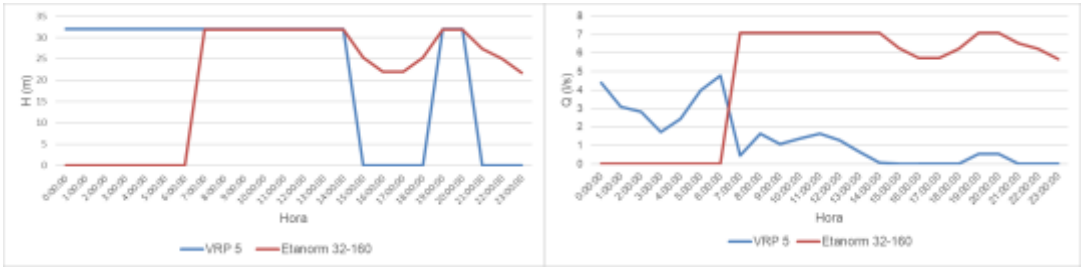

Figura 47 – Valores horários de queda e caudal para a BT e VRP, cenário 1, período 1, alternativa A

Alternativa B – Substituição da VRP6 pela Etanorm 32-200

A queda útil máxima vem igual a 31,95 m e o máximo caudal turbinado toma o valor de 5,78 l/s. A BT funciona no PMR. A pressão máxima na rede é igual 47,9 m.c.a (figura 48).

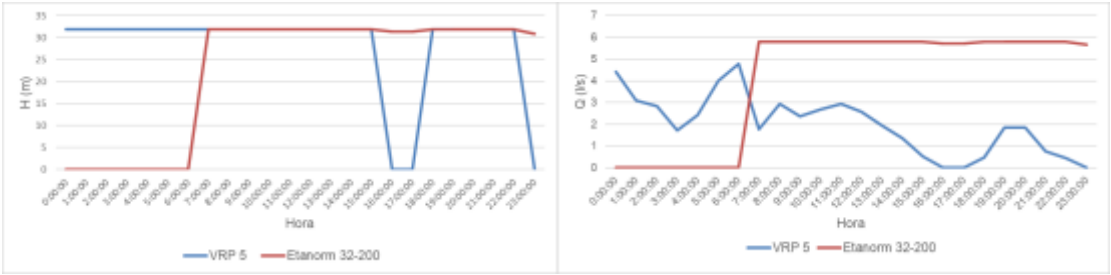

Figura 48 - Valores horários de queda e caudal para a BT e VRP, cenário 1, período 1, alternativa B

- *Período de consumo elevado (Período 2)*

Alternativa A – Substituição da VRP 6 pela Etanorm 32-160

A queda útil máxima vem igual a 31,91 m e o máximo caudal turbinado toma o valor de 7,1 l/s. A BT funciona perto do PMR. A pressão máxima da rede é igual a 53,1 m c. a.. A BT encontra-se em funcionamento na totalidade do dia (figura 49).

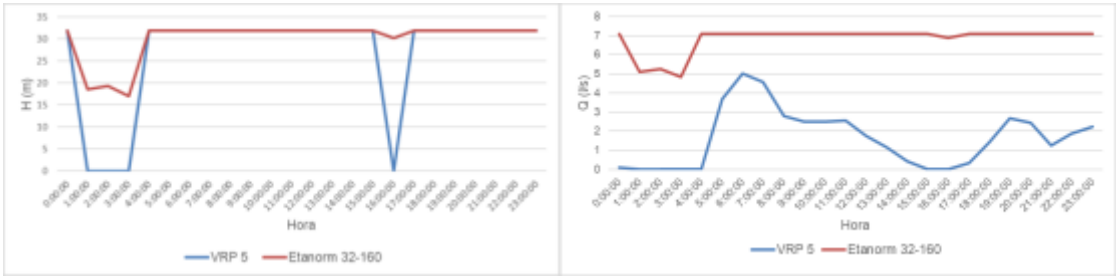

Figura 49 - Valores horários de queda e caudal para a BT e VRP, cenário 1, período 2, alternativa A

Alternativa B – Substituição da VRP6 pela Etanorm 40-200

A queda útil máxima vem igual a 31,91 m e o máximo caudal turbinado toma o valor de 10 l/s. A BT funciona no PMR. A pressão máxima da rede é igual a 55,4 m c. a.. A BT não se encontra em operação entre a 1 e as 3h (figura 50).

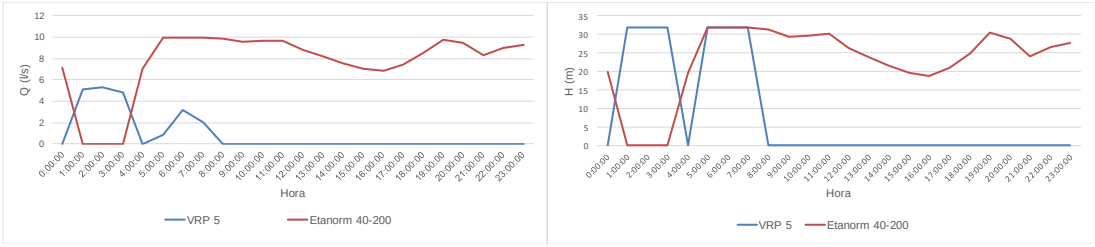

Figura 50 - Valores horários de queda e caudal para a BT e VRP, cenário 1, período 2, alternativa B

- *Período de consumo muito elevado (Período 3)*

O consumo verificado neste período torna inviável a utilização de BT com maior capacidade de geração de energia, na medida em que a sua gama de valores de caudal turbináveis ainda é superior ao registado, na maior parte do dia. Por forma a arranjar uma solução anual integral, estuda-se a aplicação das BT consideradas anteriormente.

Alternativa A – Substituição da VRP6 pela Etanorm 32-160

A queda útil máxima vem igual a 32,06 m e o máximo caudal turbinado toma o valor de 7,1 l/s. A BT funciona próxima do PMR. A pressão máxima da rede é igual a 46,8 m c. a.. A BT funciona na totalidade do dia (figuras 51).

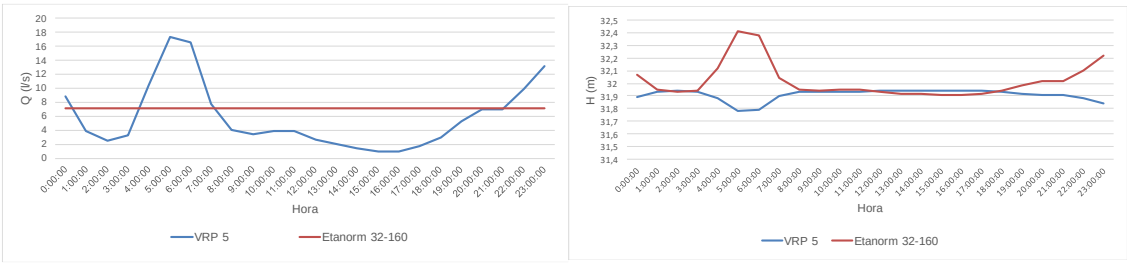

Figura 51 - Valores horários de queda e caudal para a BT e VRP, cenário 1, período 3, alternativa A

Alternativa B – Substituição da VRP6 pela Etanorm 40-200

A queda útil máxima vem igual a 31,97 m e o máximo caudal turbinado toma o valor de 10 l/s. A BT funciona próxima do PMR. A pressão máxima da rede é igual a 46,7 m c. a.. A BT funciona na totalidade do dia (figura 52).

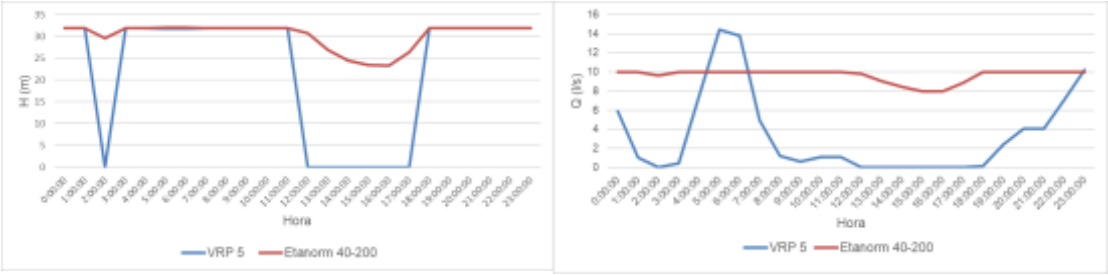

Figura 52 - Valores horários de queda e caudal para a BT e VRP, cenário 1, período 3, alternativa B

Cenário 2

Por forma a obter uma solução final que verifique simultaneamente o aproveitamento hidráulico para o consumo existente atualmente e um consumo hipotético, 50% superior, repetem-se as simulações do cenário 1 nas novas condições da rede, para os 3 períodos de consumo. Desta forma, pode conhecer-se o limite de aplicação da solução atual a implementar, se efetivamente se verificar esse aumento. Simula-se ainda a utilização de outras soluções para os períodos 1 e 3, nomeadamente a implementação de duas BT em paralelo e de outra BT (período 3) e uma outra BT, Etanorm 40-200, ao invés da Etanorm 32-200 (período 1), mais adequada ao objetivo da produção de energia.

- *Período de consumo normal (Período 1)*

Alternativa A – Substituição da VRP 6 por uma Etanorm 32-160

A queda útil máxima vem igual a 31,92 m e o máximo caudal turbinado toma o valor de 7,1 l/s. A BT funciona próxima do PMR. A pressão máxima da rede é igual a 48,7 m c. a.. A BT não opera no período às 3h (figura 53).

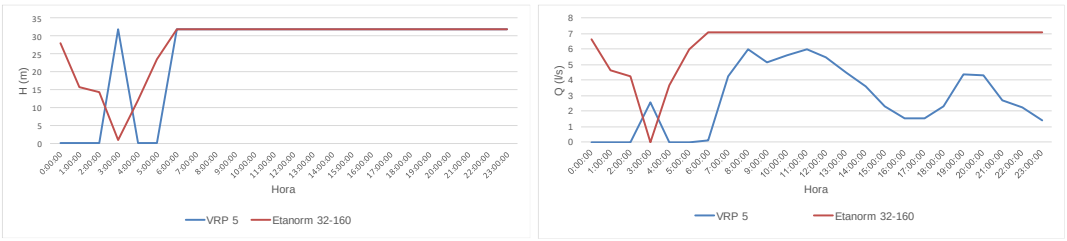

Figura 53 - Valores horários de queda e caudal para a BT e VRP, cenário 2, período 1, alternativa A

Alternativa B – Substituição da VRP 6 por uma Etanorm 40-200

A queda útil máxima vem igual a 31,85 m e o máximo caudal turbinado toma o valor de 10 l/s. A BT funciona próxima do PMR. A pressão máxima da rede é igual a 52,2 m c. a.. A BT não opera no período das 0 as 5h (figura 54).

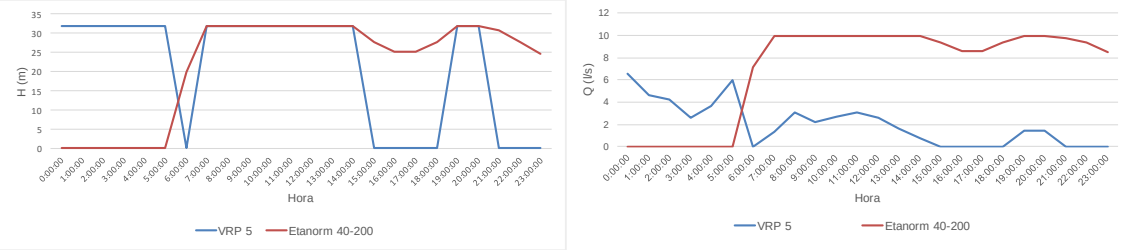

Figura 54 - Valores horários de queda e caudal para a BT e VRP, cenário 2, período 1, alternativa B

- *Período de consumo elevado (Período 2)*

Alternativa A – Substituição da VRP 6 por uma Etanorm 32-160

A queda útil máxima vem igual a 31,92 m e o máximo caudal turbinado toma o valor de 7,1 l/s. A BT funciona próxima do PMR. A pressão máxima da rede é igual a 46,7 m c. a.. Para esta alternativa é possível manter praticamente constantes as pressões na rede, quase não se distinguindo graficamente valores máximos e mínimos de pressão (figura 55).

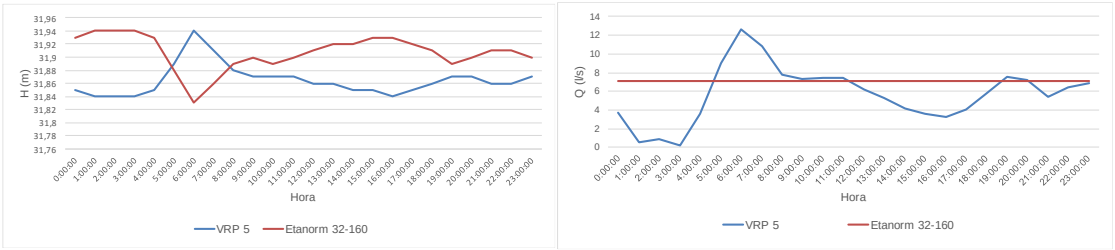

Figura 55 - Valores horários de queda e caudal para a BT e VRP, cenário 2, período 2, alternativa A

Alternativa B – Substituição da VRP 6 por uma Etanorm 40-200

A queda útil máxima vem igual a 31,79 m e o máximo caudal turbinado toma o valor de 10 l/s. A BT funciona próxima do PMR. A pressão máxima da rede é igual a 49,7 m.c.a (figuras 62 e 63).

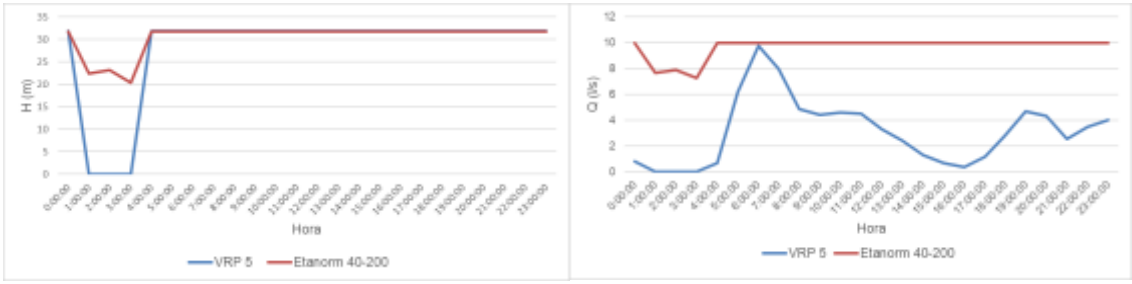

Figura 56 - Valores horários de queda e caudal para a BT e VRP, cenário 2, período 2, alternativa B

- *Período de consumo muito elevado (Período 3)*

Alternativa A – Utilização das BT Etanorm 32-160 e Etanorm 40-200 em paralelo em substituição da VRP 6

A queda útil máxima vem igual a 31,88 m e o máximo caudal turbinado toma o valor de 16,52 l/s. As BT funcionam afastadas do seu PMR no período compreendido entre as 13 e 18h. A pressão máxima da rede é igual a 51,5 m.c.a (figura 57).

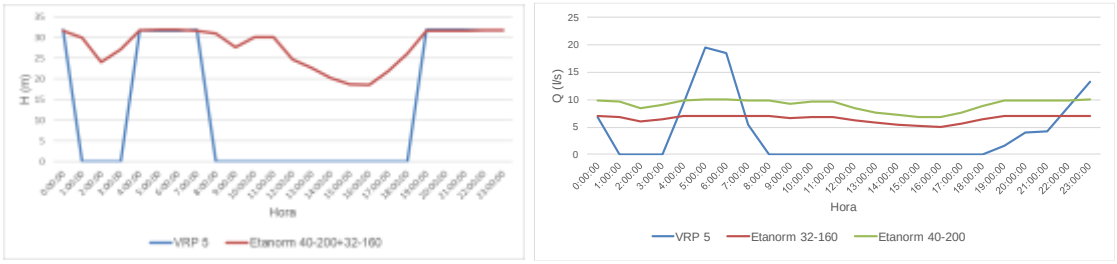

Figura 57 - Valores horários de queda e caudal para as BT e a VRP, cenário 2, período 3, alternativa A

Alternativa B – Substituição da VRP 6 por uma Etanorm 50-250

A queda útil máxima vem igual a 32,84 m e o máximo caudal turbinado toma o valor de 14,5 l/s. A BT funciona perto do PMR. A pressão máxima da rede é igual a 46,6 m.c.a (figura 58).

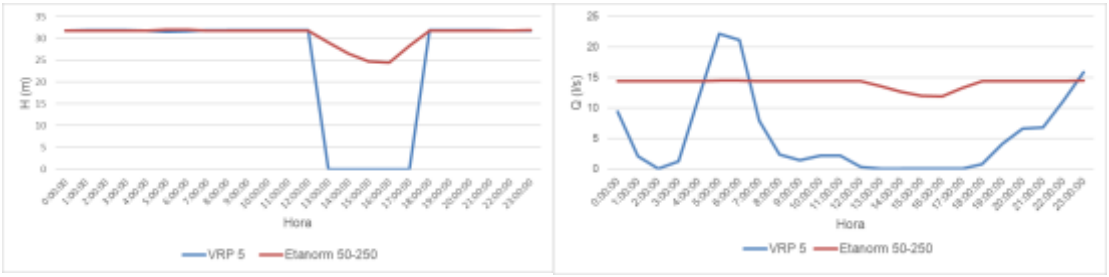

Figura 58 - Valores horários de queda e caudal para a BT e VRP, cenário 2, período 3, alternativa B

Alternativa C - Substituição da VRP 6 por uma Etanorm 32-160

A queda útil máxima vem igual a 32,07 m e o máximo caudal turbinado toma o valor de 7,1 l/s. A BT funciona próxima do PMR. A pressão máxima da rede é igual a 46,8 m.c.a e mantém-se praticamente constante no período do dia (figura 59).

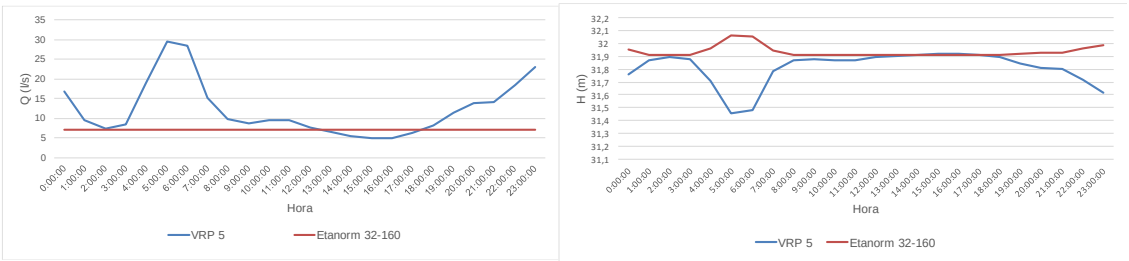

Figura 59 - Valores horários de queda e caudal para a BT e VRP, cenário 2, período 3, alternativa C

Alternativa D - Substituição da VRP 6 por uma Etanorm 40-200

A queda útil máxima vem igual a 31,84 m e o máximo caudal turbinado toma o valor de 10,1 l/s. A BT funciona no PMR. A pressão máxima da rede é igual a 46,8 m.c.a e mantém-se praticamente constante no período do dia (figura 60).

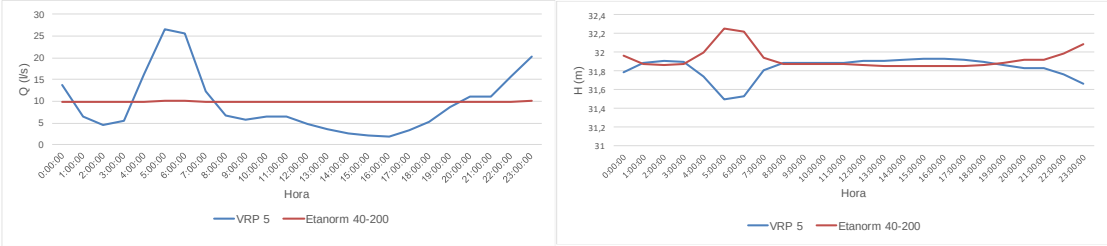

Figura 60 - Valores horários de queda e caudal para a BT e VRP, cenário 2, período 3, alternativa C

Para estas duas últimas alternativas os valores de pressão na rede são bastante próximos.

5.5. Eficiência e eficácia da rede

Em suma, em termos de implementação de BT, para o cenário 1, foram consideradas as alternativas:

- No período de consumo normal: A - Etanorm 32-160 e B - Etanorm 32-200;
- No período de consumo elevado: A - Etanorm 32-160 e B - Etanorm 40-200;
- No período de consumo muito elevado: A - Etanorm 32-160 e B - Etanorm 40-200;

E para o cenário 2:

- No período de consumo normal: A - Etanorm 32-160 e B - Etanorm 40-200;
- No período de consumo elevado: A - Etanorm 32-160 e B - Etanorm 40-200;
- No período de consumo muito elevado: A - Etanorm 32-160 + Etanorm 40-200 em paralelo, B - Etanorm 50-250, C - Etanorm 32-160 e D - Etanorm 40-200.

Efetua-se a análise da eficiência energética da instalação, bem como a eficácia da rede, quando materializadas cada uma das alternativas em cada um dos cenários. A eficiência das BT traduz-se na capacidade do sistema e tem em conta o rendimento mecânico das BT associado, em cada intervalo de tempo. Compara-se a eficácia das alternativas através da expressão definida pelos critérios de capacidade, sustentabilidade e fiabilidade. Define-se assim a qualidade da aplicação das BT e que soluções existem a ser adotadas para situação real. Refira-se que para a RDA presente na ZMC da Beloura, dotada desta grande variabilidade de consumo sazonal, a escolha da solução passará por encontrar uma que vise minimizar o número de equipamentos a instalar, tentando obter-se o máximo de energia e que garanta valores razoáveis de eficácia.

Cenário 1

- *Período de consumo normal*

Para este período, a que correspondem os meses de menor consumo, as BT avaliadas possuem uma eficácia máxima de 59,3% para a alternativa A e 51,4% para a alternativa B. Os valores de sustentabilidade tomam o valor unitário em várias hras do dia e praticamente unitário para as restantes horas de operação da BT. A fiabilidade tem valores elevados no período da tarde nas duas alternativas, onde o consumo é mais reduzido, pelo facto das BT estarem a trabalhar muito próximo do seu PMR. A alternativa A oferece maior produção de energia, comparativamente à B (figura 61).

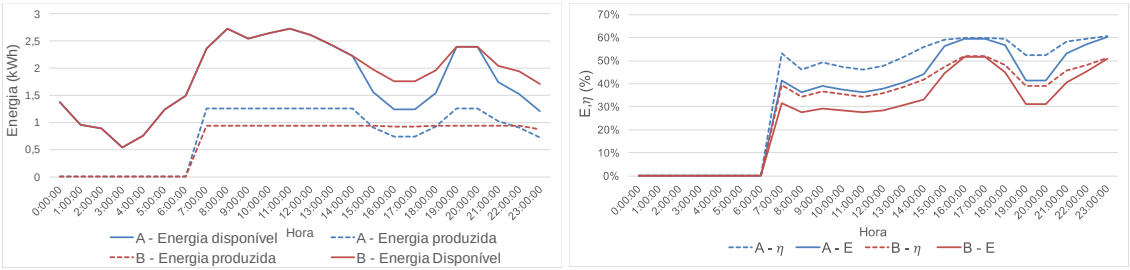

Figura 61- Energia disponível e produzida (esq.), Eficácia e Capacidade (dir.): Cenário 1, Período 1

- *Período de consumo elevado*

Neste período, os valores máximos de eficácia são de 52,1% para a alternativa A e 55,2% para a alternativa B. Os valores médios de eficácia da alternativa A são razoáveis, na medida em que a BT tem valores de fiabilidade e sustentabilidade próximos de 1. Na alternativa B, por forma a obter maior valor de energia opta-se por admitir a operação das BT ao longo de todo dia. Como consequência, no período entre a 1 e 3 horas e 13 e 18 horas, os valores de fiabilidade são reduzidos, fruto da BT estar a operar longe do seu PMR, em comparação com os restantes intervalos de tempo. A alternativa A produz um aproveitamento energético diária ligeiramente superior (27,8 kWh), em comparação com a alternativa B (26,8 kWh) (figura 62).

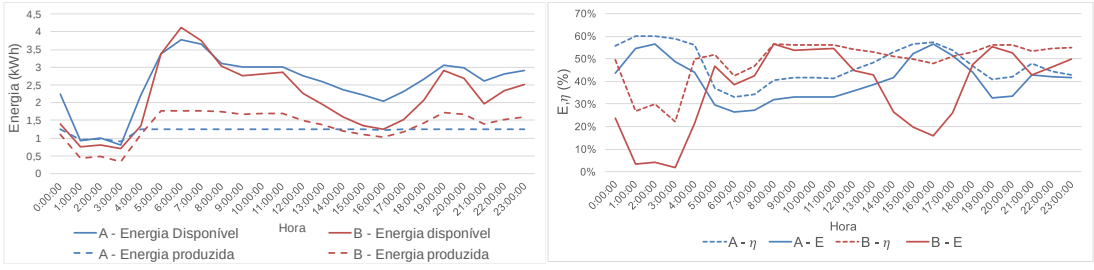

Figura 62 - Energia disponível e produzida (esq.), Eficácia e Capacidade (dir.): Cenário 1, Período 2

- *Período de consumo muito elevado*

As alternativas consideradas retornam valores máximos de capacidade de 52,7% e 56,2% para a alternativa A e B, respetivamente. Na alternativa A, o reduzido valor de eficácia traduz-se pelo pouco aproveitamento da BT (Etanorm 32-160), que esgota a sua capacidade de produção, desperdiçando muita energia. Na alternativa B os valores de fiabilidade e sustentabilidade são próximos à unidade exceto o período entre as 12 e 17h. Esta alternativa produz maior quantidade de energia (figura 63).

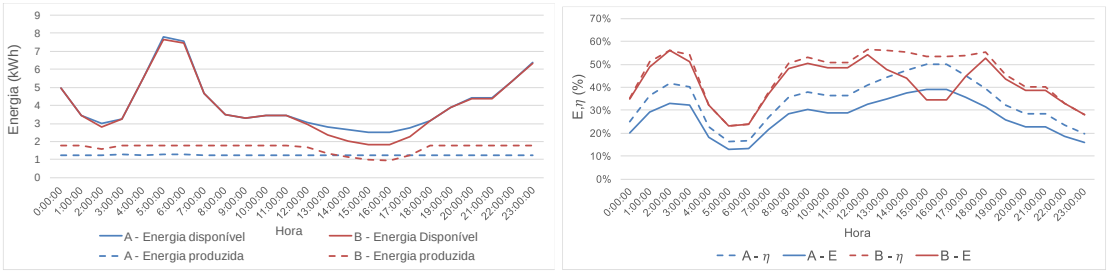

Figura 63 - Energia disponível e produzida (esq.), Eficácia e Capacidade (dir.): Cenário 1, Período 3

Cenário 2

- *Período de consumo normal*

Para a alternativa A, comum aos dois cenários, é possível notar que para além de se igualar a produção de energia para a queda máxima, que já ocorre para o cenário 1, esta se estende para um período mais prolongado, decorrente do aumento do consumo. No entanto, com o aumento do consumo ocorre a diminuição da eficácia, como expectável, uma vez que se esgota a capacidade da BT. A eficácia toma o valor máximo de 54% para a alternativa A e 49,1% para a alternativa B. Ambas as BT possuem valores de sustentabilidade e fiabilidade muito próximos de 1. A produção de energia é superior na alternativa B (figura 64).

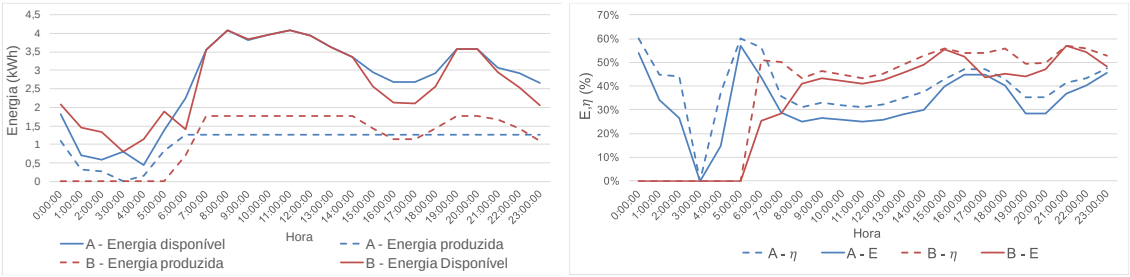

Figura 64 - Energia disponível e produzida (esq.), Eficácia e Capacidade (dir.): Cenário 2, Período 1

- *Período de consumo elevado*

Para o período hipotético considerado, as BT esgotam a sua capacidade de produção de energia na totalidade do dia, no caso da alternativa A, e em 21h na alternativa B. Nesta última, a produção

diária de energia é superior. A eficácia máxima obtida toma o valor de 39,0% e 47,8% para as alternativas A e B, respetivamente. Nestas condições, os valores de fiabilidade e sustentabilidade são próximos da unidade para a maior parte do dia, em ambas as alternativas, exceção feita para o período compreendido entre a 1 e as 3 horas, onde as BT funcionam desfasadas do seu PMR (figura 65).

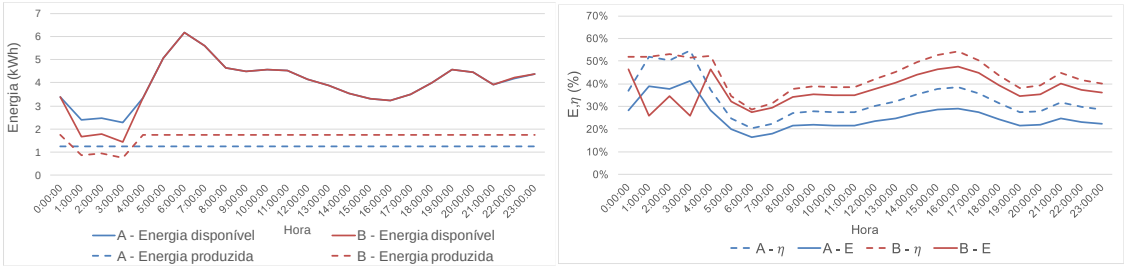

Figura 65 - Energia disponível e produzida (esq.), Eficácia e Capacidade (dir.): Cenário 2, Período 2

- *Período de consumo muito elevado*

Os valores máximos A gama de caudais para este período permite a produção de energia para a queda máxima das BT da alternativa C e D durante a totalidade do dia. Nestes casos, a sustentabilidade adquire valores próximos ou mesmo unitários. No entanto, estas possuem menor valor de eficácia, como seria expectável. Na alternativa A estudou-se a integração de duas BT em paralelo, a que corresponde o maior dos valores de capacidade média deste período. A introdução da Etanorm 50-250, alternativa B, não contribui com um aumento substancial da energia, apesar de para a mesma queda, operar escoando mais quantidade de água. Importa referir que nos períodos de maior consumo (período noturno) existe ainda uma quantidade apreciável de energia hidráulica não aproveitada (figura 66).

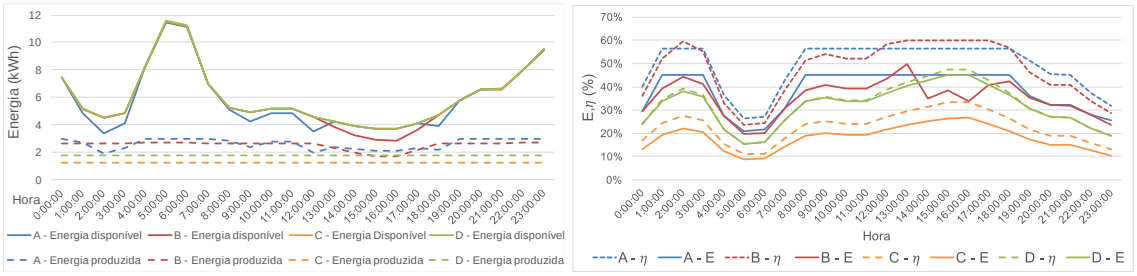

Figura 66 - Energia disponível e produzida (esq.), Eficácia e Capacidade (dir.): Cenário 2, Período 3

5.6. Análise energética e económica

A análise energética será efetuada para conjuntos de alternativas específicas, para cada um dos cenários propostos. Depois de definidas, apresenta-se o estudo económico das soluções determinadas.

Considerando o cenário 1:

- No período de consumo normal (meses de novembro a abril), a alternativa A apresenta uma produção diária de 18,5 kWh (44% da energia disponível). A alternativa B tem uma produção diária de 15,8 kWh (35% da energia disponível).
- No período de consumo elevado (meses de maio e outubro), a alternativa A apresenta uma produção diária de 27,8 kWh (45% da energia disponível) e a alternativa B 26,7 kWh (51% da energia disponível).
- No período de consumo muito elevado (meses de Junho a Setembro). A alternativa A tem uma produção diária de 30 kWh (30% da energia disponível) e a alternativa B 38,8 kWh (41% da energia disponível).

Considerando o cenário 2:

- No período de consumo normal, a alternativa A apresenta uma produção diária de 25,4 kWh (39% da energia disponível) e alternativa B 27,8 kWh (43% da energia disponível).
- No período de consumo elevado, a alternativa A apresenta uma produção diária de 30 kWh (31% da energia disponível) e a alternativa B 39,3 kWh (35% da energia disponível).
- No período de consumo muito elevado. A alternativa A tem uma produção diária de 63,2 kWh (45% da energia disponível), a alternativa B 61,2 kWh (43% da energia disponível), a alternativa C 30 kWh (20% da energia disponível) e a alternativa D 42,8 kWh (29% da energia disponível.

Nestas circunstâncias, pretende avaliar-se o ganho energético proveniente do aumento hipotético do consumo. Assim, é possível perceber até que ponto a solução a implementar se adapta a um novo padrão de consumo. Para tal, concebe-se uma solução que englobe a utilização das mesmas BT nos dois cenários – Solução 1.

Solução 1 – De modo a obter uma solução transversal que abranja os três períodos de consumo sazonais e minimizando a implementação de BT, opta-se por avaliar a viabilidade energética da substituição da VRP 6 por um esquema composto pelas Etanorm 32-160 e Etanorm 40-200 em paralelo. Esta solução compreende o máximo aproveitamento energético.

- No cenário 1, a Etanorm 32-160 funciona para os períodos de consumo normal e elevado (alternativas A) e a Etanorm 40-200 para o período de consumo muito elevado (B). A eficácia total do sistema, nestas condições, é de 37%.
- No cenário 2, admite-se que a Etanorm 40-200 opera nos períodos de consumo normal e elevado (alternativas B) e que a Etanorm 32-160 opera em simultâneo com a Etanorm 40-200 para o período de consumo muito elevado (B). A eficácia total do sistema, nestas condições, é de 36%.

Seguem-se os gráficos da produção diária de energia para os dois cenários (figuras 67 e 68).

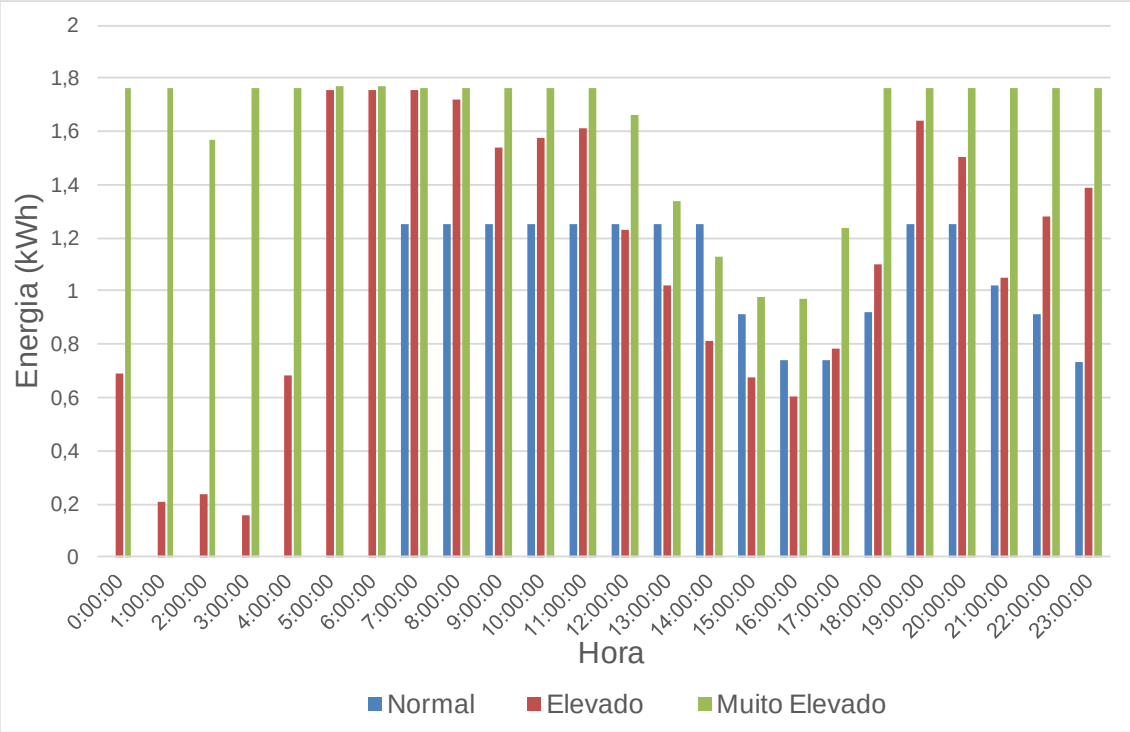

Figura 67 – Produção diária de energia para cada padrão de consumo, solução 1, cenário 1

A produção anual de energia é obtida somando as parcelas correspondentes à produção em cada janela temporal de consumo. No período de consumo normal a produção atinge os 3367 kWh, no período elevado 1725 kWh e no período muito elevado os 4738 kWh, com resultado anual de produção de 9830 kWh, ou 9,8 MWh.

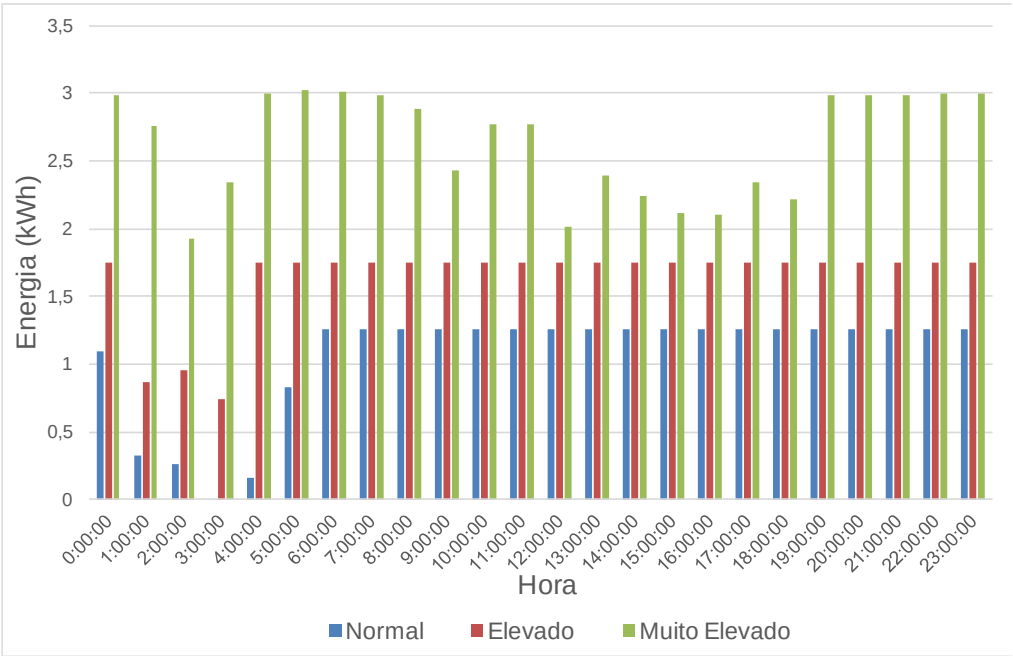

Figura 68 - Produção diária de energia para cada padrão de consumo, solução 1, cenário 2

Nas condições hipotéticas do cenário 2, no período de consumo normal a produção atinge os 4621 kWh, no período elevado 2439 kWh e no período muito elevado os 7716 kWh, perfazendo 14775 kWh, ou 14,8 MWh anualmente. Dados estes resultados, para estas BT, verifica-se um aumento anual de produção de energia de 31,7% partindo de um aumento do consumo.

A análise económica desta solução é feita para 40 anos, tendo em conta a implementação de duas BT, 1 VRP e considerando o preço de venda fixado nos 0,1€/kWh. Os preços das BT, obtidos diretamente à empresa KSB, são 3715€ para a Etanrom 32-160 e 4287€ para a Etanorm 40-200. Considera-se o valor de 2300€ para a VRP (DN 150) a instalar – extrapola-se o seu valor através do preço de outras VRP Flucon (Anexo D).

Comparam-se os dois cenários admitindo que o consumo respetivo ocorre no tempo presente. Desta forma, é possível inferir a viabilidade da solução quer exista ou não um aumento de consumo, de tal forma que não seja necessário efetuar outro estudo futuro.

Os custos de manutenção variam consoante as infraestruturas: 0,5% para construção civil, 2,5% para o equipamento elétrico e 1,5% para os equipamentos hidráulicos. É prevista a substituição dos equipamentos ao final de 20 anos. As taxas de atualização aplicadas são de 6, 8 e 10% e refletem o risco associado a este tipo de investimento, representando a taxa de 6% a perspetiva mais otimista. Apresentam-se na figura 69 os resultados dos fluxos monetários, para cada perspetiva de atualização.

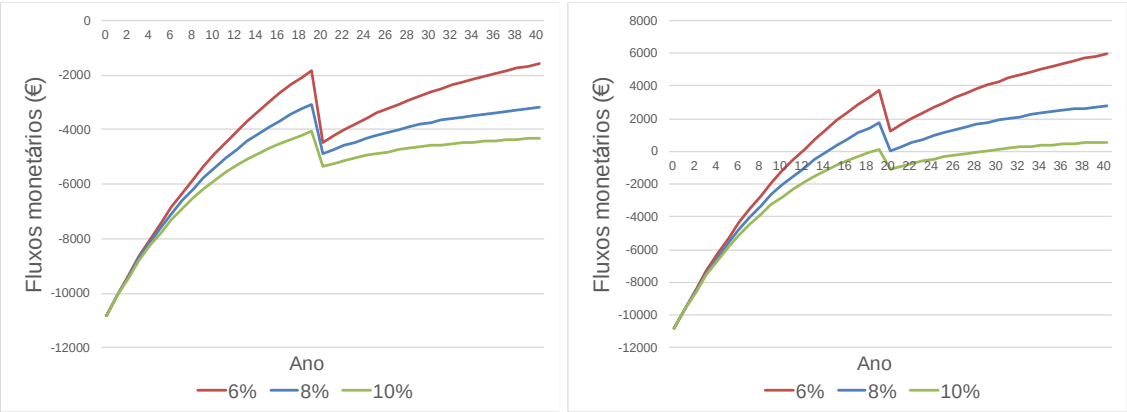

Figura 69 - Fluxos Monetários: Cenário 1 (esq.), Cenário 2 (dir.)

De acordo com a análise, para o cenário atual verificado nesta ZMC, a análise retorna um resultado claramente desfavorável. Não existe nenhuma perspetiva com índice B/C superior à unidade. Na perspetiva mais otimista, o VAL tem o valor negativo de 1590€. Para o cenário 2, o índice B/C, considerando a análise de médio risco, correspondente a uma taxa de atualização de 8%, é ligeiramente superior à unidade (1,19), a uma TIR de 10,7%, à qual corresponde um período de retorno de 15 anos. O VAL para esta situação é de 2776€. Na melhor das hipóteses o período de retorno do investimento ocorre ao final de 12 anos, para um VAL de 598€ e uma TIR de 11,0%, com o índice B/C fixado nos 1,5.

Verifica-se que mesmo que o consumo de água aumente significativamente na Beloura, este não trará proveito económico apreciável, na medida em que não traz acréscimos substanciais na produção de energia elétrica. A solução afigura-se inviável no contexto do aproveitamento energético na ZMC.

Esta solução compreende as BT mais acessíveis do mercado, instaladas em número que permita a máxima exploração de energia. Daqui se infere que o preço do equipamento influencia grandemente os indicadores económicos para a quantidade de energia produzida.

Neste prisma, partindo do princípio da minimização de pressão e consequente diminuição de perdas de água, estuda-se outra solução, fazendo uso da BT como meio de produção elétrica, mas dando ênfase à sua capacidade de, em conjunto com a VRP 6 introduzida na análise, estabilizar pressões na rede. Como se observou, a BT Etanorm 32-160 aplicada em conjunto com a VRP 6, nas condições descritas no capítulo anterior, possui valores de sustentabilidade e fiabilidade adequadas à configuração da rede. Faz-se assim a análise económica da instalação da Etanorm 32-160 e VRP para o cenário atual, para os três padrões de consumo, como medida de otimização de pressões na rede e exploração energética – Solução 2. A eficácia total do sistema, nestas condições, é de 33%.

Esta solução compreende a produção de 8777 kWh anuais, 3367 kWh no período de consumo normal, 1725 kWh no período elevado e 3686 kWh no período de consumo muito elevado. A disposição diária de produção de energia, para cada um dos períodos de consumo surge na figura 70.

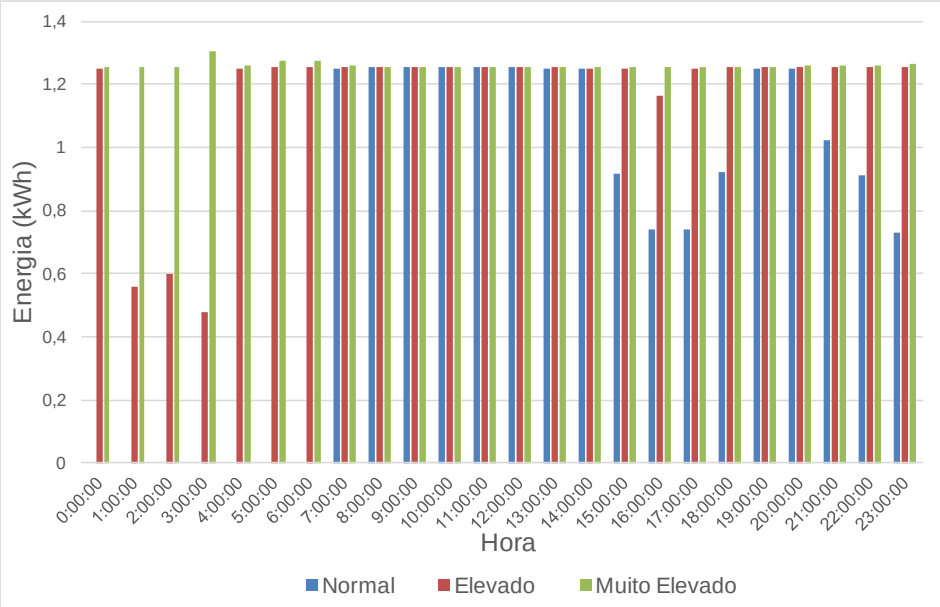

Figura 70 - Produção diária de energia para cada padrão de consumo, solução 2

A BT atinge praticamente a sua produção de energia máxima no período de consumo muito elevado, encontrando-se com muito bons rácios de energia para os restantes períodos, fruto de

operar geralmente no perto do seu PMR.

Apresentam-se na figura 71 os fluxos monetários correspondentes a cada taxa de atualização considerada, calculados de forma análoga à disposta na solução 1.

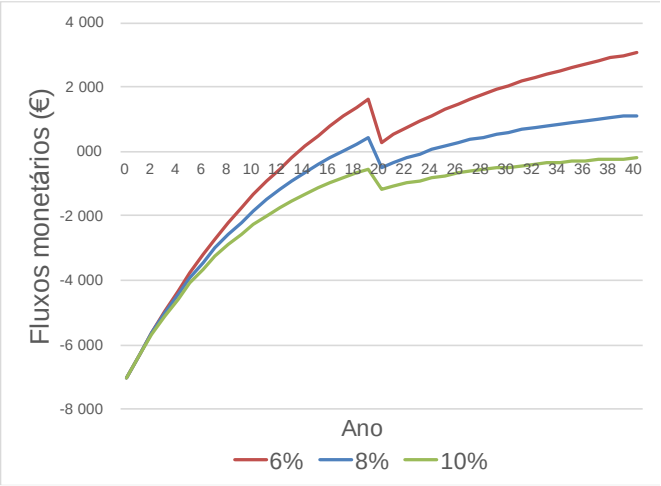

Figura 71 - Fluxos Monetários – Solução 2

Para esta solução, considerando a taxa de atualização de 8%, obtém-se um índice B/C de 1,11. O período de retorno do investimento é de 17 anos e o VAL vem igual a 1124€, a que corresponde uma TIR de 9,6%. A solução, ainda que pouco apelativa, pode considerar-se viável. No anexo E é possível visualizar a análise económica global, apresentando-se os fluxos monetários anuais.

Apesar do benefício elétrico obtido não ser substancial, é possível concluir que existem condições para a obtenção de proveito da energia hidráulica em excesso no sistema e que daí advém um reduzido benefício económico, por mais reduzidos que sejam os valores de caudal e queda na RDA.

5.7. Caracterização da solução

Finalmente, efetua-se uma síntese da solução encontrada, que visa acompanhar os valores resultantes da avaliação da produção energética e análise económica, mostrando os valores de eficácia da rede e os valores de rendimento mecânico da BT Etanorm 32-160 para os períodos de consumo designados, bem como a avaliação das velocidades nas condutas de distribuição. É ainda elaborada uma nova estimativa do volume de fugas, nesta nova configuração da rede, comparando-a com a situação atual na ZMC.

5.7.1. Eficácia e eficiência

Apresentam-se, na tabela 3, os valores médios e máximos de eficácia (E) e das suas componentes, fiabilidade (μ_p^i) e sustentabilidade (χ_p^i) como também o valor da capacidade (η_p^i) da Etanorm 32-160, que traduz a eficiência do sistema.

Tabela 3 – Eficácia, capacidade, fiabilidade e sustentabilidade da solução

Tipo de consumo	$E_{méd}$ (%)	$E_{máx}$ (%)	η_p^i (%)	$\mu_{p_{méd}}^i$ (%)	$\mu_{p_{máx}}^i$ (%)	$\chi_{p_{méd}}^i$ (%)	$\chi_{p_{máx}}^i$ (%)
Normal	46,9	59,6	53,4	87,4	99,3	98,6	100
Elevado	40,6	56,6	47,5	86,6	99,3	98,2	100
Muito elevado	27,3	39,2	34,3	80	80	99,6	100

Na figura 72, que traduz o rendimento mecânico (η_i^t) horário ao longo do dia da Etanorm 32-160, é possível verificar que a esta, na solução encontrada, opera muito próximo do seu ponto de melhor rendimento, nos três períodos de consumo definidos.

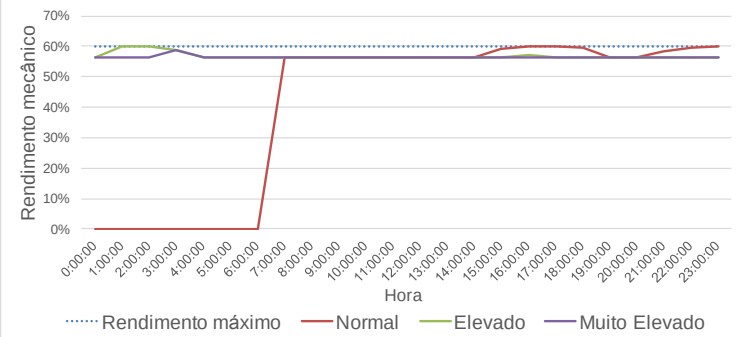

Figura 72 - Rendimento mecânico da Etanorm 32-160

5.7.2. Verificação das velocidades nas condutas da RDA

Na figura 73 apresenta-se o esquema das velocidades na rede, para a solução encontrada.

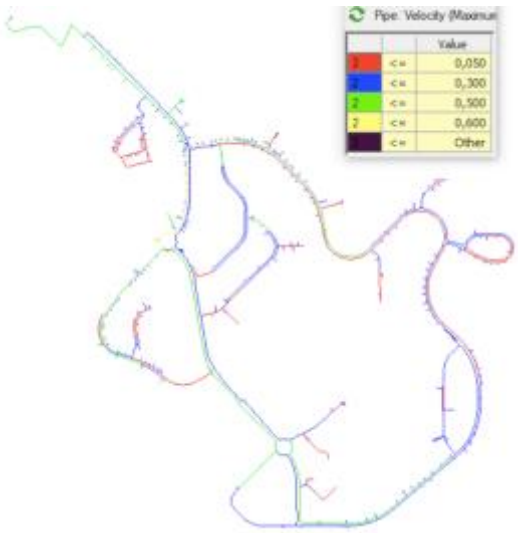

Figura 73 – Velocidades das condutas na rede para a solução encontrada

O critério da velocidade máxima é cumprido. Nas zonas a azul a velocidade é inferior à velocidade mínima indicada na legislação, 0,3 m/s. A vermelho estão as zonas críticas da rede com velocidades inferiores a 0,05 m/s. Os valores das são assim globalmente reduzidos, mesmo com uma capitação apreciável, reflexo de uma rede sobredimensionada. A rede é dotada de válvulas de descarga.

5.7.3. Verificação do nível de perdas reais na ZMC

Uma das preocupações apresentadas pelos SMAS está relacionada com o excesso de pressão na ZMC da Beloura. Novamente, utilizando a função PDD do WaterGEMS, é possível estimar o volume de perdas em cada nó, nos três períodos de consumo, na nova configuração da rede.

Na tabela 4 apresentam-se os resultados da simulação, bem como a respetiva redução percentual obtida.

Tabela 4 – Dados de fugas de água na ZMC, estimadas no modelo hidráulico para a solução

Tipo de consumo	Caudal médio distribuído no período ($\boldsymbol{l/s}$)	Volume de fuga diária ($\boldsymbol{m^3}$)	Volume de fuga total no período ($\boldsymbol{m^3}$)	Redução percentual sazonal do volume de fugas (%)	Volume de fuga total anual ($\boldsymbol{m^3}$)	Redução percentual anual do volume de fugas (%)
Normal	8,12	21,28	3873	30,5	8100	30,3
Elevado	11,74	21,68	1344	30		
Muito elevado	18,28	23,63	2883	30,1		

Aliada ao aproveitamento energético, a solução permite uma redução importante de gama de pressões na rede. Como consequência, existe uma poupança anual de cerca de 30% de fugas de água na rede, que correspondem a cerca de 3523 m^3.

Não se faz a estimativa do proveito económico gerado, uma vez que o preço de compra da água por parte dos SMAS à EPAL (Empresa Portuguesa das Águas Livres, S.A) não se encontra disponível para consulta.

6. Conclusões e perspetivas futuras

6.1. Conclusões

Os modelos computorizados de simulação hidráulica, integrando ou não outras plataformas, permitem a avaliação eficiente de um grande número de dados, transformando-os em informação. Desde que adequadamente calibrados, oferecem uma boa representação do mundo real. Salienta-se assim o seu contributo no controlo e monitorização do caudal, ferramentas fundamentais para assegurar o bom funcionamento de RDA. A disponibilização de uma boa informação é pressuposto de a uma boa gestão.

As RDA pautam-se pela constante variabilidade de condições hidráulicas, afetando apreciavelmente a sua correta gestão. No sentido de reduzir os impactes decorrentes da sua operação, é fundamental conhecer o comportamento destes sistemas.

O novo paradigma da produção de energia e o nexo água-energia abrem espaço a uma nova aprendizagem e a novas possibilidades. Em RDA, permite a redução e o controlo da pressão, associados à diminuição de fugas de água, bem como ao aproveitamento da energia hidráulica em excesso, decorrente da necessidade de garantir pressões mínimas de conforto na sua extensão. O controlo e redução da pressão em RDA constitui também um parâmetro de avaliação de eficiência da rede, bem como das EG.

A implementação de VRP e de BT é complementar. As VRP são responsáveis pela redução de pressão, associada à dissipação de energia hidráulica e redução de fugas, e a introdução de BT, por substituição ou complemento das VRP, permite a transformação de energia, produzindo eletricidade. As BT, importantes na microprodução de energia elétrica, contêm igualmente os benefícios das VRP, motivo pelo qual a sua utilização é cada vez mais uma realidade, na medida em que possibilita a redução dos custos operacionais e de energia.

As RIA permitem a monitorização contínua da rede, diminuindo o tempo de resposta a falhas, aumentando a sua eficiência e atingindo assim a redução da pegada ecológica, com vista ao desenvolvimento sustentável.

A ZMC da Beloura, não possui caudais significativos para a produção elétrica, apesar de ser possível o aproveitamento energético continuamente em metade do ano. Estudou-se a rede, tendo em conta os parâmetros de capacidade e eficácia e eficiência do sistema hidráulico. A eficácia depende dos parâmetros de capacidade, fiabilidade e sustentabilidade.

Verificou-se que um aumento do consumo não traz acréscimo significativo de produção de energia. Uma solução que contemple mais do que uma BT, revela-se inviável no presente.

Existe uma solução que permite conciliar a estabilização de pressões na rede à produção energética, correspondente à instalação de uma BT Etanorm 32-160 em paralelo com uma VRP.

A solução apresenta uma eficácia global de 33%, para uma produção energética anual de 8,8 MWh. Considerando uma taxa de atualização de 8%, o VAL do projeto toma o valor de 1124€, um índice B/C de 1,11 e uma TIR de 9,6%. Esta solução, ainda que pouco apelativa, é viável. O período de retorno do investimento ocorre ao final de 15 anos. Paralelamente, vem associada uma redução de 30%, a que correspondem cerca de 3500 m^3, das perdas de água anuais.

As soluções integradas de BT, que operam baseadas na tipologia sazonal do consumo, revelam-se aplicáveis no contexto da modelação efetuada, sem aparentes variações bruscas do seu comportamento hidráulico, que podem resultar em danos no sistema. É possível reduzir a pressão na rede para toda a gama de caudais em que opera a BT.

A instalação de BT constitui uma solução a ter em conta quando se pretende a redução de pressões em RDA, com o benefício de poder retirar proveito económico. No entanto, ainda que a maior parte dos sistemas incorpore esta solução sem prejuízo na distribuição de água ou no comportamento hidráulico, este tipo de solução está dependente da sua viabilidade económica, afetada consideravelmente pelos custos do equipamento hidráulico.

As BT afiguram-se como parte constituinte das futuras redes inteligentes de água, afetas à sustentabilidade.

6.2. Perspetivas Futuras

O estudo realizado não considerou a situação de incêndio, dotada de uma grande alteração do regime de pressões da rede. Podia ser avaliada a resposta da solução apresentada nestas condições anormais.

A rede estudada é caracterizada pela baixa velocidade do escoamento, podendo afetar a qualidade da água e podendo originar a ocorrência de cavitação. Sugere-se verificar os parâmetros de qualidade da água periodicamente.

Esta metodologia pode extrapolar-se a outras ZMC que operem com valores de caudal superior. Pode confirmar-se assim a viabilidade deste tipo de solução.

Bibliografia

[1] WWAP (United Nations World Water Assessment Programme), “The United Nations World Water Development Report 2015: Water for a Sustainable World. Paris, UNESCO.,” 2015.

[2] WWAP (United Nations World Water Assessment Programme) , “The United Nations World Water Development Report 2016: Water and Jobs. Paris, UNESCO.,” 2016.

[3] M. Pérez-Sánchez, F. J. Sánchez-Romero, H. M. Ramos e P. A. López-Jiménez, “Energy Recovery in Existing Water Networks: Towards Greater Sustainability,” *Water, 9, 97,* 2017.

[4] A. Carravetta, G. D. Giudice, O. Fecarotta e H. M. Ramos, “Pump as turbine (PAT) design in water distribution network by system effectiveness.,” *Water, 5(3), 1211-1225,* 2013.

[5] J. Thornton, R. Sturm e G. Kunkel, “Water loss control. McGraw-Hill Companies.,” 2008.

[6] H. Wen, L. Zhong, X. Fu e S. Spooner, “Water Energy Nexus in Urban Water Source Selection: A Case Study from Qingdao - WRI (World Resources Institute),” 2017.

[7] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division., “World Population Prospects: The 2015 Revision, Key Findings and Advance Tables. Working Paper No. ESA/P/WP.241.,” 2015.

[8] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division., “World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, (ST/ESA/SER.A/366).,” 2015.

[9] R. d. J. Gomes, “Modelação Matemática como Ferramenta de Gestão e Exploração de Sistemas. Universidade de Coimbra.,” 2011.

[10] B. Bates, Z. Kundzewicz, S. Wu e J. Palutikof, “Climate Change and Water. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva, 210 pp.,” 2008.

[11] UN-Water, FAO, “Coping with water scarcity. Challenge of the twenty-first century.,” 2007.

[12] World Resources Institute (WRI), “AQUEDUCT Water Risk Atlas,” [Online]. Available: http://www.wri.org/applications/maps/aqueduct-atlas/.

[13] B. Đurin e J. Margeta, “Analysis of the possible use of solar photovoltaic energy in urban water supply systems. Water, 6(6), 1546-1561.,” 2014.

[14] H. Alegre, S. T. Coelho, M. Almeida e P. Vieira, “Guia Técnico 3: Controlo de perdas de água em sistemas públicos de adução e distribuição. Instituto Regulador de Águas e Resíduos (IRAR), Instituto da Água (INAG) e Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa.,” 2005.

[15] O. Martyusheva, “Smart Water Grid. USA: Department of Civil and Enviromental Engineering, Colorado State University.,” 2014.

[16] H. Alegre, S. T. Coelho e J. P. Leitão, “Gestão Patrimonial de Infra-Estruturas em Sistemas Urbanos de Água. LNEC.,” 2012.

[17] ERSAR, “Caracterização do Setor da Água,” [Online]. Available: http://www.ersar.pt/pt/setor/caracterizacao.

[18] Conselho Nacional da Água, “Água em Portugal,” [Online]. Available: http://conselhonacionaldaagua.weebly.com/aacutegua-em-portugal.html.

[19] APA (Associação Portuguesa do Ambiente), “PENSAAR 2020 - Uma nova estratégia para o setor de abastecimento de água e saneamento de águas residuais,” vol. 1, 2015.

[20] APA (Associação Portuguesa do Ambiente), “PENSAAR 2020 - Uma nova estratégia para o setor de abastecimento de água e saneamento de águas residuais.,” vol. 3, 2015.

[21] M. Loveday e J. Dixon, “DMA sustainability in developing countries.,” *Proc. IWA Specialized Conf.: Leakage.,* 2005.

[22] P. Mendes, “Metodologia de implementação de um sistema de indicadores de desempenho em serviços municipais de abastecimento de água.,” 2003.

[23] Ministério das Cidades - Secretaria Nacional de Combate ao desperdício de água, Brasil, DTA A2 - Documento técnico de apoio A2. Indicadores de perdas nos sistemas de água, 2004.

[24] J. Morrison, "Managing leakage by District Metered Areas: a practical approach.," *Water 21, 44-46.,* 2004.

[25] H. Alegre, W. Hirner, J. M. Baptista e R. Parena, "Guia Técnico 1: Indicadores de desempenho para serviços de abastecimento de água. Manual de Boas Práticas da IWA. Instituto Regulador de Águas e Resíduos (IRAR) e Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa.," 2004.

[26] G. Venkatesh, "Cost-benefit analysis – leakage reduction by rehabilitating old water pipelines: Case study of Oslo (Norway)," *Urban Water Journal Vol. 9, No. 4, 277–286,* 2012.

[27] P. Mistry, "Pressure management to reduce water demand & leakage. Wide Bay Water Corporation, Australia.," 2011.

[28] K. Vairavamoorthy e J. Lumbers, "Leakage reduction in water distribution systems: optimal valve control.," *Journal of hydraulic Engineering, 124(11), 1146-1154.,* 1998.

[29] B. Ulanicki, P. Bounds, J. Rance e L. Reynolds, "Open and closed loop pressure control for leakage reduction," *Urban Water 2, 105-114,* 2000.

[30] H. Ramos e D. Covas, "Válvulas redutoras de pressão e produção de energia.," em *7º Congresso da Água, 1–14*, 2004.

[31] N. Fontana, M. Giugni e D. Portolano, "Losses Reduction and Energy Production in Water-Distribution Networks," *Journal of Water Resources Planning and Management, 138:237-244,* 2012.

[32] H. Ramos e A. Borga, "Application of pumps in water supply systems for energy production.," *Hydraulic Engineering Sotware VIII 53, 1689–1699,* 2000.

[33] E. C. Isbasoiu, D. Bucur, C. Ghergu e G. Dunca, "Using standard pumps as turbines.," em *CEEX2007 Conf., Technical Publishing House, Bucharest, Romania, 96.1–96.6.*, 2007.

[34] T. Calado e H. Ramos, "Microgeneration of energy in water distribution systems".

[35] M. R. N. Vilanova e J. A. P. Balestieri, "Energy and hydraulic efficiency in conventional water supply systems.," *Renewable and Sustainable Energy Reviews 30, 701–714,* 2014.

[36] A. Carravetta, G. Del Giudice, O. Fecarotta e H. M. & Ramos, Energy production in water distribution networks: A PAT design strategy., Water resources management, 26(13), 3947-3959., 2012.

[37] O. Fecarotta, C. Aricó, A. Carravetta, R. Martino e H. Ramos, "Hydropower Potential in Water Distribution Networks: Pressure Control by PATs. Water Resour. Manag. 29, 699–714 (2014).," *Water Resources Managemente, 29, 699–714,* 2014.

[38] A. Carravetta, G. d. Giudice, O. Fecarotta e H. M. Ramos, "PAT design strategy for energy recovery in water distribution networks by electrical regulation.," *Energies 6, 411–424,* 2013.

[39] A. Carravetta, O. Ferracotta e H. Ramos, "Energy production by PAT in small residential areas.," *Renewable Energy, Submetido, 1–16,* 2016.

[40] A. R. G. Ferreira, "Energy recovery in water distribution networks towards smart water grids," 2017.

[41] T. Boyle, D. Giurco, P. Mukheibir, A. Liu, C. Moy, S. White e R. Stewart, "Intelligent Metering for Urban Water: A Review," *Water, 5, 1052-1081; doi:10.3390/w5031052,* 2013.

[42] Sensus, "Smart Water Network - Intelligent water management for your utility," [Online]. Available: https://sensus.com/smart-water-network/.

[43] S. Byeon, G. Choi, S. Maen e P. Gourbesville, "Sustainable water distribution strategy with smart water grid.," *Sustainability, 7(4), 4240-4259.,* 2015.

[44] S. W. Lee, S. Sarp, D. J. Jeon e J. H. Kim, "Smart water grid: the future water management platform.," *Desalination and Water Treatment, 55:2, 339-346, DOI: 10.1080/19443994.2014.917887,* 2015.

[45] R. Hope, T. Foster, A. Money, M. Rouse, N. Money e M. Thomas, "Smart Water Systems. Project report to UK DFID.," 2011.

[46] A. M. Sadeghioon, N. Metje, D. N. Chapman e C. J. Anthony, “SmartPipes: Smart Wireless Sensor Networks for Leak Detection in Water Pipelines,” *Journal of Sensor and Actuator Networks, 3, 64-78; doi:10.3390/jsan3010064,* 2014.

[47] ESRI - Environmental Systems Research Institute, “Enterprise GIS and the Smart Electric Grid. An ESRI White Paper,” 2009.

[48] P. Boulos, L. Jacobsen, E. Heath e S. Kamojjala, “Real-time modeling of water distribution systems: A case study,” *Journal-American Water Works Association, 106(9), E391-E401,* 2014.

[49] M. Mutchek e E. Williams, “Moving Towards Sustainable and Resilient Smart Water Grids.,” *Challenges 2014, 5, 123-137; doi:10.3390/challe5010123,* 2014.

[50] U.S. Departement of Energy, “The Smart Grid: An Introduction”.

[51] M. Kurian e R. Ardakanian, Governing the Nexus. Water, Soil and Waste Resources Considering Global Change, Springer International Publishing., 2015.

[52] H. Hoff, “Understanding the Nexus. Background Paper for the Bonn 2011 Conference: The Water, Energy and Food Security Nexus.,” 2011.

[53] S. J. Kenway, P. A. Lant, A. Priestley e P. Daniels, “The connection between water and energy in cities: a review.,” *Water Science and Technology, 63(9), 1983-1990.,* 2011.

[54] U.S. Department of Energy, “The Water-Energy Nexus: Challenges and Opportunities,” 2014.

[55] F. V. Gonçalves, L. H. Costa e H. M. Ramos, “ANN for Hybrid Energy System Evaluation: Methodology and WSS Case Study,” *Water Resour. Manag., 2295–2317,* 2011.

[56] APREN (Associação de Energias Renováveis), “Boletim Energias Renováveis,” 2017.

[57] J. S. Matos, A. J. Monteiro e F. Ferreira, “Redes de distribuição de água (Aula 10). Disciplina de Saneamento 1–59,” 2012.

[58] Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações, “Decreto Regulamentar nº 23/95, de 23 de Agosto, 36” 1995.

[59] Bentley Systems, WaterGEMS User's Guide, 2016.

[60] H. Nautiyal e A. Kumar, “Reverse running pumps analytical, experimental and computational study: a review.,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14(7), 2059-2067.,* 2010.

[61] J. Du, H. Yang, Z. Shen e J. Chen, “Micro hydro power generation from water supply system in high rise buildings using pump as turbines,” *Energy, http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.023,* 2017.

[62] M. M. Portela, “Análise da Rentabilidade Económica de PCH, Relatório do CEHIDRO para o Projecto PCH (Pequenas Centrais Hidroeléctricas).,” 1998.

[63] M. M. Portela, Componente de planeamento de recursos hídricos. Aulas de Modelação e Planeamento de Recursos Hídricos 482–564, 2014.

[64] Bentley Systems, [Online]. Disponível: https://communities.bentley.com/Products/Hydraulics___Hydrology/w/Hydraulics_and_Hydrology__Wiki/setting-up-pressure-dependent-demand.

[65] T. Walski, W. Bezts, E. T. Posluszny, M. Weir e B. E. Whitman, “Modeling leakage reduction through pressure control.,” *American Water Works Association 98.4: 147-155,* 2006.

[66] O. Fecarotta, H. M. Ramos, S. Derakhshan, G. d. Giudice e A. Carravetta, “Optimal regulation of a PAT in water supply systems for energy recovery.,” *Water Resources Management, Submetido, 1–43,* 2016.

ANEXOS

Anexo A – Lei de potência da função Pressure Dependent Demand

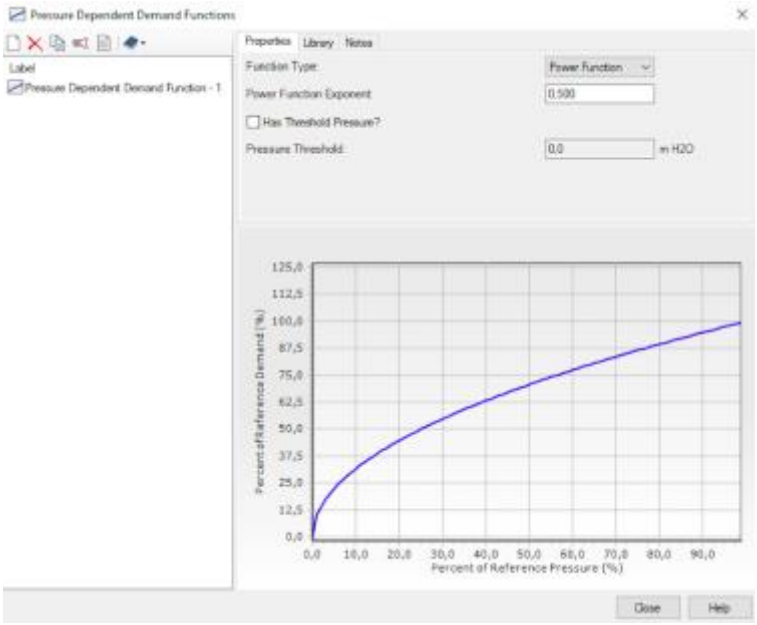

Figura A i – Lei de potência da função Pressure Dependent Demand

Anexo B – Distribuição de pressões máxima e mínima na rede

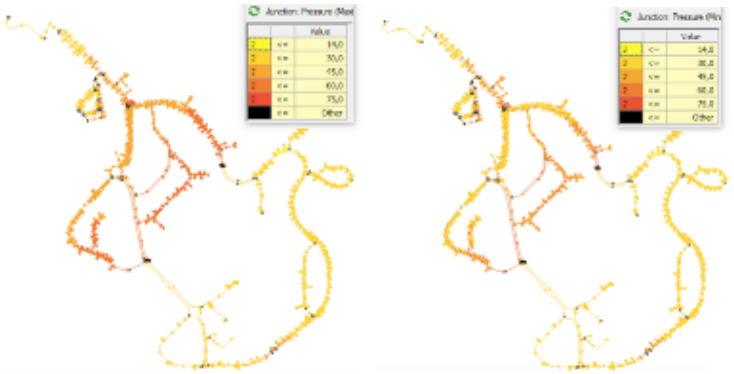

Figura B.i - Distribuição de pressões máxima (esq.) e mínima (dir.) diárias, cenário 1, período 1, alternativa B

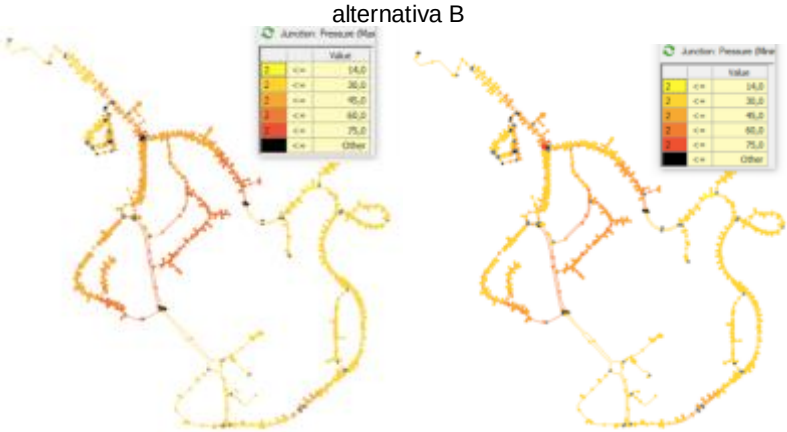

Figura B.ii - Distribuição de pressões máxima (esq.) e mínima (dir.) diárias, cenário 1, período 2, alternativa A

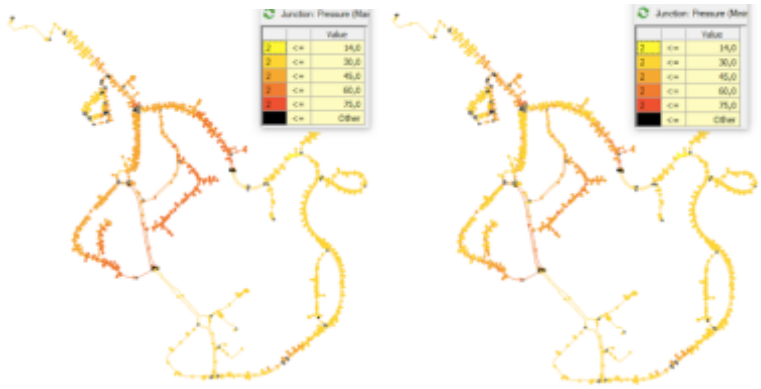

Figura B.iii - Distribuição de pressões máxima (esq.) e mínima (dir.) diárias, cenário 1, período 2, alternativa B

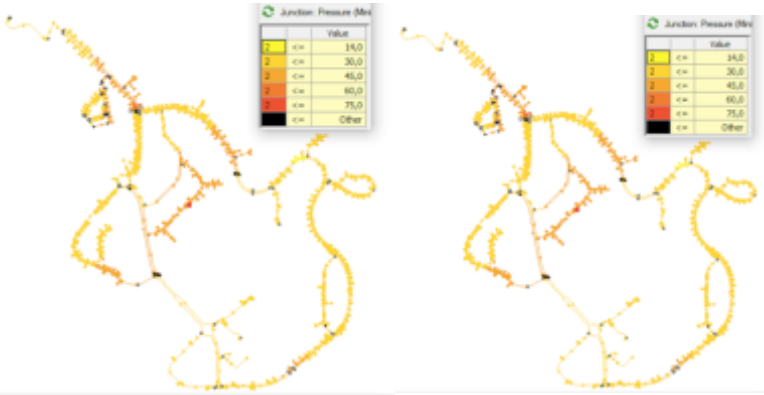

Figura B.iv - Distribuição de pressões máxima (esq.) e mínima (dir.) diárias, cenário 1, período 3, alternativa A

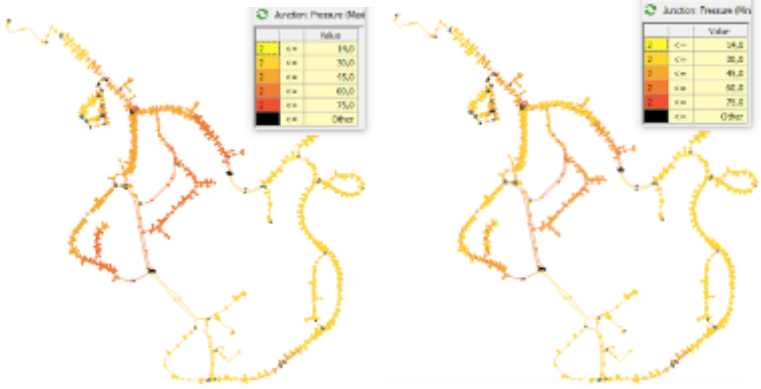

Figura B.v - Distribuição de pressões máxima (esq.) e mínima (dir.) diárias, cenário 1, período 3, alternativa B

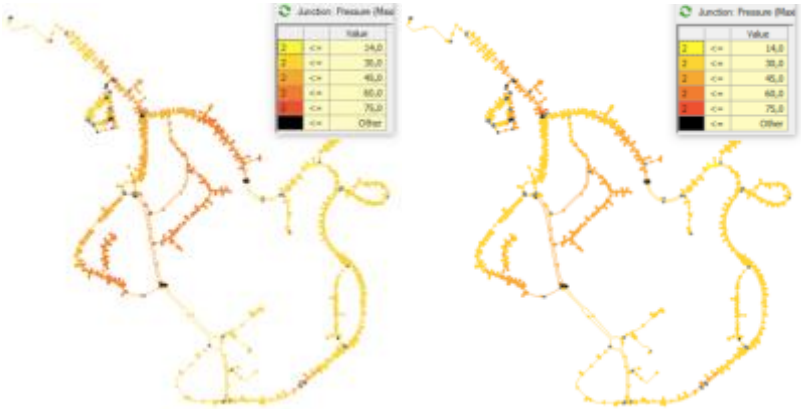

Figura B.vi - Distribuição de pressões máxima (esq.) e mínima (dir.) diárias, cenário 2, período 1, alternativa A

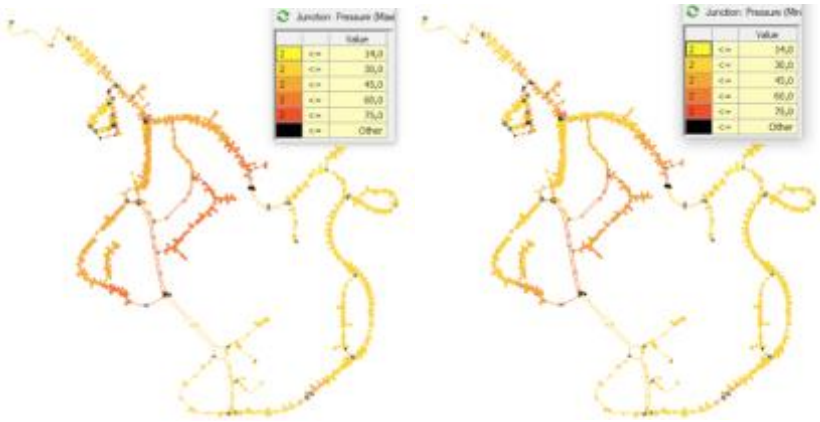

Figura B.vii - Distribuição de pressões máxima (esq.) e mínima (dir.) diárias, cenário 2, período 1, alternativa B

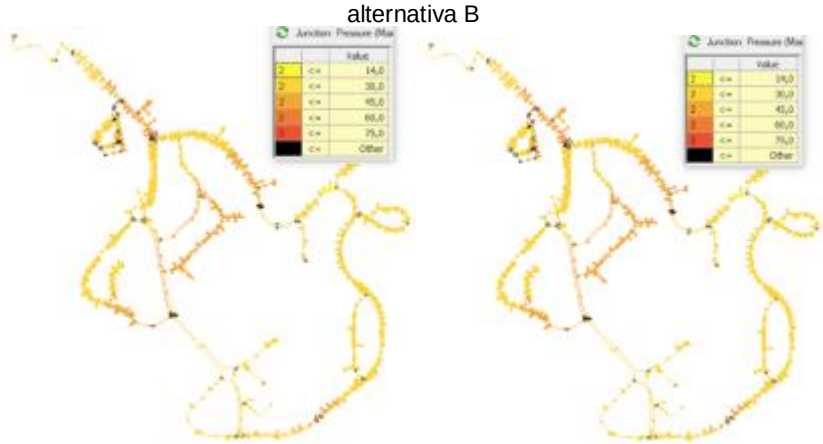

Figura B.viii - Distribuição de pressões máxima (esq.) e mínima (dir.) diárias, cenário 2, período 2, alternativa A

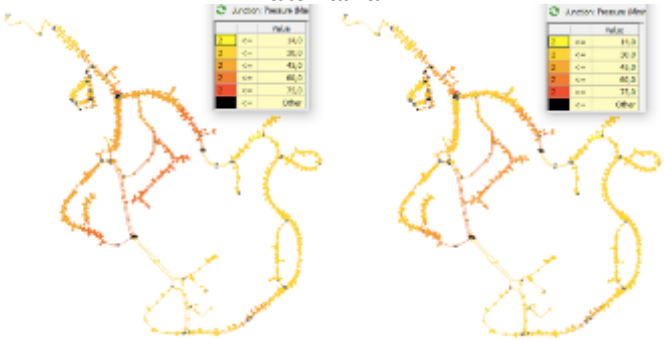

Figura B.ix - Distribuição de pressões máxima (esq.) e mínima (dir.) diárias, cenário 2, período 2, alternativa A

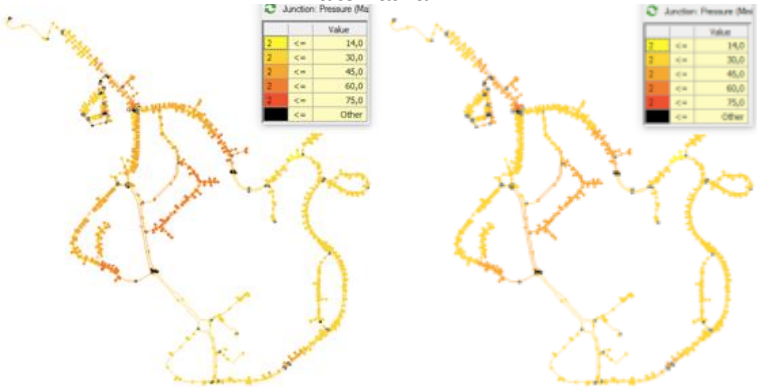

Figura B.x - Distribuição de pressões máxima (esq.) e mínima (dir.) diárias, cenário 2, período 3, alternativa A

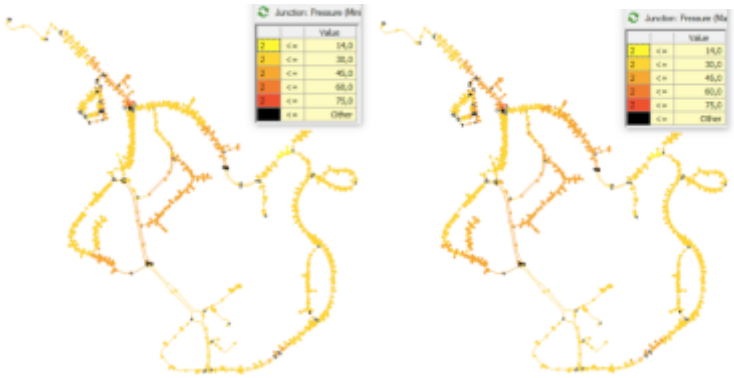

Figura B.xi - Distribuição de pressões máxima (esq.) e mínima (dir.) diárias, cenário 2, período 3, alternativa B

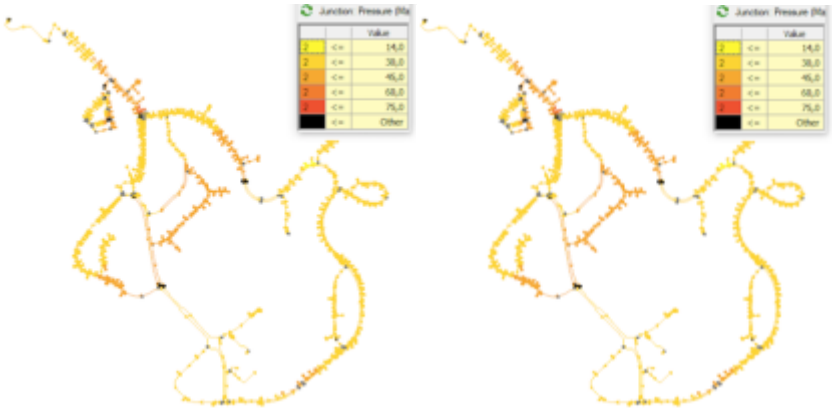

Figura B.xii - Distribuição de pressões máxima (esq.) e mínima (dir.) diárias, cenário 2, período 3, alternativa C e D

Anexo C – Curvas características e de rendimento das BT Etanorm

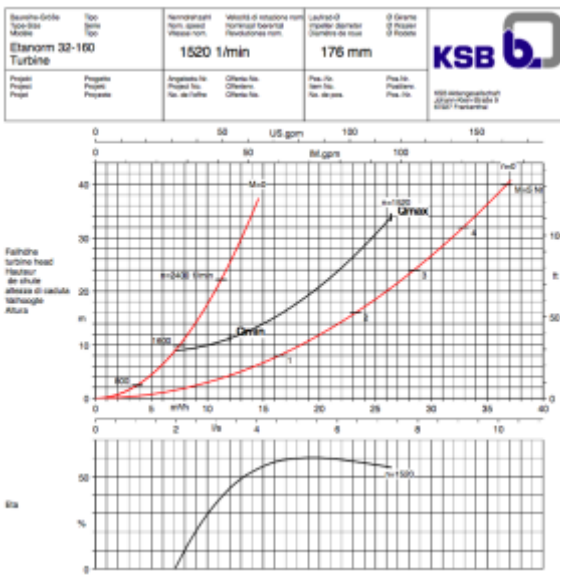

Figura C.i – Etanorm 32-160

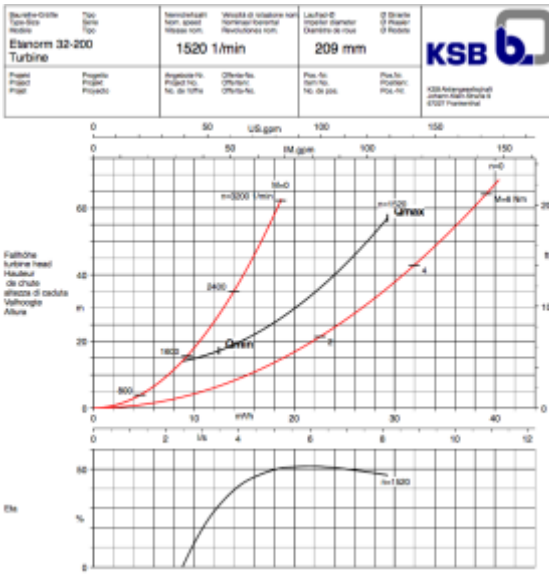

Figura C.ii – Etanorm 32-200

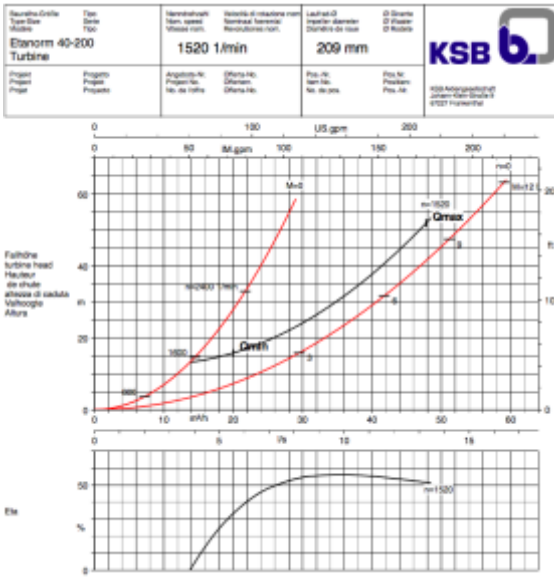

Figura C.iii – Etanorm 40-200

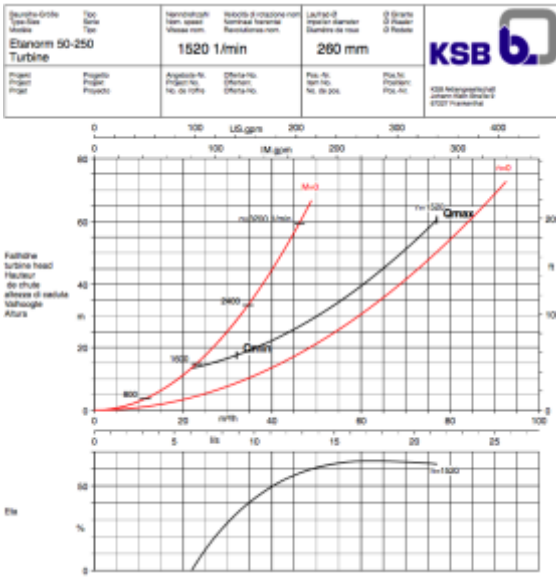

Figura C.iv – Etanorm 50-250

Anexo D – Preço da VRP Flucon

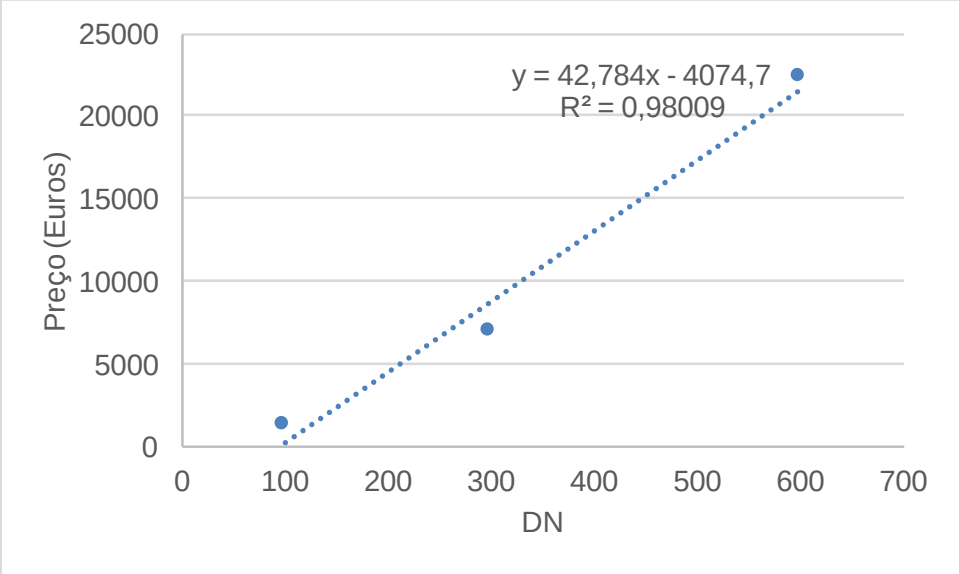

Figura D. i - Tendência linear de preço das VRP Flucon

Diâmetro Nominal ($\boldsymbol{mm}$)	Preço (€)
100	1200
150	***2300***
300	7000
600	22000

Anexo E – Análise Económica

CUSTOS DE INVESTIMENTO (eur)	ANO -1	ANO 1	....		....	ANO 10	....	ANO 20
1 - Construção Civil	500							
2 - Equipamento Hidráulico								
2.1 - Etanorm 32-160	3715							
2.2 - Válvula Redutora de Pressão Flucon	2300							5015
3 - Conexão à rede elétrica	500							
TOTAL (eur)	7015							5015
CUSTOS DE MANUTENÇÃO (eur/ano)	**ANO -1**	**ANO 1**	....		....	**ANO 10**	....	**ANO 40**
1 - Manutenção		105	...		...		...	
RECEITAS	**ANO -1**	**ANO 1**	....		....	**ANO 10**	....	**ANO 40**
1 - Produção de Energia								
1.1 - Produção anual de energia (kWh)	--	8777						
1.2 - Valor kWh (eur/kWh)	--	0,100	....		....		....	0,100
1.3 - Valor da produção anual de energia (eur/ano)	--	878						

TIR (%)	9,6%		
	Taxa de actualização		
	6,0%	8,0%	10,0%
VAL (Eur)	3049	1124	-203
f	15,723	11,574	9,091
B/C (-)	1,416	1,11	0,905

ANO	CASH-FLOW ACUMULADO ACTUALIZADO		
0	-7015,00	-7015,00	-7015,00
1	-6285,97	-6299,47	-6312,48
2	-5598,20	-5636,94	-5673,82
3	-4949,36	-5023,48	-5093,22
4	-4337,25	-4455,47	-4565,41
5	-3759,79	-3929,53	-4085,57
6	-3215,01	-3442,55	-3649,36
7	-2701,08	-2991,65	-3252,81
8	-2216,23	-2574,14	-2892,30
9	-1758,82	-2187,56	-2564,57
10	-1327,31	-1829,62	-2266,63
11	-920,22	-1498,19	-1995,78
12	-536,17	-1191,31	-1749,55
13	-173,87	-907,16	-1525,70
14	167,93	-644,06	-1322,21
15	490,38	-400,45	-1137,21
16	794,58	-174,88	-969,03
17	1081,56	33,97	-816,14
18	1352,30	227,36	-677,15
19	1607,71	406,42	-550,80
20	284,97	-503,74	-1181,38
21	512,28	-350,22	-1076,95
22	726,73	-208,08	-982,02
23	929,04	-76,46	-895,72
24	1119,90	45,40	-817,26
25	1299,96	158,24	-745,94
26	1469,82	262,72	-681,10
27	1630,07	359,46	-622,15
28	1781,25	449,04	-568,57
29	1923,87	531,98	-519,85
30	2058,42	608,77	-475,56
31	2185,35	679,88	-435,30
32	2305,10	745,72	-398,70
33	2418,06	806,69	-365,43
34	2524,64	863,13	-335,18
35	2625,18	915,40	-307,68
36	2720,03	963,79	-282,68
37	2809,51	1008,60	-259,96
38	2893,93	1050,09	-239,30
39	2973,57	1088,51	-220,52
40	3048,70	1124,08	-203,44

Figura E. i – Mapa de custos e receitas (cima); Cash-flows para o horizonte de projeto (baixo)