

**Avaliação da Eficiência Hídrica e Energética em  
Aproveitamentos Hidroagrícolas**

Contributo para o diagnóstico setorial e estudo de soluções de intervenção

**Eriksson Augusto Alves Fernandes**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

**Engenharia do Ambiente**

**Orientadores:** Doutora Dídía Isabel Cameira Covas

Doutora Dália Susana dos Santos da Cruz Loureiro

**Júri**

Presidente: Doutor Ramiro Joaquim De Jesus Neves

Orientador: Doutora Dália Susana dos Santos da Cruz Loureiro

Vogais: Doutora Maria Helena Veríssimo Colaço Alegre

Doutor Nelson Jorge Gaudêncio Carriço

**Dezembro 2020**

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, gostaria de agradecer às minhas orientadoras, Doutora Dália Loureiro e professora Doutora Dídia Covas, pela confiança depositada em mim, e por me terem dado a oportunidade de trabalhar com elas.

Ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil, onde sou estagiário, por me acolher e preparar para desafios futuros.

Aos meus pais, Mário Celso Fernandes e Cesarina Alves, por sempre acreditarem em mim, e por me terem ensinado que os sonhos podem ser concretizados. Mesmo não sabendo ler nem escrever fizeram de tudo para que os sete filhos tivessem um futuro diferente.

Aos meus irmãos, e meus sobrinhos que nos momentos difíceis sempre arranjam maneiras de me fazerem acreditar que tudo dependia de mim e que um dia as dificuldades vividas serão apenas recordações.

A toda a equipa do projeto AGIR, em especial ao Engenheiro Gonçalo, professora Doutora Madalena e ao professor Doutor Nelson pela partilha dos conhecimentos relativamente ao tema desta dissertação.

A todos os meus amigos e familiares por estarem sempre presentes nos bons e maus momentos.

À Direção Geral do Ensino Superior de Cabo Verde por financiar a minha formação em Portugal.

Por último, mas não a menos importante, à minha namorada, Stephanie Almada, pela motivação e paciência demonstrada nos momentos de frustrações e desânimos.

Um muito obrigado a todos!

## RESUMO

A presente tese de mestrado centra-se na avaliação da eficiência hídrica e energética em aproveitamentos hidroagrícolas, sendo o principal objetivo o diagnóstico setorial e o estudo de soluções de intervenção. Para o efeito é proposta uma metodologia de análise e aplicada a dois casos de estudos, de natureza diferente, um sistema com abastecimento constituído predominante por canais e um sistema totalmente pressurizado.

A metodologia de diagnóstico e estudo de soluções de melhoria é composta por quatro fases: i) Recolha e processamento de informação; ii) Realização do diagnóstico (análise global e sectorial); iii) Priorização de soluções de intervenção; iv) Recomendações finais.

A realização do diagnóstico requer o cálculo dos balanços hídrico e energético. A abordagem proposta para a realização do balanço hídrico em aproveitamentos hidroagrícolas é baseada nos trabalhos desenvolvidos por Cunha et al. (2019), e propõe-se a reformulação do cálculo de algumas das suas componentes (i.e. volume de água entrado por escoamento superficial, volume mínimo de operação, evaporação, repassos, fugas e perdas aparentes). Relativamente ao balanço energético é desenvolvida uma abordagem específica para aproveitamentos hidroagrícolas, tendo por base o balanço energético aplicável a sistemas urbanos de água (Mamade et al. 2015).

Os resultados demonstram que sistemas com abastecimento em superfície livre, o principal problema são as descargas em canais que representam 28% do volume de água entrado no sistema, enquanto que, em sistemas com conduta em pressão, os problemas são as fugas e roturas que representam perdas de 7% do volume de água entrada. São, também, identificados os subsistemas prioritários nos dois aproveitamentos analisados e priorizadas soluções de melhoria para um deles. Soluções propostas para o subsistema prioritário poderão reduzir as perdas de água em 38% e aumentar a recuperação da energia em excesso em 25%.

**Palavras-Chave:** Aproveitamento hidroagrícolas, balanço hídrico, balanço energético, eficiência, soluções de intervenções

## **ABSTRACT**

The current thesis focuses on the evaluation of water and energy efficiency in irrigation water supply systems aiming at the sectorial diagnosis and the study of intervention solutions. For this purpose, a methodology is developed and applied to two case studies of a different nature, a supply system predominantly composed of canals and a fully pressurized pipe system.

The methodology for diagnosing and studying improvement solutions consists of four phases: i) Collection and processing of information; ii) Development of the diagnosis (global and sector analysis); iii) Prioritization of intervention solutions; iv) Final recommendation.

Diagnosis requires the calculation of water and energy balances. The developed approach for carrying out the water balance in irrigation systems is based on Cunha et al. (2019) methodology, and, in this work, a reformulation of the calculation of some components (i.e., volume of water entered by surface runoff, minimum volume of operation, evaporation, leaks and apparent losses) is proposed. Regarding the energy balance, a specific approach is developed for irrigation systems, based on the energy balance applicable to urban water systems (Mamade et al. 2015).

The results show that, in systems with free surface flow, the main problems are discharges in canals that represent 28% of the volume of water entering the system, while, for pressure systems, the problem is leaks and ruptures which represent losses 7% of the volume of water entered. Priority subsystems are also identified for the two projects and improvement solutions are prioritized for one of them. Solutions for the priority subsystem can reduce water losses by 38% and increase the recovery of excess energy by 25%.

**Keywords:** Irrigation systems, water balance, energy balance, intervention solutions

# ÍNDICE

<b>Agradecimentos</b> .....	<b>II</b>
<b>Resumo</b> .....	<b>III</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>IV</b>
<b>Índice de quadros</b> .....	<b>VII</b>
<b>Índice de figuras</b> .....	<b>X</b>
<b>Lista de abreviaturas</b> .....	<b>XIII</b>
<b>Lista de símbolos</b> .....	<b>XIV</b>
<b>1 Introdução</b> .....	<b>1</b>
1.1 Âmbito .....	1
1.2 Objetivo e metodologia .....	2
1.3 Estrutura da dissertação .....	3
<b>2 Estado da arte</b> .....	<b>4</b>
2.1 Nota introdutória.....	4
2.2 Caracterização dos aproveitamentos hidroagrícolas.....	4
2.3 Abordagens para avaliação de eficiência hídrica e energética em aproveitamentos hidroagrícolas6	
2.3.1 Abordagens para o cálculo do balanço hídrico .....	6
2.3.2 Abordagens para o cálculo do balanço energético .....	15
2.4 Métodos para apoio ao cálculo de componentes do balanço hídrico.....	20
2.4.1 Métodos para apoio ao cálculo da água entrada por escoamento superficial.....	20
2.4.2 Balanço hídrico para estimativa do escoamento superficial .....	26
2.4.3 Métodos para apoio ao cálculo das perdas por evaporação em canais e reservatórios .....	26
2.5 Abordagens multicritério para apoio à tomada de decisão .....	28
2.6 Estratégias/medidas para melhorar a eficiência dos aproveitamentos hidroagrícolas .....	28
2.7 Limitações na avaliação da eficiência hídrica e energética em aproveitamentos hidroagrícolas .	29
<b>3 Metodologia proposta</b> .....	<b>31</b>
3.1 Abordagem geral .....	31
3.2 Recolha e processamento de informação .....	31
3.3 Diagnóstico global do sistema .....	32
3.3.1 Formulação do balanço hídrico .....	32
3.3.2 Metodologia para aplicação do balanço hídrico .....	37
3.3.3 Formulação do balanço energético.....	38
3.3.4 Metodologia para aplicação do balanço energético em sistemas e subsistemas .....	42
3.3.5 Análise global e identificação de subsistemas prioritários .....	44
3.4 Priorização de soluções para melhoria de eficiência hídrica e energética .....	46
3.5 Recomendação final.....	47

<b>4</b>	<b>Aplicação da metodologia.....</b>	<b>48</b>
4.1	Nota introdutória.....	48
4.2	Aproveitamento hidroagrícola A.....	48
4.2.1	Caraterização do aproveitamento.....	48
4.2.2	Balanço hídrico global e por subsistema.....	52
4.2.3	Balanço energético global e por subsistema.....	58
4.2.4	Análise global e priorização de subsistemas.....	64
4.2.5	Priorização de soluções de intervenção.....	67
4.3	Aproveitamento hidroagrícola B.....	72
4.3.1	Caraterização do aproveitamento.....	72
4.3.2	Balanço hídrico global e por subsistema.....	72
4.3.3	Balanço energético global e por subsistema.....	74
4.3.4	Análise global e priorização de subsistema.....	75
4.4	Síntese dos resultados.....	77
<b>5</b>	<b>Conclusões e Recomendações.....</b>	<b>79</b>
5.1	Principais conclusões.....	79
5.2	Recomendações e sugestões de desenvolvimento futuro.....	80
<b>6</b>	<b>Referências Bibliográficas.....</b>	<b>82</b>
<b>7</b>	<b>Anexos.....</b>	<b>85</b>
A.1	Balanço hídrico.....	85
A.3	Balanço energético.....	90
A.4	Priorização.....	93

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Balanço hídrico em AH [m <sup>3</sup> /ano] (Cunha 2018) .....	7
Quadro 2.2 – Tipos de contadores usados na rega (Sousa 2011).....	11
Quadro 2.3 – Componentes do balanço energético proposto para sistemas de abastecimento de água urbanos [kWh/ano] (Mamade et al. 2017) .....	15
Quadro 3.1 – Dados necessários relativos aos aproveitamentos hidroagrícolas para a realização dos balanços hídrico e energético.....	32
Quadro 3.2– Balanço hídrico em aproveitamentos hidroagrícolas: componentes com alterações de cálculo [m <sup>3</sup> /ano].....	33
Quadro 3.3– Balanço energético em aproveitamentos hidroagrícolas: componentes com alterações de cálculo [kWh/ano].....	38
Quadro 3.4 – Indicadores de desempenho de perdas de água e de eficiência energética recomendados para aproveitamentos hidroagrícolas .....	45
Quadro 4.1– Caraterização reservatórios intermédios do AHA .....	49
Quadro 4.2– Caraterização do sistema e subsistemas de abastecimento do AHA (período de campanha 2018).....	49
Quadro 4.3– Caraterização dos subsistemas por áreas e por duração media de campanha do AHA no período de campanha 2018 .....	51
Quadro 4.4– Tipos de Estações Elevatórias do AHA .....	52
Quadro 4.5 – Classes e erros dos contadores propostos para o AHA.....	55
Quadro 4.6 – Análise de sensibilidade aos erros associados aos módulos Neyrpic no subsistema S5 .....	55
Quadro 4.7– Cotas mínimas dos subsistemas AHA .....	59
Quadro 4.8– Indicadores de desempenho período de campanha 2016, 2017 e 2018 AHA.....	64
Quadro 4.9– Avaliação dos subsistemas do AHA relativo aos indicadores utilizados para priorização .....	65
Quadro 4.10 – Avaliação dos subsistemas relativo aos indicadores (normalizados) utilizados para priorização através da análise hierárquica .....	65
Quadro 4.11– Resultado da priorização de subsistemas utilizando a análise hierárquica. AHA ...	66
Quadro 4.12– Componentes de perdas de água e de ineficiência energética nos subsistemas S2 no período de campanha de 2018 com estimativa dos custos associados (m <sup>3</sup> , €).....	67
Quadro 4.13 – Propostas de intervenções a melhoria do desempenho do subsistema prioritário ...	68
Quadro 4.14 -Resultado indicadores de desempenho utilizados para priorização de soluções .....	69
Quadro 4.15 – Indicadores económicos calculados para as diferentes soluções .....	71

Quadro 4.16 – Caracterização rede de abastecimento AHB no período de campanha 2018 .....	72
Quadro 4.17 – Indicadores de desempenho AHB.....	76
Quadro 4.18– Resultados dos indicadores de desempenho nos subsistemas AHB utilizados para a priorização.....	77
Quadro 7.1 – Cálculo da altura do escoamento superficial no AHA referente ao período de campanha 2016, 2017 e 2018 pelo método do balanço sequencial mensal (BSQM), recorrendo a evapotranspiração potencial de Penamn-Monteith .....	86
Quadro 7.2– Volume escoamento superficial dado pelo balanço hídrico AHA período de campanha 2016.....	87
Quadro 7.3– Volume escoamento superficial dado pelo balanço hídrico AHA período de campanha 2017.....	87
Quadro 7.4 – Volume escoamento superficial dado pelo balanço hídrico AHA período de campanha 2016.....	87
Quadro 7.5 – Balanço hídrico AHA referente período de campanha 2016, 2017 e 2018 .....	88
Quadro 7.6 – Balanço hídrico AHB referente período de campanha 2016, 2017 e 2018.....	89
Quadro 7.7 – Volume captado, bombeado e energia total fornecida no AHA referente ao período de campanha de 2016.....	90
Quadro 7.8 – Volume captado, bombeado e energia total fornecida no AHA referente ao período de campanha de 2017.....	90
Quadro 7.9 – Volume captado, bombeado e energia total fornecida no AHA referente ao período de campanha de 2018.....	90
Quadro 7.10 – Volume captado, bombeado e energia total fornecida no AHA referente ao período de campanha de 2018.....	91
Quadro 7.11 – Balanço energético AHA referente período de campanha 2016, 2017 e 2018.....	92
Quadro 7.12 – Balanço energético AHB referente período de campanha 2016, 2017 e 2018 .....	93
Quadro 7.13– Indicadores e métricas usadas na priorização de subsistemas e de soluções de intervenção .....	93
Quadro 7.14 – Análise económica Solução A0 (Statu Quo).....	95
Quadro 7.15 – Análise económica Solução A1 (Reabilitação canal principal).....	95
Quadro 7.16 – Análise económica Solução A2 (Substituição contadores DN 100-150 com mais de 10 anos).....	96
Quadro 7.17 – Análise económica Solução A3 (Reabilitação de turbinas) .....	96
Quadro 7.18 – Análise económica Solução A1+A2 (Reabilitação do canal principal e substituição de contadores DN 100-150 com mais de 10 anos).....	96

Quadro 7.19 – Análise económica Solução A1+A2+A3 (Reabilitação do canal principal, substituição de contadores DN 100-150 com mais de 10 anos e reabilitação de turbinas) .....97

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Consumos unitários de água e energia no regadio (Nuncio e Arranja, 2017) .....	5
Figura 2.2 – Área regada e irrigável EU-28 (EUROSTAT 2020).....	6
Figura 2.3 – Esquema do balanço hídrico em aproveitamento hidroagrícolas (Alves et al 2005).....	7
Figura 2.4 – Curva característica de erros relativo de contadores ( <i>Itron 2014</i> ).....	11
Figura 2.5 – Representação esquemática de módulos Neyrpics: a) Esquema módulos Neyrpics b) Curva de vazão (Rijo e Pereira 1987) .....	12
Figura 2.6 – Ilustração do método do balanço hídrico para estimativa de repassos (M 2017) .....	13
Figura 2.7 – Valores de repassos obtidos experimentalmente através do balanço hídrico .....	13
Figura 2.8 – Ilustração do método de ensaio de estanquidade ( <i>Leigh e Fipps 2017</i> ) .....	13
Figura 2.9 – Valores de repassos obtidos experimentalmente através de ensaios de estanquidade...	14
Figura 2.10 – Ciclo da água.....	20
Figura 2.11 – Esquema balanço hidrológico no solo, com as respectivas parcelas de entradas e saídas de água.....	21
Figura 3.1 – Esquema da metodologia proposta para a melhoria da eficiência hídrica e energética em aproveitamentos hidroagrícolas.....	31
Figura 3.2 – Esquema de trecho com altura de água mínima a montante maior que zero .....	35
Figura 3.3 – Esquema trecho com altura de água mínima á montante menor que zero.....	35
Figura 3.4 – Ilustração da importação de volumes e energias entre subsistemas .....	38
Figura 4.1 – Esquema da rede de transporte do sistema de abastecimento do AHA .....	49
Figura 4.2– Identificação dos subsistemas, localização das estações meteorológicas e estações elevatórias no aproveitamento hidroagrícola AHA.....	50
Figura 4.3 – Evapotranspiração e temperatura: a) estações meteorológicas do AHA durante o período de campanha 2018; b) evolução do clima nos três períodos de campanha (valores ponderados pela área regada). .....	51
Figura 4.4 – Valores ETP calculado pelos métodos de TW, Turc e PM no período de campanha 2016, 2017 e 2018 nas estações meteorológicas M1 e M3 .....	52
Figura 4.5 – Calibração do modelo BSQM, baseado no escoamento dado pela evapotranspiração potencial de Thorntwaite e nos dados do escoamento medidos na estação hidrométrica P.....	53
Figura 4.6 – Volume à entrada devido ao escoamento superficial AHA períodos de campanha 2016,2017 e 2018 .....	54
Figura 4.7 – Curva de erro obtido através dos ensaios aos contadores no AHA .....	55
Figura 4.8 – Volume entrado, Consumo Autorizado e Perdas de água no AHA em: a) sistema período de campanha 2016, 2017 e 2018, b) subsistemas período de campanha 2018.....	57

Figura 4.9 – Análise de sensibilidade dos indicadores relativamente a variação da cota de referência no AHA: a) E2 b) E3.....	60
Figura 4.10 – Fração de energia gravítica e de bombeamento fornecida aos subsistemas S3 e S4 através da abordagem 1 (A1) e abordagem 2 (A2) .....	61
Figura 4.11– Energia fornecida gravítica, energia fornecida por bombeamento e energia recuperada no AHA nos períodos de campanha 2016, 2017 e 2018 ao nível do a) sistema global e dos b) subsistemas S1 a S5 no período de campanha 2018 .....	62
Figura 4.12– Energia associada ao consumo autorizado e a perdas de água AHA nos períodos de campanha 2016, 2017 e 2018: a) Sistema b) Subsistemas no período de campanha 2018.....	62
Figura 4.13 – Distribuição percentual da energia fornecida ao sistema e aos subsistemas no período de campanha 2018 .....	63
Figura 4.14 – Resultado da priorização de subsistemas utilizando média ponderada de indicadores normalizados recorrendo ao software AWARE-P para o AHA.....	66
Figura 4.15- Resultado da priorização de soluções utilizando média ponderada de indicadores normalizados recorrendo ao software AWARE-P .....	69
Figura 4.16– Resultado análise económica .....	71
Figura 4.17– Caracterização climática AHB período de campanha 2016, 2017 e 2018 .....	72
Figura 4.18 – Volume entrado, Consumo Autorizado e Perdas de água no AHB nos períodos de campanha 2016, 2017 e 2018: a) Sistema, b) Subsistemas período de campanha 2018.....	73
Figura 4.19 – Energia fornecida AHB nos períodos de campanha 2016, 2017 e 2018: a) Sistema, b) Subsistemas período de campanha 2018.....	74
Figura 4.20 – Energia associada ao consumo Autorizado e às perdas de água AHB períodos de campanha 2016, 2017 e 2018: a) Sistema b) Subsistemas período de campanha 2018.....	75
Figura 4.21- Distribuição percentual da energia fornecida AHB período de campanha 2018 sistema e subsistemas.....	75
Figura 4.22 – Resultado priorização de subsistemas AHB dado pela média ponderada dos indicadores de desempenho com base no software Aware-p .....	77
Figura 7.1– Evolução do clima AHA entre 2016 e 2018 .....	85
Figura 7.2 – Evolução do clima estações meteorológicas AHA período de campanha 2016, 2017 e 2018.....	85
Figura 7.3 – Análise Hierárquica: a) Matriz de impacto dos subsistemas perante os indicadores b) Matriz de impacto normalizado.....	94
Figura 7.4– Análise Hierárquica a) Matriz de impacto dos critérios b) Matriz de impacto dos critérios normalizado .....	95

Figura 7.5– Resultado análise hierárquica AHA.....95

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

AGIR – Avaliação da Eficiência do uso da Água e da Energia em Aproveitamentos Hidroagrícolas

BH – Balanço hídrico

BE – Balanço energético

AH – Aproveitamento hidroagrícola

EE – Estação elevatória

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

PNR – Plano Nacional de Regadio

NPA – Nível de Pleno armazenamento

NA – Não se Aplica

ETP – Evapotranspiração potencial

ETC – Evapotranspiração de cultura

EG – Entidade gestora

AHP – Análise hierárquica

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\gamma$  – peso específico da água (kN/m<sup>3</sup>)

$\eta$  – rendimento (%)

A – área (m<sup>2</sup>)

L – comprimento (m)

H – altura (m)

P – precipitação (mm)

V – volume (m<sup>3</sup>)

E – energia (kWh)

U – velocidade média (m/s)

Z – cota geométrica (m)

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Âmbito

É cada vez mais evidente que a prática da agricultura em Países como Portugal tem sido afetada pela ocorrência de sucessivas secas, situação que se tem agravado nas últimas décadas, como consequência das alterações climáticas que constitui uma das maiores problemáticas do século XXI.

Estima-se que cerca de 30% da água consumida mundialmente se destina para a agricultura, podendo este valor, na Europa, atingir 70% (Ferreira et al. 2018). Deste modo, é de extrema importância garantir uma boa gestão dos recursos hídricos desde a sua captação até o seu uso final.

Existem duas técnicas para a prática de agricultura, sequeiro e regadio, sendo a primeira praticada exclusivamente em épocas de chuva e a segunda em qualquer período do ano. Quando a cultura é de regadio, nem sempre a origem de água se localiza na zona onde esta atividade é praticada, sendo necessário construir infraestruturas de armazenamento transporte e distribuição de modo a abastecer zonas onde é necessário instalar as culturas e há carência de água.

Em outubro de 2018, foi aprovado o Programa Nacional de Regadio (PNR) pela resolução do Conselho de Ministros de 20 de setembro de 2018 que tem como objetivo expandir, reabilitar e modernizar os regadios existentes e criar novas áreas regadas, nomeadamente com potencial de ligação aos existentes. Este programa visa promover o regadio e outras infraestruturas coletivas, garantindo medidas de sustentabilidade, contribuindo, assim, para o combate à desertificação e adaptação às alterações climáticas. Para este efeito, este plano centra-se na disponibilização de água para áreas abrangidas pelo regadio, designadamente através de infraestruturas de armazenamento, implementação de sistemas de transporte, distribuição eficientes e de métodos de regas adequados, incentivando assim também a utilização de novas tecnologias para rega. Atualmente, o grande desafio é melhorar a eficiência no transporte e distribuição de água, sendo, neste contexto, que surge o projeto AGIR, com o objetivo de avaliar a eficiência do uso da água e da energia em aproveitamentos hidroagrícolas. De acordo com Decreto-Lei n.º 269/82 de 10 de julho de 2002, entende-se por aproveitamento hidroagrícolas (AH) o aproveitamento de águas do domínio público para rega, drenagem e defesa dos terrenos para fins agrícolas, que visam a intensificação sustentada da atividade agrícola na área abrangida.

A ineficiência relativamente ao binómio água-energia nos AH deve-se, sobretudo, às perdas de água que representam cerca de 35% da energia fornecida, sendo estas perdas associadas às infraestruturas (i.e., reservatórios, canais e condutas) devido ao facto destas infraestruturas se encontrarem em operação à várias décadas, a operação ser ainda muito manual em vários aproveitamentos e à falta de reabilitação e manutenção das infraestruturas e equipamentos (i.e., bombas, válvulas, comportas) (Cunha et al., 2019).

## 1.2 Objetivo e metodologia

A presente tese de mestrado tem como objetivo o desenvolvimento e a aplicação de uma metodologia para a avaliação da eficiência hídrica e energética e apoio na tomada de decisão sobre medidas de melhoria de eficiência em aproveitamentos hidroagrícolas. A tese foi desenvolvida no âmbito do projeto “Avaliação da eficiência do uso da água e da energia em aproveitamentos hidroagrícolas (AGIR)”, coordenado pela FENAREG (<http://www.fenareg.pt/agir>), com participação de vários parceiros, entre os quais o LNEC e pretende contribuir, em particular, para o diagnóstico setorial e avaliação de soluções de intervenção.

A metodologia proposta teve por base trabalhos anteriores desenvolvidos pelas equipas de investigação do Instituto Superior Técnico (IST) e do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), designadamente: (i) o balanço hídrico (BH) específico para aproveitamentos hidroagrícolas desenvolvido por Cunha (2018) e a metodologia para o balanço energético em sistemas urbanos de abastecimento de água proposta por Mamade (2019). Também se baseou em estudos desenvolvidos no âmbito da avaliação da eficiência hídrica e energética em aproveitamentos hidroagrícolas em Espanha, nomeadamente por Abadia et al. (2008) e Abadia e Racamora (2009).

A abordagem seguida na investigação é constituída pelas seguintes etapas:

- i) Levantamento do estado da arte no domínio da avaliação da eficiência hídrica e energética.
- ii) Desenvolvimento de uma metodologia para diagnóstico e priorização de intervenções.
- iii) Aplicação da metodologia a dois tipos de aproveitamentos hidroagrícolas distintos em termos do funcionamento hidráulico e do serviço prestado: um sistema constituído predominantemente por canais, com escoamento com superfície livre, e com prestação de serviço por acordo prévio (abastecimento feito com antecedência devido a tempo de resposta com caudal limitado) e outro sistema composto por um sistema de condutas em pressão e prestação de serviço imediato (abastecimento a qualquer período com serviço ilimitado).
- iv) Síntese das conclusões e recomendações para a melhoria de trabalhos futuros e aplicação da metodologia proposta.

### **1.3 Estrutura da dissertação**

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos, sendo o Capítulo 1 introdutório, onde são definidos o objetivo da tese, a abordagem seguida na investigação e a estrutura do documento final.

No Capítulo 2 apresenta-se o estado da arte onde se incluem trabalhos que abordam os temas relacionados com esta dissertação, designadamente a caracterização dos AH, o cálculo dos balanços hídricos e energéticos para aproveitamento hidroagrícolas, bem como as metodologias para a estimativa das suas componentes, abordagens para a apoio a tomada de decisão e as limitações observadas até agora no estudo da eficiência hídrica e energética em AH.

No Capítulo 3 propõe-se a metodologia a adotar para o diagnóstico de AH e para a priorização de sectores e de intervenções. Revisitam-se os balanços hídricos e energéticos, melhoram-se alguns métodos para a estimativa dos seus componentes, propõe-se uma lista de indicadores de desempenho para avaliação da eficiência hídrica e energética. Estabelece-se um procedimento para a priorização de subsistemas e de soluções de intervenção em AH.

O Capítulo 4 centra-se na aplicação da metodologia proposta a dois casos de estudo (AHA e AHB). Aplicam-se os balanços hídrico e energético, calculam-se os indicadores de desempenho e identificam-se os subsistemas prioritários. Propõe-se várias soluções de intervenção nos subsistemas prioritários com vista a melhorar a sua eficiência hídrica e energética. As soluções propostas são comparadas com base na avaliação dos benefícios ao nível do desempenho e dos custos e benefícios decorrentes da sua implementação.

No Capítulo 5 encontram-se sintetizadas as principais conclusões obtidas com este trabalho e as perspetivas futuras.

## **2 ESTADO DA ARTE**

### **2.1 Nota introdutória**

Apresenta-se, neste capítulo, o estado da arte no domínio da eficiência hídrica e energética no contexto dos aproveitamentos hidroagrícolas, nomeadamente a sua caracterização, abordagens para o cálculo dos balanços hídricos e energéticos e abordagens para apoio a tomada de decisão sobre subsistemas prioritários para intervenção e soluções para melhoria de eficiência hídrica e energética. Inclui-se no final do capítulo uma reflexão com as principais limitações observadas até agora na avaliação da eficiência hídrica e energética em aproveitamentos hidroagrícolas.

### **2.2 Caracterização dos aproveitamentos hidroagrícolas**

Em Portugal, a agricultura de regadio é vista como sendo um pilar fundamental no âmbito da luta contra a falta de alimentos, pois tem a capacidade de garantir uma alta taxa de produtividade ao longo do ano (Carvalho 2016). De acordo com o relatório de 2019 da Federação nacional de Regantes de Portugal (FENAREG), a prática do regadio em Portugal é muito dependente do acesso a água, uma vez que as condições climáticas não são favoráveis, contribuindo assim para o défice hídrico dos solos e implicando maior periodicidade de rega. Com isto é evidente o papel dos AH na potencialização desta atividade, uma vez que engloba importantes infraestruturas que permitem o transporte e o armazenamento da água, nomeadamente canais, condutas, barragens e açudes. O grande estímulo passa por melhorar a eficiência hídrica e energética dos AH, isto é, garantir uma melhor gestão no transporte e no armazenamento da água, reduzindo as perdas físicas de água e reduzindo o consumo de energia.

O regadio tenderá a intensificar-se nos próximos anos, na medida em que o crescimento populacional requer que a produção agrícola aumente em 50% até 2030 e em 70% até 2050, sendo crucial desenvolver estratégias e medidas que permitam que esta intensificação seja sustentável e eficiente (Nuncio e Arranja, 2017). Este crescimento populacional aumentará em 30% o consumo da água e 45% o consumo da energia.

A Figura 2.1 evidencia que a redução do consumo unitário de água ( $m^3/ha$ ) ao longo dos anos fez aumentar de forma exponencial o consumo de energia, sendo o principal desafio no setor do regadio, nos próximos anos, a redução do consumo energético.

De acordo com o Plano Estratégico para o Regadio Público 2014-2020 (Direção Geral de Agricultura e Desenvolvimento Rural 2018), a eficiência global relativa ao uso da água no regadio encontra-se entre os 60-65%, sendo esta eficiência dependente do sistema de captação, distribuição e do método de rega adotado. Em alguns AH o custo da energia é cerca de 70% do custo da água utilizada para a rega, existindo grande potencial de poupança. Estima-se um potencial de redução do consumo energético nas estações elevatórias da ordem dos 20 a 30% (Loureiro et al. 2018). O uso e gestão inadequado da água na maioria

das vezes são as principais causas da ineficiência energética nestes sistemas, o que acaba por implicar consumos elevados de energias associadas às captações, ao transporte e à distribuição. Isto deve-se sobretudo às perdas de água e à falta de manutenção dos equipamentos.

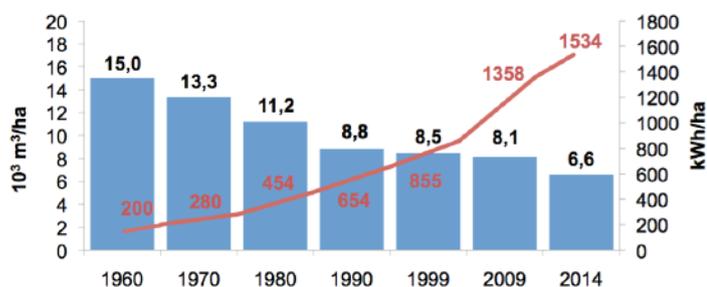


Figura 2.1 – Consumos unitários de água e energia no regadio (Nuncio e Arranja, 2017)

É, neste sentido, que a FENAREG tem trabalhado com o intuito de garantir sistemas de abastecimento dos AH mais eficientes e mais sustentáveis para os seus regantes. Neste contexto, foi proposto um plano de ação que assenta em: i) Melhoria dos sistemas de medição, monitorização, e controlo do consumo da água e da energia desde a origem até o consumo das culturas; ii) Modernização de equipamentos de captação e adução de modo a garantir uma maior eficiência; iii) Implementação de auditorias energéticas regulares aos sistemas de distribuição e rega; iv) Introdução de fontes de energias alternativas e soluções mais sustentáveis. Estes planos inserem-se no Plano Nacional para o uso eficiente da água (PNUEA) cujo objetivo é a promoção do uso eficiente da água nos setores urbanos, industrial e agrícola, contribuindo assim na minimização dos riscos de escassez hídrica e na melhoria das condições ambientais nos meios hídricos.

Em Espanha, nas últimas décadas, tem-se investido muito na melhoria da eficiência hídrica e energética nos AH (Moreno et al. 2010). Após a avaliação da eficiência de sistemas de abastecimento de 22 associações de regantes, foram propostas medidas no sentido de garantir maior eficiência e os resultados têm sido positivos, uma vez que a eficiência global aumentou, implicando uma redução da intensidade energética em 14,1%, e, conseqüentemente, uma redução da fatura de eletricidade que acabou por reduzir os encargos financeiros em 20%, contribuindo assim para uma melhor sustentabilidade económica e ambiental destes aproveitamentos.

Na Figura 2.2 apresenta-se a percentagem de áreas de rega em 2016 nos vários países da União Europeia. Na Holanda, em 2016, apenas 11% da sua área agrícola foi regada, por se tratar de um país com precipitações elevadas não havendo tanta necessidade de rega. No entanto, em Portugal e Espanha, vê-se que a diferença entre a área efetivamente regada e a área total de rega é muito menor, facto este que poderá ser explicado pelo clima que estes dois países apresentam. Com isto reforça-se a ideia de que a agricultura

nestes dois países é muito dependente da rega, sendo muito importante garantir uma melhor eficiência na gestão dos seus recursos hídricos.

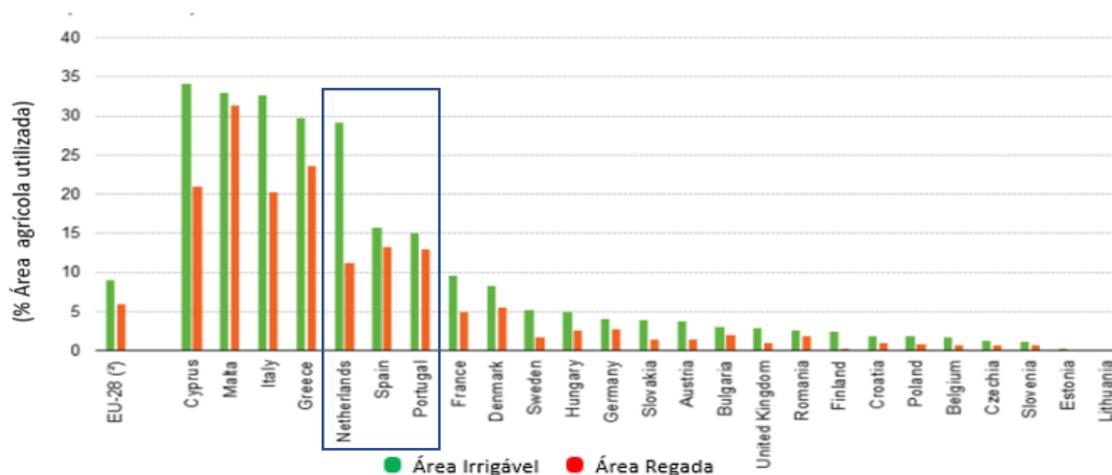


Figura 2.2 – Área regada e irrigável EU-28 (EUROSTAT 2020)

## 2.3 Abordagens para avaliação de eficiência hídrica e energética em aproveitamentos hidroagrícolas

### 2.3.1 Abordagens para o cálculo do balanço hídrico

A nível internacional há poucos estudos desenvolvidos no âmbito da avaliação do balanço hídrico nos aproveitamentos hidroagrícolas, existindo apenas abordagens mais gerais. Refira-se a título de exemplo, o estudo proposto pela Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO) que se centra na realização de balanços hídricos simples nas áreas regadas, considerando que as entradas são apenas os volumes de água provenientes das precipitações e volume de água entrada para rega e as perdas são apenas os volumes associados à evaporação e à transpiração (Batchelor et al 2017).

A nível nacional foi desenvolvido um Plano de Uso Eficiente da Água no setor agrícola (Alves et al 2005), no qual foi proposto uma abordagem para a realização do balanço hídrico em sistemas de abastecimento de AH, cujo esquema se encontra representado na Figura 2.3. As componentes de perdas de água incluem a evaporação (canais e reservatórios), as fugas através de fissuras ou roturas (canais e reservatórios) e as descargas (canais e reservatórios). No entanto os usos não autorizados (usos ilegais) não são considerados como perdas de água e a componente dos erros de medição não existe. De salientar que em alguns estudos, se desprezam as perdas por evaporação por serem muito pequenas (Saeed e Khan 2014).

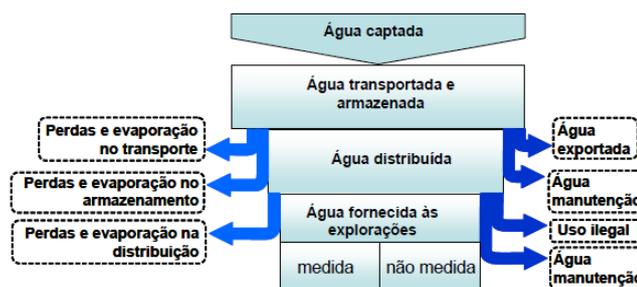


Figura 2.3 – Esquema do balanço hídrico em aproveitamento hidroagrícolas (Alves et al 2005)

Recentemente foi desenvolvida uma proposta de balanço hídrico para aproveitamentos hidroagrícolas (Quadro 2.1), tendo por base o balanço hídrico para sistemas de abastecimento urbano, proposto pela *Internacional water Association (IWA)*. A principal diferença entre os balanço hídricos em AH e em sistemas urbanos é que o transporte de água nos AH é, maioritariamente, feito em canais com superfície livre, implicando a inclusão de novas componentes na água entrada (e.g., água entrada por precipitação, escoamento superficial), no consumo autorizado (i.e., volume mínimo) e nas perdas de água (e.g., evaporação e repassos em canais), não existentes nos sistemas em pressão (Cunha 2018).

Quadro 2.1 – Balanço hídrico em AH [m<sup>3</sup>/ano] (Cunha 2018)

	Consumo Autorizado	Consumo Autorizado Faturado	Faturado medido (inclui água exportada)	Volume faturado	
			Faturado não medido		
Água entrada no sistema	Consumo Autorizado	Consumo Autorizado não Faturado	Não faturado medido	Volume não faturado	
			Não faturado não medido		
	Perdas de água	Perdas por evaporação			Evaporação em canais
					Evaporação em reservatórios intermédios
		Perdas Aparentes			Consumo não autorizado
					Perdas de água por erro de medição
		Perdas reais			Fugas em condutas
					Repassos em canais
					Repassos em reservatórios intermédios
					Descargas em canais
		Descargas em reservatórios intermédios			

### Água entrada no sistema

A Água entrada no sistema inclui o volume de água que entra no sistema, com o objetivo de garantir o abastecimento aos utilizadores. Esta componente é essencial para o balanço hídrico, sendo a sua medição fundamental e da responsabilidade das entidades gestoras. Quanto menor a incerteza na medição, melhor será a avaliação da eficiência do sistema de abastecimento. A determinação deste volume poderá requerer a instalação de caudalímetros, o uso de dispositivos portáteis, ou a estimativa indireta através de dados como a variação do nível de água em reservatórios, dados das curvas características Q-H de bombas e do número de horas de bombeamento (Liemberger e Farley 2004).

Nos sistemas de abastecimento de água dos aproveitamentos hidroagrícolas, a água entrada no sistema inclui o volume captado nas albufeiras, rio ou furo e a água importada de outros sistemas (Cunha 2018). Adicionalmente, requer a contabilização do volume entrado por precipitação na rede dos canais e nos reservatórios intermédios, assim como escoamento superficial nos canais e reservatórios intermédios.

A avaliação do volume entrado por precipitação requer o conhecimento das características físicas dos canais e dos reservatórios intermédios e dos dados referentes as precipitações medidas nas estações meteorológicas da área abrangente. Tendo em conta que a medição da precipitação é efetuada nas estações meteorológicas pontuais, a estimativa da precipitação nas áreas de análise requer uma média simples dos valores medidos nas estações adjacentes, ou a ponderação do contributo de cada estação baseada na sua distribuição espacial.

Relativamente ao escoamento superficial, este é definido como sendo o fluxo de água percorrida superficialmente dado a incapacidade do solo em o reter, devido a sua saturação (Miranda et al. 2010). Este pode ser estimado recorrendo ao balanço hidrológico sequencial mensal proposto por Thornthwaite (Portela e Santos 2006), descrito em 2.4.1.1 ou através do modelo proposto por Temez (Vaz 2010), em que ambos utilizam dados mensais de evapotranspiração potencial e precipitação. Sendo assim, é necessário estimar a evapotranspiração potencial. Esta pode ser estimada com base na fórmula de Thornthwaite a qual requer apenas dados de temperatura média mensal (Vaz 2010). No entanto, quando existe mais informação disponível (i.e, temperatura mínima, máxima e média, humidade relativa mínima, máxima e média e velocidade do vento) é recomendável o cálculo da evapotranspiração de uma cultura de referência pelo método de Penman-Monteinth (FAO). Para refletir o tipo de cultura pode também explorar-se a possibilidade de utilizar a evapotranspiração de cultura. Deste modo, há necessidade de melhorar a estimativa desta componente e compará-la com medições de campo (calibração).

De modo alternativo, o escoamento superficial pode ser estimado através do cálculo do balanço hídrico proposto Cunha et al. (2019) apresentado em 2.4.2.

#### *Volume entrado por precipitação*

Para o cálculo do volume de precipitação será necessário dados relativamente às estações meteorológicas e através dos métodos supracitados poder-se-á estimar a precipitação nas áreas em estudo (Cunha 2018).

Para a sua estimativa recorre-se à seguinte expressão:

$$V_p^C = \sum_{i=1}^n P \times A_i \times 10^{-3} \quad (2.1)$$

sendo  $V_p^C$ , o volume de água decorrente da precipitação em canais ( $m^3$ );  $P$ , a precipitação na área de influência (mm);  $A_i$ , a área superficial do canal referente à largura superficial líquida trecho de canal  $i$  ( $m^2$ ). A área superficial, calculada troço a troço é dada por:

$$A_i = \frac{B_m + B_j}{2} \times L \quad (2.2)$$

sendo  $B_m$  e  $B_j$ , a largura superficial do canal a montante e a jusante, respetivamente (m);  $L$ , o comprimento do canal (m).

O volume entrado por precipitação em reservatórios,  $V_p^R$ , é dado por:

$$V_p^R = \sum_{i=1}^n P \times A_i \times 10^{-3} \quad (2.3)$$

sendo  $V_p^R$ , o volume de água decorrente a precipitação em reservatórios (m<sup>3</sup>);  $A_i$ , a área superficial do reservatório  $i$  correspondente ao nível de pleno armazenamento (m<sup>2</sup>).

#### *Consumo Autorizado*

O consumo autorizado representa o volume de água autorizado faturado e não faturado, consumido pelos utilizadores, ou por aqueles que implícita ou explicitamente estão autorizados a consumir, nomeadamente para compromissos sociais ou utilização legítima no combate a incêndios, podendo incluir ainda o volume exportado.

O *consumo autorizado faturado* inclui o consumo faturado medido e não medido. O *consumo faturado medido* representa a água usada em diferentes categorias de consumo (usos agrícolas e não agrícolas), sendo a sua estimativa baseada na leitura dos contadores instalados a montante do ponto de entrega. O *consumo faturado não medido* inclui o consumo que foi faturado, mas não foi medido, devido a inexistência de equipamentos de medição, sendo assim a entidade gestora o quantifica através de valores típicos de consumo com base na área regada (Cunha 2018).

O *consumo autorizado não faturado* inclui o volume não faturado medido e o não faturado não medido. O *consumo não faturado medido* representa o volume consumido registado, podendo englobar o volume para usos operacionais da própria entidade gestora, descargas da rede devido a má qualidade de fornecimento, limpeza das redes e eventuais transferências para sistemas ou subsistemas da mesma entidade gestora. O *consumo não faturado não medido* inclui os volumes utilizados para combate a incêndios, podendo ainda incluir o volume mínimo de operação (Cunha 2018). Este volume representa o volume de água no canal a partir do qual se inicia o abastecimento de água através das várias tomadas de água. Para abastecer é necessário que junto às tomadas de água a altura do escoamento no canal seja superior às cotas das soleiras das tomadas de água responsáveis pela derivação de caudais para abastecimento.

A água faturada compreende o consumo faturado medido e não medido, enquanto que a água não faturada é obtida pela diferença entre o volume entrado no sistema e o consumo autorizado faturado (água faturada).

### *Abordagem para o cálculo do volume mínimo de operação em canais*

O volume mínimo de operação em canais depende do rasto e da linha da superfície livre horizontal do canal, definida de acordo com altura de jusante e de montante do trecho. O seu cálculo é feito trecho a trecho recorrendo a equação (2.4) (Cunha 2018).

$$V_{min} = \sum_{i=0}^n \frac{A_m^i + A_j^i}{2} \times L^i \quad (2.4)$$

sendo  $V_{min}$ , o volume mínimo ( $m^3$ ),  $A_m^i$  e  $A_j^i$ , a área média da secção transversal a montante e a jusante do trecho  $i$  respetivamente (m);  $L^i$ , o comprimento do trecho  $i$  (m).

### *Perdas de água*

As perdas de água são definidas como o volume de água, que tendo sido introduzido no sistema, não chega a ser entregue ou a ser faturado no cliente final (Carina 2018). As perdas de água nos AH com escoamento em superfície livre compreendem três subcomponentes: a evaporação, as perdas reais e as perdas aparentes.

### *Perdas aparentes*

As perdas aparentes referem-se ao volume de água associado ao consumo não autorizado (i.e., ligações ilícitas) e a possíveis erros de medição. Existem várias práticas de consumir água de forma ilícita em AH, como sejam a instalação de ligações clandestinas na rede de distribuição, a construção de ligações por *bypass*, a manipulação do contador ou a instalação de derivação de ramal. Por outro lado, os erros de medição dependem do tipo, calibre e idade de contador, do seu adequado dimensionamento e instalação, das características físico-químicas da água medida, e de avarias naturais (incrustações/desgaste do contador) (Carina 2018). Estes fatores poderão induzir a erros de sub ou sobremedição, sendo mais comum a primeira.

Os consumos não autorizados em sistemas urbanos de abastecimento podem ser cerca de 12% do volume entrado no sistema. Em AH, esta parcela é significativamente inferior, estimando-se em apenas 2,4% da água entrada, na medida em que é feita uma inspeção diária pelos cantoneiros à rede (Cunha 2018).

A determinação das perdas referentes a erros de medição é obtida através do cálculo do erro absoluto, que consiste na diferença entre o valor medido,  $V_m$ , e o valor verdadeiro da grandeza,  $V_v$ . Devido à falta de informação quanto ao valor verdadeiro da grandeza, assume-se um valor referente ao erro relativo,  $E_{Rel}$  (equação (2.6)), que por sua vez é dado pela razão entre o erro absoluto,  $E_{Abs}$  (equação (2.5)), e o valor verdadeiro da grandeza, e com isto será estimado o valor verdadeiro da grandeza, e posteriormente o volume que eventualmente não foi medido (erro absoluto em  $m^3$ ). A diferença entre os dois erros deve-se ao fato do primeiro representar o volume que efetivamente não foi medido, enquanto que o segundo representa a fração do volume entrado não medido, sendo assim adimensional (Barros 2015).

$$E_{Abs} = V_m - V_v \quad (2.5)$$

$$E_{Rel} = \frac{V_m - V_V}{V_V} \times 100 \quad (2.6)$$

sendo  $E_{Abs}$ , o erro absoluto ( $m^3$ );  $V_V$ , o valor verdadeiro da grandeza ( $m^3$ );  $V_m$ , o valor medido ( $m^3$ );  $E_{Rel}$ , o erro relativo (%)

De acordo com as normas internacionais de metrologia, o erro de medição é dada pela diferença algébrica entre o resultado do valor medido e o valor verdadeiro da grandeza medida, tal como ilustrada pela equação (2.6). Os erros de medição dependem de vários fatores, nomeadamente, da degradação natural do contador, do mau dimensionamento, da instalação incorreta dos contadores, do erro de leitura, registo ou processamento dos valores, da calibração pouco frequente, e da deterioração devido ao uso e qualidade da água. O erro relativo de um dado contador varia com o caudal de operação, tendendo a ser maior para menores caudais (Figura 2.4). Este erro tende a aumentar com a idade do contador.

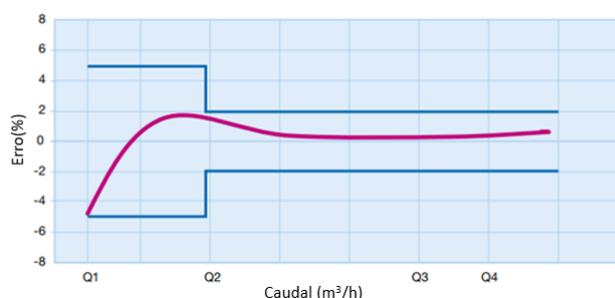


Figura 2.4 – Curva característica de erros relativo de contadores (Itron 2014)

A Figura 2.4 mostra um exemplo de uma curva de erro de um contador. Este contador tem um caudal mínimo de operação (Q1), que, em novo e bem instalado, apresenta erros da ordem dos 5%. Este erro diminui quando se atinge o caudal de transição (Q2) e, para caudais superiores a este último, e menores do que o caudal máximo (Q4) o erro é da ordem dos 2%. Um contador deve ser dimensionado para funcionar entre os valores de Q2 e Q4.

No Quadro 2.2 apresentam-se os principais tipos de contadores usados em sistemas de abastecimento em aproveitamentos hidroagrícolas.

Quadro 2.2 – Tipos de contadores usados na rega (Sousa 2011)

Instrumento	Contador	Tecnologia	Caudal ( $m^3/h$ )	Precisão	Custo
Contador	De velocidade	Multijacto	1.5 - 15	**	Médio
		Woltmann	20 - 2500	**	Médio
		Proporcional	80 - 500	*	Baixo
		Tangencial	15 - 600	*	Baixo

\*Pouca e \*\* Média precisão

As tomadas de água na maioria dos aproveitamentos hidroagrícolas com sistema em canal em Portugal encontram-se equipadas com módulos Neyrpic (Rijo, 2010). São constituídos por um conjunto de obturadores que podem ser totalmente abertos ou totalmente fechados, não permitindo assim aberturas intermédias, conforme representada na Figura 2.5 b). Os módulos têm a vantagem de distribuir um caudal praticamente constante para uma dada gama de valores da carga a montante do mesmo. A cada módulo está associado um determinado caudal derivado que é conseguido por abertura dos obturadores. Para cada abertura conhece-se o caudal e pode-se estimar o volume, multiplicando o caudal pelo tempo que este esteve aberto (Cunha 2018).

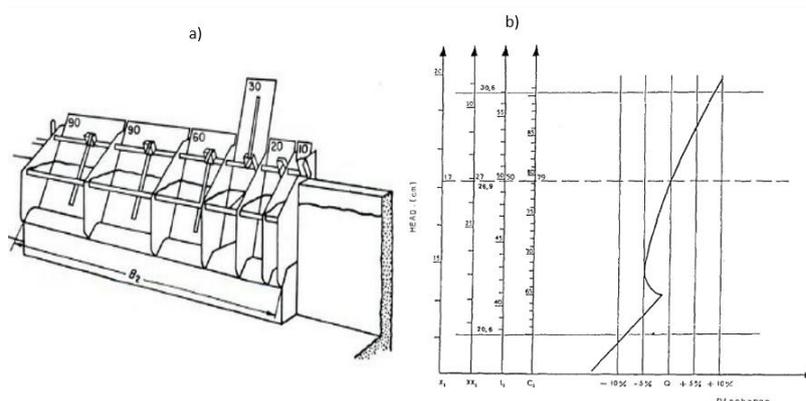


Figura 2.5 – Representação esquemática de módulos Neyrpic: a) Esquema módulos Neyrpic b) Curva de vazão (Rijo e Pereira 1987)

Estes módulos também têm erros de medição associados às variações do nível da superfície livre dos canais, à incorreta instalação ou assentamento e à acumulação de sedimentos e plantas aquáticas que poderão reduzir a secção de vazão (Rijo e Pereira 1987).

#### *Perdas reais ou físicas*

As perdas reais ou físicas são inevitáveis, independentes do tipo de sistema ou do ano da construção, compreendendo as perdas nas condutas e reservatórios de adução e ou distribuição, assim como as fugas nos ramais.

Nos AH, existem cinco subcomponentes relativo às perdas reais (Quadro 2.1), nomeadamente fugas nas condutas, repassos em canais e nos reservatórios intermédios, descargas nos reservatórios e nos canais.

As perdas nas condutas devem-se ao sistema estar pressurizado, estar degradado e à falta de manutenção. Para o cálculo do volume associado às fugas nas condutas, recorre-se ao valor de referência de perdas, este estabelecido pela ERSAR (2017)  $5 \text{ m}^3/(\text{km.dia})$  através de:

$$V_{fugas} = \sum_{i=0}^n V_{Ref} \times L_i \times \Delta t_i \quad (2.7)$$

sendo  $V_{fugas}$ , o volume associado às fugas nas condutas ( $\text{m}^3$ );  $V_{Ref}$ , o valor de referência de fugas em condutas [ $\text{m}^3/(\text{km.dia})$ ];  $L_i$ , o comprimento conduta  $i$  (km);  $\Delta t_i$ , o período de pleno funcionamento (dia).

Os repassos nos reservatórios e nos canais devem-se à presença de fissuras, causadas por falhas estruturais decorrentes da má execução da obra, da qualidade dos materiais utilizados ou de assentamentos do terreno de fundação. Para a estimativa do volume associado a repassos, existem vários estudos desenvolvidos que consistem no uso de duas metodologias para a estimativa de um valor de referência de repassos para canais revestidos e não revestidos. Uma destas metodologias é baseada no balanço hídrico (ver Figura 2.6), através do qual se mede o caudal à entrada e à saída de um dado trecho de canal, sendo os repassos dado pela diferença entre estas grandezas dividida pela área molhada do canal.

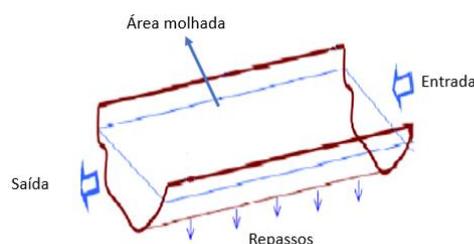


Figura 2.6 – Ilustração do método do balanço hídrico para estimativa de repassos (M 2017)

Na Figura 2.7 encontram-se apresentados valores de referências obtidos experimentalmente usando o método do balanço hídrico.

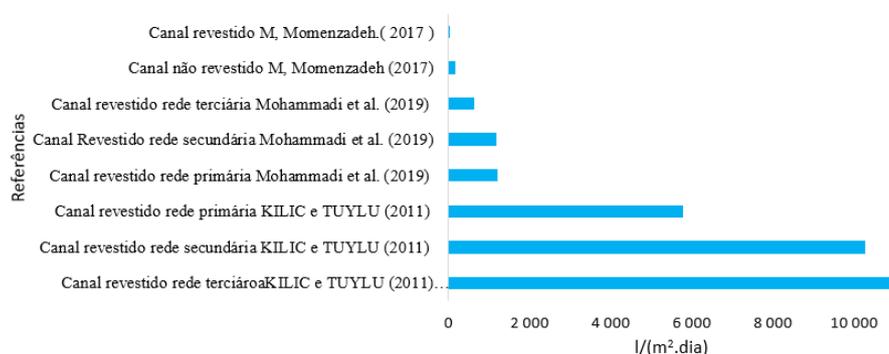


Figura 2.7 – Valores de repassos obtidos experimentalmente através do balanço hídrico

Existe um outro método, o ensaio de estanquidade (ver Figura 2.8), que consiste em isolar um determinado trecho de canal impedindo entrada ou saída de água durante um período de tempo, sendo os repassos dado pela diferença do volume no início da experiência e no final (variação de nível), dividido pela área molhada do canal e pelo intervalo de tempo a que se realizou o ensaio.

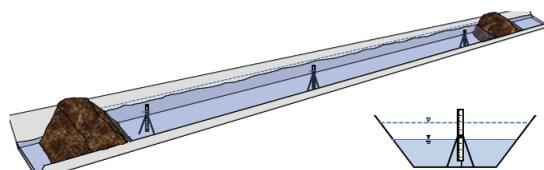


Figura 2.8 – Ilustração do método de ensaio de estanquidade (Leigh e Fipps 2017)

Na Figura 2.9 apresentam-se valores de referências obtidos experimentalmente em alguns estudos feitos baseados em ensaios de estanquidade. Os valores de repassos obtidos através de ensaios de estanquidade são mais precisos do que os obtidos pelo balanço hídrico, porém este último método tem a vantagem de ser aplicado para canais em condições normais, sendo que a principal desvantagem dos ensaios de estanquidade resume-se aos custos associados, uma vez que requer mais pormenores (Zhang et al. 2016).

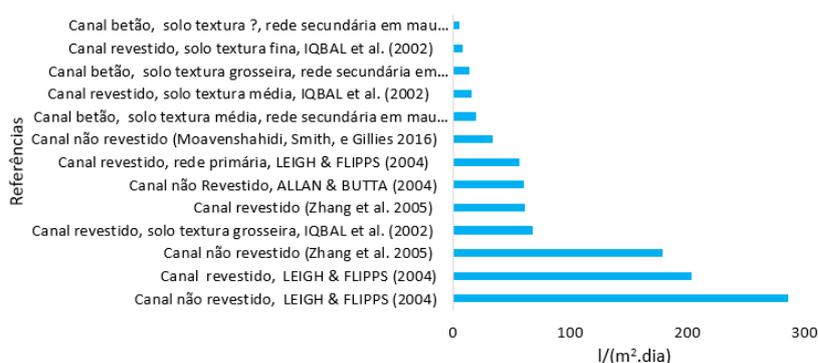


Figura 2.9 – Valores de repassos obtidos experimentalmente através de ensaios de estanquidade

São vários os fatores que influenciam os repassos, designadamente a permeabilidade e o tipo do solo, comprimento, forma, profundidade, perímetro molhado e a idade do canal, presença de plantas aquáticas, viscosidade e salinidade da água (Kinzli et al. 2010).

Um estudo desenvolvido por Iqbal et al (2002) permitiu diferenciar valores de repassos diferentes de acordo com a textura do solo. Este estudo foi baseado no balanço hídrico feito em canais em zonas com solo de textura fina, média e grossa, tendo apresentado valores de referência de 8, 16,4 e 68 l/(m².dia), respetivamente. Montanes et al (2006) propôs que, independentemente das condições dos canais, adota-se valores de repassos entre 25 e 50 l/(m².dia).

O volume de repassos é calculado trecho a trecho através de:

$$V_{Rep} = \sum_{i=0}^n V_{Ref} \times A_i \times \Delta t_i \quad (2.8)$$

sendo  $V_{Rep}$ , o volume de repassos (m³);  $V_{Ref}$ , o volume de referência de repassos [l/(m².dia)];  $A_i$ , a área molhada trecho  $i$  (m²) dada por:

$$A_i = P_i \times L_i \quad (2.9)$$

sendo  $P_i$ , o perímetro molhado trecho  $i$  (m);  $\Delta t_i$ , o período de pleno funcionamento do trecho  $i$  (dia).

#### Perdas associadas a evaporação

Sempre que o abastecimento dos aproveitamentos hidroagrícolas ocorre em canais com superfície livre ou têm reservatórios intermédios, o volume de água transportado está sujeito a evaporação, dado o permanente contato com a atmosfera. A evaporação depende da radiação solar, da temperatura, da velocidade do vento e da pressão atmosférica (Allen 1998). A presença de plantas aquáticas também

poderá influenciar a evaporação. Para a estimativa desta componente, poderão ser utilizadas os métodos apresentados na secção 2.4.3.

A velocidade do vento, e a pressão atmosférica influenciam a evaporação, dado que quanto maior for a velocidade do vento mais fácil será o afastamento do vapor formado, ao contrário do que acontece em relação a pressão atmosférica, visto que quanto maior a pressão menor é a evaporação (Allen et al 1998).

Com a estimativa da evaporação para cada estação meteorológica e conhecido a área de influência da mesma, utilizam-se as equações (2.10) e (2.11) para estimar o volume evaporado nos canais e nos reservatórios respetivamente, sendo o volume total evaporado dado pela soma das duas parcelas.

$$V_{Evap}^C = \sum_{i=1}^n A_i + EVP_i \times 10^{-3} \quad (2.10)$$

$$V_{Evap}^R = \sum_{i=1}^n A_i^R \times EVP_i \times 10^{-3} \quad (2.11)$$

sendo  $V_{Evap}^C$  e  $V_{Evap}^R$ , o volume evaporado em canais e reservatórios, respetivamente ( $m^3$ );  $A_i$ , a área de boca do trecho  $i$  ( $m^2$ );  $EVP_i$ , a evaporação obtido na estação da área de influência do trecho/reservatório  $i$  (mm);  $A_i^R$ , a área inundada no reservatório intermédio  $i$  ( $m^2$ ).

### 2.3.2 Abordagens para o cálculo do balanço energético

O balanço energético é uma ferramenta que permite dividir a energia fornecida a um sistema nas suas várias subcomponentes, permitindo diagnósticos globais e sectoriais (Cunha et al. 2019). O balanço energético deve ser precedido pelo cálculo do balanço hídrico, uma vez que existe uma relação direta entre os consumos de água autorizados e volumes perdidos e as respetivas energias associadas. Por outro lado, o balanço energético requer o conhecimento topográfico da área abastecida, da localização das estações elevatórias e o levantamento dos respetivos volumes bombeados.

Quadro 2.3 – Componentes do balanço energético proposto para sistemas de abastecimento de água urbanos [kWh/ano] (Mamade et al. 2017)

Energia gravítica	Energia total fornecida	Energia associado ao consumo autorizado	Energia entregue aos consumidores	Energia mínima
			Energia dissipada associada ao consumo	Energia supérflua
Por perdas de cargas nas condutas e canais				
Por perdas de cargas nas válvulas e nas comportas				
Ineficiência das bombas				
Ineficiência nas turbinas				
Associada ao consumo autorizado				
Energia de Bombeamento	Energia associada a perdas de água	Energia Recuperada	Associada a perdas de água	Nos pontos onde ocorrem perdas
			Energia dissipada associada as perdas	Por perdas de cargas nas válvulas e comportas
		Por perdas de cargas nas condutas e nos canais		
	Por ineficiência das bombas			
	Por ineficiência das turbinas			

Nota: Os componentes apresentados a cinzento requerem modelação matemática

### *Energia total fornecida*

O primeiro passo consiste em definir o período de cálculo do balanço energético e a fronteira do sistema, os quais devem ser coincidentes com o que foi adotado no cálculo do balanço hídrico para o mesmo sistema. Deve também definir-se a cota de referência,  $Z_{ref}$ , a partir da qual se calculam as componentes de energia associada ao escoamento, podendo ser o nível hidrodinâmico mínimo de uma captação (i.e., captação subterrânea) ou o ponto de abastecimento localizado à cota mínima (Cunha et al. 2018).

O cálculo da energia fornecida, de acordo com a equação (2.14), é feito através de duas variáveis-chave: a carga hidráulica ( $H$ ), equação (2.13) que inclui a cota de posição ( $z$ ), e.g., a cota de fundo do canal, a pressão ( $h$ ), e.g., altura de água no canal e o termo cinético ( $\frac{v^2}{2g}$ ), sendo este último em geral desprezável, e o respetivo volume de água em cada ponto de entrada do sistema.

$$E = \frac{\gamma}{3600} \sum_{i=1}^n V_i (H_i - Z_{ref}) \quad (2.12)$$

$$H = z + h + \frac{v^2}{2g} \quad (2.13)$$

A energia total fornecida engloba a energia gravítica,  $E_G$ , e a energia de pressão de bombeamento,  $E_B$ , sendo que estas duas energias diferem uma da outra na medida em que a primeira ocorre naturalmente, isto é, o volume transportado é devido a diferença de cotas (do mais alto para o mais baixo), enquanto que a energia de bombeamento é a energia requerida pelos grupos eletrobomba para transportar um dado volume de uma cota baixa para uma alta, ou seja, sempre que o escoamento é contra a gravidade será necessário este tipo de energia. A energia total fornecida é dada pela seguinte expressão:

$$E_F = E_G + E_B \quad (2.14)$$

sendo  $E_F$ , a energia total fornecida (kWh);  $E_G$ , a energia gravítica (kWh);  $E_B$ , a energia fornecida pelas bombas (kWh).

A energia gravítica nos AH engloba a energia associada ao volume de água entrado no sistema através das albufeiras, linhas de água e captações subterrâneas (Cunha et al., 2018), dada por:

$$E_G = \frac{\gamma}{3600} \sum_{i=1}^n V_i (H_i - Z_{ref}) \quad (2.15)$$

sendo  $\gamma$ , o peso específico da água (9,8 kN/m<sup>3</sup>);  $V_i$ , o volume fornecido ao sistema através do reservatório de entrada  $i$  (m<sup>3</sup>/ano);  $H_i$ , o nível médio do reservatório de entrada  $i$  (m);  $Z_{ref}$ , a cota de referência (m);  $n$ , o número total de reservatórios.

A energia de bombeamento fornecida ao sistema corresponde à energia elétrica consumida referente a todas as estações elevatórias (EE) e é, em geral, obtida através da fatura de energia elétrica. Esta energia

pode corresponder a EE de entrada dada pela equação (2.16) ou a EE intermédias dada pela equação (2.17), sendo que as de entrada deverão incluir ainda a energia gravítica.

$$E_E^B = \sum_{i=1}^n E_i^F + \frac{\gamma}{3600} [V_i^B \times (H_i^B - Z_{ref})] \quad (2.16)$$

$$E_I^B = \sum_{i=1}^n E_i^F \quad (2.17)$$

sendo  $E_E^B$ , a energia fornecida pelas EE de entrada (kWh);  $E_I^B$ , a energia fornecida pelas EE intermédias;  $E_i^F$ , a energia elétrica faturada na EE  $i$  (kWh);  $V_i^B$ , o volume bombeado pela bomba  $i$  (m<sup>3</sup>);  $H_i^B$ , a carga hidráulica a jusante da bomba  $i$  (m);  $n$ , o número total de EE de cada tipo.

Para estimar a eficiência de uma dada bomba, deve-se calcular a energia útil requerida,  $E_i^U$ , isto é, energia necessária para que se dê o escoamento, sendo dada por:

$$E_i^U = \frac{\gamma}{3600} V_i^B \times H_{t_i}^B \quad (2.18)$$

sendo  $E_i^U$ , a energia útil associada a bomba  $i$  (kWh);  $H_{t_i}^B$ , a altura manométrica da bomba  $i$  (m).

Conhecido a energia útil, pode estimar-se a energia dissipada pela bomba e a sua respetiva eficiência recorrendo à fatura do consumo da energia elétrica no mesmo período de análise através das seguintes equações:

$$E_{diss\ i}^B = E_i^F - E_i^U \quad (2.19)$$

$$\eta_i = \frac{E_i^U}{E_i^F} \times 100 \quad (2.20)$$

sendo  $E_{diss\ i}^B$ , a energia dissipada na bomba  $i$  (kWh);  $\eta_i$ , a eficiência da bomba  $i$  (%).

#### *Energia associada ao consumo autorizado*

A energia associada ao consumo autorizado integra a energia entregue aos consumidores (mínima requerida e supérflua), a energia dissipada por perdas de carga e por ineficiência em equipamentos devida ao consumo, e a energia recuperada associado ao consumo autorizado. A sua estimativa é baseada na seguinte equação:

$$E_{CA} = E_F \times \frac{V_{CA}}{V_{AE}} \quad (2.21)$$

sendo  $E_{CA}$ , a energia associada ao consumo autorizado (kWh);  $V_{CA}$ , o volume associado ao consumo autorizado (m<sup>3</sup>);  $V_{AE}$ , o volume entrado no sistema (m<sup>3</sup>).

#### *Energia entregue aos consumidores*

A energia entregue aos consumidores inclui a energia mínima necessária para garantir consumo aos utilizadores e a energia supérflua. A energia mínima traduz-se num valor teórico de energia necessária para abastecer os utilizadores, sem considerar as perdas de carga que ocorrem ao longo do sistema, sendo

dada pela equação (2.22). A energia supérflua corresponde ao excesso de energia entregue aos consumidores relativamente a energia mínima requerida, a sua estimativa requer modelação hidráulica (Mamade et al. 2017).

$$E_{min} = \frac{\gamma}{3600} \sum_{i=1}^n V_i^{CA} \left( z_i^{CG} + \frac{P_i^{min}}{\gamma} - Z_{ref} \right) \quad (2.22)$$

sendo  $E_{min}$ , a energia mínima para garantir o consumo (kWh);  $V_i^{CA}$ , o volume consumo autorizado na área  $i$  ( $m^3$ );  $z_i^{CG}$ , a cota centro de gravidade da área  $i$  (m);  $P_i^{min}$ , a pressão mínima requerida na área  $i$  (Pa).

Com o intuito de garantir um maior rigor no cálculo, Mamade et al (2018) aconselha dividir o sistema em áreas de análise os mais homogêneos possíveis em termos de pressões mínimas requeridas e de consumo, para obter uma melhor estimativa da energia mínima.

#### *Energia dissipada em equipamentos eletromecânicos associada ao consumo autorizado*

A dissipação de energia inclui as perdas de carga contínuas, devido ao atrito gerado pelo escoamento em canais e condutas, e perdas de carga localizadas em órgãos de regulação e operação, designadamente nas comportas e nas válvulas (Cunha 2018), perdas de energia nos equipamentos eletromecânicos como sejam bombas e às turbinas, são dadas pelas equações (2.23) e (2.24) respetivamente.

$$E_{diss B}^{CA} = \frac{V_{CA}}{V_{AE}} \sum_{i=1}^n E_i^F \left( 1 - \frac{\eta_i}{100} \right) \quad (2.23)$$

sendo  $E_{diss B}^{CA}$ , a energia dissipada nas bombas devido ao consumo autorizado (kWh);  $\eta_i$ , a eficiência da bomba  $i$  (%)

Com o intuito de recuperar energia que é fornecida ao sistema, na maioria das vezes utilizam-se turbinas. De acordo com Pérez-Sánchez et al (2017) em aproveitamentos hidroagrícolas, estas turbinas podem ser instaladas nas barragens e em reservatórios, que tenham condições necessárias para tal, podendo ainda serem instaladas *rodas de água (water weels)* nos canais.

As turbinas também têm perdas de energia, sendo a energia dissipada dada por:

$$E_{diss T}^{CA} = \frac{V_{CA}}{V_{AE}} \sum_{i=1}^n E_{T i}^u \left( 1 - \frac{\eta_i}{100} \right) \quad (2.24)$$

sendo  $E_{diss T}^{CA}$ , a energia dissipada em turbinas devido ao consumo autorizado (kWh);  $E_{T i}^u$ , a energia útil recuperada pela turbina  $i$  (kWh) – equação (2.25);  $\eta_i$ , a eficiência turbina  $i$  (%) – equação (2.26):

$$E_{T i}^u = \frac{\gamma}{3600} \times H_i^u \times V_i^T \quad (2.25)$$

$$\eta_i = \frac{E_i^T}{E_{T i}^u} \times 100 \quad (2.26)$$

sendo  $V_i^T$ , o volume turbinado na turbina  $i$  ( $m^3$ );  $H_i^u$ , a queda útil na turbina  $i$  (m);  $E_i^T$ , a energia recuperada na turbina  $i$  (kWh) correspondente ao valor registado nas faturas de venda de energia.

### *Energia recuperada associada ao consumo autorizado*

De acordo com o balanço energético proposto por Cunha (2018), a energia recuperada engloba a energia recuperada associada ao volume autorizado (equação (2.27)) e a energia recuperada associada às perdas (equação (2.31)), isto é, através do volume de água que foi turbinado, porém, se perdeu ao longo do sistema. Ambas as componentes dependem da fração do consumo autorizado em relação a água entrada no sistema e a energia recuperada/gerada por cada uma das turbinas em operação, sendo o valor obtido através da fatura de venda de energia.

$$E_{Rec}^{CA} = \frac{V_{CA}}{V_{AE}} \sum_{i=1}^n E_i^T \quad (2.27)$$

sendo  $E_{Rec}^{CA}$ , energia recuperada associada ao consumo autorizado (kWh).

### *Energia associada às perdas de água*

A ineficiência nos AH relativamente ao binómio água e energia, deve-se sobretudo às perdas de água. Globalmente, a energia dissipada associada a estas perdas é dada pela equação (2.28), a qual inclui a energia recuperada associada ao volume de perdas de água, energia dissipada nos locais em que ocorrem as perdas de água por evaporação, fugas, repassos e descargas, a energia dissipada por perdas de carga contínuas e localizadas e energia dissipada em bombas e turbinas devida a perdas de água.

$$E_{PA} = E_F \times \frac{V_{PA}}{V_{AE}} = E_{TF} \left(1 - \frac{V_{CA}}{V_{AE}}\right) = E_F - E_{CA} \quad (2.28)$$

sendo  $E_{PA}$ , a energia associada às perdas de água (kWh);  $V_{PA}$ , o volume associado a perdas de água ( $m^3$ );  $V_{AE}$ , o volume de água entrado no sistema ( $m^3$ ).

### *Energia dissipada em equipamentos eletromecânicos associada às perdas de água*

Esta subcomponente inclui a energia dissipada nas bombas e nas turbinas devido às perdas de água, sendo dada pelas equações (2.29) e (2.30) respetivamente.

$$E_{diss B}^{PA} = \sum_{i=1}^n E_i^F - E_{diss B i}^{CA} \quad (2.29)$$

$$E_{diss T}^{PA} = \sum_{i=1}^n E_i^T - E_{diss T i}^{CA} \quad (2.30)$$

sendo  $E_{diss B}^{PA}$ , a energia dissipada pelas bombas devido às perdas de água (kWh);  $E_{diss T}^{PA}$ , a energia dissipada nas turbinas devido às perdas de água (kWh).

### *Energia recuperada associada às perdas de água*

A estimativa desta componente é dada por:

$$E_{Rec}^{PA} = \sum_{i=0}^n E_i^T - E_{Rec T i}^{CA} \quad (2.31)$$

sendo  $E_{Rec}^{PA}$ , a energia recuperada associada às perdas de água (kWh).

## 2.4 Métodos para apoio ao cálculo de componentes do balanço hídrico

### 2.4.1 Métodos para apoio ao cálculo da água entrada por escoamento superficial

#### 2.4.1.1 Método do balanço sequencial mensal

O sistema de abastecimento de um aproveitamento hidroagrícola poderá ser feito em canais com superfície livre ou em condutas em pressão. Sempre que existam canais ou reservatórios, verifica-se entrada de água por escoamento superficial, o que implica a sua contabilização para o cálculo do balanço hídrico.

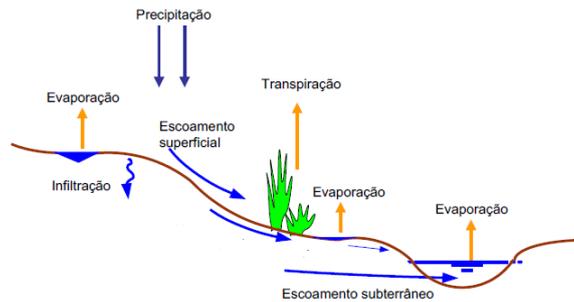


Figura 2.10 – Ciclo da água

Através do balanço hidrológico sequencial mensal proposto por Thornthwaite e Mather (Vaz 2010), e conhecendo algumas das componentes relativas ao ciclo da água apresentadas na Figura 2.10, é possível estimar o volume de água entrado nos canais e reservatórios devido ao escoamento superficial através da seguinte equação:

$$P = SH + ETR + \Delta S_s \quad (2.32)$$

sendo  $P$ , a precipitação (mm/mês);  $SH$ , o excesso hídrico (mm/mês);  $ETR$ , a evapotranspiração real (mm/mês);  $\Delta S_s$ , a variação de armazenamento de água no solo (mm/mês).

O cálculo do balanço hidrológico sequencial mensal é precedido pela quantificação da evapotranspiração potencial, que, por sua vez, é dependente das características do clima de um determinado local e num determinado instante. A evapotranspiração potencial representa a altura de água transferida para a atmosfera, como consequência da evaporação e transpiração numa área extensa coberta de vegetação de porte baixo e bem suprida de água (Stone e Marques 1995). Existem vários métodos para o cálculo desta componente sendo aqui abordados os de Thornthwaite (1948), Turc (1961) e Penman-Monteith (1965).

Baseado na equação (2.32) do balanço hidrológico e nas fórmulas de quantificação da evapotranspiração potencial apresentadas nesta secção para os diferentes métodos supracitados, procede-se à estimativa do escoamento superficial de acordo com o balanço ilustrado na Figura 2.11.

A Figura 2.11 ilustra as componentes utilizadas para o cálculo do escoamento superficial, em que  $H_{max}$  representa a capacidade de saturação do solo (i.e., altura de água máxima que o solo consegue reter),  $H$  representa a altura de água disponível no solo num determinado mês,  $P$ ,  $ETP$  e  $ETR$  representam,

respetivamente, a precipitação, a evapotranspiração potencial e a evapotranspiração real ocorrida num dado mês, e SH representa o excesso hídrico.

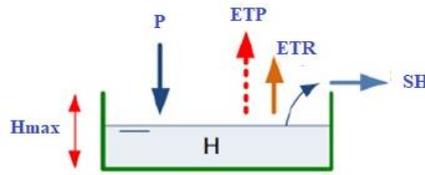


Figura 2.11 – Esquema balanço hidrológico no solo, com as respetivas parcelas de entradas e saídas de água

A ocorrência do excesso hídrico ou do escoamento superficial é dependente da variação de água no solo. Assim, é necessário calcular a altura de água no solo no mês de análise recorrendo a:

$$H_t = \begin{cases} \min[(H_{t-1} + P_t - ETP_t); H_{max}] & \text{se } P_t \geq ETP_t \\ H_{t-1} \times e^{\frac{L_t}{H_{max}}} & \text{se } P_t < ETP_t \end{cases} \quad (2.33)$$

sendo  $ETP_t$ , a evapotranspiração potencial no presente mês (mm);  $P_t$ , a precipitação ocorrida no presente mês (mm);  $H_{max}$ , a altura máxima de água que o solo pode reter (mm);  $H_{t-1}$ , a altura de água no solo no mês anterior (mm);  $L_t$ , a perda potencial de água no presente mês (mm), dado por:

$$L_t = \begin{cases} L_{t-1} + (P_t - ETP_t) & \text{se } P_t < ETP_t \\ 0 & \text{se } P_t \geq ETP_t \end{cases} \quad (2.34)$$

Determinada a altura de água disponível no solo suscetível de evapotranspiração e conhecida a evapotranspiração potencial previamente calculada, estima-se a evapotranspiração real que representa a altura de água perdida para a atmosfera em estado de vapor por evaporação direta da água e transpiração das plantas, sendo dada por:

$$ETR_t = \begin{cases} ETP_t & \text{se } P_t \geq ETP_t \\ P_t + (H_{t-1} - H_t) & \text{se } P_t < ETP_t \end{cases} \quad (2.35)$$

O excesso hídrico é definido como sendo a altura de água disponível para ocorrência de escoamento superficial, sendo calculado através de:

$$SH_t = P_t - ETR_t - \Delta S_s = P_t - ETR_t - (H_t - H_{t-1}) \quad (2.36)$$

A equação (2.36) mostra que, para que ocorra o excesso hídrico, a altura de precipitação tem de ser maior do que a soma da evapotranspiração real com a variação de altura de água disponível no solo; caso contrário, pode ocorrer o défice hídrico (DH), isto é, há carência de água no solo.

A seguir, estima-se o escoamento superficial recorrendo a equação (2.37), na qual se considera que o escoamento no presente mês é dado pela aproximação da soma do excesso hídrico no presente mês e no mês anterior desfasado por um coeficiente de partição do escoamento.

$$R_t = \varphi \times SH_t + (1 - \varphi) \times SH_{t-1} \quad (2.37)$$

sendo  $R_t$ , o escoamento superficial no presente mês (mm);  $\varphi$ , o coeficiente de repartição de escoamento (-);  $SH_t$  e  $SH_{t-1}$ , o excesso hídrico no presente mês e no mês anterior respetivamente (mm).

Os parâmetros coeficiente de partição  $\varphi$  e  $H_{max}$  devem ser calibrados por comparação com dados experimentais. A calibração pode ser feita através da determinação do conjunto de parâmetros que conduzem a um erro quadrático mínimo (Vaz 2010).

Na sequência da estimativa do escoamento,  $R$ , procede-se ao cálculo do volume de água entrado no sistema proveniente do escoamento superficial, sendo esta variável de acordo com a área da bacia a que o sistema está associado. A sua estimativa é baseada na seguinte igualdade:

$$V^{ES} = R \times A_{bacia} \times 10^{-3} \quad (2.38)$$

sendo  $V^{ES}$ , o volume associado ao escoamento superficial ( $m^3$ );  $A_{bacia}$ , a área da bacia hidrográfica ( $m^2$ ).

Apresentam-se nas secções seguintes vários métodos para estimativa da evapotranspiração potencial, designadamente o de Thornthwaite, Penman-Monteith e Turc.

## Métodos para estimativa da evapotranspiração potencial

### 2.4.1.2 Fórmula empírica de Thornthwaite para estimativa da evapotranspiração

Este método foi proposto por Thornthwaite em 1948 com o objetivo de estimar a evapotranspiração potencial. Trata-se de um método bastante simplista, uma vez que requer somente dados relativo às temperaturas médias mensais, isto é, assume-se que a temperatura é a única variável capaz de exprimir o balanço de energia capaz de implicar a evapotranspiração. Para o cálculo de ETP através deste método utiliza-se a equação (2.39).

$$ETP = 16 \times f \times \left(10 \times \frac{T}{I}\right)^a \quad (2.39)$$

sendo  $ETP$ , a evapotranspiração potencial (mm/mês);  $f$ , o fator de correção mensal, dado pela equação (2.40);  $T$ , a temperatura média mensal ( $^{\circ}C$ );  $I$ , o índice térmico anual, calculado através da equação (2.44);  $a$ , o expoente empírico obtido através da aplicação equação (2.45).

$$f = \frac{ND \times Nm}{360} \quad (2.40)$$

sendo  $ND$ , o número de dias do mês;  $Nm$ , a insolação astronómica média mensal, cálculo baseado na média mensal da insolação astronómica diária ( $N$ ), dada por:

$$N = \frac{24}{\pi} \times W_s \quad (2.41)$$

sendo  $W_s$ , o ângulo da hora de pôr do sol (rad), dada pela seguinte expressão:

$$W_s = \arccos(-\tan\varphi \times \tan\delta) \quad (2.42)$$

sendo  $\varphi$ , a latitude da estação meteorológica (rad);  $\delta$ , o ângulo da declinação solar, dado pela equação (2.43);  $J$ , o dia juliano.

$$\delta = 0,4093 \times \sin\left(\frac{2\pi}{365} \times J - 1,405\right) \quad (2.43)$$

O Índice térmico e o expoente empírico são dados pelas equações (2.44) e (2.45) respetivamente.

$$I = \sum_{1}^{12} i = \sum_{i}^{12} \left(\frac{T}{5}\right)^{1,514} \quad (2.44)$$

$$a = 6,75 \times 10^{-7} \times I^3 - 7,71 \times 10^{-5} \times I^2 + 1,79 \times 10^{-2} \times I + 0,49 \quad (2.45)$$

sendo,  $I$ , o índice térmico,  $a$ , expoente empírico.

### 2.4.1.3 Fórmula de Penman-Monteith para estimativa da evapotranspiração

Através da combinação do balanço energético na atmosfera com os princípios aerodinâmicos os dois cientistas propuseram a metodologia a seguir apresentada para o cálculo da evapotranspiração de referência (Stone e Marques 1995), que é definida como sendo a evapotranspiração potencial associada a uma cultura de referência, podendo ser estimada pela equação (2.46) (Lúcio 2016).

Este método é o mais usado, uma vez que engloba outros fatores que influenciam a evapotranspiração, nomeadamente a radiação solar, pressão de vapor e a velocidade do vento, o que leva a crer que com esta abordagem ter-se-á valores mais rigorosos, sendo desta forma o método utilizado pela FAO para a estimativa de evapotranspiração numa dada região num determinado período de tempo (diária ou mensal).

$$ET_0 = \frac{0,408 \times \Delta \times (R_n - G) + \gamma_p \times \frac{900}{T + 273} \times U_2 \times (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \times (1 + 0,34 \times U_2)} \quad (2.46)$$

sendo  $ET_0$ , a evapotranspiração potencial de uma cultura de referência (mm/dia);  $\Delta$ , o declive da curva de pressão de vapor (kPa/°C), estimado baseado na equação (2.51);  $R_n$ , o balanço da radiação líquida á superfície [MJ/(m<sup>2</sup>.dia)], dado pela equação (2.55);  $\gamma_p$ , a constante psicométrica (kPa/°C), calculado através da equação (2.52);  $G$ , a densidade de fluxo de calor no solo [MJ/(m<sup>2</sup>.dia)], dado pela equação (2.54),  $T$ , a temperatura média (°C);  $U_2$ , a velocidade do vento a dois metros do solo (m/s);  $e_s$ , o valor médio de pressão de saturação de vapor, calculado através da equação (2.48);  $e_a$ , a pressão de vapor quando se atinge a temperatura de orvalho, estimado através da aplicação da equação (2.50).

A pressão de saturação do vapor a uma dada temperatura,  $e^0(T)$ , é dada pela seguinte expressão:

$$e^0(T) = 0,6108 \times EXP\left(\frac{17,27 \times T}{T + 237,3}\right) \quad (2.47)$$

sendo  $e^0$ , a pressão de saturação do vapor (kPa);  $T$ , a temperatura média (°C).

Com isto é possível determinar a pressão de saturação de vapor ( $e_s$ ) e o valor atual da pressão ( $e_a$ ), que posteriormente são utilizados para o cálculo do défice de saturação. A estimativa destas variáveis resume-se a aplicação das equações (2.48) e (2.49) respetivamente.

$$e_s = \frac{e^0(T_{max}) + e^0(T_{min})}{2} \quad (2.48)$$

sendo  $e_s$ , a pressão de saturação de vapor (kPa);  $T_{max}$  e  $T_{min}$ , a temperatura máxima e mínima respetivamente (°C).

O parâmetro,  $e_a$ , representa a pressão de vapor quando se atinge a temperatura de orvalho ( $T_{Dew}$ ), isto é, a temperatura até à qual o ar húmido deve ser arrefecido, à pressão e razão de mistura constantes, para que se atinja a saturação em relação à água líquida (Talaia e Vigário 2020). De entre as várias equações utilizadas para o cálculo desta grandeza, nomeadamente as equações (2.49) e (2.50), a que representa resultados mais satisfatórios é a que leva em consideração a humidade relativa máxima e mínima (Allen et al 1998).

$$e_a = e_s \times \frac{HR_{med}}{100} \quad (2.49)$$

$$e_a = e^0(T_{dew}) = \frac{e^0(Tmin) \times \frac{HRmax}{100} + e^0(Tmax) \times \frac{HRmin}{100}}{2} \quad (2.50)$$

sendo  $e_a$ , a pressão de vapor quando se atinge a temperatura de orvalho (kPa);  $HRmax$ , a humidade relativa máxima (%);  $HR_{med}$ , a humidade relativa média (%);  $HRmin$ , a humidade relativa mínima (%);  $Tmax$ , a temperatura máxima (°C);  $Tmin$ , a temperatura mínima (°C).

O declive da curva de tensão ( $\Delta$ ) de vapor relaciona a pressão de vapor com a temperatura, dada por:

$$\Delta = \frac{4098 \times 0,6108 \times EXP\left(\frac{17,27 \times T}{T + 237,3}\right)}{(T + 237,3)^2} \quad (2.51)$$

sendo  $\Delta$ , o declive da curva de tensão (kPa);  $T$ , a temperatura média (°C).

Por outro lado, a constante psicrométrica ( $\gamma_p$ ) varia de acordo com a pressão parcial da água no ar e o calor latente de vaporização ( $L$ ), sendo que este último representa a energia necessária para quebrar a superfície da água, em que para um litro (um quilograma) de água são necessárias 2,5 megajoules (Zotarelli e Dukes 2010). O cálculo da constante psicrométrica é baseado na equação (2.52), e é dependente da pressão atmosférica, sendo este último dado pela equação (2.53).

$$\gamma_p = \frac{C_p \times P}{\epsilon \times L} = 0,000665 \times P \quad (2.52)$$

$$P = 101,3 \left( \frac{293 - 0,0065 \times Z}{293} \right)^{5,26} \quad (2.53)$$

sendo  $\gamma_p$ , a constante psicrométrica (kPa);  $P$ , a pressão atmosférica (kPa);  $L$ , o calor latente de vaporização (MJ/kg);  $C_p$ , o calor específico a pressão constante [ $1,013 \times 10^{-3}$  MJ/(kg.°C)];  $\epsilon$ , a relação peso molecular do vapor de água / peso ar seco 0,622;  $Z$ , a altitude acima do nível do mar da estação meteorológica (m).

A densidade do fluxo de calor no solo ( $G$ ), revela a quantidade de energia necessária para aquecer uma determinada área do solo num determinado intervalo de tempo, dado por:

$$G_i = C_s \times \frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta t} \times \Delta Z \quad (2.54)$$

sendo  $G_i$ , a densidade do fluxo de calor no solo [MJ/(m<sup>2</sup>.dia)];  $C_s$ , o calor específico do solo [MJ/(m<sup>3</sup>.°C)];  $\Delta t$ , o intervalo de tempo (dia);  $\Delta Z$ , a profundidade efetiva do solo (m);  $T_i$ , a temperatura média no mês  $i$  (°C);  $T_{i-1}$ , a temperatura média no mês  $i-1$  (°C).

Para a estimativa da evapotranspiração de referência diária o fluxo de calor no solo ( $G$ ) é desprezável, uma vez que apresenta valores relativamente baixos quando comparado com o balanço de energia líquida (Allen et al 1998).

Em relação ao balanço da radiação líquida,  $R_n$ , o qual apresenta a energia disponível capaz de contribuir para a evaporação ou evapotranspiração da água, é dada através da equação (2.55).

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (2.55)$$

sendo  $R_n$ , o balanço da radiação líquida [MJ/(m<sup>2</sup>.dia)];  $R_{ns}$ , a radiação líquida solar ou de ondas curtas [MJ/(m<sup>2</sup>.dia)], dada pela equação (2.61);  $R_{nl}$ , o balanço líquido das trocas entre a atmosfera e a superfície do solo [MJ/(m<sup>2</sup>.dia)], dado através de:

$$R_{nl} = \sigma \times \frac{(T_{max}^4 + T_{min}^4)}{2} \times (0,34 - 0,14 \times \sqrt{e_a}) \times \left(1,35 \times \frac{R_s}{R_{s0}} - 0,35\right) \quad (2.56)$$

sendo  $\sigma$ , a constante de Boltzman [4,903\*10<sup>-9</sup> MJ/(K<sup>4</sup>.dia)];  $R_s$ , a radiação solar incidente [MJ/(m<sup>2</sup>.dia)] dada pela equação (2.57);  $R_{s0}$ , a radiação solar que atingiria a mesma superfície com céu sem nuvens [MJ/(m<sup>2</sup>.dia)], dada pela equação (2.60).

$$R_s = \left(\alpha + \beta \times \frac{n}{N}\right) R_a \quad (2.57)$$

sendo  $\alpha$  e  $\beta$ , os coeficientes de Angström (-);  $n$ , o número de horas de sol (h);  $N$ , a insolação astronómica (h);  $R_a$ , a radiação no topo da atmosfera por unidade área e tempo [MJ/(m<sup>2</sup>.dia)], dada pela seguinte igualdade:

$$R_a = \frac{24 \times 60}{\pi} \times G_{sc} \times d_r \times [w_s \times \sin(\varphi) \times \sin(\delta) + \cos(\varphi) \times \cos(\delta) \times \sin(w_s)] \quad (2.58)$$

sendo  $G_{sc}$ , a constante solar [0,0820 MJ/(m<sup>2</sup>.min)];  $d_r$ , a inversa da distância relativa ao sol (-), dada pela equação (2.59),  $w_s$ , o ângulo de hora do pôr do sol (rad), dada pela equação (2.42);  $\varphi$ , a latitude da estação meteorológica (rad);  $\delta$ , o ângulo de declinação solar (rad), dado pela igualdade (2.43).

$$d_r = 1 + 0,033 \times \cos\left(\frac{2\pi}{365 \times J}\right) \quad (2.59)$$

A radiação solar incidente na terra,  $R_{s0}$ , caso não houver nuvens é calculada baseada na seguinte expressão:

$$R_{s0} = \left(0,75 + \frac{2 \times Z}{100\,000}\right) R_a \quad (2.60)$$

A radiação líquida solar ou de ondas,  $R_{ns}$ , por sua vez é dada pela equação (2.61).

$$R_{ns} = (1 - \alpha) R_s \quad (2.61)$$

sendo  $\alpha$ , Albedo (-);  $R_s$ , radiação incidente [MJ/(m<sup>2</sup>.dia)], caso não for medido na estação meteorológica utiliza-se a equação (2.57) para o calcular.

O albedo é definido como sendo a razão entre a radiação refletida numa superfície e a radiação que nela incide, para solos cobertos com relvas deve-se tomar um valor de 0,23 referente ao albedo (Allen et al 1998).

#### 2.4.1.4 Fórmula de Turc para estimativa da evapotranspiração

A fórmula de Turc foi desenvolvida em 1961, para o cálculo da evapotranspiração potencial, sendo representado na equação (2.62). Normalmente é utilizada quando se tem poucas informações relativamente ao clima, sendo que para a sua estimativa é necessária valores referente à humidade relativa média ( $HR_{med}$ ), temperatura média do ar, e da radiação solar incidente ( $R_s$ ), podendo estes dados serem diários ou mensais (Diouf et al. 2016).

$$ETP = a \times C \times (R_s + b) \times \frac{T}{T + 15} \quad (2.62)$$

sendo  $ETP$ , a evapotranspiração potencial (mm/dia);  $a$  e  $b$ , as constantes empíricas, iguais a 0,31  $m^2/(MJ.min)$  e 2,094  $MJ/(m^2.dia)$  respetivamente;  $T$ , a temperatura média diária ( $^{\circ}C$ );  $C$ , por sua vez depende da humidade relativa média, e é dado pela equação (2.63).

$$C = \begin{cases} 1 + \frac{50 - HR_{med}}{70} & \text{se } HR_{med} \leq 50 \% \\ 1 & \text{se } HR_{med} > 50 \% \end{cases} \quad (2.63)$$

#### 2.4.2 Balanço hídrico para estimativa do escoamento superficial

Para além do método supracitado, poderá utilizar-se ainda um balanço hídrico para a estimativa do escoamento superficial baseado na equação (2.64), considerando que o nível de água nos reservatórios é constante (Cunha 2018).

$$V_{in} + V_p + V^{ES} = V_{out} + V_{perdas} \quad (2.64)$$

sendo  $V_{in}$ , o volume entrado através das captações ( $m^3$ );  $V_p$ , o volume entrado por precipitação ( $m^3$ );  $V^{ES}$ , o volume escoamento superficial ( $m^3$ );  $V_{out}$ , o volume associado ao consumo ( $m^3$ );  $V_{perdas}$ , o volume associado às perdas, nomeadamente a evaporação, perdas aparentes e perdas reais ( $m^3$ )

#### 2.4.3 Métodos para apoio ao cálculo das perdas por evaporação em canais e reservatórios

De acordo com Ryçe e Vonberg (2004) há dois métodos para estimar a evaporação, em que um é baseado em princípios aerodinâmicos, segundo o qual a evaporação deve-se ao transporte turbulento do vapor através de um processo de difusão, enquanto que o outro consiste na contabilização da energia através do qual a evaporação é induzida através das radiações solares. Baseado nestes métodos, existem várias abordagens para o cálculo da evaporação em superfícies líquidas, nomeadamente método de Pan, método de balanço de energia ou hídrica, e métodos combinados (Liu et al. 2016). Relativamente aos métodos combinados o mais utilizado é o de Penman (1948), em que para a sua aplicabilidade são necessários dados relativamente à radiação, temperatura, pressão de vapor e velocidade do vento (McJannet et al. 2008).

### 2.4.3.1 Fórmula de Thorntwaite para o cálculo da evaporação

De acordo com Cunha (2018) a fórmula de Thorntwaite usada para estimativa de evapotranspiração potencial (ver 2.4.1.2) poderá ser utilizada para o cálculo da evaporação nos canais e nos reservatórios, quando há poucas informações relativamente ao clima, isto é, quando só é conhecida as temperaturas médias mensais.

### 2.4.3.2 Fórmula de Penman 1948 para estimativa da evaporação

Tal como já foi referido, a evaporação em superfícies líquidas depende de vários fatores, para uma melhor estimativa desta variável, utiliza-se o método proposto por Penman em 1948 (Finch 2001), sendo a sua estimativa baseada na equação (2.65), a qual tem em consideração a energia que a superfície líquida está sujeita a receber, que poderá induzir a evaporação. Sendo assim sempre que possível aconselha-se a utilizar este método para a estimativa da evaporação, pois considera-se todos os fatores que influenciam a evaporação.

$$E = \frac{\Delta \times \left(\frac{R_n}{L} \times 1000\right) + \gamma_p \times E_a}{\Delta + \gamma_p} \quad (2.65)$$

sendo  $E$ , a evaporação (mm/dia);  $\Delta$ , o declive da curva de pressão de vapor (kPa/°C), dado pela equação (2.51);  $R_n$ , o balanço da radiação líquida [MJ/(m<sup>2</sup>.dia)];  $G$ , a mudança de armazenamento de calor na água [ $\approx 0$  MJ/(m<sup>2</sup>.dia)];  $L$ , o calor latente (MJ/m<sup>3</sup>);  $\gamma_p$ , a constante psicométrica (kPa/°C), dada pela equação (2.52);  $E_a$ , o poder evaporante calculado através da equação (2.66).

O balanço da radiação líquida,  $R_n$ , é dado pela equação (2.55), porém por se tratar de uma superfície líquida o albedo é diferente, sendo que para superfícies com água varia de 5 a 8% (Proença 2019)

$$E_a = 0,35 \times (e_s - e_a) \times \left(1 + \frac{v}{100}\right) \quad (2.66)$$

sendo  $v$ , a velocidade do vento a dois metros do solo (mi/dia)

Com isto obtém-se a evaporação para cada estação meteorológica, sendo que para o cálculo do volume evaporado num determinado troço do canal, ou de um determinado reservatório, é preciso estimar a área de abrangência de cada estação meteorológica, através do índice espacial ou média simples, e com isto calcula-se o volume evaporado, sendo este dado pela soma dos volumes evaporados em canais e reservatórios dado pelas equações (2.10) e (2.11) respetivamente.

### 2.4.3.3 Double-Deck Surface Air Layer (DSAL) Model

Para além do método combinado acima abordado, o método aerodinâmico também é muito utilizado, sirva-se a título de exemplo o estudo feito na China por Liu et al. (2016).

## **2.5 Abordagens multicritério para apoio à tomada de decisão**

O processo de tomada de decisão em sistemas urbanos de água deve atender a três dimensões distintas – o custo, o risco e o desempenho (Alegre et al 2011), pelo que as entidades gestoras devem tomar decisões de investimento e de planeamento procurando sempre maximizar o desempenho e minimizar o risco e o custo associado.

Quer na fase de diagnóstico para priorização de subsistemas para intervenção, quer na fase de elaboração de um plano em que se priorizam soluções de intervenção é muito importante dispor de abordagens que permitam a comparação de sistemas ou de soluções de intervenção. Um dos métodos mais utilizados no processo de tomada de decisão consiste numa Análise Hierárquica (*Analytical Hierarchy Process, AHP*) que permite a comparação de várias soluções perante vários critérios de avaliação. Para mais detalhes sugere-se a leitura de Chen (2006) e Vargas (2010).

## **2.6 Estratégias/medidas para melhorar a eficiência dos aproveitamentos hidroagrícolas**

Através dos indicadores de desempenho e com a priorização serão identificados os sistemas/subsistemas prioritários e com isto saber-se-á as intervenções necessárias para a sua melhoria. Para a melhoria do desempenho de um sistema de abastecimento é importante melhorar a eficiência hídrica e energética em simultâneo.

Assim, pode-se dividir as medidas de melhoria de eficiência em dois grupos, isto é, em medidas que melhorem a eficiência hídrica e medidas que melhorem a eficiência energética, em que no primeiro o foco é diminuir as perdas de água através de melhorias infraestruturais enquanto que no segundo é diminuir a intensidade energética através da melhoria da eficiência dos equipamentos eletromecânicos e redução do excesso de energia.

### *Medidas infraestruturais e não infraestruturais para a redução de perdas de água*

A realização de intervenções de manutenção periódica nas infraestruturas de transporte e armazenamento de água permite diminuir as perdas de água, nomeadamente as fugas em condutas, os repassos e as descargas em canais e reservatórios intermédios.

As fugas normalmente acontecem devido a roturas nas condutas sujeitas a pressão elevada; a melhor forma de controlar as perdas associadas a esta ocorrência consiste no controlo da pressão (Feldman 2009), isto é, na aplicação de válvulas redutoras de pressão de modo a diminuir a pressão em excesso. Esta estratégia é particularmente útil durante à noite, período durante o qual o consumo é menor e as pressões são maiores (Feldman 2009). Em sistemas em pressão, prevê-se que a redução das fugas possa conduzir a uma redução das perdas de água em 33% (Cabrera et al 2017).

Os repassos, por sua vez ocorrem sobretudo pela falta de estanqueidade dos canais (Morgado et al. 2011), que normalmente é devida ao crescimento de plantas em canais que acabam por criar fissuras, deslocamento e má assentamento dos terrenos. A forma mais eficiente de reduzir as perdas por repassos é fazer auditorias periódicas, com o intuito de identificar zonas críticas e, posteriormente, realizar intervenções e manutenção ou de reabilitação.

Relativamente às descargas em canais deverá ser controlado o nível de água nos mesmos ou construir reservatórios intermédios que permitam o armazenamento de água associado à estas ocorrências.

#### *Medidas baseadas na melhoria da eficiência energética*

Em geral, as medidas que podem contribuir para uma melhor eficiência energética centram-se em: i) a melhoria das condições de operação das bombas, em que o caudal bombeado deve estar o mais próximo possível do caudal do ponto ótimo de operação; ii) a diminuição da energia supérflua; iii) a minimização das perdas de cargas; iv) recuperação de energia em excesso através da instalação de turbinas (Cabrera et al 2017); e v) utilização de bombas mais eficientes, de preferência com velocidade de rotação variável.

### **2.7 Limitações na avaliação da eficiência hídrica e energética em aproveitamentos hidroagrícolas**

A análise da eficiência hídrica e energética em aproveitamentos hidroagrícolas tem despertado atenção de muitos investigadores no sentido de desenvolver uma metodologia que permita fazer o diagnóstico em termos de perdas de água e de eficiência energética. Porém, ainda existem aspetos a melhorar, como seja a necessidade de uma abordagem aplicável simultaneamente a sistemas com superfície livre e a sistemas em pressão. A aplicação do balanço hídrico e do balanço energético num sistema de abastecimento de água com superfície livre requer o cálculo de subcomponentes característicos destes sistemas, designadamente em relação à água entrada (escoamento superficial, precipitação), consumo autorizado (volume mínimo) e a perdas de água (evaporação, repassos). Uma vez que o balanço energético também deve ser aplicável a qualquer tipo de aproveitamento hidroagrícola, segue um racional semelhante ao do balanço hídrico e requer o seu cálculo prévio. Para além disto, há necessidade de melhorar a abordagem e de propor métodos para o cálculo das componentes inovadoras face ao balanço energético existente para sistemas urbanos de água. Neste sentido, identificaram-se várias lacunas no conhecimento e aspetos a melhorar que se referem nos parágrafos seguintes.

Aspetos a melhorar no balanço hídrico:

- I. Desenvolvimento de métodos mais robustos para estimativa do escoamento superficial, do volume mínimo, das perdas por evaporação, das perdas aparentes por erros de medição e das perdas por fugas repassos.

- II. Aplicação do balanço a diferentes tipos de sistemas (sujeitos a pressão baixa ou elevada) e a subsistemas e discussão das principais incertezas associadas.

Aspectos a melhorar no balanço energético:

- I. Definição da cota de referência a adotar no cálculo do balanço energético no âmbito dos aproveitamentos hidroagrícolas.
- II. Proposta de indicadores para avaliação da eficiência energética específicos para aproveitamentos hidroagrícolas.
- III. Desenvolvimento de uma nova formulação do cálculo da energia associada às componentes típicas dos sistemas em canal (i.e., água entrada por escoamento superficial, água entrada por precipitação, volume mínimo de operação, perdas por evaporação e por repassos).
- IV. Aplicação do balanço a diferentes tipos de sistemas (sujeitos a pressão baixa ou elevada).

Aspectos a melhorar no diagnóstico e apoio na tomada de decisão:

- I. Estabelecimento de metodologia sistemática que permita fazer o diagnóstico global, localizar subsistemas prioritários e apoiar na tomada de decisão sobre prioridades de intervenção.
- II. Abordagens propostas para gestão patrimonial de infraestruturas (Alegre e Covas 2010) e para gestão de perdas de água e de energia (Loureiro et al. 2017), e abordagem baseadas na análise multicritério (Alegre et al 2011) parecem promissoras, mas ainda não foram aplicados neste tipo de sistemas.
- III. Um dos métodos mais utilizados na análise multicritério consiste na análise hierárquica. A principal desvantagem da análise hierárquica é a atribuição de pesos à preferência, pelo que é importante reduzir esta subjetividade. O uso dos indicadores normalizados no processo de priorização poderá permitir comparar subsistemas e soluções diferentes sem atribuição de pesos, pois os pesos serão os próprios indicadores normalizados.

Para aproveitamentos hidroagrícolas com sistemas de abastecimento em canais os principais desafios consistem na estimativa do volume de água à entrada, mais concretamente volume proveniente do escoamento superficial, a diferenciação das perdas de água, nomeadamente o volume perdido devido à evaporação, as perdas aparentes (usos autorizados e erros de medição), bem como as perdas reais (fugas, descargas e repassos), e o volume mínimo necessário para garantir consumo.

É neste sentido que esta dissertação será uma mais valia, pois serão levados a cabo trabalhos/pressupostos que poderão minimizar as limitações apresentadas pelos métodos dos balanços hídricos e energéticos, assim como a priorização dos subsistemas e das intervenções.

### 3 METODOLOGIA PROPOSTA

#### 3.1 Abordagem geral

Neste capítulo apresenta-se uma proposta de metodologia para a melhoria das eficiências hídrica e energética de aproveitamentos hidroagrícolas. A metodologia é constituída por quatro fases principais, conforme apresentado na Figura 3.1:

1. Recolha e processamento de informação
2. Realização do diagnóstico (análise global e sectorial)
3. Priorização de soluções de intervenção
4. Recomendação final

Numa primeira fase, é necessário recolher e processar toda a informação necessária para a avaliação de desempenho e diagnóstico. Segue-se o diagnóstico, uma das etapas principais da metodologia. Consiste na avaliação do desempenho atual do sistema global e dos seus subsistemas em termos de perdas de água e de eficiência energética. Para o efeito, são realizados os balanços hídricos e energéticos anuais e calculados um conjunto de indicadores de desempenho específicos para avaliação de perdas e de eficiência energética em aproveitamentos hidroagrícolas. É efetuada uma análise global de todos os sistemas e identificados os subsistemas prioritários recorrendo a análises multicritério (i.e., análise hierárquica e método da média ponderada aplicado através do software AWARE-P desenvolvido no âmbito do projeto Iniciativa nacional para a gestão de perdas de água e energia (iPerdas), coordenado pelo LNEC (iperdas.lnec.pt). Uma vez identificado o subsistema prioritário, são analisadas diferentes soluções de intervenção para esse subsistema atendendo ao desempenho técnico e ao custo-benefício. Por fim, são elaboradas recomendações de implementação das intervenções a efetuar. Nas seções seguintes, apresenta-se uma descrição detalhada de cada uma destas fases.

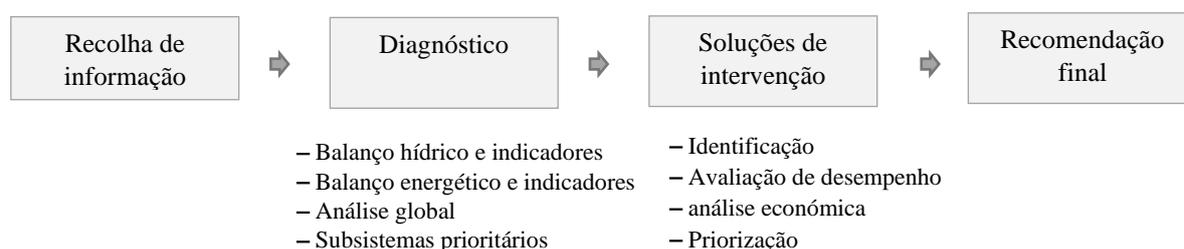


Figura 3.1 – Esquema da metodologia proposta para a melhoria da eficiência hídrica e energética em aproveitamentos hidroagrícolas.

#### 3.2 Recolha e processamento de informação

Na primeira fase, procede-se a recolha e tratamento de dados que permitam caracterização física e operacional dos aproveitamentos hidroagrícolas assim como o cálculo dos balanços hídricos e energéticos. A lista destes dados encontra-se apresentada no Quadro 3.1. De realçar que é preciso estabelecer um

período de referência (período de campanha), isto é período ao qual o sistema esteve a operar continuamente, o que implica que os dados recolhidos devem ser referentes a este período. Em aproveitamentos hidroagrícolas este período corresponde, tipicamente, o período de rega sendo constituído por 6-7 meses (i.e., de março a outubro).

Quadro 3.1 – Dados necessários relativos aos aproveitamentos hidroagrícolas para a realização dos balanços hídrico e energético

Balanço hídrico	Balanço energético
Características físicas e topológicas dos sistemas e subsistemas objeto de estudo (localização, mapeamento, tipo de transporte, dimensões, reservatórios)	Idem
Identificação, localização e recolha dos dados (diários e mensais) registados em estações meteorológicas adjacentes, designadamente, dados de Precipitação, Temperatura mínima, máxima e média, Humidade relativa mínima, máxima e média e Radiação solar incidente.	Identificação e recolha de dados relativos a Estações Elevatórias, designadamente tipologia, número e características nominais e de operação dos grupos elevatórios, volume captado/bombeado, energia elétrica consumida para o bombeamento e alturas de elevação.
Identificação dos tipos de captações e recolha de dados relativos aos volumes captados e respetivas metodologias ou equipamentos de medição.	Recolha de dados relativos a altimetria da área de estudo.
Dados relativos à rede de abastecimento (canais e condutas)	Recolha de informação relativa à pressão mínima para garantir o consumo.
Quantificação e identificação do tipo de consumo (Faturado medido ou não medido, Não faturado medido ou não medido)	Caso houver turbinas, recolher informação das características (Tipo, Queda útil), energia gerada e os volumes turbinados

### 3.3 Diagnóstico global do sistema

Os balanços hídrico e energético em aproveitamentos hidroagrícolas utilizados têm por base os propostos por Cunha (2018) e Mamade (2017) apresentados nas secções 2.3.1 e 2.3.2 . O balanço hídrico encontra-se consolidado, sendo aqui apenas propostas novas metodologias de cálculo de alguns dos seus componentes. O balanço energético proposto por Mamade (2017) não foi testado, pelo que foram introduzidas algumas alterações nos seus componentes. As componentes alteradas ou para as quais foram propostas novas metodologias de cálculo estão devidamente assinaladas nos balanços apresentados nas secções que se seguem.

#### 3.3.1 *Formulação do balanço hídrico*

O balanço hídrico recomendado para aproveitamentos hidroagrícolas é o apresentado no Quadro 2.1 cujas componentes para as quais foram introduzidas alterações se encontram assinaladas a cinzento no Quadro 3.2 e cujo cálculo é revisitado de seguida.

Quadro 3.2– Balanço hídrico em aproveitamentos hidroagrícolas: componentes com alterações de cálculo [m³/ano]

	Consumo Autorizado	Consumo Autorizado Faturado	Faturado medido (inclui água exportada)	Volume faturado	
			Faturado não medido		
Água entrada no sistema	Consumo Autorizado	Consumo Autorizado não Faturado	Não faturado medido	Volume não faturado	
			Não faturado não medido		
	Perdas de água	Perdas por evaporação			Evaporação em canais
					Evaporação em reservatórios intermédios
		Perdas Aparentes			Consumo não autorizado
					Perdas de água por erro de medição
		Perdas reais			Fugas em condutas
					Repastos em canais
					Repastos em reservatórios intermédios
					Descargas em canais
		Descargas em reservatórios intermédios			

Nota: O cálculo das componentes assinaladas a cinzento foi objeto de alteração na metodologia proposta.

### Água entrada

A componente da *água entrada* no sistema apresentada no balanço hídrico proposto Quadro 3.2, engloba o volume de água captado em albufeiras, linhas de água ou captações subterrâneas, o volume referente a precipitação, o volume importado de outros sistemas ou subsistemas, e o volume de água associado ao escoamento superficial que eventualmente entrou no sistema através da rede de transporte e distribuição ou dos reservatórios intermédios.

O volume captado e importado pode ser estimado ou medido através de caudalímetros instalados nas captações e pontos de entrega, deste modo estas medições são da inteira responsabilidade das entidades gestoras. Para o cálculo do volume de precipitação tal como foi apresentado no capítulo anterior é necessário saber a área de boca de cada trecho de canal e área inundada de cada reservatório (área suscetível a precipitação), tendo sempre em atenção a estação meteorológica de influência.

No que se refere ao escoamento superficial, foram explorados métodos alternativos para o cálculo da altura de água no solo (H), perda potencial de água (L) e evapotranspiração real (ETR) dadas respetivamente pelas equações (2.33), (2.34) e (2.35). Propõe-se, neste estudo, que estas parcelas sejam calculadas com base na evapotranspiração de cultura, em vez da evapotranspiração potencial, visto que esta assume que há sempre disponibilidade de água no solo e que o solo está sempre coberto de relva (Rodrigues 1984). A evapotranspiração de cultura (ETC) é entendida como a evapotranspiração de uma cultura específica crescendo em condições definidas, incluindo a disponibilidade de água no solo e a fertilidade do solo (Allen et al 1998) dada por:

$$ETC = KC \times ETP \quad (3.1)$$

sendo ETC, a evapotranspiração de cultura (mm/mês); KC, o coeficiente de cultura (-); ETP, a evapotranspiração potencial (mm/mês).

De modo a fazer uma comparação entre métodos, a evapotranspiração potencial é calculada de acordo com os métodos propostos anteriormente, nomeadamente Thornthwaite, Turc e Penmam-Moteith. No caso do método Penmam-Moteith, através do qual se estima a evapotranspiração potencial para uma cultura de referência, utiliza-se um albedo de 0,23, tal como a FAO recomenda (Allen et al 1998). Conhecida a evapotranspiração potencial, calcula-se a evapotranspiração da cultura usando um coeficiente de cultura igual a 0,7 referente a culturas de vegetais de porte baixo (Allen et al 1998). Uma vez obtida a evapotranspiração da cultura, procede-se ao cálculo da altura de água no solo, perda potencial de água e evapotranspiração real, recorrendo às equações (2.33), (2.34) e (2.35) respetivamente. Baseado no modelo do balanço sequencial mensal, estima-se o escoamento superficial (R), através da equação (2.37), e calcula-se o volume de água entrado no sistema devido ao escoamento superficial, baseado na equação (2.38).

Com a inclusão do conceito da evapotranspiração de cultura, a calibração do modelo de balanço sequencial mensal por comparação com medições de campo do escoamento superficial, permitirá estimar os valores de  $H_{max}$  (capacidade máxima de retenção do solo),  $\varphi$  (coeficiente de repartição do escoamento) e KC (coeficiente de cultura) conducentes a um valor de erro quadrático médio mínimo entre o modelo e os dados experimentais.

Para a aplicação deste método, deve considerar-se como o ponto de partida, o mês de outubro, visto que é o início do ano hidrológico. Assim, a altura de água disponível no solo no referido mês não depende da existente no mês anterior uma vez que se admite ser nula.

#### *Consumo Autorizado*

Este consumo inclui o consumo autorizado faturado (medido e não medido) e o não faturado (medido e não medido), englobando deste modo o volume referente ao consumo agrícola e não agrícola, volume exportado para outros subsistemas, e o volume mínimo de operação.

Sempre que a exportação de água é feita entre subsistemas geridos pela mesma entidade, deve considerar-se que o volume exportado entre subsistemas está incluído no consumo autorizado não faturado medido.

O volume mínimo de operação corresponde ao consumo autorizado não faturado não medido. Para esta componente, é proposta uma nova metodologia de cálculo, a qual considera a altura de água a montante do trecho, visto que este volume varia de acordo com o tipo de secção, declive e comprimento. Sendo o mais pertinente o declive, na medida em que se um dado troço estiver numa zona de vertente, haverá parte do trecho que poderá ficar seco, isto é, o volume mínimo de operação acumular-se-á a jusante da parte que poderá estar seca e a montante da tomada de água. Para isto propõe-se duas abordagens baseado no cálculo da altura mínima a montante, dada por:

$$h_m^{min} = H_j - Z_m \quad (3.2)$$

sendo  $h_m^{min}$ , a altura de água mínima a montante (m),  $H_j$ , a altura do plano de água horizontal a jusante,  $Z_m$ , a cota da rasante a montante.

*Nova abordagem para o cálculo do volume mínimo quando todo o trecho está molhado*

Este procedimento de cálculo aplica-se quando o declive é suficientemente pequeno para que a altura de água mínima a montante,  $h_m^{min}$ , seja maior do que zero, ou seja, o volume mínimo ocupa o trecho todo, não havendo deste modo parte do trecho que fique seco, conforme ilustrado na Figura 3.2.

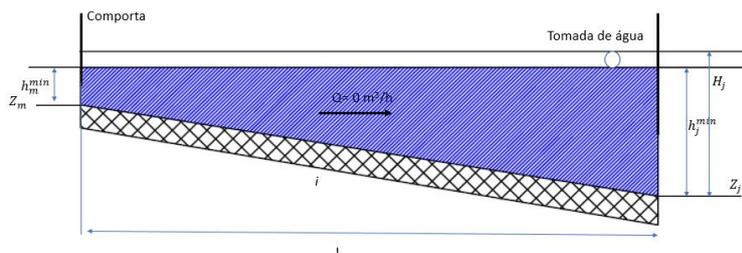


Figura 3.2 – Esquema de trecho com altura de água mínima a montante maior que zero

No caso de existirem trechos de conduta em sifão, o volume mínimo é dado por:

$$V_{min} = \pi \times \left(\frac{D}{2}\right)^2 \times L \quad (3.3)$$

sendo dependente do diâmetro ( $D$  em metros) e o do comprimento ( $L$  em metros).

No caso de canais de secção retangular, o volume mínimo de operação é dado por:

$$V_{min} = A_{med} \times L \quad (3.4)$$

sendo  $A_{med}$ , a área média da secção transversal dada por:

$$A_{med} = \frac{A_j + A_m}{2} \quad (3.5)$$

sendo  $A_j$  e o  $A_m$ , as áreas das secções transversais a jusante e a montante, respetivamente ( $m^2$ ).

*Nova abordagem para o cálculo do volume mínimo quando parte do trecho fica seco*

Esta abordagem é considerada quando a altura de água mínima requerida a montante do canal,  $h_m^{min}$ , é inferior a zero, o que significa que a montante existe uma parte do trecho seco (conforme Figura 3.3).

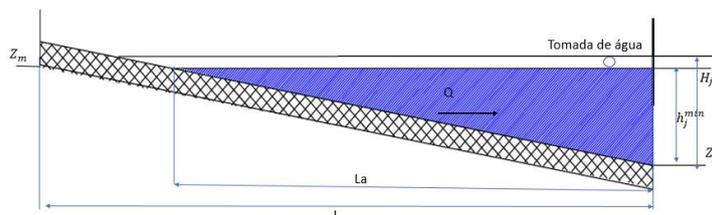


Figura 3.3 – Esquema trecho com altura de água mínima á montante menor que zero

Na iminência de haver parte de trecho seco, será preciso estimar o comprimento do trecho com água,  $L_a$ , recorrendo a:

$$L_a = \frac{h_j^{min}}{Z_m - Z_j} \times L \quad (3.6)$$

sendo  $L_a$ , o comprimento do trecho com água (m);  $h_j^{min}$ , altura de água mínima a jusante (m),  $Z_m$ , cota da rasante a montante (m);  $Z_j$ , cota da rasante a jusante (m); e  $L$ , comprimento total do trecho (m).

O volume mínimo de operação requerido num canal nestas condições é dado por:

$$V_m^{min} = A_m^{med} \times L_a \quad (3.7)$$

sendo  $V_m^{min}$ , o volume mínimo (m<sup>3</sup>) e  $A_m^{med}$ , a área média da secção transversal do canal (m<sup>2</sup>) dada por:

$$A_m^{med} = \frac{A_j}{2} \quad (3.8)$$

sendo  $A_j$ , a área transversal da secção a jusante (m<sup>2</sup>).

O volume mínimo de operação de um dado sistema ou subsistema é obtido pela soma dos volumes mínimos de cada trecho de canal e de sifão que o compõem.

### *Perdas de água*

As perdas de água incluem a componente das perdas aparentes (i.e usos não autorizados e erros de medição), das perdas físicas ou reais (i.e Repassos em canais e reservatórios intermédios, Fugas em condutas, descargas em canais e reservatórios) e a evaporação (i.e. evaporação em canais e reservatórios intermédios)

Com base no método de Penman (1948), estima-se a evaporação para cada estação meteorológica, e através das equações (2.10) e (2.11), calcula-se a evaporação nos canais e nos reservatórios, tendo sempre o cuidado de identificar a estação meteorológica de influência. De realçar que deve ser considerado o albedo sob a superfície líquida igual a 0,065, e os coeficientes de Angström,  $\alpha$  e  $\beta$ , iguais a 0,25 e a 0,5 respetivamente, que correspondem a valores médios apresentados pela atmosfera em função de humidade, poeiras e aerossóis.

Para os AH, considera-se que os usos não autorizados representam uma pequena fração do consumo autorizado, sendo a sua estimativa dado por:

$$V_{CAN} = f \times \frac{V_{CA}}{100} \quad (3.9)$$

sendo  $f$ , a fração do volume de água consumido sem autorização em relação ao consumo autorizado (%);  $V_{CA}$ , o volume associado ao consumo autorizado (m<sup>3</sup>).

Para a estimativa dos erros de medição, devem ser efetuados testes a alguns contadores existentes, através da instalação de um medidor de referência logo a jusante dos mesmos contadores. Estes testes permitem avaliar o erro associado aos contadores e se estes estão a medir por excesso ou por defeito, erros estes que tipicamente conduzem à submedição que tende a agravar-se com a idade dos mesmos.

Segundo Arregui et al. (2006) um contador do tipo tangencial woltman novo (utilizado nos aproveitamentos analisados), bem instalado, a operar com o caudal nominal, apresenta um erro relativo médio entre 0 e 2%. Atendendo a este valor e à taxa de degradação de contadores obtida através dos ensaios realizados em contadores do sistema,  $t_d$ , é possível estimar o erro relativo de um contador,  $\varepsilon_r$ , em função da sua idade,  $x$ , e do erro inicial,  $\varepsilon_0$ , através de:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_0 - t_d \cdot x \quad (3.10)$$

sendo  $\varepsilon_r$ ,  $\varepsilon_0$  e  $t_d$  expressos em % e  $x$  expresso em anos.

Relativamente às perdas reais, para a estimativa de repassos devem ser feitos ensaios que permitam estimar valores de referências a utilizar em canais reabilitados, não reabilitados e impermeabilizados. Na ausência de ensaios, recomenda-se que se considerem valores da bibliografia ou ensaios efetuados em sistemas similares. Refiram-se os seguintes valores de referência de repassos de 25 l/(m<sup>2</sup>.dia) para os canais em bom estado, e de 50 l/(m<sup>2</sup>.dia) para canais em mau estado (Montanes 2006).

O volume de descargas em reservatórios e canais é obtido por:

$$V_{Desc} = V_R^P - (V_{Rep} + V_{fugas}) \quad (3.11)$$

sendo  $V_{Desc}$ , o volume de descargas (m<sup>3</sup>);  $V_R^P$ , o volume total de perdas reais (m<sup>3</sup>) dado pela equação (3.12);  $V_{Rep}$ , o volume de repassos em canais e reservatórios (m<sup>3</sup>), dado pela equação (2.8);  $V_{fugas}$ , o volume de fugas (m<sup>3</sup>), dado pela equação (2.7).

O volume das perdas reais,  $V_R^P$ , é calculado através da seguinte equação:

$$V_R^P = V_{PA} - V_{EVP}^P - V_{Ap}^P \quad (3.12)$$

sendo  $V_{PA}$ , o volume de perdas totais de água (m<sup>3</sup>) dado pela equação (3.13);  $V_{EVP}^P$ , o volume de perdas devido a evaporação em canais e reservatórios (m<sup>3</sup>) dados pelas equações (2.10) e (2.11);  $V_{Ap}^P$ , o volume associado às perdas aparentes (m<sup>3</sup>), dado pela soma dos usos não autorizados e erros de medições equações (3.9) e (2.5).

O volume total de perdas de água observado num sistema ou subsistema,  $V_{PA}$ , é dado por:

$$V_{PA} = V_E - V_{CA} \quad (3.13)$$

sendo  $V_E$ , o volume entrado no sistema (m<sup>3</sup>);  $V_{CA}$ , o volume associado ao consumo autorizado(m<sup>3</sup>)

### 3.3.2 Metodologia para aplicação do balanço hídrico

A aplicação do balanço hídrico deve ser efetuada para a globalidade do sistema e para os seus subsistemas. O sistema global é definido entre as tomadas de água das barragens e tomadas de água (em pressão ou em superfície livre) aos regantes. Os subsistemas são setores do aproveitamento nos quais é possível avaliar o volume de água entrado, o volume de consumo autorizado e as perdas de água. A divisão em subsistemas

vai permitir um diagnóstico setorial e assim identificar zonas críticas da rede e os principais tipos de problemas.

Os subsistemas podem ser hidráulicamente independentes, ou seja, não têm ligações hidráulicas entre si (cf Figura 3.4). No caso de haver dependência entre subsistemas, a componente de água entrada num dado subsistema B inclui adicionalmente o volume importado,  $V_{Imp}^{A \rightarrow B}$ . No caso de o subsistema de origem A pertencer à mesma entidade gestora que o subsistema que recebe água, B, o volume importado é um consumo medido não faturado no subsistema de origem A, uma vez que este volume é faturado ao subsistema a jusante B; caso contrário, é um volume de consumo faturado medido.

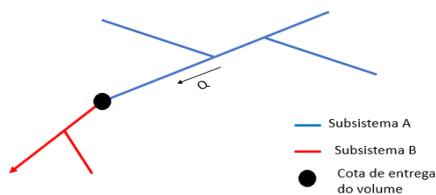


Figura 3.4 – Ilustração da importação de volumes e energias entre subsistemas

### 3.3.3 Formulação do balanço energético

O balanço energético recomendado por Cunha et al (2018) para aproveitamentos hidroagrícolas é o apresentado no Quadro 3.3, cujas componentes nas quais foram introduzidas alterações neste estudo se encontram assinaladas a cinzento e cujo cálculo é revisitado de seguida. Sumariamente, propõe-se neste estudo a formulação para o cálculo das componentes, da energia total fornecida (e.g a energia associada ao volume de precipitação, escoamento superficial e a associada a importação de água), a energia associada ao consumo autorizado (i.e, energia associada ao volume mínimo de operação, associado ao volume transferido) e a associada às perdas de água (i.e, devida a repassos em canais e evaporação em canais e reservatórios).

Quadro 3.3– Balanço energético em aproveitamentos hidroagrícolas: componentes com alterações de cálculo [kWh/ano]

Energia gravítica	Energia total fornecida	Energia associado ao consumo autorizado	Energia entregue aos consumidores	Energia mínima
Energia de Bombeamento		Energia associada a perdas de água	Energia dissipada associada ao consumo	Por perdas de cargas nas condutas e canais *
				Por perdas de cargas nas válvulas e nas comportas *
				Ineficiência das bombas
				Ineficiência nas turbinas
		Energia recuperada	Associada ao consumo autorizado	
			Associada a perdas de água	
			Nos pontos onde ocorrem perdas *	
			Por perdas de cargas nas válvulas e comportas*	
Energia dissipada associada as perdas	Por perdas de cargas nas condutas e nos canais *			
	Por ineficiência das bombas			
	Por ineficiência das turbinas			

\* Requer modelação matemática

Nota: O cálculo das componentes assinaladas a cinzento foi objeto de alteração na metodologia proposta.

### *Energia fornecida*

A energia total fornecida inclui a soma das energias associadas a cada subcomponente de água à entrada do sistema, nomeadamente a energia associada ao volume captado, que poderá ser gravítica ou de bombeamento, a energia associada ao volume importado e as energias associadas às entradas de água por precipitação e escoamento superficial.

A energia gravítica e a energia de bombeamento fornecidas ao sistema podem ser determinadas pelas equações (2.15), (2.16), e (2.17), e a estas componentes juntam-se as novas componentes propostas para o balanço energético em aproveitamentos hidroagrícolas, nomeadamente a energia associada ao volume importado, ao volume de escoamento superficial e a associada ao volume de precipitação.

Para além dos subsistemas poderem adquirir água a outros subsistemas, quando se calcula o balanço energético entre subsistemas que são hidraulicamente dependentes, também pode haver transferência de energia entre subsistemas. Esta componente de energia é dada pela seguinte igualdade:

$$E_{imp}^{A \rightarrow B} = \frac{\gamma}{3600} \sum_{i=1}^n V_{imp}^{A \rightarrow B} \times (H_i^E - Z_{ref}^B) \quad (3.14)$$

sendo  $E_{imp}^{A \rightarrow B}$ , a energia importada pelo sistema/subsistema B e proveniente do sistema/subsistema A (kWh);  $V_{imp}^{A \rightarrow B}$ , o volume importado pelo sistema/subsistema B e entregue no ponto de cota piezométrica  $H_i^E$  ( $m^3$ );  $H_i^E$ , a cota piezométrica no ponto de entrega do volume  $V_{imp}^{A \rightarrow B}$  (m), dada pela equação (2.13);  $Z_{ref}^B$ , a cota de referência do sistema/subsistema B (m). Esta importação de energia também pode corresponder a água que é importada a partir de outro sistema de outra entidade gestora.

A energia associada ao volume entrado por precipitação,  $E_V^P$ , nos canais e reservatórios é dada por:

$$E^P = E^{PC} + E^{PR} \quad (3.15)$$

sendo  $E^{PC}$  e  $E^{PR}$  a energia associada ao volume de precipitação em canais e reservatórios (kWh), dadas pelas equações (3.16) e (3.17), respetivamente.

$$E^{PC} = \frac{\gamma}{3600} \sum_{i=1}^n V_p^{C i} \times \left( \frac{H_j^i + H_m^i}{2} - Z_{ref} \right) \quad (3.16)$$

sendo  $V_p^{C i}$ , o volume de precipitação entrado no canal  $i$  ( $m^3$ ); e  $H_m^i$  e  $H_j^i$ , as cotas do plano de água relativamente à largura de boca a montante e a jusante do canal, respetivamente (m).

$$E^{PR} = \frac{\gamma}{3600} \sum_{i=1}^n V_p^{R i} \times (NPA_i^R - Z_{ref}) \quad (3.17)$$

sendo  $V_p^{R i}$ , o volume de precipitação entrado no reservatório  $i$  ( $m^3$ );  $NPA_i^R$ , o nível de pleno armazenamento do reservatório intermédio  $i$  (m).

A energia associada ao volume de água entrado no sistema através do escoamento superficial afluente ao reservatório  $i$  ou troço de rede  $j$  é dada por:

$$E^{ES} = \frac{\gamma}{3600} \sum_{i=1}^n V_i^{ES} \times (H_i^R - Z_{ref}) + \sum_{j=1}^n V_j^{ES} \times (H_j^C - Z_{ref}) \quad (3.18)$$

sendo  $E^{ES}$ , a energia associada ao volume de escoamento superficial (kWh);  $V_i^{ES}$ , o volume de escoamento superficial que afluí ao reservatório  $i$  ( $m^3$ );  $V_j^{ES}$  o volume de escoamento superficial que afluí ao troço de rede  $j$ ;  $H_i^R$  o nível médio no reservatório intermédio  $i$  (m) e  $H_j^C$  o nível de água na secção de jusante do troço de rede  $j$ . No que se refere ao escoamento superficial em troços de rede, este normalmente ocorre em troços em que o transporte de água é assegurado por uma linha de água, pois em geral a rede em canal possui um sistema para drenagem da água superficial que evita a afluência deste volume de água no sistema.

#### *Energia associada ao consumo autorizado*

A energia associada ao consumo autorizado nos aproveitamentos hidroagrícolas é dada pela equação (2.21). A formulação proposta neste trabalho para o cálculo da energia mínima requerida, equação (3.18), inclui a energia necessária para assegurar o consumo direto aos regantes ou a transferência entre sistemas, independentemente das características e do modo como o sistema de abastecimento de água é operado. Deste modo, a energia associada a volumes de água para operação (e.g., volume mínimo de operação) e manutenção do sistema (e.g., volume de água gasto na limpeza, reparação de canais) não devia ser incluída na componente de energia mínima. Deste modo, para além da energia entregue e da energia dissipada associada ao consumo autorizado, deveria existir uma terceira componente associada a energia necessária para manutenção e operação da rede. No entanto, uma vez que estes volumes de água para operação e manutenção têm um peso muito reduzido face ao volume de água entregue aos regantes e para transferência entre sistemas, a energia associada a estes volumes de água foi incluída na componente de energia mínima requerida.

$$E_{min} = E_{min}^R + E_{Exp}^{A \rightarrow B} + E_{min}^V \quad (3.19)$$

sendo  $E_{min}$ , a energia mínima (kWh);  $E_{min}^R$ , a energia mínima requerida para assegurar o fornecimento de água aos regantes (faturado ou não faturado e medido ou não medido) (kWh), dada pela equação (3.20);  $E_{Exp}^{A \rightarrow B}$ , a energia mínima requerida para assegurar a transferência entre sistemas dada pela equação (3.21);  $E_{min}^V$ , a energia associada ao volume mínimo de operação (kWh) dada pela equação (3.22).

A energia mínima requerida para assegurar o fornecimento de água aos regantes é dada pela seguinte expressão:

$$E_{min}^R = \frac{\gamma}{3600} \sum_{i=1}^n V_i^R (Z_i + p_i^{min} - Z_{ref}) \quad (3.20)$$

sendo  $V_i^R$ , o volume de água entregue na área regada  $i$  ( $m^3$ );  $Z_i$ , a cota média da área regada  $i$  (m);  $P_i^{min}$ , pressão mínima requerida na área regada  $i$  (m c.a.)

Quando há transferências de volumes entre sistemas ou subsistemas é necessário garantir uma energia mínima para garantir esta transferência de acordo com a equação:

$$E_{Exp}^{A \rightarrow B} = \frac{\gamma}{3600} \sum_{p=1}^n V_{Exp\ p}^{A \rightarrow B} (H_p^{Exp} - Z_{ref}^A) \quad (3.21)$$

sendo  $E_{Exp}^{A \rightarrow B}$ , a energia necessária para garantir a transferência de água (kWh);  $V_{Exp\ p}^{A \rightarrow B}$ , o volume transferido no ponto de entrega  $p$  ( $m^3$ );  $Z_i^E$ , a cota piezométrica no ponto de entrega  $p$  (m);  $Z_{ref}^A$ , a cota de referência do subsistema de origem A (m).

Para o cálculo da energia associada ao volume mínimo de operação propõe-se a seguinte formulação:

$$E_{min}^V = \frac{\gamma}{3600} \sum_{i=1}^n V_j^{min} (Z_j^{ph} - Z_{ref}) \quad (3.22)$$

sendo  $V_j^{min}$ , o volume mínimo de operação para o troço de canal  $j$  ( $m^3$ );  $Z_j^{ph}$ , a cota de plano horizontal a jusante do troço  $j$  (m).

As energias dissipadas nas bombas e turbinas associadas ao consumo autorizado, são dadas baseado nas equações apresentadas nos trabalhos anteriores, nomeadamente as equações (2.23) e (2.24) respetivamente. A energia recuperada associada ao consumo autorizado, por sua vez é dada pela equação (2.27).

#### *Energia associada às perdas*

A energia total associada às perdas de água cresce com o volume de perdas, sendo dada pela equação apresentada no capítulo anterior, equação (2.28). Neste trabalho foram propostas metodologias de cálculo específicos para os sistemas de abastecimentos típicos em AH (canais), designadamente as energias associadas ao volume evaporado em canais e reservatórios e perdido por repassos em canais.

A energia recuperada associada às perdas, é calculada através da formulação apresentada nos trabalhos anteriores baseado na equação (2.31). Por outro lado, as energias dissipadas nas bombas e turbinas devido a perdas de água são estimadas através das equações (2.29) e (2.30) respetivamente.

Tendo em conta as componentes de perdas de água apresentadas no BH, relativamente aos AH com sistema de abastecimento em canais, nomeadamente a evaporação e os repassos, para o BE proposto para estes sistemas inclui-se estas perdas em termos energéticos.

Sendo a energia associada as perdas por repassos dada pela seguinte igualdade:

$$E_V^{Rep} = \frac{\gamma}{3600} \sum_{i=1}^n V_i^{Rep\ c} \left( \frac{H_i^m + H_i^j}{2} - Z_{ref} \right) \quad (3.23)$$

sendo  $E_V^{Rep}$ , a energia associada ao volume de repassos em canais (kWh);  $V_i^{Rep C}$ , o volume de repassos no trecho  $i$  ( $m^3$ );  $H_i^m$  e  $H_i^j$ ; as cotas do plano de água relativamente à largura de boca a montante e a jusante do canal, respetivamente (m).

Não obstante, a energia dissipada devido a evaporação nos canais e reservatórios intermédios é dado por:

$$E^{EVP} = E^{EVP C} + E^{EVP R} \quad (3.24)$$

sendo  $E^{EVP}$ , a energia associada a evaporação (kWh);  $E^{EVP C}$ , a energia associada a evaporação em canais (kWh), dada pela equação (3.25);  $E^{EVP R}$ , a energia associada a evaporação em reservatórios (kWh), dada pela equação (3.26).

$$E^{EVP C} = \frac{\gamma}{3600} \sum_{i=1}^n V_i^{EVP C} \left( \frac{H_i^m + H_i^j}{2} - Z_{ref} \right) \quad (3.25)$$

$$E^{EVP R} = \frac{\gamma}{3600} \sum_{i=1}^n V_i^{EVP R} (N_i^m - Z_{ref}) \quad (3.26)$$

sendo  $V_i^{EVP C}$  e  $V_i^{EVP R}$ , o volume evaporado no trecho do canal  $i$  e no reservatório intermédio  $i$  respetivamente ( $m^3$ );  $N_i^m$ , o nível medio no reservatório intermédio  $i$  (m).

### 3.3.4 Metodologia para aplicação do balanço energético em sistemas e subsistemas

A metodologia proposta requer a definição da cota de referência tal como evidenciado pelos estudos anteriores (Mamade et al 2018). A cota a considerar e com base na qual são calculadas as componentes do balanço energético. Neste sentido, serão comparados e discutidos os resultados obtidos para diferentes valores de cotas mínimas de modo a analisar qual a mais indicada para análise das eficiências nos sistemas e subsistemas.

Ao nível do sistema pode adotar-se como cota de referência a cota mínima do sistema, a cota mínima dos locais de consumo ou a cota média de consumo, resultante da ponderação do consumo em cada área regada pela respetiva cota média.

Quando o sistema é composto por subsistemas com dependência hidráulica entre si (i.e, os subsistemas estão interligados, sendo os de jusante abastecidos pelos de montante), ou independentes, mas próximos ou com possibilidade de ligação entre si, a recomendação é adotar uma cota única para o cálculo do balanço energético. Caso o sistema seja composto por subsistemas hidraulicamente independentes, afastados e sem possibilidade de ligação entre si, o balanço energético deve ser calculado separadamente para cada subsistema e depois por agregação pode obter-se o balanço energético global.

No caso dos subsistemas, caso a cota mínima adotada para o sistema seja muito diferente da cota mínima de um dado subsistema em que há dependência hidráulica, os resultados podem não traduzir a realidade

em termos do balanço de energia. Por outras palavras, utilizar uma cota mínima do sistema que seja muito inferior a uma cota de referência de um subsistema poderá implicar a sobreavaliação da energia fornecida, na medida em que quanto menor a cota de referência maior é a energia fornecida. Neste sentido, quando se pretende aplicar o balanço energético ao nível dos subsistemas, também deverá ser analisada a cota a adotar.

Relativamente à energia transferida entre subsistemas e para a energia utilizada pelo subsistema de origem para o respetivo consumo, propõe-se duas abordagens de cálculo. Para ilustrar as duas abordagens apresenta-se na Figura 3.4 um exemplo com dois subsistemas, em que o de origem é o A, e o subsistema para o qual se transfere energia é o subsistema B.

*Abordagem 1:* Aplica-se apenas quando a energia transferida entre subsistemas provém de origem gravítica. Nesta situação, a energia transferida para o subsistema B,  $E_{Exp}^{A \rightarrow B}$ , é calculada através da equação (3.21). A energia disponível para ser utilizada pelo subsistema A (Figura 3.4) calcula-se com base em:

$$E_{TF}^A = E_F^A - E_{Exp}^{A \rightarrow B} \quad (3.27)$$

sendo  $E_{TF}^A$ , a energia total que fica no subsistema A (kWh);  $E_F^A$ , a energia total fornecida ao subsistema A (incluindo a energia fornecida ao volume que entrou e foi exportado) (kWh).

Quando a cota de entrega no subsistema B é desconhecida, a energia transferida do subsistema A para o B,  $E_{Exp}^B$ , pode ser estimada pela equação (3.28), designando-se esta variante por Abordagem 1A. Porém esta última abordagem deve ser aplicada apenas quando não existem dados das cotas topográficas

$$E_{Exp}^B = \frac{V_{Exp}^{A \rightarrow B}}{V_{AE}^A} \times E_F^A \quad (3.28)$$

*Abordagem 2:* Aplica-se quando a energia necessária para assegurar a transferência de água provém de origem gravítica e de bombeamento. Esta situação verifica-se, por exemplo, nos casos em que a energia associada ao volume de água entrado no sistema é de origem gravítica, mas há necessidade de fazer um reforço da energia disponível ao longo do percurso até o ponto de transferência de água, através de bombeamento. Neste caso, a proporção de energia fornecida gravítica ou por bombeamento ao longo do percurso e que é transferida pode ser obtida pela soma ponderada (em energia) dos dois tipos de origens de energia ao longo do percurso, através das equações (3.29). A energia que fica no subsistema A é dada pela equação (3.27).

$$E_{Exp}^B = \frac{E_{Exp}^{A \rightarrow B}}{E_F^A} \left( \sum_{i=1}^n E_{G_i}^A + \sum_{j=1}^p E_{B_j}^A \right) \quad (3.29)$$

sendo  $E_{Exp}^B$ , a energia exportada para o subsistema B (kWh);  $n$ , o número de origens gravíticas que contribuem para a transferência do volume;  $E_{G_i}^A$  energia gravítica associada a componente  $i$  da água entrada no sistema A que é transferível (kWh);  $p$ , número de EE que contribuem para o transporte do volume que é exportado;  $E_{B_j}^A$ , a energia elétrica associada à EE  $j$  no transporte do volume transferido (kWh).

De salientar que a energia transferida de bombeamento inclui a energia efetivamente transferida e as ineficiências associadas a EE na mesma proporção de volume ou de energia transferida.

A importação de volume implica necessariamente a importação de energia. De acordo com a *Abordagem 1*, esta energia é dada pela equação (3.14), isto é, a energia importada é toda gravítica. De acordo com a *Abordagem 2*, a energia importada contempla a energia gravítica e de bombeamento, sendo a componente gravítica dada por:

$$E_{imp}^G = E_{imp}^B - \frac{E_{Exp}^{A \rightarrow B}}{E_F^A} \sum_{j=1}^n E_{Bj}^A \quad (3.30)$$

sendo  $E_{imp}^G$ , a energia gravítica importada pelo subsistema B (kWh);  $E_B^{imp}$ , a energia total importada pelo subsistema B (kWh), dada pela equação (3.14);

De salientar que a energia gravítica importada é dada com base na cota de referência do subsistema que importa o volume (B), enquanto que a energia de bombeamento é dada pela fração de energia elétrica eventualmente exportada pelo subsistema de origem (A).

### 3.3.5 Análise global e identificação de subsistemas prioritários

A análise do desempenho dos sistemas e dos subsistemas terá por base um conjunto de indicadores de desempenho que permitem avaliar as perdas de água e a eficiência energética, apresentados no Quadro 3.4. Muitos dos indicadores relativos a eficiência hídrica foram propostos pelo *International Water Association* (IWA) e que foram adotados pela Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos (ERSAR) no Guia Técnico n.º 1 (Alegre et al 2004). Tendo em conta que estes indicadores são direcionados para sistemas urbanos, alguns tiveram de ser ajustados ou redefinidos para atenderem às especificidades dos aproveitamentos hidroagrícolas, nomeadamente o Indicador dos repassos (IRep) e Indicador de descargas (IDesc). O indicador Op28 proposto no mesmo guia foi reformulado por forma a incluir o comprimento dos canais, incluindo-se aqui o indicador Op28b, que representa o volume de perdas de água por comprimento de conduta e de canal e por unidade de tempo.

De constatar que os valores de referências das métricas, apresentadas no Quadro 3.4, foram obtidos em análises efetuadas no âmbito do projeto AGIR.

Quadro 3.4 – Indicadores de desempenho de perdas de água e de eficiência energética recomendados para aproveitamentos hidroagrícolas

Designação	Definição	Valores de referência utilizados
WR1 – Ineficiência na utilização dos recursos hídricos (%)	Representa a ineficiência na utilização dos recursos hídricos	● [0; 15[ ● [15; 25[ ● ≥ 25
Op24 – Perdas de água por comprimento de condutas [l/(km.dia)]	Representa as perdas de água por comprimento de conduta durante o período de pleno funcionamento	● [0; 3[ ● [3; 5[ ● ≥ 5
Op28 <sub>b</sub> – Perdas de água total por comprimento de conduta e canais [m <sup>3</sup> /(km.dia)]	Representa a fração de água entrada no sistema que foi perdida por comprimento de canais e condutas	● [0; 100[ ● [100; 150[ ● ≥ 150
Fi46 – Água não faturada em termos de volume (%)	Representa a fração de água que eventualmente entrou no sistema, porém por alguma razão não foi faturada	● [0; 20 [ ● [20; 35[ ● ≥ 35
IRep – Repassos [m <sup>3</sup> /(km.dia)]	Representa um valor de referência de perdas de água por unidade de área unidade de área molhada do canal e do período de pleno funcionamento	● [0; 15[ ● [15; 25[ ● ≥ 25
IDesc – Descarga em canais e reservatórios (%)	Representa a fração do volume de água entrado no sistema que foi perdido devido a descargas em canais e reservatórios	● [0; 7,5[ ● [7,5; 12,5[ ● ≥ 12,5
E2 – Excesso de energia por unidade de volume de consumo autorizado (kWh/m <sup>3</sup> )	Evidencia a possibilidade de redução de energia por unidade de volume do consumo autorizado	● [0; 0,25[ ● [0,25; 0,5[ ● ≥ 0,5
E3– Excesso teórico de energia (-)	Representa o excesso teórico de energia que é fornecido ao sistema em comparação com a energia mínima requerida para garantir consumo	● [1; 2,5[ ● [2,5; 3,5[ ● ≥ 3,5
PEE–Eficiência das Bombas (%)	Realça a eficiência energética global de todas as estações elevatórias do sistema	● [100; 68[ ● [68; 50[ ● ≤ 50

● Bom ● Mediano ● Insatisfatório

A identificação dos subsistemas prioritários é efetuada, na presente tese, com base em duas abordagens: a Análise Hierárquica (AHP apresentada em 2.5) e a abordagem AWARE-P que consiste em priorizar subsistemas através de uma média ponderada.

A aplicação da análise hierárquica consiste nos seguintes passos:

- I. *Normalização dos indicadores:* Tendo em conta que esta análise será realizada com base nos indicadores de desempenho e que estes apresentam diferentes unidades, de modo a poder comparar os valores dos indicadores, será necessário normalizá-los. Para o efeito estabelece-se uma escala de 1 a 9 atribuindo ao *Bom* [1, 4[, ao *Mediano* [4, 6[ e *Insatisfatório* [6, 9] conforme apresentado no Quadro 3.4. O valor normalizado do indicador é obtido de uma interpolação linear atendendo ao valor original e a escala proposta (e.g. WR1= 17% corresponde a 4,45, PEE=48% corresponde a 7,1)

- II. *Implementação e normalização da matriz de impacto dos subsistemas:* A matriz de impacto é construída com base na comparação dos indicadores normalizados para diferentes subsistemas e normalizada. Para consultar detalhes sugere-se a leitura de Vargas (2010).
- III. *Implementação e normalização da matriz de impacto dos critérios:* Esta matriz é obtida através de atribuição de pesos de preferências a cada critério (indicador). Caso os indicadores tenham o mesmo peso obtém-se uma matriz identidade. A normalização é efetuada dividindo esta matriz pelo número total de critérios,  $n$ .
- IV. *Cálculo da matriz de preferência:* Esta matriz é obtida pela multiplicação das matrizes de impacto normalizadas dos subsistemas para cada indicador com a matriz normalizada dos critérios. O subsistema que apresente maior valor da matriz de preferência é a prioritária.

### 3.4 Priorização de soluções para melhoria de eficiência hídrica e energética

Uma vez identificados os subsistemas com pior desempenho, deve proceder-se à análise de possíveis intervenções que poderão melhorar a eficiência dos mesmos. Estas soluções de intervenção devem ser comparadas e selecionada a que melhor se adequa ao sistema em análise, atendendo a aspetos técnicos de desempenho e a aspetos económicos (benefícios vs. custos).

Para priorizar soluções relativamente ao desempenho, pode utilizar-se um algoritmo de análise multicritério simples, como o software *AWARE-P*. Neste caso, as opções passam a ser as soluções de intervenção, na qual os critérios (indicadores) serão os mesmos utilizados na priorização de subsistemas, e com isto a solução que apresentar a maioria dos indicadores no nível *Bom* será a prioritária.

Esta análise deve ser complementada com uma análise económico-financeira que inclua o cálculo de:

- valor atualizado líquido, VAL (*Net Present Value*, NPV); dado pela equação (3.31);
- taxa interna de rentabilidade, TIR (*Internal rate of return*, IRR) dada pela equação (3.32);
- período de retorno do investimento, PRI (*Pay back period*, PBP), dado pela equação (3.33).

$$VAL = -I_0 + \sum_{i=1}^N \frac{C_t}{(1+r)^i} \quad (3.31)$$

$$VAL(r = TIR) = 0 \leftrightarrow 0 = -I_0 + \sum_{i=1}^N \frac{C_t}{(1+TIR)^i} \quad (3.32)$$

$$PRI = \frac{I_0}{C_t} \quad (3.33)$$

sendo  $I_0$ , o investimento (€);  $C_t$ , o *Cash-Flow* no instante  $i$  (€);  $i$ , o instante (ano);  $N$ , o período de análise (anos)  $r$ , a taxa de atualização dada por:

$$r = [(1 + T1) \times (1 + T2) \times (1 + T3)] - 1 \quad (3.34)$$

sendo T1, a taxa de obrigações do tesouro; T2, a taxa anual de risco; T3, a taxa anual de inflação. A taxa anual de risco anual no mercado português é de 4,86% (Xirimimbi 2018). Assim, para o cálculo da taxa de atualização será considerado T1=3,10% (PORDATA 2020), T2=4,86% e T3=1,14% (PORDATA 2020).

O período de retorno do investimento (PRI) representa o número de anos necessário para que o investimento seja totalmente recuperado, ou seja, para os benefícios líquidos acumulados (cash-flow acumulado) igualem o investimento.

Nesta análise, uma solução é considerada prioritária, quando apresentar o maior VAL e menor PRI. De salientar que uma solução só é economicamente viável, quando o seu VAL no período de análise for positivo e o TIR for maior que a taxa de atualização ( $r$ ).

### **3.5 Recomendação final**

Com a aplicação da metodologia apresentada será possível identificar os principais problemas dos aproveitamentos hidroagrícolas e identificar áreas/subsistemas com maiores ineficiências. Conhecidas as áreas/subsistemas prioritários com base na avaliação do desempenho, poderão ser identificadas possíveis soluções de intervenção que contribuam para a melhoria da eficiência hídrica e energética atendendo ao seu impacto espectável em termos de desempenho e aos custos e benefícios associados. A solução recomendada para a implementação será aquela que implique a uma melhoria do desempenho do subsistema mais significativa e com menor período retorno do investimento. Após a implementação da solução é necessário monitorizar e avaliar o desempenho do sistema ao longo do horizonte de projeto.

## 4 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

### 4.1 Nota introdutória

A metodologia proposta foi aplicada a dois aproveitamentos hidroagrícolas, designados por AHA e AHB. O sistema AHA é constituído por canais e condutas, sendo a pressão mínima requerida nos pontos de consumo muito baixa (cerca de 1,0 m c.a.). O sistema relativo ao AHB é na sua totalidade em pressão (sem canais) e no qual pressão mínima requerida nos pontos de consumo é elevada (i.e., superior a 30 m c.a.).

Para este estudo é muito importante estabelecer um período de campanha (i.e., período de funcionamento em contínuo). Os períodos de campanha são distintos para estes dois aproveitamentos, uma vez que o AHA opera normalmente de março a outubro, enquanto que o AHB opera o ano todo, com início e fim em outubro.

Será realizada uma análise para os períodos de campanha de três anos consecutivos, 2016, 2017 e 2018 com o intuito de avaliar a evolução temporal da eficiência hídrica e energética dos dois aproveitamentos hidroagrícola e, assim, propor medidas de intervenção que melhorem a sua eficiência.

### 4.2 Aproveitamento hidroagrícola A

#### 4.2.1 Caraterização do aproveitamento

O sistema de abastecimento do Aproveitamento hidroagrícola A (AHA) é constituído por uma rede de canais e de condutas e está dividido, em cinco subsistemas, de acordo com os dados disponibilizados para o período de campanha de 2018, sendo designados por S1, S2, S3, S4 e S5.

O subsistema S1 inclui a albufeira *Ma* e os açudes *J* e *K*. O subsistema S2 compreende a albufeira *Mb* e o reservatório *R*, cujo objetivo é armazenar água e depois distribuí-la para os subsistemas a jusante, nomeadamente os subsistemas S3 e S4. O subsistema S5 não está ligado aos outros subsistemas, sendo abastecido diretamente a partir duma terceira albufeira *Mc*.

Para este aproveitamento o período de campanha normalmente começa em março e termina em outubro. Nos anos de 2016, 2017 e 2018, o sistema operou em média 200, 193 e 173 dias, respetivamente, podendo haver canais ou condutas com um período de funcionamento mais reduzido.

Na Figura 4.1 apresenta-se um esquema da rede de canais do sistema de abastecimento do AHA e dos respetivos subsistemas.

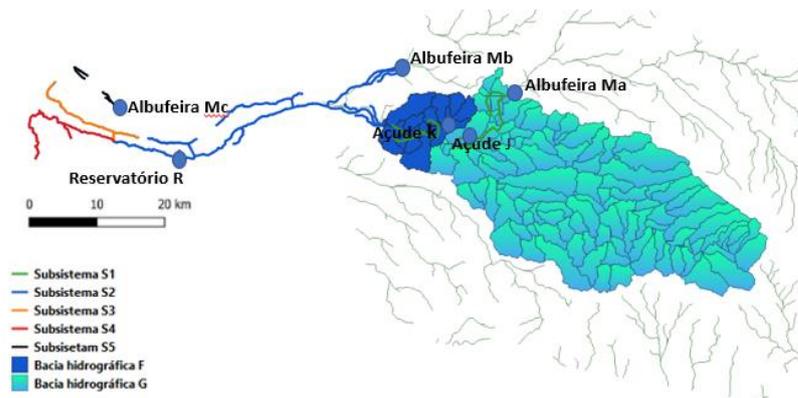


Figura 4.1 – Esquema da rede de transporte do sistema de abastecimento do AHA

Os açudes *J* e *K* são reservatórios intermédios do subsistema S1 e o reservatório *R* é um reservatório intermédio do subsistema S2. Os açudes *J* e *K* estão inseridas nas bacias hidrográficas *F* e *G*, cuja área é 110 e 1009 km<sup>2</sup> respetivamente. A existência destas bacias permite a entrada de água através do escoamento superficial para os açudes (reservatórios intermédios) *J* e *K*, contribuindo assim para o volume de água entrado no sistema. De salientar que o reservatório *R*, referente ao subsistema S2 não permite entrada de água por escoamento superficial, pois é uma infraestrutura de armazenamento confinada.

No Quadro 4.1 apresentam-se as características destes reservatórios intermédios, nomeadamente a área inundada, o nível de pleno armazenamento (NPA) e nível médio de água.

Quadro 4.1– Caracterização reservatórios intermédios do AHA

Reservatório Intermédio	Área inundada em relação ao NPA (m <sup>2</sup> )	Nível de pleno armazenamento (m)	Nível médio de água (m)
Açude <i>J</i>	72 000	42,50	42,50
Açude <i>K</i>	36 000	62,00	62,00
Reservatório <i>R</i>	21 150	14,50	13,00

O AHA é constituído por redes de canais, que representam um total 208,5 km de extensão e por redes de condutas que representam 193,9 km da rede. Ao longo dos últimos tempos vários são os canais e condutas que têm sido reabilitados. No Quadro 4.2 apresentam-se os comprimentos de canais e condutas em bom e mau estado até o período de campanha de 2018 para os diferentes subsistemas.

Quadro 4.2– Caracterização do sistema e subsistemas de abastecimento do AHA (período de campanha 2018)

Subsistemas	Extensão da rede de canais (km)		Extensão rede de condutas (km)	
	Bom estado	Mau estado	Bom estado	Mau estado
S1	10,42	26,95	0	39,45
S2	16,34	98,53	34,41	56,71
S3	4,45	16,40	16,03	11,84
S4	1,71	25,15	20,98	11,10
S5	8,53	0	0,17	3,16
Sistema	41,45	167,02	71,59	122,25

O subsistema, S1, ao contrário dos restantes subsistemas, utiliza o rio como meio de transporte de parte do volume captado na albufeira, *Ma*, isto é, parte do volume entrado neste sistema entra no rio e, depois, a jusante é bombeado, de modo a abastecer os canais laterais ao rio e o restante volume destina-se a abastecer os subsistemas a jusante. Deste modo, durante o período de campanha, a entidade gestora controla as descargas que ocorrem no açude, *K*, de modo a garantir que a água adquirida a partir da albufeira, *Ma*, não corresponda a uma perda de água.

Para a caracterização meteorológica do AHA existem seis estações meteorológicas, M1 a M6, conforme apresentado na Figura 4.2, que medem diariamente a precipitação, a temperatura, a humidade relativa e a radiação solar incidente. Para o subsistema S1 utiliza-se os dados meteorológicos da estação M1, por ser a mais próxima, assim como para o S2 a média entre as estações do M2, M3 e M4, para o S3 e S4 a estação M6 e a estação M5 para o S5.

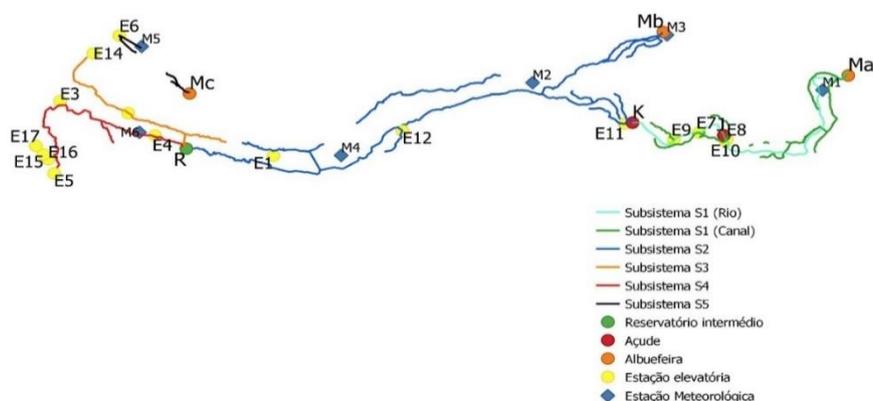


Figura 4.2– Identificação dos subsistemas, localização das estações meteorológicas e estações elevatórias no aproveitamento hidroagrícola AHA

A caracterização do clima destas estações para o período de campanha de 2018 encontra-se sintetizado na Figura 4.3 a), através dos parâmetros temperatura média,  $T_{med}$ , precipitação,  $P$ , evaporação estimada pelo método de Penman (1948),  $EVP$ , e a evapotranspiração potencial obtida pela fórmula de Thornthwaite,  $ETP(TW)$ . Verifica-se que a utilização deste último método para estimar a evaporação (devido à ausência de dados) conduz a subavaliação deste parâmetro.

Na Figura 4.3 b) apresenta-se a evolução dos referidos parâmetros ao longo dos três anos. O ano de 2017 foi o ano mais seco, o que intuitivamente leva a crer que para este ano o consumo de água terá sido maior devido ao défice hídrico, implicando uma maior periodicidade de rega. Por outro lado, o ano de 2016 foi aquele em que choveu mais, o que poderá ter conduzido a um maior escoamento superficial e a um maior volume de água entrado devido a precipitação. Na Figura 7.1 e Figura 7.2 apresenta-se a evolução temporal do clima nas várias estações meteorológicas entre 2016 e 2018.

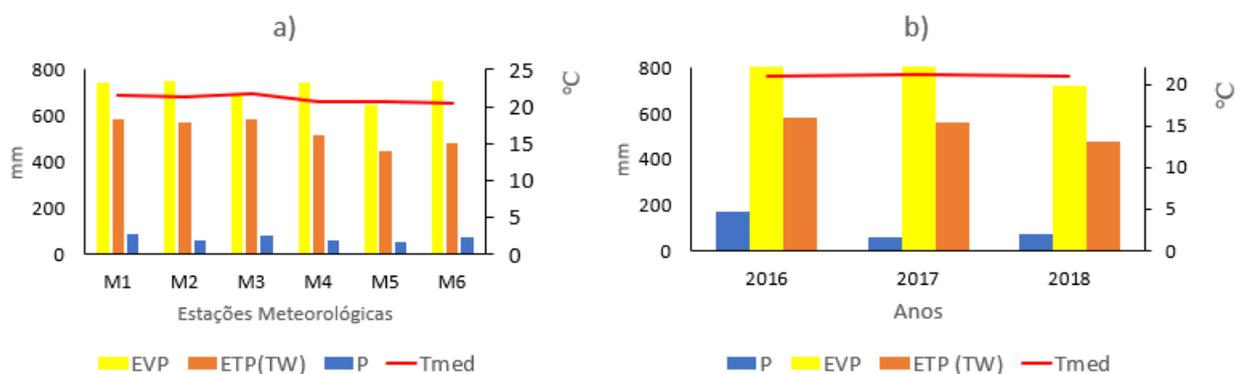


Figura 4.3 – Evapotranspiração e temperatura: a) estações meteorológicas do AHA durante o período de campanha 2018; b) evolução do clima nos três períodos de campanha (valores ponderados pela área regada).

A caracterização dos subsistemas relativamente a área suscetível a entrada de água por precipitação e perdas por evaporação, assim como a área regada e a duração média de campanha de cada um dos mesmos é apresentada no Quadro 4.3. O subsistema S2 deverá ter maior volume de água à entrada do sistema devido ao elevado valor da área suscetível a precipitação e, conseqüentemente, maiores perdas por evaporação, isto porque é o maior subsistema, contabilizando 49,1% da área regada e 55% da rede de canais do sistema; também foi o que esteve a operar por um período mais alargado. Os canais em galeria ou túnel não permitem entrada de água por precipitação nem perdas de água por evaporação, sendo assim as suas áreas não estão incluídas neste quadro.

De notar que a área sujeita a perdas por evaporação no sistema é mínima quando comparada com as áreas das albufeiras, representando apenas 73% da área total da albufeira de menor dimensão (área inundadas das três albufeiras relativo ao NPA:  $M_a=1,96 \cdot 10^7 \text{ m}^2$ ;  $M_b=1,4 \cdot 10^7 \text{ m}^2$  e  $M_c=1,2 \cdot 10^6 \text{ m}^2$ ) (SNIRH 2020).

Quadro 4.3– Caracterização dos subsistemas por áreas e por duração media de campanha do AHA no período de campanha 2018

	Área suscetível à entrada de água por à precipitação (m <sup>2</sup> )	Área suscetível às perdas de água por evaporação (m <sup>2</sup> )	Área beneficiada regada (km <sup>2</sup> )	Duração média da campanha (dias)
S1	158 619	154 227	27,55	172
S2	539 734	489 672	80,41	174
S3	72 302	65 927	26,75	172
S4	94 575	83 651	23,68	172
S5	19 181	15 586	5,21	152
Sistema	884 414	809 063	163,60	172

O sistema de abastecimento do AHA contempla um total de 13 estações elevatórias (EE), representadas na Figura 4.2. Estas EE podem ser classificadas em EE de entrada ou intermédias, sendo as de entrada aquelas correspondentes a captações de água em albufeira ou em linha de água e as intermédias aquelas que servem de reforço para o transporte de água entre dois pontos com desnível altimétrico diferente.

A jusante das barragens *Ma*, *Mb* e do açude *J* encontram-se instalados pequenos aproveitamentos hidroelétricos com o objetivo de aproveitar a energia potencial fornecida para produzir eletricidade.

No Quadro 4.4 apresenta-se a classificação de cada uma das EE apresentadas na Figura 4.2, sendo que no Quadro 7.7, Quadro 7.8, Quadro 7.9 e Quadro 7.10 encontram-se apresentados os volumes bombeados e as energias consumidas por cada uma destas EE nos vários períodos em análise.

Quadro 4.4– Tipos de Estações Elevatórias do AHA

Sistema	Estações elevatórias de entrada	Estações elevatórias intermédias
S1	NA	E7; E8; E9; E10;
S2	E1	E11; E12; E13
S3	E2	NA
S4	E3; E4; E5	NA
S5	E6	NA

#### 4.2.2 Balanço hídrico global e por subsistema

Para este aproveitamento a componente de água à entrada inclui o volume de água entrado por escoamento superficial. Esta subcomponente do volume de água à entrada foi calculada tanto pelo balanço hídrico como pelo balanço sequencial mensal (BSQM) (usando ETP obtidas pelas fórmulas de Thornthwaite, Turc e Penman-Monteith). O BSQM foi baseado nos dados meteorológicos das estações *M1* e *M2*, uma vez que são as estações meteorológicas que estão contidas nas áreas de influência das bacias *F* e *G* (ver Figura 4.1 e Figura 4.2)

Na Figura 4.4 apresentam-se os dados relativos a evapotranspiração potencial obtida pelos métodos de Thornthwaite, ETP(TW), Turc, ETP(Turc), e Penman-Monteith, ETP(PM). Verifica-se que o método de Thornthwaite subestima o ETP e o método de Turc sobrestima o ETP, pelo que se considera que o método mais rigoroso é o método de Penman-Monteith. Assim, calculou-se o escoamento superficial, utilizando o ETP obtido através das três formulações, porém para o balanço hídrico do sistema e dos subsistemas foi sempre considerado o ETP dado pelo método de Penman-Monteith (PM).

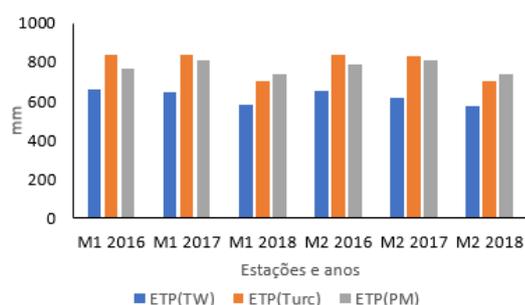


Figura 4.4 – Valores ETP calculado pelos métodos de TW, Turc e PM no período de campanha 2016, 2017 e 2018 nas estações meteorológicas M1 e M3

Para o escoamento superficial obtido com base na evapotranspiração potencial calculada a partir da fórmula de TW, o modelo foi calibrado baseado no escoamento observado na rede hidrométrica da estação *P* (SNIRH 2020) num período de 15 anos (1969 a 1984). Recorreu-se a intervalo de tempo, uma vez que a estação hidrométrica *P* só tinha dados relativos a este período. Deste modo, calculou-se o valor mensal da evapotranspiração potencial para este período, recorrendo aos dados de temperatura mensal, que depois foram utilizados para calcular a evapotranspiração de cultura e o escoamento superficial. Obtido o escoamento superficial no intervalo de 1969 a 1984, procedeu-se a calibração do modelo, que consistiu em comparar os valores obtidos com os observados na estação hidrométrica *P*. Concluiu-se que a altura máxima de saturação do solo e os coeficientes de repartição e de cultura que conduzem a um erro quadrático mínimo são 180 mm, 0,74 e 0,8, respetivamente. O resultado da calibração obtida encontra-se representado na Figura 4.5.

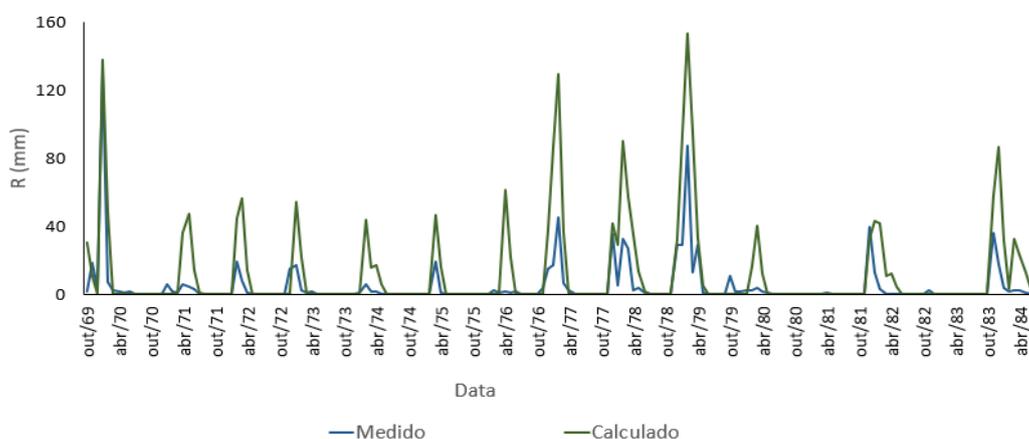


Figura 4.5 – Calibração do modelo BSQM, baseado no escoamento dado pela evapotranspiração potencial de Thornthwaite e nos dados do escoamento medidos na estação hidrométrica *P*.

Os valores do volume de escoamento superficial obtidos com base na evapotranspiração potencial, calculada a partir da fórmula de Thornthwaite, BSM(TW), e utilizando os parâmetros resultantes da calibração, são incoerentes. Obtiveram-se valores excessivamente elevados para altas taxas de precipitação e muito baixos para reduzidas taxas de precipitação, conforme o resultado obtido na Figura 4.6 (2016:  $P=214,5$  mm,  $V^{ES}=50$  hm<sup>3</sup>; 2017:  $P=58,6$  mm,  $V^{ES}=0$  hm<sup>3</sup>).

Estimou-se o volume do escoamento superficial com base na evapotranspiração potencial dada pela fórmula de Pennam-Monteith (Quadro 7.1). Uma vez que não foi possível verificar o modelo devido a falta de informação referente ao período supracitado (i.e., radiação solar incidente, humidade relativa mínima, média e máxima), considerou-se uma altura máxima de saturação de 100 mm, um coeficiente de repartição de escoamento de 0,5 e um coeficiente de cultura de 0,7. Usou-se estes valores uma vez que os

volumes de escoamento superficial obtidos com base nestes parâmetros através do BSQM(PM) e pelo balanço hídrico (BH) (ver Quadro 7.4,

Quadro 7.5 e Quadro 7.6) são semelhantes (ver Figura 4.6). Tendo em conta as limitações do ETP dado pelo método de TW, concluiu-se que o ideal seria considerar o método de PM.

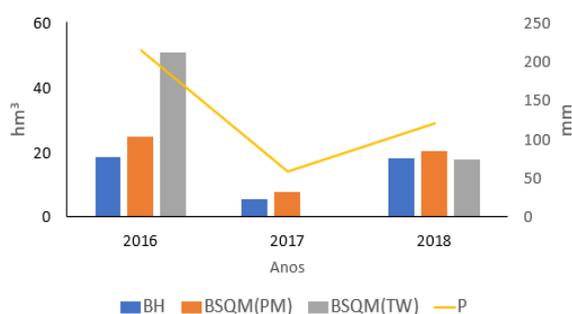


Figura 4.6 – Volume à entrada devido ao escoamento superficial AHA períodos de campanha 2016,2017 e 2018

Para a estimativa do escoamento através do balanço hídrico, dado pela equação (2.64), considerou-se que o nível nos reservatórios era constante e foram utilizados os dados referentes ao subsistema S1, designadamente o volume à entrada associado às captações e à precipitação, o volume associado ao consumo (consumo no próprio subsistema e o volume exportado para o S2, S3 e S4) e o volume associado às perdas (evaporação, perdas aparentes e reais). No que se refere às descargas nos canais, considerou-se que estes volumes voltavam para os reservatórios bem como o volume mínimo de operação. O volume de água entrado nos canais devido ao escoamento superficial foi desprezado. Os resultados obtidos confirmam que, dado a elevada precipitação verificada no período de campanha de 2016, grande parte do volume entrado no sistema nesse ano deveu-se ao escoamento superficial, ao contrário do ano de 2017 que devido à baixa precipitação esta componente não parece ter grande influência.

Com base em informações recolhidas *in situ*, verificou-se que os usos não autorizados eram quase nulos devido a supervisão diária, pelo que foi considerado que a subcomponente das perdas aparentes relativa a este usos representa 1% do consumo autorizado. Este valor foi considerado tendo em conta o inquérito desenvolvido junto aos cantoneiros.

Relativamente aos erros de medições, foram realizados ensaios aos contadores, tendo-se concluído que o erro relativo dos contadores se agrava a uma taxa de 1% ao ano. Na Figura 4.7 apresenta-se a curva de erro obtido baseado nos vários contadores ensaiados no AHA, onde se verifica que os contadores estão com erros bastante significativos.

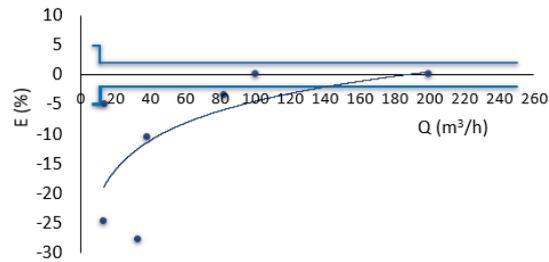


Figura 4.7 – Curva de erro obtido através dos ensaios aos contadores no AHA

Com base na idade dos contadores, definiram-se três classes de contadores existente no AHA, cujas idades e erros médios se apresentam no Quadro 4.5.

Quadro 4.5 – Classes e erros dos contadores propostos para o AHA

Classes	Idade (anos)	Intervalo de erros (%)	Erro médio (%)
Novo	0 a 5	[2, -3]	-1,0
Médio	6 a 9	[-4, -7]	-5,5
Velho	10 a 20	[-8, -18]	-13,0

De salientar que em 2018 foram reparados 56 contadores tangenciais DN 80-100, os quais apresentaram em 2017 uma média de idade de 14 anos e um erro médio de submedição na ordem dos 11%, pelo que estes contadores foram considerados novos para o período de campanha 2018, isto é, passaram a ter um erro de sobremedição de 2%.

Para o período de campanha de 2016 considerou os erros de medição referente aos contadores tangenciais eram iguais aos de 2017, pois não havia dados suficientes para os estimar.

Relativamente aos erros associados aos módulos Neyrpic, não houve ensaios, sendo os respetivos erros desconhecidos. Porém fez-se uma análise de sensibilidade com base no volume de descargas em canais no subsistema S5, sistema no qual a medição do volume faturado é feito na totalidade através destes módulos. Foram analisados vários valores de erros de medição, definidos com base nas bandas de tolerâncias estabelecidas pelos fabricantes para este tipo de equipamento (ver Figura 2.5), e avaliou-se a variação do volume de descargas com base nos erros associados a cada banda, sendo os resultados obtidos apresentados no Quadro 4.6.

Quadro 4.6 – Análise de sensibilidade aos erros associados aos módulos Neyrpic no subsistema S5

Erros de medição em Módulos Neyrpic (%)	Volume de água entrada (m³)	Perdas de água por descargas em canais (m³)
-10	5 469 632	85 988
-5	5 469 632	250 852
5	5 469 632	533 477
10	5 469 632	655 519

Considerando que a rede de abastecimento do subsistema S5 encontra-se totalmente reabilitada, e que o tempo de resposta é inferior a um dia (comprimento de rede igual a 11,86 km e serve apenas 10 regantes), é exetável ter um valor mínimo de descargas em canais neste subsistema. Assim considerou-se que o erro em módulos Neyrpic seria por submedição de 10% (constante nos três anos em análise) o que pode sobrestimar as perdas aparentes e subestimar as perdas reais. Deste modo, os erros de medição globais de contadores e módulos adotados referentes aos períodos de campanha 2016, 2017 e 2018 foram -9,56%, -9,56% e -9,54% respetivamente. Estes erros estão próximos do erro admitido para os módulos Neyrpic, na medida em que cerca de 80% do volume medido neste AH é efetuado nos módulos.

Relativamente às perdas reais, foram feitos ensaios de estanquidade em canais e em condutas. Para canais reabilitados (em bom estado), obteve-se um valor de referência na ordem dos 14 l/(m<sup>2</sup>.dia), enquanto que para os não reabilitados o valor obtido foi de 20 l/(m<sup>2</sup>.dia). Assim, considerou-se que, para canais reabilitados, o valor de repassos seria de 14 l/(m<sup>2</sup>.dia) e, para os canais não reabilitados, seria de 25 l/(m<sup>2</sup>.dia) de modo a ser coerente com os valores propostos na bibliografia, entre 25 e 50 l/(m<sup>2</sup>.dia) (Montanes 2006). Para os canais impermeabilizados com tela considerou-se que os repassos eram nulos.

Os ensaios nas condutas demonstraram que as condutas reabilitadas perdem cerca de 1,5 m<sup>3</sup>/(km.dia), enquanto que os não reabilitados perdem 6,9 m<sup>3</sup>/(km.dia). Assim, considerou-se que o valor de referência para condutas reabilitadas é de 1,5 m<sup>3</sup>/(km.dia), e para os não reabilitados é de 7 m<sup>3</sup>/(km. dia),

As principais componentes do balanço hídrico – água entrada, consumo autorizado e perdas de água obtidas ao nível do sistema e dos subsistemas são apresentadas na Figura 4.8a) e Figura 4.8b) respetivamente.

Relativamente à componente de água entrada, regista-se um ligeiro aumento em 2017, porque houve um aumento nos volumes captados devido à baixa precipitação observada neste período. Em relação ao consumo autorizado, este varia de acordo com o volume de água entrada no período de campanha, tendo este representado 57.7%, 64.8% e 61.3% do volume total da água entrado para 2016, 2017 e 2018, respetivamente. A componente de perdas de água diminuiu ligeiramente (de 2016 para 2018 diminuiu em média 14%) na sequência das reabilitações pontuais efetuadas em canais/condutas e da substituição de contadores. Entre 2016 e 2018, foram reabilitadas cerca de 6 km da rede de abastecimento (3,1 km de canais e 2,9 km de condutas) e em 2018 foram reparados 56 contadores DN 80-100. Recomenda-se que a EG possa prosseguir com a reabilitação da rede de canais e de condutas, assim como com a substituição ou reparação de contadores antigos. Relativamente aos módulos Neyrpic, por medirem a maior parte do volume que é faturado, é muito importante que sejam periodicamente limpos e mantidos ou reparados ou substituídos no caso de se apresentarem degradados.

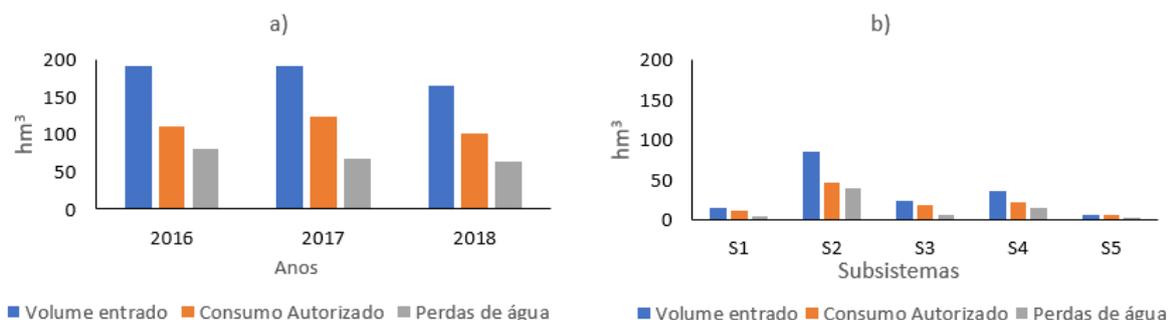


Figura 4.8 – Volume entrado, Consumo Autorizado e Perdas de água no AHA em: a) sistema período de campanha 2016, 2017 e 2018, b) subsistemas período de campanha 2018

As perdas de água neste AH são sobretudo perdas reais, que chegam a representar em média cerca de 32% do volume de água entrada no sistema (35.6% em 2016, 27.7% em 2017 e 32% em 2018 ver Quadro 7.5). Das várias subcomponentes das perdas reais, a que aparenta ter maior peso são as descargas, que representam em média 29.4% da água entrada no sistema. Estas descargas ocorrem sobretudo nos canais, isto porque para haver consumo é necessário garantir uma certa altura de água nas tomadas de água (volume mínimo). No entanto, na maioria das vezes, esta altura de água disponível nos canais é maior do que a altura necessária, implicando deste modo perdas de água por descargas. Um outro fator que poderá contribuir para as descargas é o tempo de resposta do sistema de abastecimento, isto é, para abastecer a parte terminal do sistema é preciso captar a água nas albufeiras *Mb* e *Ma*, sendo que, em média, esta é feita com um dia de antecedência. Posto isto, se durante este período de transporte da água ocorrer precipitação, os clientes não estão interessados em usar a água que eventualmente entrou no sistema, e estando já no sistema, e sem qualquer reservatório para o armazenar acabará por ser descarregado.

A Figura 4.8 b) ilustra o BH nos vários subsistemas do AHA em 2018. O subsistema S2 é o central, no qual a componente de água entrada representa cerca de 51% do volume total entrado no sistema, sendo que 45% do consumo autorizado no mesmo ano aconteceu nesse subsistema.

Através dos mapas da rede de abastecimento deste AH apresentados em 4.2.1, é possível observar que as albufeiras *Ma* e *Mb* têm um papel fundamental no abastecimento dos dois subsistemas terminais (S3 e S4), sendo que, em 2018, do volume total à entrada do S3 45.7% foi proveniente do subsistema S1 (escoamento superficial e captação) e 54.0% foi proveniente do S2 (precipitação e captação), enquanto que para o S4 42,9% do seu volume total de água à entrada foi proveniente do S1 e 50.72% do S2. Estas transferências de água de um sistema para outro são vistas como sendo um consumo não faturado medido, uma vez que os subsistemas pertencem à mesma entidade gestora e a água transferida só é faturada no sistema mais a jusante.

Esta análise setorial demonstrou que o S2 está a ter um mau desempenho, uma vez que as perdas observadas neste subsistema têm quase o mesmo peso que o consumo autorizado. Estas perdas devem-se sobretudo às descargas (rede de canal muito extenso), a erros de medição (169 contadores DN 100-150 com mais de 10 anos, sendo grande parte do volume medido em módulos). Das perdas totais observadas no sistema em 2018, 61.5% ocorreu no S2. O outro subsistema crítico é o S4 no qual as perdas de água representam 21,95% das perdas totais observadas no sistema no período de campanha de 2018, sendo estas perdas sobretudo devido a descargas terminais. O subsistema S5 foi o que apresentou o melhor desempenho no período de campanha de 2018, uma vez que os canais foram reabilitados na sua totalidade e a sua rede de abastecimento é muito pequena quando comparada com a dos outros subsistemas, o que implica a um menor tempo de resposta, evitando assim perdas de água desnecessárias, caso ocorra precipitação.

### **4.2.3 Balanço energético global e por subsistema**

#### **4.2.3.1 Análise de sensibilidade para o cálculo do balanço energético**

Nesta secção procede-se à realização de uma análise de sensibilidade do efeito do valor da cota de referência nos resultados do balanço energético. Esse efeito é analisado com base nos valores das métricas de eficiência energética E2 e E3. A verdade é que a definição da cota de referência a adotar não reúne consenso na comunidade científica, podendo adotar-se diferentes valores globais associados ao sistema – (i) a cota mínima, (ii) a cota mínima do consumo ou (iii) a cota do terreno dada pela média ponderada com o volume faturado – ou, ainda, as mesmas cotas mas relativas a cada subsistema (iv-vii). Para este efeito, avaliou-se a variação das métricas E2 e E3, utilizando diferentes cotas de referência, seleccionando como cota mais adequado aquele em que os dois indicadores dessem a mesma resposta em termos de eficiência energética.

Analisando os mapas da rede de abastecimento deste aproveitamento, nota-se que os subsistemas S1, S2, S3 e S4 estão interligados, sendo dependentes hidráulicamente, e que o S5 é independente. Quando existe esta dependência, a recomendação seria adotar como cota de referência a cota mínima absoluta, que neste caso seria 0,23 m que é a cota referente ao nível a montante da EE E5 (cf. Quadro 4.7) para os quatro primeiros subsistemas e 1,34 m, que é a cota referente a um dado trecho de canal para o S5. Porém dada a proximidade geográfica do S5 em relação aos outros subsistemas, ponderou-se utilizar a mesma cota de referência para todos os subsistemas (i.e., a cota mínima absoluta 0,23). Todavia ao comparar esta cota de referência com as cotas mínimas dos subsistemas, notou-se que esta é relativamente baixa quando comparada com a cota mínima do subsistema S1 (59,90 m), o que poderia influenciar a priorização dos

subsistemas, uma vez que quanto menor for a cota de referência maior é a energia fornecida e maior é a energia mínima requerida, implicando deste modo a um E2 máximo e um E3 mínimo.

No Quadro 4.7 apresentam-se os valores das diferentes cotas acima referidas para os subsistemas do AHA.

Quadro 4.7– Cotas mínimas dos subsistemas AHA

	Cota mínima (m)	Cota mínima de consumo (m)	Cota média das áreas regadas ponderada pelo volume faturado (m)
S1	59,90	59,90	76,53
S2	12,00	17,77	24,08
S3	1,30	6,25	6,25
S4	0,23	3,06	4,27
S5	1,34	4,45	4,45
Sistema	0,23	3,06	21,60

Os resultados obtidos em cada subsistema para os indicadores E2 e E3 quando se utilizam diferentes valores de cotas de referência são apresentados na Figura 4.9. Esta mostra que a única cota que permite obter a mesma resposta nos dois indicadores é a *cota mínima do consumo de cada subsistema*. O subsistema S1 é o que apresenta maior energia em excesso por unidade de volume de consumo autorizado e maior energia em excesso em relação a energia mínima requerida para garantir o consumo. Para esta cota de referência, a ordem de priorização obtidas pelos dois indicadores E2 e E3 é S1 (mais ineficiente), S2, S4, S5, S3 (mais eficiente).

De salientar que a priorização obtida pelo E2 com base nas cotas mínima do sistema, mínima do consumo do sistema e mínima do consumo de cada subsistema apontam para a mesma direção; contudo, os resultados do indicador E2 não são coerentes com os do E3, verificando-se que os valores do indicador E3 são mais sensíveis ao valor da cota de referência considerada, nem sempre permitindo a comparação de sistemas entre si.

Em suma, para a aplicação do BE ao nível do sistema deverá ser utilizada a cota mínima absoluta (0,23 m), pois para além de dar a mesma resposta que a cota mínima do consumo do sistema (3,06 m) permite que todas as componentes do BE sejam positivas, facilitando assim a sua interpretação. Relativamente a análise comparativa dos diferentes subsistemas deverá ser utilizada a cota mínima de consumo de cada um destes.

Os resultados do balanço energético a seguir apresentados serão baseados nestes pressupostos. A análise do BE é efetuada ao nível dos subsistemas, pelo que a soma da energia total fornecida nos vários subsistemas não coincidirá com a energia total fornecida ao sistema porque as cotas de referência adotadas para o cálculo do balanço no sistema e subsistemas são diferentes.

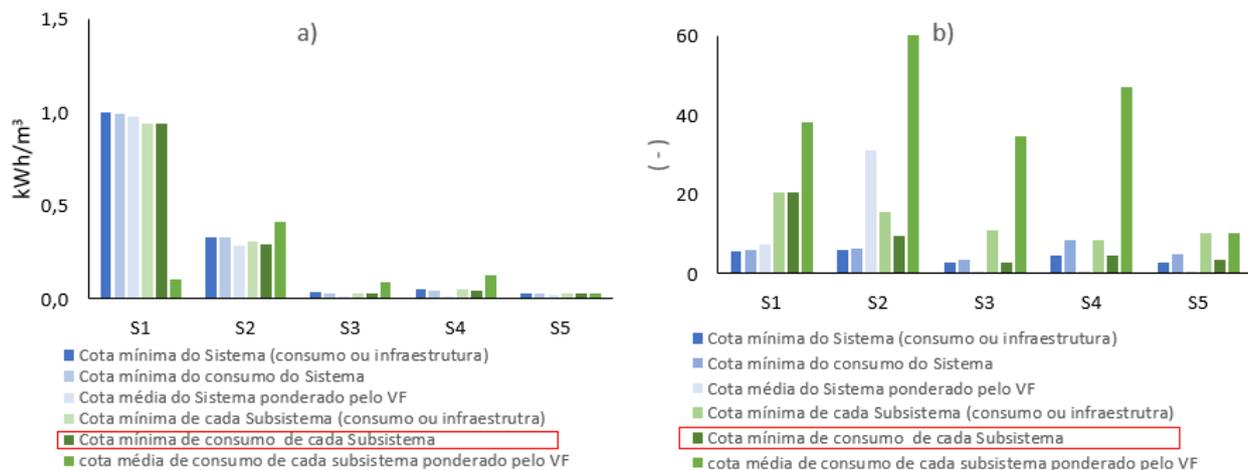


Figura 4.9 – Análise de sensibilidade dos indicadores relativamente a variação da cota de referência no AHA: a) E2 b) E3

No que diz respeito a transferência de energias foram testadas as abordagens propostas no ponto 3.3.4 para o aproveitamento A:

*Abordagem 1:* Considerou-se que a energia transferida era toda gravítica, sendo a energia exportada, importada e a que fica no subsistema que exporta volume dada pelas equações (3.21), (3.14) e (3.27) respetivamente.

*Abordagem 2:* Considerou-se que a energia exportada e importada provém da energia gravítica e de bombeamento ponderada pela energia gravítica e de bombeamento que poderá ser exportada, dadas pelas equações (3.29) e (3.30) respetivamente. A energia que fica no subsistema que exporta volume por sua vez é dada pela equação (3.27). Posto isto, para esta abordagem foi considerada que a energia importada no S2, S3 e S4 (vinda do S1) era na sua totalidade gravítica, isto porque no S1 as EE são todas intermédias e elevam água do rio para os canais, o que implica que este subsistema só poderá exportar energia gravítica associada aos volumes referentes às captações nas albufeiras, escoamento superficial e energia associada a precipitação no açude  $k$ . Não obstante, para o S2 foi considerado que este poderia exportar as energias gravíticas associadas aos volumes referentes às captações e precipitações, bem como a energia de bombeamento que é fornecida pela estação elevatória E13 que se situa a cerca de 0,5 km dos pontos de entrega do S3 e S4.

Os resultados para ambas abordagens referentes a fração de energia gravítica e de bombeamento fornecida para os subsistemas S3 e S4 encontram-se na Figura 4.10.

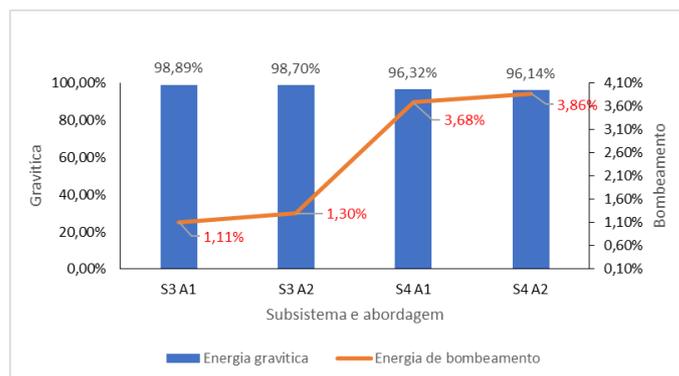


Figura 4.10 – Fração de energia gravítica e de bombeamento fornecida aos subsistemas S3 e S4 através da abordagem 1 (A1) e abordagem 2 (A2)

Para este caso de estudo a *Abordagem 2* é a que faz mais sentido, visto que:

Na *Abordagem 1* considera-se que a energia exportada para os subsistemas S3 e S4 é exclusivamente gravítica, o que não é verídico, pois a estação elevatória E13 serve de reforço para abastecer estes dois subsistemas terminais. Embora a proporção de energia fornecida por bombeamento seja reduzida em S3 e S4, esta abordagem permite entender o peso da energia elétrica ao longo de sistemas dependentes entre si. Por vezes existem subsistemas que não possuem qualquer estação elevatória, mas cujo percurso hidráulico até esse sistema envolveu sucessivos bombeamentos e essa “pegada energética” deve ser avaliada. Se os subsistemas S3 e S4 não existissem é provável que o volume bombeado e a energia consumida por esta EE fosse menor. Sendo assim os resultados do balanço energético a seguir apresentados são baseadas na *Abordagem 2*.

#### 4.2.3.2 Resultados balanço energético global e por subsistemas

Para a realização do balanço energético do sistema global, considerou-se a cota de referência correspondente à mínima absoluta do sistema, 0,23 m, que corresponde ao nível da água a montante da estação elevatória E5. Para a realização dos balanços energéticos dos subsistemas, foram utilizadas as cotas mínimas de consumo referente a cada um dos mesmos. Considerou-se a pressão mínima,  $p_{\min}/\gamma$ , para garantir consumo aos regantes igual a 1 m c.a..

Apresentam-se na Figura 4.11 as componentes de energia fornecida (gravítica e de bombeamento) e a componente de energia recuperada no sistema global e para cada um dos subsistemas.

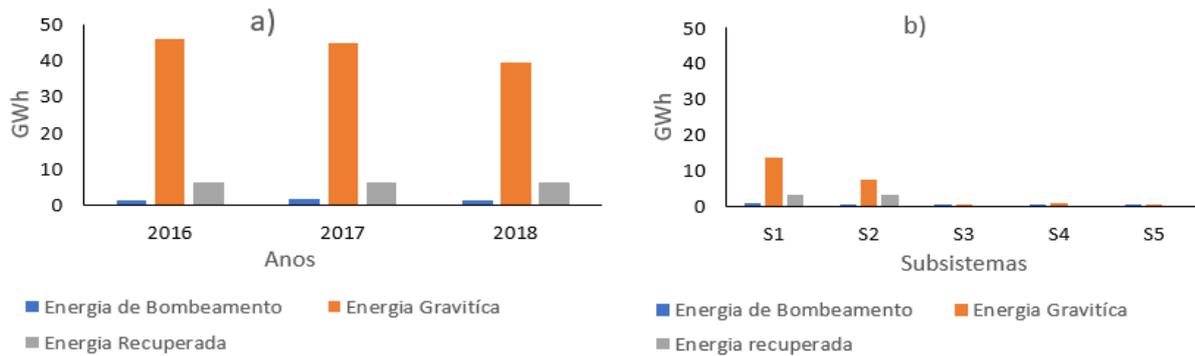


Figura 4.11– Energia fornecida gravítica, energia fornecida por bombeamento e energia recuperada no AHA nos períodos de campanha 2016, 2017 e 2018 ao nível do a) sistema global e dos b) subsistemas S1 a S5 no período de campanha 2018

O sistema tem uma componente muito significativa de energia gravítica (da ordem dos 95% ver Quadro 7.11) porque o nível altimétrico diminui de montante para a jusante. Ao longo dos três anos, esta componente gravítica varia com o volume captado nas albufeiras e bombeado nas estações elevatórias de entrada, com o volume de precipitação e com o volume de escoamento superficial. De salientar as cotas altimétricas e os níveis a montante das EE de entrada utilizados para a estimativa da energia gravítica associada foram consideradas constantes para os diferentes períodos de campanha, exceto os níveis nas albufeiras que foram atualizadas de acordo com os dados disponibilizados pela SNIRH nos diferentes anos.

Na mesma figura (Figura 4.11), encontra-se representada a componente da energia recuperada nas centrais hidroelétricas localizadas a jusante das albufeiras *Ma* e *Mb* e do açude *F*. Esta representou em média 13,6% da energia fornecida nos três anos de análise.

Apresenta-se na Figura 4.12 as duas principais subcomponentes do balanço energético – a energia associada ao consumo autorizado e a energia associado às perdas de água – referente ao sistema e os subsistemas para os diferentes períodos em análise.

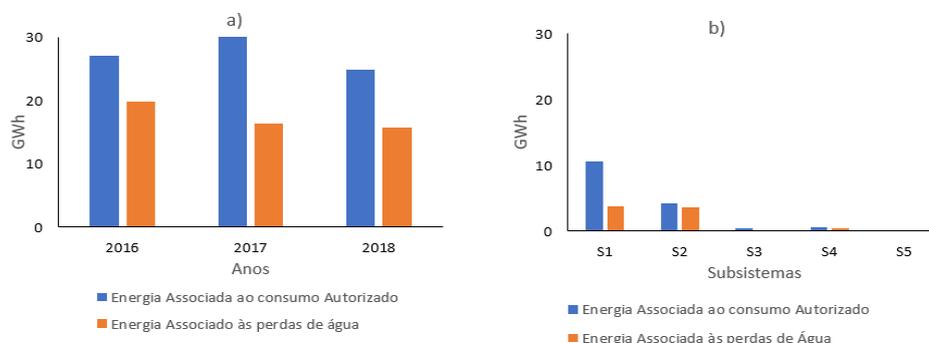


Figura 4.12– Energia associada ao consumo autorizado e a perdas de água AHA nos períodos de campanha 2016, 2017 e 2018: a) Sistema b) Subsistemas no período de campanha 2018

Apresenta-se na Figura 4.12 a) o balanço energético no sistema ao longo dos três anos em análise. Este balanço reflete o BH apresentado anteriormente: em 2016, 57,69% da energia total fornecida foi usada para garantir o consumo autorizado e 42,31% foi desperdiçada em perdas de água; em 2017, 64,75% da energia total fornecida usada para o consumo autorizado e 35,25% foi desperdiçada em perdas de água; e em 2018, 61,31% da energia total fornecida foi utilizada para garantir o consumo e 38,69% foi perdida. Estes resultados demonstram a importância da diminuição das perdas de água para a melhoria da eficiência energética do sistema, na medida em que cerca de 1/3 da energia total fornecida foi perdida em fugas, repassos e descargas.

Ao nível dos subsistemas, tal como no BH, os subsistemas S2 e S4 mostraram ser energeticamente ineficientes, face ao grande volume de perdas de água observadas nestes subsistemas. No S2 apenas 53,94% da energia fornecida foi utilizada para garantir o consumo autorizado, o que significa que quase metade da energia fornecida foi perdida. Por outro lado, o subsistema S5 revelou ser o mais eficiente ao nível energético, uma vez que 90,77% energia total fornecida foi utilizada para garantir o consumo autorizado.

Os resultados apresentados na Figura 4.13 demonstram que a ineficiência no sistema deste AH deve-se a problemas no traçado/operação e às perdas de água, as quais contribuíram para dissipação de 60% da energia fornecida no período de campanha de 2018. Esta dissipação ocorre sobretudo no S1 e S2, em que no S1 40% da energia fornecida é dissipada na rede e no S2 30% da energia foi dissipada devido a perdas de água. De frisar que da energia total fornecida para este AH em 2018 apenas 15% foi utilizada para garantir o consumo autorizado faturado, sendo que a análise setorial demonstrou que a energia fornecida ao subsistema S1 é 20 vezes superior à energia necessária para garantir o consumo (E3 Quadro 4.9), fato este explicado com base na Figura 4.13, (da energia total fornecida apenas 4% foi utilizada para garantir o consumo), mostrando deste modo grande potencial de recuperação de energia em excesso.

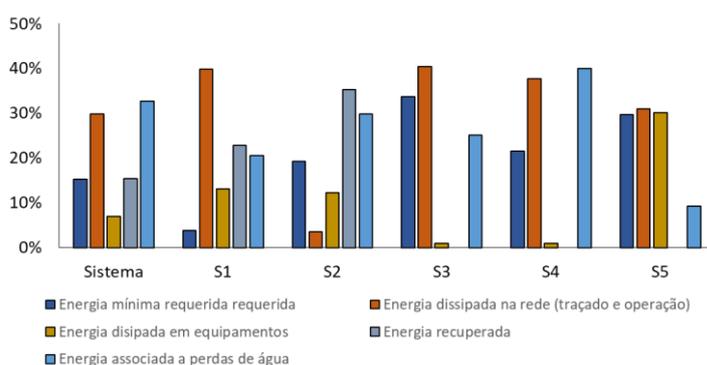


Figura 4.13 – Distribuição percentual da energia fornecida ao sistema e aos subsistemas no período de campanha 2018

#### 4.2.4 Análise global e priorização de subsistemas

Para analisar o desempenho do AH em estudo foram utilizados vários indicadores de eficiência hídrica e energética, com o objetivo de diagnosticar os principais problemas do sistema ao longo dos três anos (ver Quadro 4.8) e dos subsistemas relativamente ao período de campanha de 2018 (ver Quadro 4.9).

Quadro 4.8– Indicadores de desempenho período de campanha 2016, 2017 e 2018 AHA

	Fi46 (%)	WR1 (%)	Op28 <sub>b</sub> [m <sup>3</sup> /(km.dia)]	E2 (kWh/m <sup>3</sup> )	E3 (-)	PEE (%)
2016	42,59	35,64	1037,31	0,311	6,046	46,116
2017	35,53	27,72	875,46	0,261	4,965	51,322
2018	39,02	31,57	750,52	0,280	5,574	46,755

A água não faturada, Fi46, em 2017 foi baixa quando comparada com os outros dois anos. Isto deve-se à pouca precipitação verificada neste ano que poderá ter influenciado o volume de descargas em canais, na medida em que neste ano esta subcomponente foi menor, implicando uma redução nas perdas reais e, consequentemente, dos indicadores WR1 e Op28<sub>b</sub>. A redução gradual dos valores obtidos para este último indicador para os três anos deve-se sobretudo a redução das perdas de água, isto porque foram levados a cabo intervenções de reabilitação em canais, condutas e contadores. Relativamente ao E2, este é maior em 2016, realçando desde modo o potencial de redução de consumo energético por cada m<sup>3</sup> do consumo autorizado. Isto deve-se sobretudo a baixa taxa de recuperação de energia neste ano o que levou ao aumento da energia fornecida, e consequentemente um maior E3. Por outro lado 2017 apresentou os valores mais baixos de E2 e E3. Isto porque foi o ano com maior consumo autorizado, e comparado com os outros anos não foi preciso muita energia, visto que houve maior recuperação de energia. Relativamente a eficiência das bombas, PEE, não se tira nenhuma conclusão ao longo dos três anos, na medida em que as eficiências apresentadas nos três anos, poderá estar a ser subestimada, visto que poderá haver incongruências nos volumes bombeados. Isto deve-se ao fato de não haver medições do volume (sobretudo nas EE intermédias), sendo assim o volume é estimado considerando que a bomba está a operar no caudal nominal. Um outro fator que poderá estar a contribuir, são as alturas de elevação, visto que estas foram consideradas como sendo o desnível geométrico a montante, desprezando assim as possíveis perdas de cargas, implicando a sobrestimação da energia útil.

Os indicadores de desempenho ao nível dos subsistemas (Quadro 4.9) evidenciaram que os subsistemas com maior percentagem de água não faturada são aqueles que apresentam maiores perdas. Trata-se dos subsistemas S2 e S4 onde as perdas de água representaram respetivamente 61,5% e 21,95% das perdas totais no sistema em 2018. O subsistema com menor percentagem de água não faturado é o S5, no qual apenas 9,29% da água entrada não foi faturada. Consequentemente, o subsistema com maior ineficiência

no uso dos recursos hídricos é o S2 seguido pelo S4, enquanto que o S5 mostra ser mais eficiente. Para o indicador Op28<sub>b</sub>, os subsistemas S2 e S4 são os piores, apresentando 1088 e 1339m<sup>3</sup>/(km.dia), respetivamente.

Relativamente a eficiência energética a nível dos subsistemas (Quadro 4.9), o S1 apresentou um maior excesso de energia em relação a energia mínima (E3=20,51), tendo apresentado grande potencial de redução da energia necessária para garantir o consumo autorizado (E2=0,94 kWh/m<sup>3</sup>). Relativamente a eficiência das bombas, PEE, os resultados demonstram que as bombas do subsistema S4 são as mais eficientes (PEE=65,2%), sendo os do subsistema S3 os mais ineficientes (PEE=19,5%), visto que as bombas instaladas neste subsistema têm em média 25 anos de idade e nunca chegaram a ser reabilitados.

Quadro 4.9– Avaliação dos subsistemas do AHA relativo aos indicadores utilizados para priorização

	<i>Fi46</i> (%)	<i>IRep</i> [l/(m <sup>2</sup> .dia)]	<i>IDesc</i> (%)	<i>Op24</i> [m <sup>3</sup> /(km.dia)]	<i>WRI</i> (%)	<i>E2</i> (kWh/m <sup>3</sup> )	<i>E3</i> (-)	<i>PEE</i> (%)
<b>S1</b>	26,8	20,6	15,1	7,0	17,2	0,938	20,5	47,9
<b>S2</b>	46,6	22,3	36,3	3,0	39,3	0,292	5,3	48,9
<b>S3</b>	25,2	19,6	15,1	3,6	16,5	0,026	3,0	19,5
<b>S4</b>	40,2	24,1	32,5	2,0	33,9	0,045	4,7	65,2
<b>S5</b>	9,3	14,0	1,6	6,7	2,4	0,027	3,4	29,8

De acordo com a metodologia apresentada em 3.3.5 para priorização de subsistemas, utilizou-se alguns indicadores apresentados no Quadro 4.9, nomeadamente *o Fi46, IRep, IDesc, Op24, WRI, E3 e PEE*. Estes indicadores foram normalizados de modo a poder comparar indicadores diferentes, visto que estes apresentam uma variedade de unidades. O resultado da normalização encontra-se no Quadro 4.10.

Quadro 4.10 – Avaliação dos subsistemas relativo aos indicadores (normalizados) utilizados para priorização através da análise hierárquica

	<i>Fi46</i>	<i>IRep</i>	<i>IDesc</i>	<i>Op24</i>	<i>WRI</i>	<i>E3</i>	<i>PEE</i>
<b>S1</b>	4,90	5,12	7,21	8,34	4,45	8,28	7,09
<b>S2</b>	7,36	5,47	8,95	2,97	7,38	7,46	7,04
<b>S3</b>	4,69	4,92	7,22	4,64	4,29	4,95	8,22
<b>S4</b>	7,16	5,83	8,63	2,35	7,24	7,09	4,31
<b>S5</b>	1,93	2,87	1,42	8,14	1,32	5,74	7,81

● Bom ● Mediano ● Insatisfatório

Os valores apresentados no Quadro 4.10 correspondem aos pesos utilizados para a construção da matriz de impacto, matriz esta que posteriormente foi normalizada.

Considerando que os critérios tinham o mesmo peso na priorização, obteve-se os resultados apresentados no Quadro 4.11.

Quadro 4.11– Resultado da priorização de subsistemas utilizando a análise hierárquica. AHA

Subsistema	Preferência	Priorização
S5	0,141	5
S3	0,195	4
S4	0,212	3
S1	0,220	2
S2	0,233	1

Com base nos resultados apresentados no Quadro 4.11, concluiu-se que o S2 é o sistema prioritário, uma vez que apresentou o pior desempenho, fato este explicado pelo valor da preferência em relação aos outros subsistemas (0,233). Para mais detalhes consultar a Figura 7.3, Figura 7.4 e o Quadro 7.13.

Os resultados obtidos através da aplicação do software AWARE-P, relativamente aos mesmos subsistemas, apresentados na Figura 4.14, são similares aos obtidos pela análise hierárquica. De realçar que se considerou, nesta abordagem, que os critérios (i.e., indicadores) teriam o mesmo peso, representados simbolicamente pelos círculos todos da mesma dimensão, conforme a Figura 4.14.

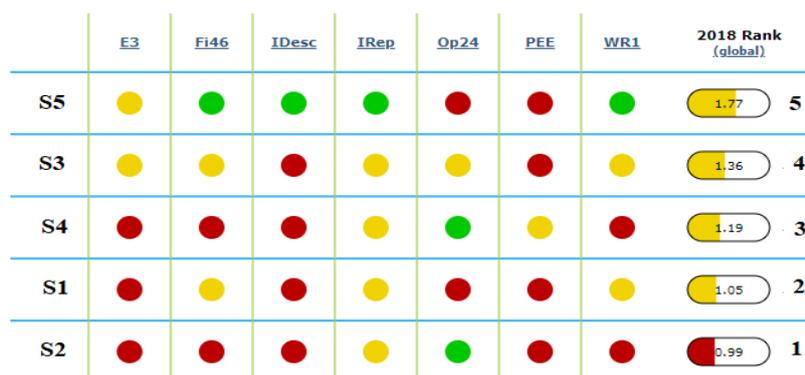


Figura 4.14 – Resultado da priorização de subsistemas utilizando média ponderada de indicadores normalizados recorrendo ao software AWARE-P para o AHA

Baseado nas duas metodologias analisadas, concluiu-se que o subsistema S2 é o que apresenta o pior desempenho, sendo particularmente relevante a realização de intervenções de redução de perdas de água e de melhoria de eficiência energética.

No Quadro 4.12 encontram-se quantificadas estas ineficiências em termos de desempenho (perdas de água e consumo de energia) e os respetivos custos associados para o período de campanha de 2018 no subsistema S2 (prioritário). Os custos foram calculados com base no preço de aquisição da água, e no preço da compra e venda de energia. Nota-se que as componentes de perdas apresentaram grande prejuízo à entidade gestora, uma vez que o investimento feito na compra do volume de água que foi perdido não

foi recuperado, sendo este prejuízo acrescido pela compra de energia utilizada para a captação do mesmo volume.

Por outro lado, vê-se que as turbinas instaladas neste subsistema recuperaram apenas 366 MWh durante todo o período de campanha, energia esta que foi vendida contribuindo assim para obter um benefício associado ao aproveitamento. Este poderia ser maior caso as turbinas estivessem a operar com uma eficiência mais elevada do que a atual ( $\eta = 59,7\%$ ).

Quadro 4.12– Componentes de perdas de água e de ineficiência energética nos subsistemas S2 no período de campanha de 2018 com estimativa dos custos associados (m<sup>3</sup>, €)

Componentes		Valor período de campanha	Média diária (valor/dia)	Custos associados (€/ campanha)
Perdas de água	Repastos (m <sup>3</sup> )	2 444 910,76	14 033,70	- 29 338,93
	Fugas em condutas (m <sup>3</sup> )	79 540,31	456,56	- 954,48
	Descargas em canais (m <sup>3</sup> )	28 528 389,61	163 751,96	- 342 340,68
	Erros de medição (m <sup>3</sup> )	4 880 982,31	28 016,67	- 58 571,79
Energia dissipada e recuperada	Energia recuperada (kWh)	2 994 358,00	17 187,51	269 492,22
	Energia elétrica bombeamento (kWh)	366 154,96	2 101,72	- 329 539,47
	Energia dissipada na rede (kWh)	668 558	3 837,50	- 601 702,61
	Energia associada às perdas (kWh)	2 243 724	12 878,90	- 2 019 351,68
	Energia dissipada em equipamentos (kWh)	1 041 098,90	5 975,87	- 936 989,01

#### 4.2.5 Priorização de soluções de intervenção

Uma vez identificado o subsistema prioritário, S2, procedeu-se à análise de diferentes intervenções para a melhoria da eficiência hídrica e energética. Apresentam-se no Quadro 4.13 várias soluções de intervenção propostas, com os respetivos pressupostos e impactos esperados. Estas soluções foram concebidas com base no desempenho apresentado pelo subsistema S2 no ano de 2018. A solução, A1 (reabilitação do canal principal 47,12 km entre o açude *k* e os subsistemas terminais S3 e S4), atende aos resultados do balanço hídrico que demonstraram que o subsistema S2 perdeu cerca de 2,5 hm<sup>3</sup> de água referente aos repastos e 29 hm<sup>3</sup> devido a descargas. Com esta solução, a EG estima ser possível diminuir os repastos no subsistema em 30% e contribuir para otimização de operação, que poderá implicar também a uma redução das descargas em 40%. A solução, A2 (substituição de 149 contadores), decorre deste subsistema ter 149 contadores DN 100-150 com mais de 10 anos e com erros elevados (em média - 12,45%). Estima-se que a substituição destes contadores aumente, o consumo faturado em 2,10% no início do horizonte de projeto. A solução, A3 (reabilitação de turbinas), decorre de as turbinas deste subsistema terem, atualmente, eficiências muito baixas e com a aplicação desta solução será possível aumentar a energia recuperada em 25%. Analisaram-se, também, várias combinações destas soluções – A1+A2 e A1+A2+A3 – numa expectativa de que a combinação de duas ou três apresentasse melhores resultados.

Quadro 4.13 – Propostas de intervenções a melhoria do desempenho do subsistema prioritário

Soluções	Propostas	Pressupostos	Impacto
A0	Situação <i>Statu Quo</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– As perdas aparentes aumentam devido aos erros dos contadores, implicando a diminuição do consumo autorizado.</li> <li>– A eficiência das bombas e das turbinas decai à taxa de 1% ao ano.</li> <li>– O volume de água entrado no sistema é constante ao longo do horizonte de projeto.</li> <li>– A taxa de repassos e o volume de descargas mantém-se ao longo do tempo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Redução do consumo autorizado por aumento das perdas aparentes.</li> <li>– Aumento dos gastos operacionais com energia por diminuição de eficiência nas estações elevatórias.</li> <li>– Redução na venda de energia por diminuição de eficiência nas turbinas.</li> </ul>
A1	Reabilitação do canal principal	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Redução das perdas reais (permitirá a redução dos repassos e otimização do controlo que irá reduzir 40% das descargas).</li> <li>– Redução do volume entrado.</li> <li>– Redução do consumo de energia.</li> <li>– A eficiência das bombas e das turbinas decai à taxa de 1% ao ano.</li> <li>– As perdas aparentes aumentam devido aos erros dos contadores implicando a diminuição do consumo autorizado.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Redução dos gastos operacionais com energia e dos gastos com manutenção</li> <li>– Redução consumo faturado.</li> </ul>
A2	Substituição dos contadores DN100-150 com mais de 10 anos	<ul style="list-style-type: none"> <li>– As perdas aparentes diminuem e o consumo faturado aumenta.</li> <li>– A eficiência das bombas e das turbinas decai à taxa de 1% ao ano.</li> <li>– o Volume de água entrado no sistema é constante ao longo do horizonte de projeto.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Redução das perdas aparentes.</li> <li>– Redução dos custos operacionais (consumo faturado aumenta, apesar do consumo de energia aumentar).</li> <li>– Redução na venda de energia.</li> </ul>
A3	Reabilitação de turbinas	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Com a reabilitação a eficiência passa a ser 85% no ano inicial e decai à taxa de 1% ao ano.</li> <li>– Aumento da energia recuperada.</li> <li>– Aumento das perdas aparentes e diminuição do consumo faturado.</li> <li>– A eficiência das bombas degrada 1% ao ano.</li> <li>– Aumento do consumo de energia.</li> <li>– Aumento das perdas aparentes, e diminuição do consumo faturado.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Custos operacionais aumenta (compra de água e energia).</li> <li>– Aumento de venda de energia.</li> <li>– Redução consumo faturado.</li> </ul>

#### 4.2.5.1 Priorização de soluções através da análise de desempenho

Para avaliar o desempenho do subsistema após a implementação das intervenções apresentadas no Quadro 4.13, é necessário calcular os balanços hídricos e energéticos para cada uma das soluções e os respetivos indicadores de eficiência após a implementação das mesmas, considerando um horizonte de projeto de 10 anos. Para o efeito, calcularam-se os valores dos indicadores para cada ano de avaliação e priorizaram-se as soluções em termos de desempenho baseado no *software* AWARE-P e nos pressupostos apresentados no Quadro 4.13. Considerou-se o ano inicial 2019 e que as condições climatéricas eram constantes ao longo dos 10 anos e iguais às de 2018. Calculados os indicadores de desempenho para o ano de referência e para o horizonte de projeto (2019 a 2029), com base nos valores das métricas de desempenho apresentadas no Quadro 3.4, foi possível priorizar as soluções. Apresentam-se os resultados obtidos para as métricas no início e fim do horizonte de projeto e a priorização no Quadro 4.14 e na Figura 4.15

respetivamente. De salientar que se utilizaram menos métricas de desempenho do que na priorização dos subsistemas, visto que as remanescentes não são influenciadas pelas soluções de intervenção propostas, sendo iguais para todas as soluções.

Quadro 4.14 -Resultado indicadores de desempenho utilizados para priorização de soluções

	2019				2029			
	Fi46 (%)	IRep [l/(m <sup>2</sup> .dia)]	IDesc (%)	E3 (-)	Fi46 (%)	IRep [l/(m <sup>2</sup> .dia)]	IDesc (%)	E3 (-)
A0	46,74	22,3	36,35	5,36	48,61	22,3	36,35	5,94
A1	36,21	6,43	26,22	4,55	38,45	6,43	26,22	5,1
A2	45,46	22,3	36,35	5,24	47,25	22,3	36,35	5,79
A3	46,74	22,3	36,35	4,24	48,61	22,3	36,35	4,94
A1+A2	34,68	6,43	26,22	4,44	36,82	6,43	26,22	4,96
A1+A2+A3	34,68	6,43	26,22	4,17	36,82	6,43	26,22	4,84



Figura 4.15- Resultado da priorização de soluções utilizando média ponderada de indicadores normalizados recorrendo ao software AWARE-P

Esta priorização mostrou que a combinação das três soluções propostas é a melhor solução. Apesar de não ser possível fazer com que todos os indicadores passem para o nível *Bom* (verde), é notório que a combinação destas soluções melhora substancialmente o desempenho deste subsistema, pois permite diminuir as perdas de água em 38%, aumentar a recuperação de energia em 25% e aumentar o consumo faturado medido em 2,10%. Por outro lado, verifica-se que se não for feita nenhuma reabilitação neste subsistema em 2029 o desempenho será crítico (A0) (ver Quadro 7.14, Quadro 7.15, Quadro 7.16, Quadro 7.17, Quadro 7.18 e Quadro 7.19)

#### 4.2.5.2 Priorização de soluções através da análise económica

Nesta secção avalia-se a viabilidade económica das diferentes soluções propostas tendo por base três indicadores económicos: o valor atualizado líquido (VAL), a taxa interna de rentabilidade (TIR) e o período de retorno do investimento (PRI).

Considerou-se como gastos operacionais de cada alternativa, os custos associados às perdas de água e ao bombeamento. Os proveitos de cada solução foram assumidos iguais às poupanças associadas ao investimento por comparação com a solução Statu Quo (A0). Para a solução Statu Quo (A0), os proveitos são nulos, mas para as restantes soluções estes são iguais aos gastos operacionais desta solução. Desta forma, calculou-se o *cash-flow anual* deduzindo aos proveitos os gastos operacionais e considerando o investimento concentrado em 2019 e o *cash-flow acumulado* somando os valores do *cash-flow anual*, não considerando taxa de atualização. Apresenta-se na Figura 4.16 a evolução temporal do *cash-flow anual* e do *cash flow acumulado* para as várias soluções de intervenção analisadas.

Das várias soluções e combinações de soluções analisadas, a A2 (substituição de contadores) é a que tem um período de retorno imediato (2022), enquanto que, para as outras soluções (A1, A3, A1+A2, A1+A2+A3), 10 anos não é suficiente para recuperar o investimento. Porém verifica-se que, ao contrário da solução A0, o *cash flow acumulado* das restantes soluções aumenta lentamente, o que indica o investimento efetuado na implementação destas será recuperado num futuro longínquo. A solução A2 (substituição de contadores) poderá ser economicamente viável a curto prazo, pois requer um investimento reduzido (35.760 €), sendo que ao final de 10 anos tem um *cash-flow acumulado* de 112.137,32 €. A solução A0 ao fim de 10 anos evidencia que a entidade gestora deste AH poderá ter um prejuízo de ca. 8M€.

Atendendo aos resultados da priorização das soluções propostas, conclui-se que ao nível do desempenho a combinação das soluções A1+A2+A3 é a mais promissora pois permite melhorar o desempenho do subsistema S2 em diferentes dimensões, na medida em que permite a diminuição das perdas de água, o aumento do consumo autorizado (consumo faturado) e o aumento da energia recuperada; contudo, a sua implementação requer um investimento mais concentrado, sendo que, em 10 anos, não é possível recuperar o investimento (16 M€). Por outro lado, a solução A2 demonstrou ser economicamente viável, porém não se traduz em significativas melhorias de desempenho. Assim apesar da combinação das três soluções requerer maior investimento, deverá ser a solução a ser implementada, na medida em que permite diminuir substancialmente as perdas de água, aumentar o consumo faturado e a energia recuperada, havendo sempre a possibilidade de recuperar o investimento a longo prazo.

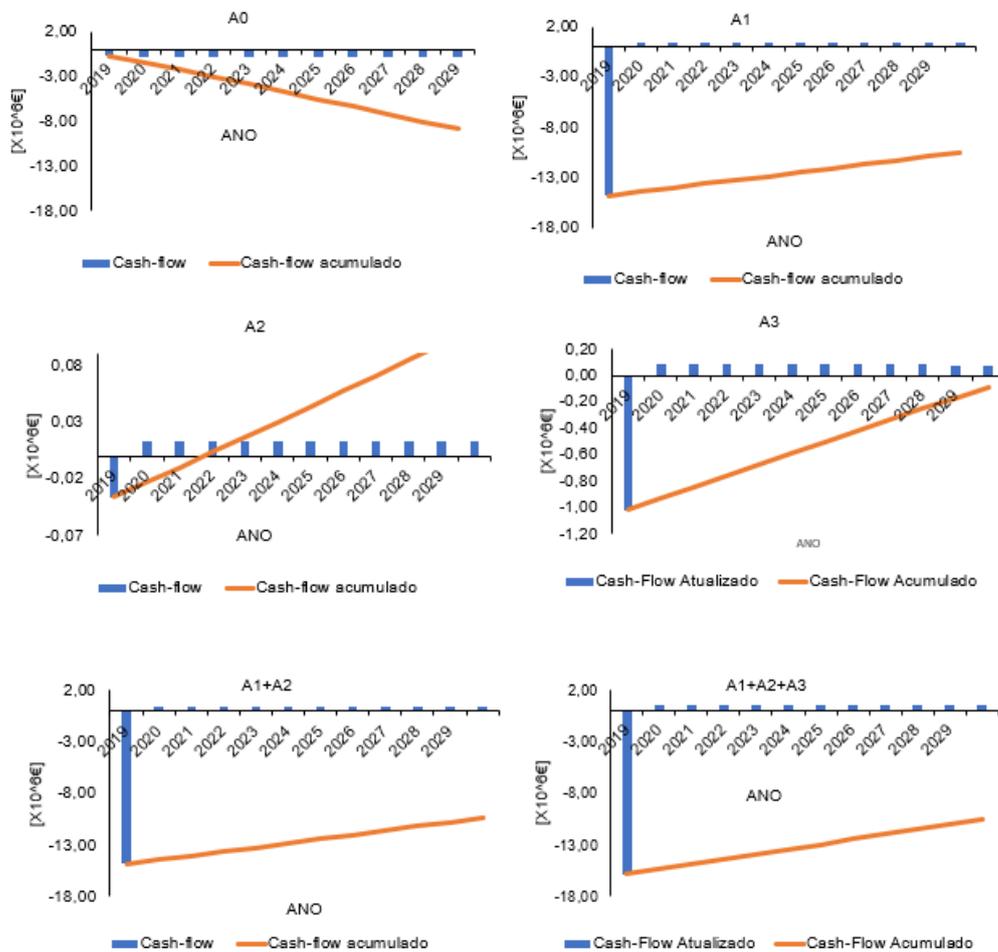


Figura 4.16– Resultado análise económica

Apresenta-se no Quadro 4.15 os indicadores económicos para cada solução. Apenas a solução A2 é economicamente viável num horizonte de 10 anos.

Quadro 4.15 – Indicadores económicos calculados para as diferentes soluções

Solução	VAL (* $10^6$ €)	TIR (%)	PRI (anos)
A1	-12,21	-	38
A2	0,05	36	3
A3	-0,46	-	12
A1+A2	-12,16	-	36
A1+A2+A3	-12,65	-	33

### 4.3 Aproveitamento hidroagrícola B

#### 4.3.1 Caracterização do aproveitamento

O aproveitamento hidroagrícola B, AHB, é servido pela barragem *H*, que por sua vez está inserida na bacia hidrográfica *P*. O seu sistema de abastecimento é feito na sua totalidade em pressão (em condutas). Está dividida em dois subsistemas, o C1 e o C2 (Quadro 4.16), e tem uma estação elevatória a jusante da barragem que eleva água para estes dois subsistemas. Para a sua caracterização climática é usada a estação agrometeorológica *W*. Contrariamente ao aproveitamento AHA, o sistema de abastecimento deste aproveitamento está todo o ano em serviço.

Quadro 4.16 – Caracterização rede de abastecimento AHB no período de campanha 2018

Subsistemas	Extensão rede de condutas (km)	
	Reabilitada	Não Reabilitada
C1	0,00	19,35
C2	21,90	0,00
Sistema	21,90	19,35

O AHB contabiliza um total de 41,25 km de rede de condutas, sendo que cerca de 53% encontra-se reabilitada.

Apesar do sistema ser em pressão, será feita uma análise meteorológica neste aproveitamento com o intuito de relacionar o consumo de água para a rega nos diferentes períodos de campanha com a ocorrência de precipitação. Mostra-se na Figura 4.17 que o ano de 2017 foi o ano mais seco, sendo de esperar que o consumo neste ano seja superior aos outros anos.

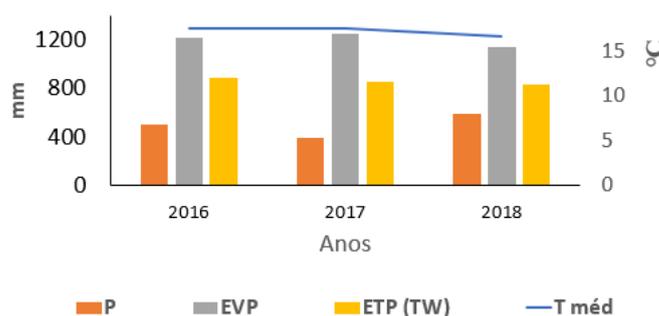


Figura 4.17– Caracterização climática AHB período de campanha 2016, 2017 e 2018

#### 4.3.2 Balanço hídrico global e por subsistema

Tendo em conta que o escoamento no AHB é em pressão, algumas componentes do BH foram excluídas, nomeadamente o volume de água entrado por precipitação, o volume perdido devido a evaporação e o volume de repassos e descargas, face à inexistência de reservatórios intermédios e de canais.

Os resultados referentes ao volume entrado, consumo autorizado e perdas de água relativos ao período de análise no sistema e nos subsistemas estão representadas na Figura 4.18.

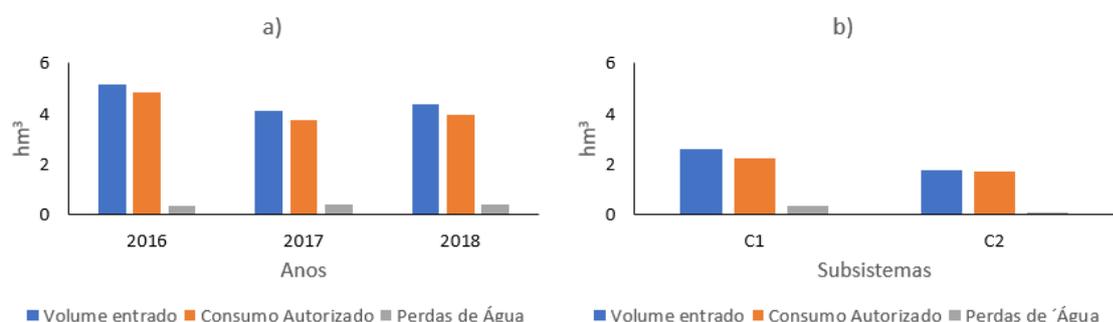


Figura 4.18 – Volume entrado, Consumo Autorizado e Perdas de água no AHB nos períodos de campanha 2016, 2017 e 2018: a) Sistema, b) Subsistemas período de campanha 2018

A Figura 4.18a) mostra as três principais componentes do BH. Regista-se a diminuição do consumo de água (volume de água entrado) ao longo dos três períodos de campanha (ver Quadro 7.6), implicando diminuição do consumo autorizado proporcionalmente. Esta variação não corresponde ao esperado na medida em que 2017 a precipitação foi mais baixa e seria expectável que o consumo fosse maior. Por outro lado, as perdas de água quase que não variam, isto porque a rede de distribuição não se alterou, sendo que as perdas reais quase se mantêm constantes ao longo dos três anos, e as perdas aparentes aumentaram 1% ao ano devido à degradação dos contadores. As perdas de água representaram em média 8,40% da água entrada no sistema nos três anos, sendo que a subcomponente com maior peso é a das perdas reais, a qual apresentou em média 6,67% do volume de água total entrado no sistema ao longo dos períodos em análise.

A Figura 4.18b) mostra o balanço hídrico nos dois subsistemas deste aproveitamento. Verifica-se que o subsistema C1 é o sistema principal, onde o volume de água entrado representa 59% do volume total entrado no sistema no período de campanha de 2018, e 57% do consumo autorizado verificado no sistema no mesmo ano. Ao comparar as perdas de água nos dois subsistemas, verifica-se que esta componente é mais expressiva em C1. Isto deve-se ao facto de se tratar do subsistema principal, o qual está sujeito a maiores erros de medição, uma vez que é o subsistema com mais contadores e que possui uma rede de abastecimento mais envelhecida e que não foi reabilitada (ver Quadro 4.16).

O consumo autorizado em C1 e C2 para o período de campanha de 2018 representou cerca de 87% e 97% da água entrada para cada um dos subsistemas respetivamente.

### 4.3.3 Balanço energético global e por subsistema

Para o balanço energético do sistema, considerou-se a cota de referência igual à cota mínima de consumo do sistema, 181,70 m, correspondente a cota mínima de consumo do subsistema C2, e a cota piezométrica mínima igual a 50 m c.a.. Na análise dos subsistemas, foram consideradas cotas de referência iguais a 203,30 m e 181,70 m para C1 e C2 (cotas mínimas de consumo de cada um dos subsistemas) respectivamente. Os resultados obtidos para a energia entrada no sistema global e nos subsistemas são apresentados na Figura 4.19.

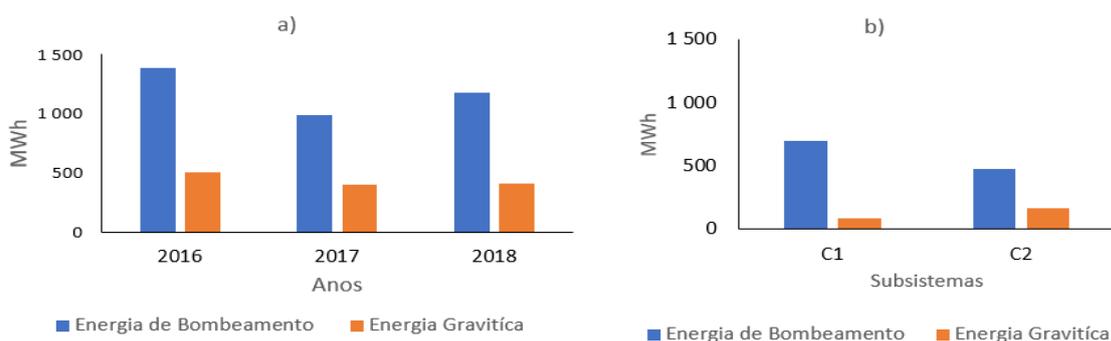


Figura 4.19 – Energia fornecida AHB nos períodos de campanha 2016, 2017 e 2018: a) Sistema, b) Subsistemas período de campanha 2018

Comparando os resultados obtidos para o BH neste AH ao longo dos três anos e com os resultados obtidos para o BE no mesmo período apresentados na Figura 4.19a), conclui-se que a energia gravítica e de bombeamento variam diretamente com o volume entrado. O abastecimento deste AH é feito sobretudo por energia de bombeamento (ver Quadro 7.12), a qual em média representou 73 % da energia total fornecido nos três anos em análise. Ao nível dos subsistemas, C2 é o que requer menos energia de bombeamento, porque está a uma cota mais baixa, tendo assim maior potencial de uso da energia natural.

A energia fornecida subdivide-se em duas subcomponentes, a componente do consumo autorizado e a das perdas. A energia associada a cada uma destas componentes para os diferentes períodos em análise ao nível do sistema e dos subsistemas apresenta-se na Figura 4.20. A maior parte da energia fornecida para o abastecimento neste AH destina-se para o consumo autorizado, representando em média 92 % da energia total fornecida (cf. Figura 4.20a). C2 quase que não apresenta energia associada às perdas, uma vez que tem perdas muito baixas, sendo que 97% da energia total fornecida foi utilizada para o consumo autorizado.

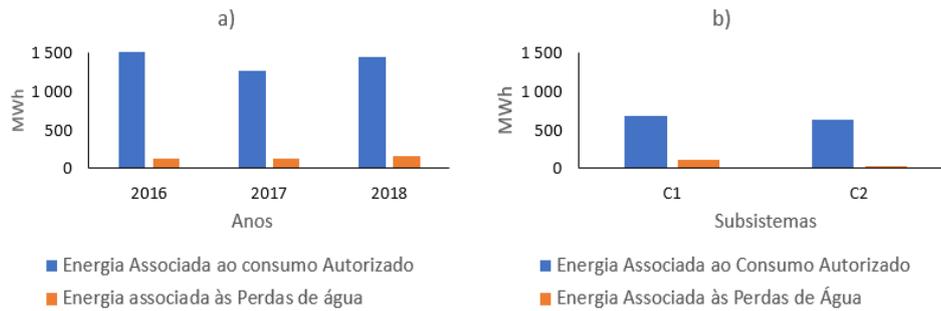


Figura 4.20 – Energia associada ao consumo Autorizado e às perdas de água AHB períodos de campanha 2016, 2017 e 2018: a) Sistema b) Subsistemas período de campanha 2018

A Figura 4.20a) evidencia que a maior parte da energia fornecida para o abastecimento neste AH destina-se para o consumo autorizado, representando em média 92% da energia total fornecida.

Á nível dos subsistemas nota-se que o C2 quase que não apresenta energia associada às perdas, isto porque apresentou perdas relativamente baixas, o que acabou por refletir no BE do mesmo, sendo que da energia total fornecida 97 % foi utilizada para garantir o consumo autorizado.

Os resultados apresentados na Figura 4.21 demonstram que a ineficiência energética no AHB é sobretudo devido a ineficiência dos equipamentos, a qual contribuiu com a dissipação de 22% da energia fornecida em 2018. Em média este AH utiliza 58% da energia fornecida para garantir o consumo autorizado. Relativamente aos subsistemas o C1 é o que dissipou mais energia devido a perdas de água (13%), enquanto que o C2 foi o que mais dissipou energia na rede devido a operação e traçado (26%).

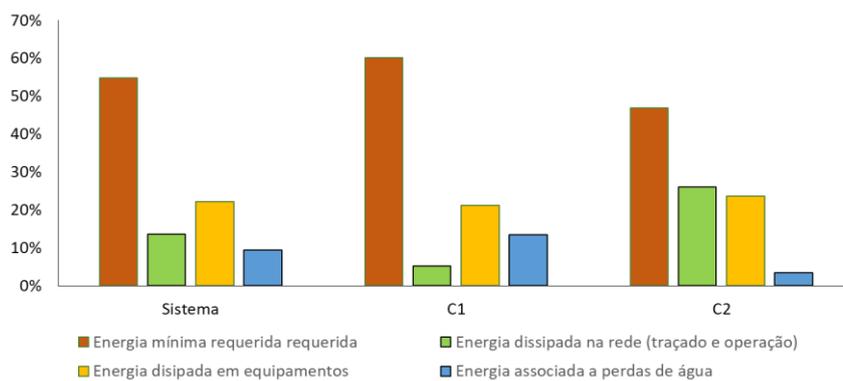


Figura 4.21- Distribuição percentual da energia fornecida AHB período de campanha 2018 sistema e subsistemas

#### 4.3.4 Análise global e priorização de subsistema

A avaliação do desempenho do sistema de abastecimento deste AH foi baseada nos indicadores de eficiência hídrica e energética apresentadas no Quadro 4.17. Tratando-se de um sistema com abastecimento em pressão alguns indicadores utilizados na avaliação do desempenho no AHA não foram considerados.

A água não faturada (Fi46) é diretamente proporcional às perdas de água e ao consumo autorizado não faturado. Tendo em conta a pouca variabilidade das perdas de água, a fração de água não faturada ao longo dos três anos é quase constante, sendo que o valor mais alto ocorreu em 2018, visto que nesse ano houve maior consumo autorizado não faturado, consumo este utilizado pela própria entidade gestora para a manutenção da rede e dos espaços verdes. Baseado na análise setorial Figura 4.18b) pode-se dizer que a elevada percentagem de água não faturada ocorre sobretudo no subsistema C1, onde as perdas de água e consumo autorizado não faturado têm maior peso.

Quadro 4.17 – Indicadores de desempenho AHB

	Fi46 (%)	WR1 (%)	Op24 [m <sup>3</sup> /(km.dia)]	E2 (kWh/m <sup>3</sup> )	E3 (-)	PEE (%)
2016	10,92	5,83	22,92	0,17	1,77	66,81
2017	10,90	7,32	24,71	0,14	1,63	74,68
2018	15,51	6,87	25,51	0,18	1,83	66,92

Relativamente ao indicador Op24, verificou-se que houve mais perdas de água em 2018, uma vez que neste ano ocorreram várias roturas nas condutas.

Relativamente ao E2, este varia inversamente com o consumo autorizado e, ao longo dos três anos, este indicador não teve grandes alterações.

O indicador E3 representa o rácio da energia total fornecida em relação a energia mínima necessária para garantir consumo. A energia mínima representou 56.4%, 61,5% e 54,7% da energia total fornecida em 2016, 2017 e 2018, respetivamente. O ano de 2017 foi o ano com menor E3 e, por consequência, com menor excesso de energia.

O PEE evidencia a fração de energia elétrica consumida pelas bombas com o intuito de elevar um certo volume de água. Verifica-se que, em 2017, as bombas tiveram maior eficiência (75%).

A análise setorial mostra que subsistema C2 é o que contribui para uma menor eficiência do sistema, uma vez que apresentou E2=0.19 kWh/m<sup>3</sup>, E3=2,13 e PEE=66,92 %, enquanto que o C1 apresenta E2=0,12 kWh/m<sup>3</sup>, E3=1,54 e PEE=66,92%. Conclui-se que, se por um lado, o subsistema C1 foi o mais problemático relativamente as perdas de água, o subsistema C2 é o mais ineficiente em termos energéticos, uma vez que apenas 46,9% da energia total representa a energia necessária para garantir o consumo.

No Quadro 4.18 encontram-se os resultados relativo aos indicadores de desempenho para os dois subsistemas no período de campanha de 2018, indicadores estes que foram utilizados para a priorização dos mesmos.

Quadro 4.18– Resultados dos indicadores de desempenho nos subsistemas AHB utilizados para a priorização

	Fi46 (%)	Op24 [m <sup>3</sup> /(km.dia)]	WR1 (%)	E3 (-)	PEE (%)
<b>C1</b>	18,68	40,80	11,11	1,54	66,92
<b>C2</b>	10,89	1,50	0,68	2,13	66,92

De modo a priorizar os subsistemas baseados nos indicadores supracitados, recorreu-se uma vez mais ao software AWARE-P, sendo que com esta análise concluiu-se que o subsistema C2 apesar da ineficiência energética apresentada está a ter um desempenho muito bom, quando comparado com o C1 (Figura 4.22).

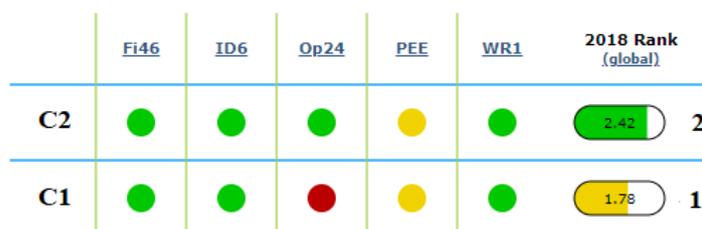


Figura 4.22 – Resultado priorização de subsistemas AHB dado pela média ponderada dos indicadores de desempenho com base no software Aware-p

Devido a falta de informação não foi possível propor medidas de melhorias para este AH, porém ficou claro que o subsistema prioritário é o C1, e que os principais problemas são as fugas e roturas em condutas.

#### 4.4 Síntese dos resultados

Os resultados obtidos a nível global (sistemas) demonstram que o AHA em canal, apresenta valores de água não faturada significativos (valor médio de 41,33%). Relativamente à água não faturada, a principal componente é devida a perdas por descargas, seguida das perdas devido a erros de medição. Em termos de eficiência energética, as principais causas de ineficiência decorrem de problemas de operação/traçado e das perdas de água (Figura 4.13). A priorização de subsistemas permitiu identificar o subsistema S2 para estudo de medidas de melhoria de eficiência hídrica e energética. De modo a diminuir as perdas de água e a ineficiência energética, foram analisadas várias soluções para o subsistema prioritário, nomeadamente a reabilitação de canais, a substituição de contadores e a reabilitação de turbinas. A análise do impacto relativo a implementação da combinação destas soluções permitiu concluir que estas medidas poderão reduzir as perdas de água no subsistema S2 em 38% e aumentar a recuperação da energia em excesso em 25%.

Em relação ao AHB em pressão, embora o valor de água não faturada seja significativamente inferior que no AHA, verifica-se que este ainda tem potencial de melhoria em termos da redução das fugas e roturas que representaram, em média, 7% de água entrada no sistema. Estas perdas ocorrem sobretudo no subsistema C1. No que se refere à eficiência energética, a principal ineficiência é devida aos equipamentos

de bombeamento, contribuindo para a dissipação de 22% da energia fornecida em 2018 (Figura 4.21). Neste caso de estudo não foi possível estudar medidas de melhoria devido a falta de dados.

## **5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

### **5.1 Principais conclusões**

A avaliação do desempenho em sistemas de abastecimento de água nos aproveitamentos hidroagrícolas é de extrema importância, permitindo diagnosticar perdas de água e ineficiências energéticas, contribuindo para uma melhoria gradual na sustentabilidade económica, infraestrutural e ambiental destes mesmos sistemas.

Neste estudo, identificaram-se as limitações no conhecimento existente relativamente à avaliação da eficiência hídrica e energética (e.g., volume mínimo, evaporação, balanço energético específico para AH) e apoio na tomada de decisão (e.g., aplicação da análise multicritério) em AH.

A metodologia proposta baseou-se nas seguintes fases: recolha e processamento de informação; realização do diagnóstico (análise global e sectorial); priorização de soluções de intervenção; recomendação final. Esta metodologia foi aplicada a dois aproveitamentos hidroagrícolas de natureza diferente, um sistema misto composto por canais e condutas, mas com fornecimento de água com superfície livre ou sujeito a baixa pressão, em regra inferior a 1 m c.a., e um sistema composto por uma rede de condutas e com fornecimento de pressão superior a 30 m c.a.

Comparando os dois casos de estudo em termos de perdas de água, conclui-se que o aproveitamento em canal é o que apresenta maiores perdas de água, sendo o principal problema as descargas em canais que representam cerca de 28% do volume entrado. Nos aproveitamentos hidroagrícolas com funcionamento em pressão, o principal problema são as fugas e roturas em condutas que contribuem para a perda de 7% do volume de água entrado no sistema.

Em termos de eficiência energética, os resultados obtidos para o AHA mostram que a grande parte da energia fornecida é dissipada devido a problemas de traçado e devido às perdas de água. Em média 30% da energia fornecida é dissipada na rede, devido a problemas de traçado, por outro lado as perdas de água contribuíram em média para a dissipação de 32% da energia fornecida. A análise setorial feita neste AH mostra que há subsistemas com muita energia em excesso, por exemplo o subsistema S1 no qual a energia fornecida é 20 vezes superior a energia necessária para garantir o consumo.

Por outro lado, o AHB mostra ser mais eficiente energeticamente: 57,6% da energia total fornecida é utilizada para garantir o consumo (faturado), 20,40% da energia fornecida é dissipada em equipamentos e 14% é dissipada devida ao traçado, à operação da rede e a perdas de carga na rede.

Relativamente a recuperação de energia, o balanço energético mostra um grande potencial de recuperação de energia em excesso através da utilização de turbinas no AHA, cujos proveitos podem ser utilizados por

exemplo, para cobrir gastos com energia em estações elevatórias existentes e para apoiar o investimento em reabilitação, contribuindo assim para a sustentabilidade económica, infraestrutural e ambiental deste aproveitamento.

## 5.2 Recomendações e sugestões de desenvolvimento futuro

No que se refere à aplicação do balanço hídrico, fazem-se as seguintes recomendações:

- A evapotranspiração de cultura deve ser considerada no cálculo do balanço sequencial mensal, em vez da evapotranspiração potencial geralmente adotada, por forma a obter uma melhor estimativa do volume associado ao escoamento superficial.
- Deve ser efetuado um levantamento dos canais extensos e/ou com declives acentuados que ficam parcialmente a seco, por forma a obter melhores estimativas do volume mínimo de operação.
- Para o cálculo da evaporação, sempre que possível deve-se adotar a fórmula de Penman, pois nos trabalhos anteriores era estimada com base numa formulação específica para a evapotranspiração potencial (i.e., Thorntwaite) cujos valores eram subestimados. A fórmula de Thorntwaite pode ser utilizada como primeira aproximação ou quando não existem dados (e.g., velocidade do vento, radiação solar incidente, humidade relativa), contudo, verificou-se que as perdas por evaporação apesar de serem baixas, não são desprezáveis, representando cerca de 2% das perdas totais de água em AH.
- Devem ser realizados ensaios para a avaliação dos erros dos contadores de modo a ter uma melhor estimativa desta componente atendendo aos diferentes tipos de equipamentos. Os contadores que já tenham ultrapassado a vida útil devem ser substituídos ou reabilitados.
- Devem ser realizados testes de estanqueidade para a avaliação das fugas e repassos em canais e condutas com e sem reabilitação, por forma a estimar melhor as perdas reais nos mesmos.

No que se refere à aplicação do balanço energético, fazem-se as seguintes recomendações:

- Devem ser realizadas análises de sensibilidade que permitam concluir qual a melhor cota de referência a adotar a nível dos sistemas e subsistemas.
- O indicador E2 deve ser utilizado para a avaliação da eficiência energética, uma vez que não é pouco sensível à cota de referência considerada, permitindo obter resultados mais robustos.
- A energia associada ao volume mínimo deve ser incluída na componente da energia mínima requerida para o consumo.

Em termos de priorização de alternativas recomenda-se:

- A aplicação do método da análise hierárquica no processo de priorização com base nos indicadores de desempenho normalizados.

- Para a utilização do software AWARE-P, as métricas devem ser adequadamente selecionadas, uma vez que a abordagem implementada mostrou ser muito sensível às métricas consideradas.

Em termos de ações futuras a implementar pela entidade gestora, recomenda-se:

- A realização de ensaios aos módulos Neyrpics e aos contadores tangenciais para a avaliação dos erros de medições e taxas de degradação associadas.
- O estudo detalhado dos fatores que influenciam as descargas e repassos em canais.
- A realização de auditorias energéticas para estimar os volumes bombeados, captados, alturas de elevação, volumes turbinados, energias consumidas e geradas.
- A estimativa do erro de medições dos volumes entrados no sistema.

Em termos de trabalhos futuros de investigação, recomenda-se:

- A modelação hidráulica das redes de abastecimento de água tanto em canais como em condutas em pressão, para apoio à especificação e análise de alternativas e para um melhor controlo operacional das descargas.
- O estudo de soluções que permitam o aproveitamento de energia em canais, por exemplo as tecnologias de baixa queda, como sejam os parafusos de Arquimedes invertidos.
- O desenvolvimento de uma metodologia para avaliação da condição em canais para apoio na sua reabilitação.
- Avaliação da eficiência de cada subsistema em estudo desde origem da água, de modo a evidenciar as ineficiências no percurso, implicando que os subsistemas a jusante sejam responsáveis por parte das perdas de água e de ineficiências energéticas que ocorrem nos subsistemas a montante.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alegre, H., Duarte, P., Baptista J. Indicadores de desempenho para serviços de abastecimento de água. *Série Guias Técnicos nº 1; Labórtario Nacional de Engenharia Civil&International Water Association* 2004; 276 pp.
- Alegre H, Covas D. Gestão patrimonial de infra-estruturas de abastecimento de água. *Série Guias Técnicos nº 16; Labórtario Nacional de Engenharia Civil & Instituto Superior Técnico*. 2010; 472 pp.
- Alegre, H., Carriço, N., Covas, D., Almeida M. Análise multicritério para priorização de intervenções de reabilitação em sistemas de distribuição de água. *10º Seminario Iberoamericano de Planificación, Proyecto y Operación de Sistemas de Abastecimiento de Agua.*; Morelia, 10-14 Janeiro 2011; 19 pp.
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., Smith M. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation Drainage*. 1998; N.º 56; 300 pp.
- Alves, I.L., Cameira, M.R., Fernando, R.M, Teixeira J. Uso eficiente da água no sector agrícola. Instituto Superior de Agronomia; 2005; 326 pp.
- Arregui F, Jr EC, Cobacho R, García-serra J. Key factors affecting water meter accuracy. *IWA Water Loss Conference*. Halifax, Canada; 2006; 1–10
- Barros J. Perdas aparentes em sistemas de Abastecimento de água. Tese de Mestrado em Engenharia do Ambiente. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 2015; 116 pp
- Batchelor, C., Peiser, L., Faurès, J.M H. Water accounting and auditing. A sourcebook. FAO, N°43; 2017:238 pp.
- Cabrera E, Cabrera Jr E, Gómez E. Strategies to Improve the Energy Efficiency of Pressurized Water Systems. *Procedia Engineering*. 2017; vol.186; 294–302.
- Carina S. Implementação de medidas de controlo de perdas de água em sistemas urbanos de abastecimento. Tese de Mestrado em Gestão Sustentável do Ciclo Urbano da Água. Universidade de Coimbra. 2018; 91 pp.
- Carvalho J. Importância económica da agricultura de regadio em Portugal. Tese de Mestrado em Engenharia Zootécnica- Produção Animal. Instituto Superior de Agronomia- Universidade de Lisboa. 2016; 72 pp.
- Chen C-F. Applying the Analytical Hierarchy Process ( AHP ) Approach to Convention Site Selection. *Journal of Travel Research* 2006; Vol.45; pp167–174.
- Cunha H, Mamade A, Alegre H. Proposal for energy balance calculation in collective irrigation systems. 2018; 1–13
- Cunha H. Balanços Hídrico e Energético em Aproveitamentos Hidroagrícolas Uma nova abordagem para sistemas mistos. Mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico-Universidade de Lisboa. 2018; 118 pp.
- Cunha H, Loureiro D, Sousa G, Covas D, Alegre H. A comprehensive water balance methodology for collective irrigation systems. *Agricultural Water Management*. 2019; vol.223; 9 pp.
- Cunha H, Mamade A, Loureiro D, Sousa G, Alegre H, Covas Di. Abordagem para o balanço energético em aproveitamentos hidroagrícolas. *Recur Hídricos*. 2019;40, vol.2;p9–17.
- Decreto-Lei n.º 269/82 de 10 de julho. 2002. *Diário da República* n.º 81 – I Série A. *Ministério da Agricultura Comércio e Pesca*.
- Diouf OC, Weihermüller L, Ba K, Faye SC, Faye S, Vereecken H. Estimation of Turc reference evapotranspiration with limited data against the Penman-Monteith Formula in Senegal. *J Journal of Agriculture and Environment for International Development*. 2016; vol.110: 117–137.
- Direção Geral de Agricultura e Desenvolvimento Rural. *Estratégia para o regadio público 2014-2020*. 2014: 1424–1430.

- ERSAR. Qualidade dos serviços de águas e resíduos prestados aos utilizadores. *Série Guias Técnicos nº 22*. 2017: 351 pp.
- EUROSTAT. *Agri-environmental indicator - irrigation*. Acedido em 18 de Agosto 2020, em: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Agrienvironmental\\_indicator\\_irrigation#Analysis\\_at\\_EU\\_and\\_country\\_level.%20Published%202020](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Agrienvironmental_indicator_irrigation#Analysis_at_EU_and_country_level.%20Published%202020).
- Feldman M. Aspects of energy efficiency in water supply systems. *Proceedings of the 5th IWA Water Loss Reduction Specialist Conference*; 2009; 85–89.
- Ferreira B, Fiúza F, Coelho A, Carriço N, Moreira M, Arranja C. Caracterização Preliminar Dos Aproveitamentos Hidroagrícolas Em Portugal Continental. *Monte Real, 27-29 de junho. VII Congresso Nacional de Rega e Drenagem*. 2018; 1–14.
- Finch JW. A comparison between measured and modelled open water evaporation from a reservoir in south-east England. *Hydrological Processes*. 2001; vol.15: 2771–2778.
- International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms*. 3<sup>rd</sup> Edition, JCGM; 2012; 300 pp
- Intron. Horizontal Woltmann meter. Acedido em 3 de julho 2020, em: <https://www.itron.com/br/solutions/product-catalog/woltex-m>
- Kinzli K, Martinez M, Oad R, Prior A, Gensler D. Using an ADCP to determine canal seepage loss in an irrigation district. *Agricultural Water Management*. 2010; vol.97; 801–810.
- Liu S, Wang W, Mori M, Kobayashi T. Estimating the Evaporation from Irrigation Canals in Northwestern China Using the Double-Deck Surface Air Layer Model. *Advances in Meteorology*. 2016; vol.2016; 10 pp
- Loureiro D, Alegre H, Silva MS, Ribeiro R, Mamade A, Poças A. Implementing tactical plans to improve water-energy loss management. *Water Science & Technology: Water Supply* 2017; vol.17: 381–388
- Loureiro D, Carriço N, Rijo M, et al. Eficiência hídrica e energética em aproveitamentos hidroagrícolas. *14<sup>o</sup> Congresso da Água*. Évora; 2018; 1–7
- Lucio, André. Comparação de Diferentes Métodos de Estimacão de Séries de Escoamentos Mensais em Sec es da Rede Hidrográfica de Portugal. Mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico. 2016; 117 pp.
- Momenzadeh M. The Evaluation of Water Leakage in the Irrigation Channels of Kazeroon Plain Using the Input Method of Discharge and Exper. Formulas. *Irrigation & Drainage Systems Engineering* 2017; vol. 6; 3–7
- Mamade A, Sousa C, Marques A, Loureiro D, Alegre H, Covas D. Energy auditing as a tool for outlining major inefficiencies: Results from a real water supply system. *Procedia Engineering*. 2015; vol.119; 1098–1108
- Mamade A, Loureiro D, Alegre H, Covas D. A comprehensive and well tested energy balance for water supply systems. *Urban Water J*. 2017; vol. 14: 853–861
- McJannet DL, Webster IT, Stenson MP, Sherman BS. Estimating open water evaporation for the Murray-Darling Basin: *A report to the Australian Government from the CSIRO Murray-Darling Basin Sustainable Yields Project*. 2008: 50 pp
- Miranda RAC, Oliveira MVS, Silva DF. Ciclo hidrogr fico planet rio: abordagens e conceitos. *Geo UERJ*. 2010; vol.1; 109–119
- Montanes JL. *Hydraulic Canals- Design, construction, regulation and maintenance*. 1<sup>st</sup> Edition, Taylor & Francis e-Library; 2006; 410 pp
- Moreno MA, Ortega JF, C rcoles JI, Martínez A, Tarjuelo JM. Energy analysis of irrigation delivery systems: Monitoring and evaluation of proposed measures for improving energy efficiency. *Irrigation Science*. 2010; vol. 28; 445–460

- Morgado F, Lopes JG, Brito J De, Feiteira J. Portuguese irrigation canals : lining solutions , pathology and rehabilitation. 2011; *Teoria e Prática na Engenharia Civil*. vol.17; 33–47.
- Nuncio J, Arranja C. Regadio: binómio água e energia. *Recursos Hídricos*. 2017; vol. 38, N.º 2; 17–23.
- Penman H. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Royal Society* 1948; vol.193; 120–145.
- Pérez-Sánchez M, Sánchez-Romero FJ, Ramos HM, López-Jiménez PA. Energy recovery in existing water networks: Towards greater sustainability. *Water (Switzerland)*. 2017; vol.9; 1–20.
- PORDATA. Taxa de Inflação. Acedido em 18 de Setembrbo, em:  
[https://www.pordata.pt/Portugal/Taxa+de+Infla%C3%A7%C3%A3o+\(Taxa+de+Varia%C3%A7%C3%A3o+do+%C3%8Dndice+de+Pre%C3%A7os+no+Consumidor\)+total+e+por+consumo+individual+por+objetivo-2315](https://www.pordata.pt/Portugal/Taxa+de+Infla%C3%A7%C3%A3o+(Taxa+de+Varia%C3%A7%C3%A3o+do+%C3%8Dndice+de+Pre%C3%A7os+no+Consumidor)+total+e+por+consumo+individual+por+objetivo-2315)
- PORDATA. Taxa obrigação do tesouro. Acedido em 18 de Setembrbo, em:  
<https://www.pordata.pt/Portugal/Taxas+de+rendibilidade+de+obriga%C3%A7%C3%B5es+do+tesouro-2803>
- Portela MM, Santos JF. Estimação De Escoamentos Superficiais Mensais Em Portugal Continental Baseada na evapotranspiração potencial de Thornthwaite. *Recursos Hidricos*. 2006; vol.27; 19–34.
- Proença de Oliveira R. Evaporation and evapotranspiration. *Instituto Superior Técnico*; 2019; 49 pp.
- Rijo M, Pereira LS. Measuring conveyance efficiencies to improve irrigation water management. *Irrigation Drainage Systems*. 1987; vol.3; 267–276.
- Rodrigues CM. Evaporação e evapotranspiração. *Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais Mediterrânicas- Universidade de Évora*, 1984: 215–234.
- Saeed TU, Khan TA. Impact of Water Losses and Maintenance of Canal Irrigation System on Agriculture ( Case Study : Urmur Minor of Warsak Gravity Canal Pakistan). *American Journal of Experimental Agriculture*. 2014; vol.4; 550–562.
- SNIRH, <https://snirh.apambiente.pt/>
- Sousa A. Avaliação de erros de sub-contagem em contadores de água domésticos. Tese de Mestrado em Construção Urbana. Instituto Superior de Engenharia de Coimbra. 2011; 111 pp.
- Stone LF, Marques P. Determinação da evapotranspiração para fins de irrigação. *EMBRAPA-CNPAF* 1995; 49 pp.
- Talaia M, Vigário C. *Temperatura de ponto de orvalho: um risco ou uma necessidade.*; *Imprensa Universidade de Coimbra* 2016; 49 pp.
- Vargas RV. Using the analytic hierarchy process (ahp) to select and prioritize projects in a portfolio. Em: *Decision Making, Portfolio Management*. ; 2010.
- Vaz J. Modelos de transformação da precipitação em escoamento à escala mensal: Aplicação a três casos de estudo em Moçambique. Tese de Mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico- Universidade de Lisboa. 2010; 148 pp.
- Xirimimbi A. Avaliação de Projetos de Investimentos em Contexto de Risco e Incerteza. Tese de Mestrado em Contabilidade e Finanças. *Escola Superior de Ciências Empresariais-Instituto Politécnico de Setúbal*. 2018; 80 pp.
- Zhang Q, Chai J, Xu Z, Qin Y. Investigation of Irrigation Canal Seepage Losses through Use of Four Different Methods in Hetao Irrigation District , China. *Journal of Hydrologic Engineering*. 2016; vol.22: 1–11.
- Zotarelli L, Dukes M. Step by step calculation of the Penman-Monteith Evapotranspiration. UF/IFAS Extension: 2010: 1–10.

## 7 ANEXOS

### A.1 Balanço hídrico

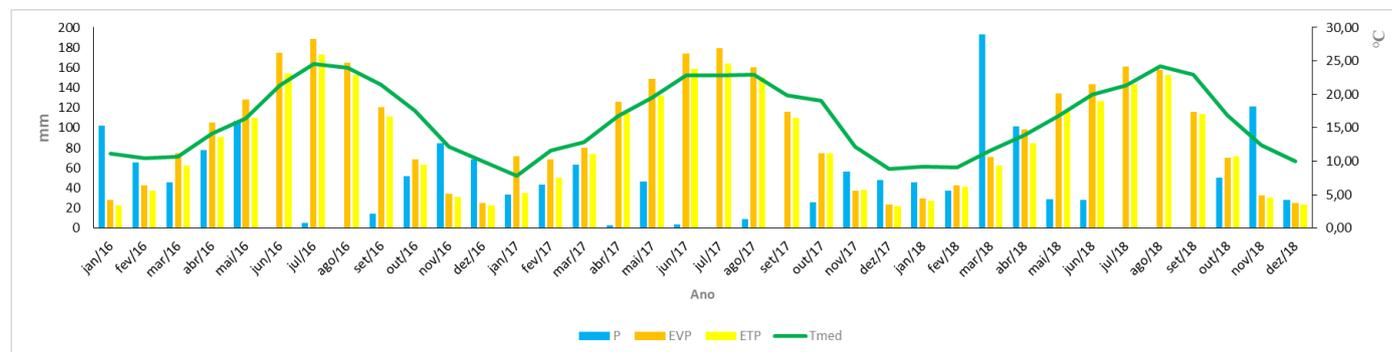


Figura 7.1– Evolução do clima AHA entre 2016 e 2018

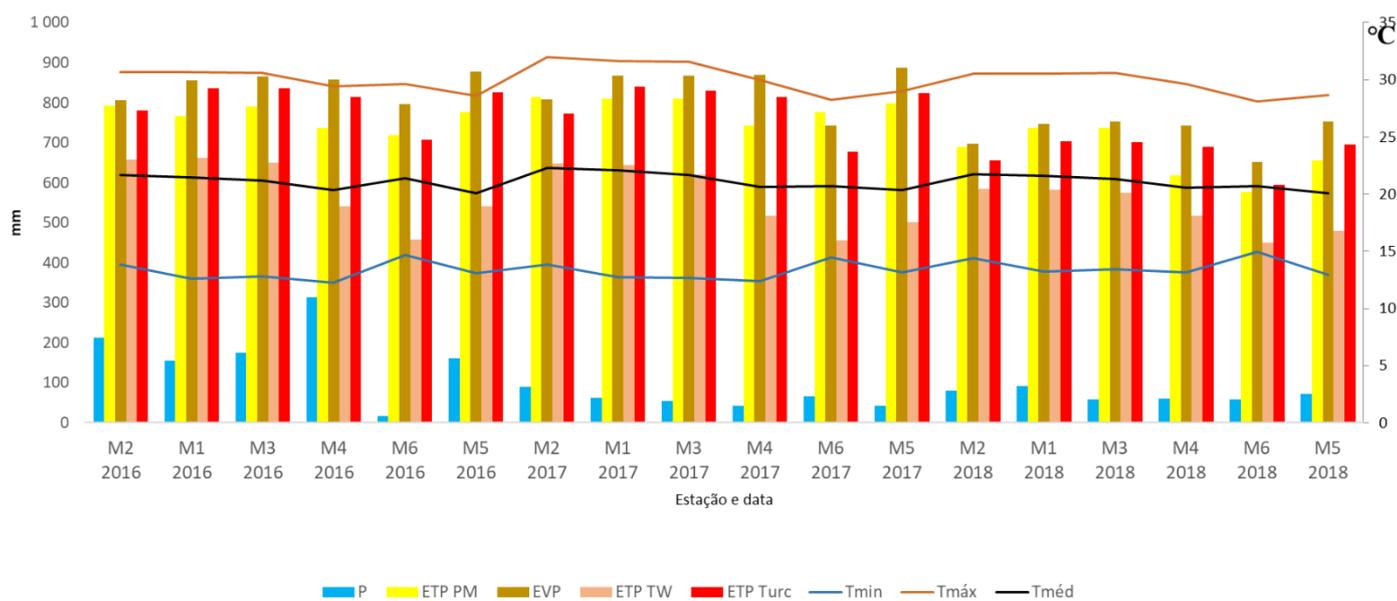


Figura 7.2 – Evolução do clima estações meteorológicas AHA período de campanha 2016, 2017 e 2018

Quadro 7.1 – Cálculo da altura do escoamento superficial no AHA referente ao período de campanha 2016, 2017 e 2018 pelo método do balanço sequencial mensal (BSQM), recorrendo a evapotranspiração potencial de Penamn-Monteith

Mês	P (mm)	ETP (mm)	ETC (mm)	L (mm)	H <sub>T</sub> (mm)	H <sub>T</sub> - H <sub>T-1</sub> (mm)	ETR (mm)	SH (mm)	R (mm)
out/15	130,1	50,98	35,69	0,00	0,00	0,00	35,69	94,41	47,21
nov/15	23,8	30,33	21,23	0,00	2,57	2,57	21,23	0,00	47,21
dez/15	51,8	22,50	15,75	0,00	38,62	36,05	15,75	0,00	0,00
jan/16	109,6	21,80	15,26	0,00	100,00	61,38	15,26	32,96	16,48
fev/16	64,3	35,62	24,93	0,00	100,00	0,00	24,93	39,37	36,16
mar/16	42,5	61,39	42,97	-0,47	99,53	-0,47	42,97	0,00	19,68
abr/16	71,95	89,90	62,93	0,00	100,00	0,47	62,93	8,55	4,27
mai/16	93,7	108,28	75,80	0,00	100,00	0,00	75,80	17,90	13,22
jun/16	0,6	156,32	109,42	-108,82	33,68	-66,32	66,92	0,00	8,95
jul/16	6,35	176,63	123,64	-226,12	3,51	-30,17	36,52	0,00	0,00
ago/16	0	155,97	109,18	-335,29	0,12	-3,39	3,39	0,00	0,00
set/16	17,8	112,35	78,64	-396,14	0,00	-0,12	17,92	0,00	0,00
out/16	42,075	63,11	44,18	-398,24	0,00	0,00	42,08	0,00	0,00
nov/16	89,7	30,57	21,40	0,00	68,30	68,30	21,40	0,00	0,00
dez/16	51,1	22,59	15,81	0,00	100,00	31,70	15,81	3,59	1,79
jan/17	26,1	35,85	25,10	0,00	100,00	0,00	25,10	1,00	2,30
fev/17	41	53,42	37,40	0,00	100,00	0,00	37,40	3,60	2,30
mar/17	64,4	72,78	50,95	0,00	100,00	0,00	50,95	13,45	8,53
abr/17	3,6	112,18	78,53	-74,93	47,27	-52,73	56,33	0,00	6,73
mai/17	41,2	129,48	90,63	-124,36	13,63	-33,64	74,84	0,00	0,00
jun/17	4,4	162,57	113,80	-233,76	1,32	-12,31	16,71	0,00	0,00
jul/17	0,2	172,05	120,43	-353,99	0,04	-1,28	1,48	0,00	0,00
ago/17	9,5	155,39	108,78	-453,27	0,00	-0,04	9,54	0,00	0,00
set/17	0	115,75	81,02	-534,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
out/17	17,7	75,38	52,77	-569,36	0,00	0,00	17,70	0,00	0,00
nov/17	45,85	37,21	26,04	0,00	19,81	19,81	26,04	0,00	0,00
dez/17	53,55	21,94	15,36	0,00	58,00	38,19	15,36	0,00	0,00
jan/18	40	27,20	19,04	0,00	78,96	20,96	19,04	0,00	0,00
fev/18	33,6	40,63	28,44	0,00	84,12	5,16	28,44	0,00	0,00
mar/18	192,5	60,83	42,58	0,00	100,00	15,88	42,58	134,04	67,02
abr/18	95	84,09	58,86	0,00	100,00	0,00	58,86	36,14	85,09
mai/18	28,5	116,73	81,71	-53,21	58,74	-41,26	69,76	0,00	18,07
jun/18	25,4	130,44	91,31	-119,12	17,85	-40,89	66,29	0,00	0,00
jul/18	0	154,99	108,49	-227,61	1,83	-16,01	16,01	0,00	0,00
ago/18	0	171,26	119,88	-347,49	0,06	-1,78	1,78	0,00	0,00
set/18	0	127,59	89,31	-436,81	0,00	-0,06	0,06	0,00	0,00
out/18	21,5	83,23	58,26	-473,57	0,00	0,00	21,50	0,00	0,00
nov/18	111,8	33,78	23,65	0,00	88,15	88,15	23,65	0,00	0,00
dez/18	26	27,23	19,06	0,00	95,09	6,94	19,06	0,00	0,00

Quadro 7.2– Volume escoamento superficial dado pelo balanço hídrico AHA período de campanha 2016

Fluxos	Designação	Valor(m3)
Entrada	Captação albufeira <i>Ma</i>	76 367 784,0
	Precipitação em canais e rio	26 535,6
	Precipitação reservatórios intermédios	15 606,4
	Escoamento Superficial	18 450 502,0
Saída	Consumo faturado medido	11 234 067,9
	Consumo faturado não medido	1 045 559,7
	Evaporação em reservatórios intermédios	91 791,7
	Evaporado em canais e rio	71 860 770,0
	Exportação para S2	37 215,5
	Descargas reservatório intermédio <i>K</i>	8 737 388,6
	Repastos em canais	285 242,4
	Erros de medição	1 248 229,8
	Usos não autorizados	122 796,28
Fugas em condutas	11 234 067,9	

Quadro 7.3– Volume escoamento superficial dado pelo balanço hídrico AHA período de campanha 2017

Fluxos	Designação	Valor(m3)
Entrada	Captação albufeira <i>Ma</i>	72 537 936,0
	Precipitação em canais e rio	3 086,8
	Precipitação reservatórios intermédios	5 965,9
	Escoamento Superficial	5 368 591,4
Saída	Consumo faturado medido	14 614 721,5
	Consumo faturado não medido	1 040 149,1
	Evaporação em reservatórios intermédios	91 434,4
	Evaporado em canais e rio	57 913 830,0
	Exportação para S2	42 615,7
	Descargas reservatório intermédio <i>K</i>	2 379 128,1
	Repastos em canais	278 685,5
	Erros de medição	1 623 857,9
	Usos não autorizados	156 548,71
Fugas em condutas	53 294,6	

Quadro 7.4 – Volume escoamento superficial dado pelo balanço hídrico AHA período de campanha 2016

Fluxos	Designação	Valor(m3)
Entrada	Captação albufeira <i>Ma</i>	61 630 368,0
	Precipitação em canais e rio	5 070,5
	Precipitação reservatórios intermédios	7 495,3
	Escoamento Superficial	17 977 643,1
Saída	Consumo faturado medido	11 041 757,6
	Consumo faturado não medido	167 559,5
	Evaporação em reservatórios intermédios	81 370,4
	Evaporado em canais e rio	64 316 718,0
	Exportação para S2	34 289,5
	Descargas reservatório intermédio <i>K</i>	2 313 962,1
	Repastos em canais	278 685,5
	Erros de medição	1 226 862,0
	Usos não autorizados	112 093,17
Fugas em condutas	47 279,1	

Quadro 7.5 – Balanço hídrico AHA referente período de campanha 2016, 2017 e 2018

<p>Água entrada no sistema</p> <p>191 453 856 m<sup>3</sup></p> <p>191 046 839 m<sup>3</sup></p> <p>164 253 620 m<sup>3</sup></p>	<p>Consumo autorizado</p> <p>57,69%</p> <p>64,75%</p> <p>61,31%</p>	<p>Consumo autorizado faturado</p> <p>57,41%</p> <p>64,47%</p> <p>60,98%</p>	<p>Consumo faturado medido</p> <p>53,73%</p> <p>61,38%</p> <p>58,26%</p>	<p>Água Faturado</p> <p>57,41%</p> <p>64,47%</p> <p>60,98%</p>
			<p>Consumo faturado não medido</p> <p>3,68%</p> <p>3,08%</p> <p>2,72%</p>	
		<p>Consumo autorizado não faturado</p> <p>0,28%</p> <p>0,28%</p> <p>0,33%</p>	<p>Consumo não faturado medido</p>	<p>Água Não Faturada</p> <p>42,59%</p> <p>35,53%</p> <p>39,02%</p>
			<p>Consumo não faturado não medido</p> <p>0,28%</p> <p>0,28%</p> <p>0,33%</p>	
	<p>Perdas de água</p> <p>42,31%</p> <p>35,25%</p> <p>38,69%</p>	<p>Perdas por evaporação</p> <p>0,39%</p> <p>0,39%</p> <p>0,38%</p>	<p>Perdas por evaporação em canal</p> <p>0,33%</p> <p>0,34%</p> <p>0,32%</p>	<p>Perdas por evaporação nos reservatórios intercalares</p> <p>0,06%</p> <p>0,06%</p> <p>0,06%</p>
		<p>Erros de medição</p> <p>5,71%</p> <p>6,49%</p> <p>6,14%</p>		
		<p>Perdas reais</p> <p>35,64%</p> <p>27,72%</p> <p>31,57%</p>	<p>Fugas em condutas</p> <p>0,10%</p> <p>0,10%</p> <p>0,10%</p>	
			<p>Repassos em canais</p> <p>2,26%</p> <p>2,08%</p> <p>2,15%</p>	
			<p>Repassos nos reservatórios intermédios</p>	
<p>Descargas em reservatórios intermédios</p> <p>4,59%</p> <p>1,37%</p> <p>1,51%</p>		<p>Descargas em canais</p> <p>28,69%</p> <p>24,18%</p> <p>27,81%</p>		

Nota: Percentagem em relação a Água entrada no sistema. Período de campanha: 2016, 2017, 2018

Quadro 7.6 – Balanço hídrico AHB referente período de campanha 2016, 2017 e 2018

Água entrada no sistema 5 158 680 m <sup>3</sup> 4 101 490 m <sup>3</sup> 4 368 720 m <sup>3</sup>	Consumo autorizado 93,3% 90,9% 91,2%	Consumo autorizado faturado 89,08% 89,10% 84,49%	Consumo faturado medido 87% 86% 82%	Água. Faturado 89,08% 89,10% 84,49%	
			Consumo faturado não medido 2% 3% 2%		
		Consumo autorizado não faturado 4,20% 1,82% 6,72%	Consumo não faturado medido 4% 2% 7%		Água Não Faturada 10,92% 10,9% 15,51%
			Consumo não faturado não medido 4% 2% 7%		
	Perdas de água 6,7% 9,1% 8,8%	Perdas por evaporação	Perdas por evaporação em canal	Água Não Faturada 10,92% 10,9% 15,51%	
			Perdas por evaporação nos reservatórios intercalares		
		Perdas aparentes 0,9% 1,8% 2,5%	Uso não autorizado		
			Erros de medição 1% 2% 3%		
		Perdas reais 5,8% 7,3% 6,9%	Fugas em condutas 5,8% 7% 7%		
			Repassos em canais		
			Repassos nos reservatórios intermédios		
			Descargas em reservatórios intermédios		
		Descargas em canais			

Nota: Percentagem em relação a Água entrada no sistema. Período de campanha: 2016, 2017, 2018

### A.3 Balanço energético

Quadro 7.7 – Volume captado, bombeado e energia total fornecida no AHA referente ao período de campanha de 2016

Captações	Volume (m3)	Energia faturada (kWh)	Energia útil (kWh)	Energia gravítica (kWh)	Energia total fornecida (kWh)
Albufeira Ma	76 367 784,02	NA	NA	26 387 264,01	26 387 264,01
Albufeira Mb	80 527 248,00	NA	NA	16 994 881,59	16 994 881,59
Albufeira Mc	2 754 300,00	NA	NA	111 600,96	111 600,96
EE E1	754 704,00	59 186,00	41 089,44	15 963,25	75 149,25
EE E2	342 900,00	17 989,00	11 761,47	2 772,35	20 761,35
EE E3	336 600,00	20 820,00	11 545,38	980,44	21 800,44
EE E4	1 229 760,00	28 857,00	20 086,08	1 138,21	29 995,21
EE E5	673 200,00	10 679,00	9 163,00	0,00	10 679,00
EE E6	3 446 171,90	103 059,00	28 143,74	22 796,43	125 855,43
EE E7	3 102 246,0	273 104	97 117,53	NA	97 117,53
EE E8	743 472,0	39 385	20 238,96	NA	39 385
EE E9	1 651 176,0	161 936	94 392,23	NA	161 936
EE E10	2 122 934,4	240 679	135 808,83	NA	240 679
EE E11	1 331 802,0	93 502	54 381,92	NA	93 502
EE E12	1 449 053,3	204 441	61 930,93	NA	204 441
EE E13	291 114,0	26 636	4 754,86	NA	26 636

Quadro 7.8 – Volume captado, bombeado e energia total fornecida no AHA referente ao período de campanha de 2017

Captações	Volume (m3)	Energia faturada (kWh)	Energia útil (kWh)	Energia gravítica (kWh)	Energia total fornecida (kWh)
Albufeira Ma	72 537 936,00	NA	NA	23 921 013,65	23 921 013,65
Albufeira Mb	97 819 362,00	NA	NA	20 136 184,68	20 136 184,68
Albufeira Mc	2 395 347,00	NA	NA	96 995,15	96 995,15
EE E1	1 062 720,00	82 975,00	57 859,20	22 478,30	105 453,30
EE E2	651 600,00	49 944,00	22 349,88	5 268,19	55 212,19
EE E3	587 200,00	61 767,00	20 140,96	1 710,38	63 477,38
EE E4	3 253 860,00	76 306,00	53 146,38	3 011,63	79 317,63
EE E5	1 507 500,00	24 491,00	20 518,75	0,00	24 491,00
EE E6	3 636 434,70	98 898,00	29 697,55	24 055,02	122 953,02
EE E7	3 531 006,0	314 726	110 540,10	NA	314 726
EE E8	628 236,0	35 769	17 101,98	NA	35 769
EE E9	2 956 610,0	240 698	169 019,54	NA	240 698
EE E10	2 351 268,0	295 358	150 415,84	NA	295 358
EE E11	1 504 170,0	126 191	61 420,28	NA	126 191
EE E12	2 268 648,0	248 283	96 959,49	NA	248 283
EE E13	1 401 629,0	44 619	22 893,27	NA	44 619

Quadro 7.9 – Volume captado, bombeado e energia total fornecida no AHA referente ao período de campanha de 2018

Captações	Volume (m3)	Energia faturada (kWh)	Energia útil (kWh)	Energia gravítica (kWh)	Energia total fornecida (kWh)
Albufeira Ma	61 630 368,00	NA	NA	21 296 891,17	21 296 891,17
Albufeira Mb	75 963 840,00	NA	NA	15 846 116,34	15 846 116,34
Albufeira Mc	2 235 240,00	NA	NA	93 757,71	93 757,71
EE E1	912 816,00	70 234,00	49 697,76	19 307,58	89 541,58
EE E2	40 500,00	7 354,00	1 389,15	327,44	7 681,44
EE E3	50 400,00	10 278,00	1 728,72	146,80	10 424,80
EE E4	1 258 812,00	25 511,00	20 560,60	1 165,10	26 676,10
EE E5	882 900,00	16 455,00	12 017,25	0,00	16 455,00
EE E6	3 232 980,00	88 653,00	26 402,67	21 386,16	110 039,16
EE E7	2 791 953,0	252 615	87 403,64	NA	252 615
EE E8	630 216,0	30 519	17 155,88	NA	30 519
EE E9	1 665 792,0	175 276	95 227,78	NA	175 276
EE E10	1 967 148,0	221 768	125 842,83	NA	221 768
EE E11	1 043 172,0	79 778	42 596,19	NA	79 778
EE E12	1 427 544,0	162 682	61 011,64	NA	162 682
EE E13	817 705,0	44 619	13 355,85	NA	44 619

Quadro 7.10 – Volume captado, bombeado e energia total fornecida no AHA referente ao período de campanha de 2018

Ano	Captações	Volume (m3)	Energia faturada (kWh)	Energia útil (kWh)	Energia gravítica (kWh)	Energia total fornecida (kWh)
2016	EE E1	5 158 680	1 387 240,00	926 842,84	508 673,29	1 895 913,29
2017	EE E1	4 101 490,00	986 714,00	736 901,04	404 428,74	1 391 142,74
2018	EE E1	4 368 720,00	1 172 972,00	784 913,36	409 654,13	1 582 626,13

Quadro 7.11 – Balanço energético AHA referente período de campanha 2016, 2017 e 2018

Energia gravítica 97,28% 96,35% 97,08%	Energia total fornecida 47 053 880 kWh 46 562 437 kWh 40 633 647 kWh	Energia associado ao consumo autorizado 57,69% 64,75% 61,31%	Energia entregue aos consumidores	Energia mínima 14,49% 17,50% 15,17%	Energia mínima 14,49% 17,50% 15,17%		
			Energia dissipada associada ao consumo	Energia supérflua *	Energia dissipada na rede (traçado e operação) 29,91% 30,89% 29,76%		
				Por perdas de cargas nas condutas e canais *			
				Por perdas de cargas nas válvulas e nas comportas *			
				Ineficiência das bombas 0,85% 1,21% 0,95%	Energia dissipada em equipamentos 6,13% 7,97% 6,92%		
			Ineficiência nas turbinas 5,28% 6,76% 5,96%				
			Energia Recuperada	Associada ao consumo autorizado 7,17% 8,39% 9,46%	Energia recuperada 12,43% 12,96% 15,42%		
				Associada a perdas de água 5,26% 4,57% 5,97%			
			Energia de Bombeamento 2,72% 3,65% 2,92%	Energia associada a perdas de água 42,31% 35,25% 38,69%	Energia dissipada associada as perdas	Nos pontos onde ocorrem perdas *	Energia associada às perdas de água 37,06% 30,68% 32,73%
						Por perdas de cargas nas válvulas e comportas*	
Por perdas de cargas nas condutas e nos canais *							
Por ineficiência das bombas 0,62% 0,66% 0,60%							
			Por ineficiência das turbinas 3,87% 3,68% 3,76%				

Nota: Percentagem em relação a Energia total fornecida. Período de campanha: 2016, 2017, 2018

Quadro 7.12 – Balanço energético AHB referente período de campanha 2016, 2017 e 2018

Energia gravítica 26,83% 29,07% 25,88%	Energia total fornecida 1 895 913 kWh 1 391 143 kWh 1 582 626 kWh	Energia associado ao consumo autorizado 93,29% 90,93% 90,59%	Energia entregue aos consumidores	Energia mínima 56,49% 61,46% 54,73%	Energia mínima 56,49% 61,46% 54,73%
			Energia dissipada associada ao consumo	Energia supérflua *	Energia dissipada na rede (traçado e operação) 14,14% 13,14% 13,64%
				Por perdas de cargas nas condutas e canais *	
				Por perdas de cargas nas válvulas e nas comportas *	
				Ineficiência das bombas 23% 16% 22%	Energia dissipada em equipamentos 22,65% 16,33% 22,21%
Ineficiência nas turbinas					
Energia de Bombeamento 73,17% 70,93% 74,12%		Energia associada a perdas de água 6,71% 9,07% 9,41%	Energia Recuperada	Associada ao consumo autorizado	Energia recuperada
				Associada a perdas de água	
			Energia dissipada associada as perdas	Nos pontos onde ocorrem perdas *	Energia associada às perdas de água 6,71% 9,07% 9,41%
				Por perdas de cargas nas válvulas e comportas*	
				Por perdas de cargas nas condutas e nos canais *	
Por ineficiência das bombas 2% 2% 2%					
Por ineficiência das turbinas					

Nota: Percentagem em relação a Energia total fornecida. Período de campanha: 2016, 2017, 2018

#### A.4 Priorização

Quadro 7.13– Indicadores e métricas usadas na priorização de subsistemas e de soluções de intervenção

Classes	Fi46 (%)	IRep [l/(m <sup>2</sup> .dia)	Op24 [m <sup>3</sup> /km.dia]	IDes (%)	WR1(%)	E3(-)	PEE (%)
Bom	[0; 20[	[0; 15[	[0; 3[	[0; 7,5[	[0;15[	[1; 2,5[	[100; 68[
Mediano	[20; 35[	[15; 25[	[3; 5[	[7,5; 12,5[	[15; 25[	[2,5; 3,5[	[68; 50[
Insatisfatório	[35; 47]	[25; 100]	[5; 8]	[12,5; 36,5]	[25; 100]	[3,5; 30[	[50; 0]

a)						b)						
<b>Fi46</b>	S1	S2	S3	S4	S5	<b>Fi46</b>	S1	S2	S3	S4	S5	<b>Média</b>
S1	1,000	0,549	1,044	0,624	2,541	S1	0,173	0,173	0,173	0,173	0,173	<b>0,173</b>
S2	1,822	1,000	1,903	1,136	4,629	S2	0,315	0,315	0,315	0,315	0,315	<b>0,315</b>
S3	0,957	0,526	1,000	0,597	2,433	S3	0,166	0,166	0,166	0,166	0,166	<b>0,166</b>
S4	1,604	0,880	1,675	1,000	4,075	S4	0,278	0,278	0,278	0,278	0,278	<b>0,278</b>
S5	0,394	0,216	0,411	0,245	1,000	S5	0,068	0,068	0,068	0,068	0,068	<b>0,068</b>
<b>Total</b>	<b>5,776</b>	<b>3,171</b>	<b>6,033</b>	<b>3,602</b>	<b>14,677</b>							
<b>IRep</b>	S1	S2	S3	S4	S5	<b>IRep</b>	S1	S2	S3	S4	S5	<b>Média</b>
S1	1,000	0,937	1,041	0,879	1,786	S1	0,212	0,212	0,219	0,212	0,212	<b>0,213</b>
S2	1,068	1,000	0,939	0,939	1,907	S2	0,226	0,226	0,198	0,226	0,226	<b>0,220</b>
S3	0,961	0,900	1,000	0,845	1,716	S3	0,203	0,203	0,211	0,203	0,203	<b>0,205</b>
S4	1,137	1,065	1,184	1,000	2,031	S4	0,241	0,241	0,249	0,241	0,241	<b>0,242</b>
S5	0,560	0,525	0,583	0,492	1,000	S5	0,118	0,118	0,123	0,118	0,118	<b>0,119</b>
<b>Total</b>	<b>4,726</b>	<b>4,427</b>	<b>4,745</b>	<b>4,155</b>	<b>8,440</b>							
<b>Op24</b>	S1	S2	S3	S4	S5	<b>Op24</b>	S1	S2	S3	S4	S5	<b>Média</b>
S1	1,000	2,804	1,798	3,554	1,024	S1	0,315	0,315	0,315	0,315	0,315	<b>0,315</b>
S2	0,357	1,000	0,641	1,268	0,365	S2	0,112	0,112	0,112	0,112	0,112	<b>0,112</b>
S3	0,556	1,560	1,000	1,977	0,570	S3	0,175	0,175	0,175	0,175	0,175	<b>0,175</b>
S4	0,281	0,789	0,506	1,000	0,288	S4	0,089	0,089	0,089	0,089	0,089	<b>0,089</b>
S5	0,977	2,739	1,756	3,471	1,000	S5	0,308	0,308	0,308	0,308	0,308	<b>0,308</b>
<b>Total</b>	<b>3,171</b>	<b>8,892</b>	<b>5,700</b>	<b>11,270</b>	<b>3,247</b>							
<b>IDesc</b>	S1	S2	S3	S4	S5	<b>IDesc</b>	S1	S2	S3	S4	S5	<b>Média</b>
S1	1,000	0,803	1,000	0,833	5,086	S1	0,215	0,215	0,215	0,215	0,215	<b>0,215</b>
S2	1,245	1,000	1,245	1,037	6,333	S2	0,268	0,268	0,268	0,268	0,268	<b>0,268</b>
S3	1,000	0,803	1,000	0,833	5,088	S3	0,215	0,215	0,215	0,215	0,215	<b>0,215</b>
S4	1,200	0,964	1,200	1,000	6,104	S4	0,259	0,259	0,259	0,259	0,259	<b>0,259</b>
S5	0,197	0,158	0,197	0,164	1,000	S5	0,042	0,042	0,042	0,042	0,042	<b>0,042</b>
<b>Total</b>	<b>4,642</b>	<b>3,728</b>	<b>4,641</b>	<b>3,868</b>	<b>23,611</b>							
<b>WR1</b>	S1	S2	S3	S4	S5	<b>WR1</b>	S1	S2	S3	S4	S5	<b>Média</b>
S1	1,000	0,602	1,036	0,614	3,370	S1	0,180	0,180	0,180	0,136	0,180	<b>0,171</b>
S2	1,660	1,000	1,720	1,020	5,595	S2	0,299	0,299	0,299	0,227	0,299	<b>0,285</b>
S3	0,965	0,581	1,000	1,686	3,252	S3	0,174	0,174	0,174	0,374	0,174	<b>0,214</b>
S4	1,628	0,980	1,686	1,000	5,485	S4	0,293	0,293	0,293	0,222	0,293	<b>0,279</b>
S5	0,297	0,179	0,307	0,182	1,000	S5	0,053	0,053	0,053	0,040	0,053	<b>0,051</b>
<b>Total</b>	<b>5,550</b>	<b>3,343</b>	<b>5,751</b>	<b>4,503</b>	<b>18,702</b>							
<b>E3</b>	S1	S2	S3	S4	S5	<b>E3</b>	S1	S2	S3	S4	S5	<b>Média</b>
S1	1,000	1,111	1,674	1,169	1,443	S1	0,247	0,247	0,247	0,247	0,247	<b>0,247</b>
S2	0,900	1,000	1,506	1,052	1,298	S2	0,222	0,222	0,222	0,222	0,222	<b>0,222</b>
S3	0,598	0,664	1,000	0,698	0,862	S3	0,148	0,148	0,148	0,148	0,148	<b>0,148</b>
S4	0,856	0,951	1,432	1,000	1,234	S4	0,211	0,211	0,211	0,211	0,211	<b>0,211</b>
S5	0,693	0,770	1,160	0,810	1,000	S5	0,171	0,171	0,171	0,171	0,171	<b>0,171</b>
<b>Total</b>	<b>4,046</b>	<b>4,496</b>	<b>6,771</b>	<b>4,730</b>	<b>5,837</b>							
<b>PEE</b>	S1	S2	S3	S4	S5	<b>PEE</b>	S1	S2	S3	S4	S5	<b>Média</b>
S1	1,000	1,006	0,862	1,645	0,907	S1	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	<b>0,21</b>
S2	0,994	1,000	0,857	1,635	0,902	S2	0,20	0,20	0,20	0,20	0,21	<b>0,20</b>
S3	1,160	1,167	1,000	1,909	1,053	S3	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	<b>0,24</b>
S4	0,608	0,611	0,524	1,000	0,524	S4	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	<b>0,12</b>
S5	1,102	1,109	0,950	1,813	1,000	S5	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	<b>0,23</b>
<b>Total</b>	<b>4,865</b>	<b>4,893</b>	<b>4,192</b>	<b>8,003</b>	<b>4,386</b>							

Figura 7.3 – Análise Hierárquica: a) Matriz de impacto dos subsistemas perante os indicadores b) Matriz de impacto normalizado

a)

	FI46	IRep	Op24	IDesc	WR1	E3	PEE
FI46	1	1	1	1	1	1	1
IRep	1	1	1	1	1	1	1
Op24	1	1	1	1	1	1	1
IDesc	1	1	1	1	1	1	1
WR1	1	1	1	1	1	1	1
E3	1	1	1	1	1	1	1
PEE	1	1	1	1	1	1	1
<b>Total</b>	<b>7</b>						

b)

	FI46	IRep	Op24	IDesc	WR1	E3	PEE	Média
FI46	0,143	0,143	0,143	0,143	0,143	0,143	0,143	<b>0,143</b>
IRep	0,143	0,143	0,143	0,143	0,143	0,143	0,143	<b>0,143</b>
Op24	0,143	0,143	0,143	0,143	0,143	0,143	0,143	<b>0,143</b>
IDesc	0,143	0,143	0,143	0,143	0,143	0,143	0,143	<b>0,143</b>
WR1	0,143	0,143	0,143	0,143	0,143	0,143	0,143	<b>0,143</b>
E3	0,143	0,143	0,143	0,143	0,143	0,143	0,143	<b>0,143</b>
PEE	0,143	0,143	0,143	0,143	0,143	0,143	0,143	<b>0,143</b>

Figura 7.4– Análise Hierárquica a) Matriz de impacto dos critérios b) Matriz de impacto dos critérios normalizado

	FI46	IRep	Op24	IDesc	WR1	E3	PEE		Indicadores	Preferência
S1	0,173	0,213	0,315	0,215	0,171	0,247	0,21	X	0,143	0,220
S2	0,315	0,220	0,112	0,268	0,285	0,222	0,20		0,143	0,233
S3	0,166	0,205	0,175	0,215	0,214	0,148	0,24		0,143	0,195
S4	0,278	0,242	0,089	0,259	0,279	0,211	0,12		0,143	0,212
S5	0,068	0,119	0,308	0,042	0,051	0,171	0,23		0,143	0,141
									0,143	0,220
									0,233	

Figura 7.5– Resultado análise hierárquica AHA

Quadro 7.14 – Análise económica Solução A0 (Statu Quo)

	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029
Perdas de água [hm <sup>3</sup> ]	39,23	39,38	39,54	39,70	39,85	40,01	40,17	40,33	40,49	40,65	40,82
Consumo de Energia [GWh]	0,37	0,37	0,37	0,38	0,38	0,38	0,39	0,39	0,40	0,40	0,40
Recuperação de Energia [GWh]	2,96	2,93	2,90	2,87	2,84	2,81	2,78	2,75	2,72	2,69	2,66
Custo de Manutenção [x10 <sup>6</sup> €]	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24
Custo Operacional [x10 <sup>6</sup> €]	-0,77	-0,78	-0,79	-0,80	-0,80	-0,81	-0,82	-0,83	-0,83	-0,84	-0,85
Cash-flow atualizado [x10 <sup>6</sup> €]	-0,70	-0,65	-0,60	-0,55	-0,51	-0,47	-0,43	-0,40	-0,36	-0,34	-0,31
Cash-flow acumulado [x10 <sup>6</sup> €]	-0,70	-1,35	-1,95	-2,50	-3,01	-3,47	-3,90	-4,30	-4,67	-5,00	-5,31

Quadro 7.15 – Análise económica Solução A1 (Reabilitação canal principal)

	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029
Perdas de água [hm <sup>3</sup> ]		25,22	25,38	25,53	25,69	25,85	26,00	26,16	26,32	26,49	26,65	26,81
Consumo de Energia [GWh]		0,33	0,33	0,34	0,34	0,34	0,35	0,35	0,35	0,36	0,36	0,36
Recuperação de Energia [GWh]		2,67	2,64	2,62	2,59	2,56	2,54	2,51	2,48	2,45	2,43	2,40
Manutenção do canal [[x10 <sup>6</sup> €]]		0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Custo Operacional reabilitado [[x10 <sup>6</sup> €]]		-0,38	-0,39	-0,40	-0,40	-0,41	-0,42	-0,43	-0,43	-0,44	-0,45	-0,46
Custo Operacional Statu Quo [x10 <sup>6</sup> €]		-0,77	-0,78	-0,79	-0,80	-0,80	-0,81	-0,82	-0,83	-0,83	-0,84	-0,85
Benefícios [[x10 <sup>6</sup> €]]		0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39

Quadro 7.16 – Análise económica Solução A2 (Substituição contadores DN 100-150 com mais de 10 anos)

	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029
Perdas de água [hm <sup>3</sup> ]		38,14	38,29	38,44	38,59	38,74	38,89	39,04	39,20	39,35	39,51	39,66
Consumo de Energia [GWh]		0,37	0,37	0,37	0,38	0,38	0,38	0,39	0,39	0,40	0,40	0,40
Recuperação de Energia [GWh]		2,96	2,93	2,90	2,87	2,84	2,81	2,78	2,75	2,72	2,69	2,66
Manutenção do canal [x10 <sup>6</sup> €]		0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24
Custo Operacional reabilitado [[x10 <sup>6</sup> €]]		-0,76	-0,77	-0,77	-0,78	-0,79	-0,80	-0,81	-0,81	-0,82	-0,83	-0,84
Custo Operacional Statu Quo [x10 <sup>6</sup> €]		-0,77	-0,78	-0,79	-0,80	-0,80	-0,81	-0,82	-0,83	-0,83	-0,84	-0,85
Benefícios [x10 <sup>6</sup> €]		0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

Quadro 7.17 – Análise económica Solução A3 (Reabilitação de turbinas)

	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029
Perdas de água [hm <sup>3</sup> ]		39,23	39,38	39,54	39,70	39,85	40,01	40,17	40,33	40,49	40,65	40,82
Consumo de Energia [GWh]		0,37	0,37	0,37	0,38	0,38	0,38	0,39	0,39	0,40	0,40	0,40
Recuperação de Energia [GWh]		3,99	3,91	3,87	3,83	3,79	3,75	3,71	3,67	3,63	3,59	3,55
Manutenção do canal [x10 <sup>6</sup> €]		0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24
Custo Operacional reabilitado [[x10 <sup>6</sup> €]]		-0,68	-0,69	-0,70	-0,71	-0,72	-0,73	-0,74	-0,74	-0,75	-0,76	-0,77
Custo Operacional Statu Quo [x10 <sup>6</sup> €]		-0,77	-0,78	-0,79	-0,80	-0,80	-0,81	-0,82	-0,83	-0,83	-0,84	-0,85
Benefícios [x10 <sup>6</sup> €]		0,09	0,09	0,09	0,09	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08

Quadro 7.18 – Análise económica Solução A1+A2 (Reabilitação do canal principal e substituição de contadores DN 100-150 com mais de 10 anos)

	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029
Perdas de água [hm <sup>3</sup> ]		24,14	24,28	24,43	24,58	24,73	24,88	25,04	25,19	25,34	25,50	25,66
Consumo de Energia [GWh]		0,33	0,33	0,34	0,34	0,34	0,35	0,35	0,35	0,36	0,36	0,36

Recuperação de Energia [GWh]		2,67	2,64	2,62	2,59	2,56	2,54	2,51	2,48	2,45	2,43	2,40
Manutenção do canal [x10 <sup>6</sup> €]		0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Custo Operacional reabilitado [[x10 <sup>6</sup> €]]		-0,37	-0,38	-0,38	-0,39	-0,40	-0,41	-0,41	-0,42	-0,43	-0,43	-0,44
Custo Operacional Statu Quo [x10 <sup>6</sup> €]		-0,77	-0,78	-0,79	-0,80	-0,80	-0,81	-0,82	-0,83	-0,83	-0,84	-0,85
Benefícios [x10 <sup>6</sup> €]		0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41

Quadro 7.19 – Análise económica Solução A1+A2+A3 (Reabilitação do canal principal, substituição de contadores DN 100-150 com mais de 10 anos e reabilitação de turbinas)

	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029
Perdas de água [hm <sup>3</sup> ]	0,00	24,14	24,28	24,43	24,58	24,73	24,88	25,04	25,19	25,34	25,50	25,66
Consumo de Energia [GWh]	0,00	0,33	0,33	0,34	0,34	0,34	0,35	0,35	0,35	0,36	0,36	0,36
Recuperação de Energia [GWh]	0,00	3,59	3,56	3,52	3,48	3,45	3,41	3,37	3,34	3,30	3,27	3,23
Manutenção do canal [x10 <sup>6</sup> €]	0,00	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Custo Operacional reabilitado [[x10 <sup>6</sup> €]]	0,00	-0,29	-0,30	-0,30	-0,31	-0,32	-0,33	-0,34	-0,34	-0,35	-0,36	-0,37
Custo Operacional Statu Quo [x10 <sup>6</sup> €]	0,00	-0,77	-0,78	-0,79	-0,80	-0,80	-0,81	-0,82	-0,83	-0,83	-0,84	-0,85
Benefícios [x10 <sup>6</sup> €]	0,00	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48