



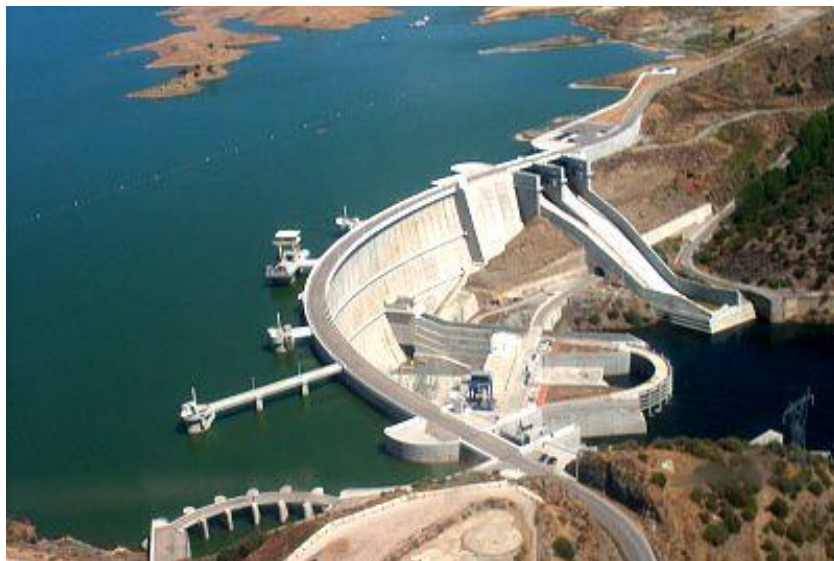
Licenciatura Engenharia Energias Renováveis

Escola de Ciências e Tecnologia

Universidade de Évora

Prática de Sistemas Energéticos

**Quantificação das perdas por evaporação na albufeira de Alqueva
como determinante do balanço de massa e do potencial hidroelétrico
do reservatório**



Rafael Serrano n.º 26397

EDIA, S.A.

Professor Carlos Miranda Rodrigues

Engenheiro Martinho Murteira

2014-2015

Índice

Lista de figuras	5
Lista de tabelas	6
Lista de símbolos	7
Introdução	8
Primeira Parte	
1. Ciclo Hidrológico como matéria de observação	9
1.1 Energia Hidroeléctrica e projectos energéticos	10
1.2 Importância da Hidroelectricidade.....	10
1.3 Hidroelectricidade em Portugal	12
1.4 Geração de Hidroelectricidade	14
1.5 Projecção de uma central.....	15
1.6 Custos de uma central hidroeléctrica	16
1.7 Potência de uma central.....	17
2. Empreendimento de fins múltiplos de Alqueva	20
2.1 Central hidroeléctrica do Alqueva	21
3. Evaporação	23
3.1 Factores que influenciam a evaporação	23
3.1.1 Radiação Solar	23
3.1.2 Temperatura do ar.....	23
3.1.3 Temperatura da superfície da água	24
3.1.4 Humidade Relativa.....	24
3.1.5 Vento	24
3.2 Estações Meteorológicas	25
3.3 Estação de Alquilha	25
3.3.1 Tina evaporométrica Classe A.....	26
4. Determinação da evaporação em tinas evaporométricas, lagos e albufeiras	29
4.1 Método evaporométrico- coeficiente de tina	29
4.2 Método de Brutsaert.....	30
4.3 Fórmula de Kohler	31

Segunda Parte

5. Auditoria à estação de Alquilha	32
6. Metodologia de validação e tratamento de dados de tina	34
7. Balanço hídrico da albufeira	38
8. Potencial Hidroeléctrico do reservatório	39
9. Potência perdida por evaporação	39
Conclusão	40
Referências Bibliográficas	40
Anexo I	42
Anexo II	47

Lista de figuras

Figura 1- O ciclo hidrológico	9
Figura 2- Evolução mundial da produção de hidroeletricidade (2008)	10
Figura 3- Principais produtores de hidroeletricidade (2008)	11
Figura 4- Produção vs potencial hidroeléctrico mundial	11
Figura 5- Produção energética por sector (EDP)	13
Figura 6- Produção eléctrica (2012)	13
Figura 7- Transformações energéticas	14
Figura 8- Esquema de uma central reversível	14
Figura 9- Constituintes de uma central	15
Figura 10- Empreendimento de fins múltiplos de Alqueva	20
Figura 11- Alqueva I e II	21
Figura 12- Localização da estação de Alqueva-Ilha	25
Figura 13- Medidas padrão de uma tina Classe A à superfície	27
Figura 14- Suporte actual da tina evaporométrica	32
Figura 15- Interior da tina evaporométrica	32
Figura 16- Sensor de direcção do vento	42
Figura 17- Sensor de velocidade do vento	43
Figura 18- Sensor de temperatura/humidade do ar	44
Figura 19- Sensor de temperatura da água	45
Figura 20- Sensor de nível da água	45
Figura 21- Indicador de precipitação	46

Lista de Tabelas

Tabela 1- Centrais hidroeléctricas em Portugal	12
Tabela 2- Custos de investimento de uma central	16
Tabela 3- Parâmetros para cálculo de ktina	27
Tabela 4- Período de erro nos dados da estação	34
Tabela 5- Dados de infiltração calculados	38
Tabela 6- Potência mensal da Central de Alqueva	39
Tabela 7- Potência perdida por evaporação	39

Lista de Símbolos

Símbolo	Descrição/Designação	Unidade
A	Área	(m ²)
α_{tina}	Fracção de energia aduzida à tina	-
E_l	Evaporação no lago	(mm/dia)
e_a	Pressão actual de vapor	(kPa)
e_s	Pressão de saturação de vapor	(kPa)
E_{tina}	Evaporação na tina	(mm/dia)
$E_{v_{Brutsaert}}$	Evaporação por Brutsaert	(mm/dia)
h	Cota a que a água se encontra	(m)
h_T	Queda útil	(m)
HR	Humidade relativa	(%)
HR_{max}	Humidade relativa máxima diária	(%)
k_{tina}	Coefficiente de tina	-
ρ	Massa volúmica	kg/m ³
p	Pressão atmosférica	(kPa)
P	Potência	(W)
Q	Caudal	(m ³ /s)
\dot{Q}_{in}	Entrada de água	m ³
\dot{Q}_{out}	Saída de água	m ³
T	Temperatura do ar	(°C)
T_{Max}	Temperatura máxima diária	(°C)
T_{Min}	Temperatura mínima diária	(°C)
θ	Gradiente de temperatura	-
μ	Rendimento da Central hidroeléctrica	(%)
u	Velocidade média diária do vento	(m/s)
U_{tina}	Percurso médio diário do vento	(km)
\dot{V}_T	Volume alocado à produção de energia	(m ³)

Introdução

O objectivo deste relatório é descrever o estágio curricular da disciplina de Prática de Sistemas Energéticos, inserida no Plano de Estudos da Licenciatura em Engenharia de Energias Renováveis da Universidade de Évora. O estágio foi realizado na Empresa De Desenvolvimento E Infraestruturas Do Alqueva S.A. (EDIA) e teve a duração de 3 meses. Iniciou-se no dia 18 de Setembro de 2014 e terminou no dia 19 de Dezembro de 2014.

O plano do estágio tem por tema “*Quantificação das perdas por evaporação na albufeira de Alqueva como determinante do balanço de massa e do potencial hidroelétrico do reservatório*”. Este estágio insere-se em contexto profissional, pelo que, neste âmbito, a EDIA identificou a necessidade de implementar uma metodologia de validação e tratamento de dados registados pela tina evaporométrica, apoiada nas práticas sugeridas pelas organizações internacionais, nomeadamente a Organização Meteorológica Mundial (OMM) e Programa Hidrológico Internacional (PHI).

Os objetivos do trabalho consistem em: (1) realizar uma auditoria à estação meteorológica de Alqueva-Ilha equipada com uma tina evaporométrica do tipo classe A, nomeadamente caracterizar as condições gerais de instalação e de funcionamento da estação, e ainda analisar e validar informação histórica; (2) formular e implementar uma metodologia de validação e tratamento de dados, medidos através da tina evaporométrica, suportada nas práticas sugeridas pelas organizações internacionais, nomeadamente a Organização Meteorológica Mundial (OMM) e Programa Hidrológico Internacional (PHI); (3) efetuar o balanço hídrico da albufeira e avaliar o potencial hidroelétrico do reservatório; (4) caracterizar o aproveitamento hidroelétrico, designadamente através da descrição da central hidroelétrica de Alqueva e a sua importância em Portugal; por último (5) proceder ao cálculo da Energia Elétrica que se podia produzir com o volume de água perdido por evaporação.

A área de estudo compreende a área ocupada pela albufeira de Alqueva e a central hidroelétrica de Alqueva.

O trabalho será dividido em 2 partes: a primeira trata da abordagem teórica sobre energia hidroelétrica, evaporação e estações meteorológicas. O segundo capítulo é referente à parte prática do estágio.

Primeira parte

1. O ciclo hidrológico como matéria de observação

A água é o único recurso natural que está presente em todos os aspectos da civilização humana, desde o desenvolvimento agrícola e industrial até aos valores culturais enraizados na sociedade. O conhecimento hidrológico torna-se fulcral para a sobrevivência e bem-estar do ser humano e também das outras espécies.

Esta encontra-se no planeta Terra em 3 estados físicos: líquido, sólido e gasoso; localizando-se em 3 camadas diferente: atmosfera, mares e oceanos, e continentes.

Sendo uma matéria dinâmica no espaço e no tempo, a água pode mudar de estado e passar de uma camada para outra. Este transporte pode ser representado pelo ciclo hidrológico. [1]

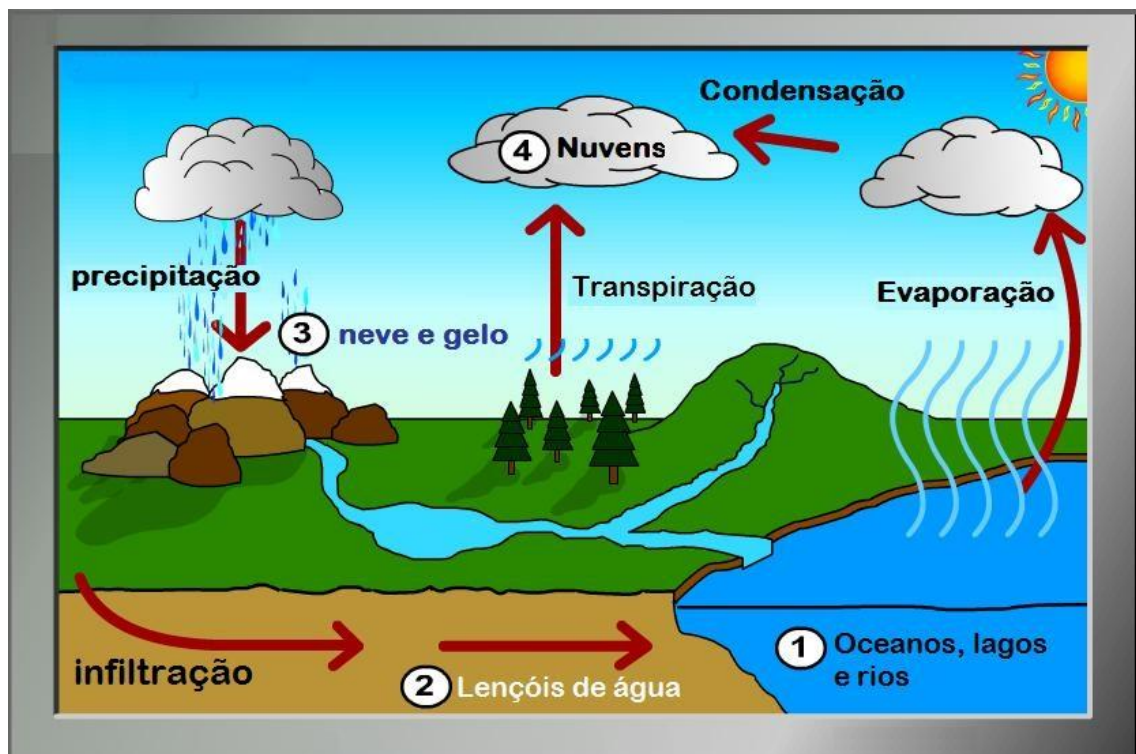


Figura 1 O ciclo hidrológico

No século XIX o ser humano chegou à conclusão que a água tem um grande potencial hidroelétrico. Devido à sua densidade volúmica, o transporte de água acarreta uma grande quantidade de energia. Então, a Humanidade decidiu usar essa propriedade para produzir energia eléctrica.

1.1 Energia hidroeléctrica e projectos energéticos

No Universo tudo é Energia. Este factor é de extrema importância para satisfazer as nossas necessidades físicas e contribuir para o desenvolvimento económico da sociedade moderna. Com o crescimento contínuo da população, é lógico que as necessidades energéticas acompanhem esse crescimento. A sociedade de hoje tem o seu paradigma baseado na produção de energia suportada nos combustíveis fósseis. Cada vez mais se torna necessário a quebra deste modelo, tornando-se mais inteligente usar formas de energia renovável. Alguns países já tomaram consciência desse facto e começam a usar cada vez mais este tipo de fontes de energia. Esta parte do trabalho dá ênfase à energia hídrica.

A produção de energia eléctrica é uma boa forma de utilizar os recursos hídricos. Posto isto, a informação e a análise de dados hidrológicos são essenciais para planificar a modelação de fontes de energia eléctrica provenientes de energia hídrica. [4]

1.2 Importância da Hidroelectricidade

A hidroelectricidade é a forma mais comum de energia renovável e é responsável por uma parte importante de energia produzida mundialmente- produz 3 288 TWh mundialmente. Tal valor corresponde a 16% da produção global de electricidade (2008). [18]

Desde 1990, a produção hidroeléctrica aumentou 50%, com a China em destaque.

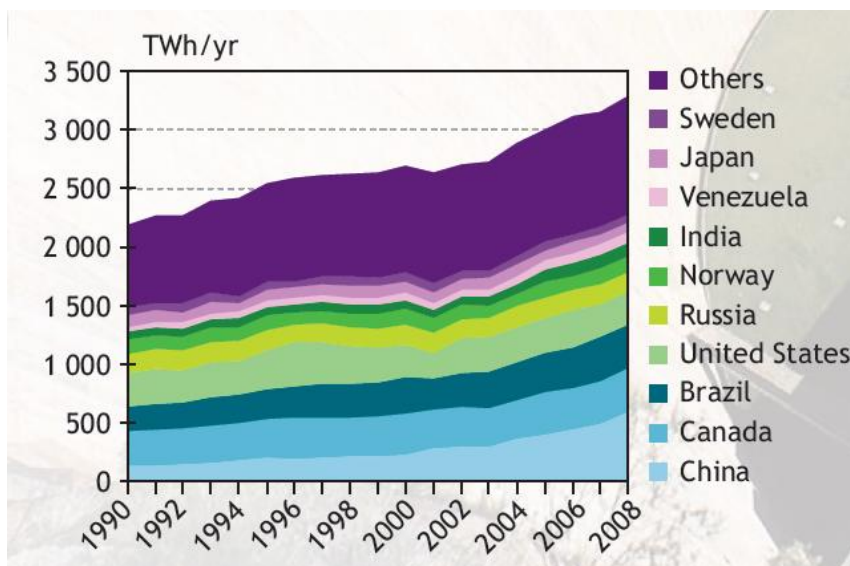


Figura 2 Evolução mundial da produção de hidroelectricidade (2008)

Está estimado que a exploração da hidroelectricidade consegue atingir 16 400 TWh/ano. Os cinco países com mais potencial conseguem produzir 8 360 TWh/ano, e os cinco a seguir 2 500 TWh/ano. Estes 10 países são responsáveis por 2/3 da produção hidroeléctrica mundial.

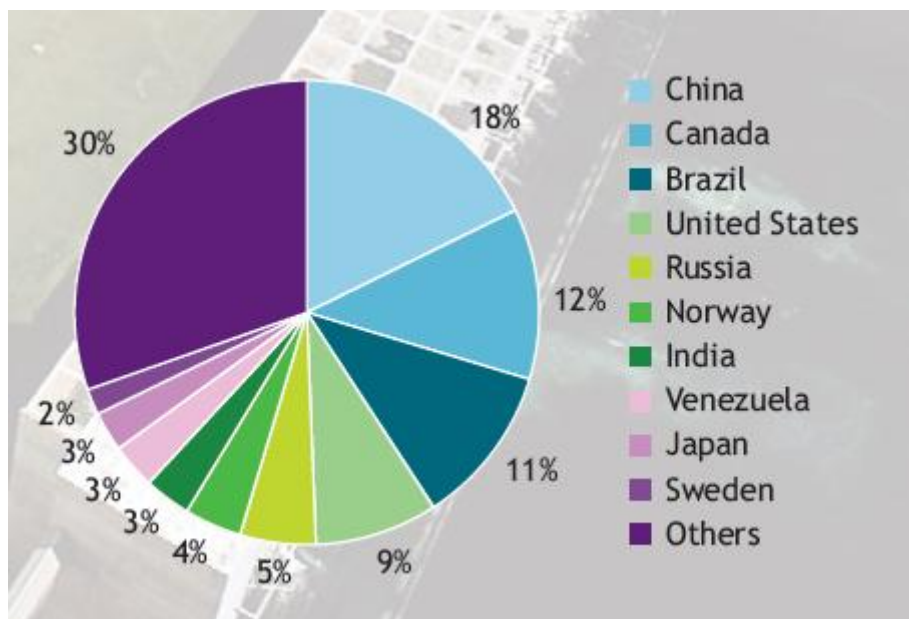


Figura 3 Principais produtores de Hidroelectricidade [18]

Globalmente, apenas 19% do potencial hidroelétrico foi desenvolvido. De referir que os maiores produtores hidroelétricos usam cerca de 60% do seu potencial.

O próximo gráfico mostra que com ambição alguns países podem fazer “explodir” o seu potencial no que toca á produção hidroelétrica:

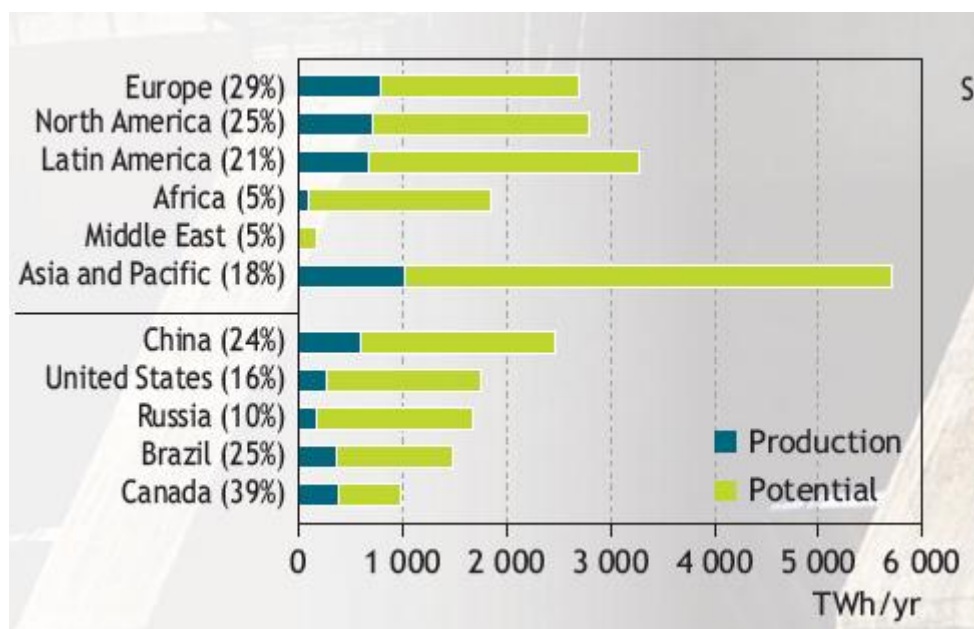


Figura 4 Produção vs Potencial Hidroelétrico Mundial [18]

1.3 Hidroelectricidade em Portugal

A utilização da água como força motriz para produção de energia eléctrica inicia-se a nível mundial em meados do século XIX e em Portugal na última década desse século, tendo-se desenvolvido inicialmente de uma forma “espontânea” até por volta de 1930, ditada pela necessidade de satisfazer consumos locais, nomeadamente para alimentar pequenas instalações de iluminação pública e oficinas de moagens, fiação e tecelagem e, logo a seguir, de fábricas de têxteis e lanifícios. [17]

A partir de 1930 começa a desenhar-se um quadro em que, visando o desenvolvimento industrial e económico do País, emerge a ideia da necessidade de aproveitar a energia da água dos rios para a produção de electricidade, tornando-se assim num meio para atingir o objectivo da industrialização.

O potencial energético bruto dos nossos rios encontra-se avaliado em cerca de 32 000 GWh, dos quais 24 500 GWh e 20 000 GWh são considerados, respectivamente, como técnica e economicamente aproveitáveis. Destes últimos encontravam-se já aproveitados, em 1990, cerca de 11 600 GWh, estando identificados outros 6 600 GWh como candidatos a futura integração no sistema electroprodutor em aproveitamentos de grande e média dimensão. Restam cerca de 1 800 GWh como realizáveis em aproveitamentos de pequena dimensão (mini-hídricos).

A próxima tabela é relativa às centrais hidroeléctricas em funcionamento (dados REN)

Informação Sobre a Rede Nacional de Transporte

Produtores em Regime Ordinário ligados à Rede Nacional de Transporte - Centrais Hidroeléctricas

Centrais	Curso de água	Ano de entrada em serviço	Potência instalada	Capacidade útil	
			[MW]	[hm ³]	[GWh]
Alto Lindoso	Lima	1992	630	359	250
Lindoso	Lima	1922	15	0	-
Touvedo	Lima	1993	22	7	0
Alto Rabagão	Rabagão	1964	68	550	1049
Venda Nova-Vila Nova	Rabagão	1951	90	95	136
Venda Nova-Frades	Rabagão	2005	191	-	-
Paradela-Vila Nova	Cávado	1956	54	159	223
Salamonde	Cávado	1953	42	57	28
Vilarinho das Furnas	Homem	1972	125	116	138
Cançada	Cávado	1955	62	144	33
Miranda	Douro	1960	369	6	-
Picote	Douro	1958	195	13	-
Picote II	Douro	2011	245	-	-
Bemposta	Douro	1964	240	20	-
Bemposta II	Douro	2011	191	-	-
Pocinho	Douro	1983	186	12	-
Valeira	Douro	1976	240	13	-
Vilar-Tabuaço	Távora	1965	58	98	116
Réqua	Douro	1973	180	12	-
Varosa	Varosa	1934	25	13	-
Carrapatelo	Douro	1971	201	16	-
Torrão	Tâmega	1988	140	58	7
Crestuma/Lever	Douro	1985	117	16	-
Caldeirão	Caldeirão	1994	40	3	2
Agueira	Mondego	1981	336	227	40
Raiva	Mondego	1982	24	13	0
Sabugueiro I	Rib. Lagoa	1947	13	14	30
Desterro	Alva	1959	13	4	4
Ponte de Jugais	Alva	1923	20	-	-
Vila Cova	Alva	2001	23	-	-
Santa Luzia	Rib. Unhais	1943	24	50	62
Cabril	Zêzere	1954	108	614	339
Bouçã	Zêzere	1955	44	15	5
Castelo do Bode	Zêzere	1951	159	901	163
Pracana	Ocreza	1993	41	101	15
Fratel	Tejo	1974	132	21	-
Belver	Tejo	1951	81	8	-
Alqueva	Guadiana	2003	240	4151	442
Total			4985	-	3081

Tabela 1 Centrais Hidroeléctricas em Portugal (2012) [REN]

Nos gráficos seguintes poder-se-á ver a contribuição da energia hidroelétrica no país.

Repartição por tecnologia da energia comercializada pela EDP Serviço Universal em 2013

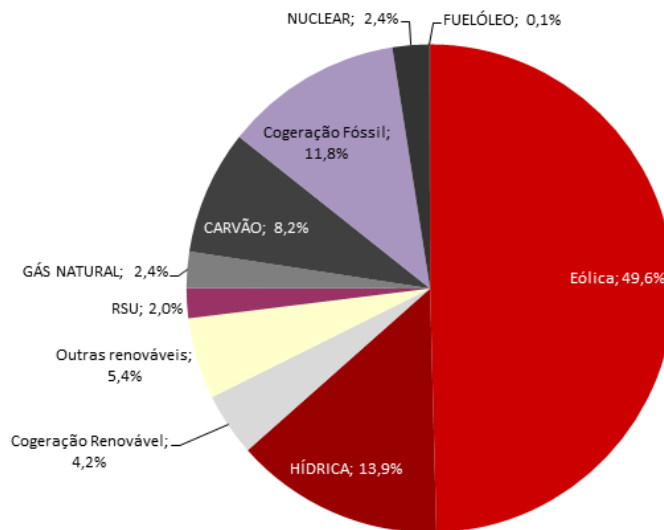


Figura 5 Produção energética por sector [EDP]

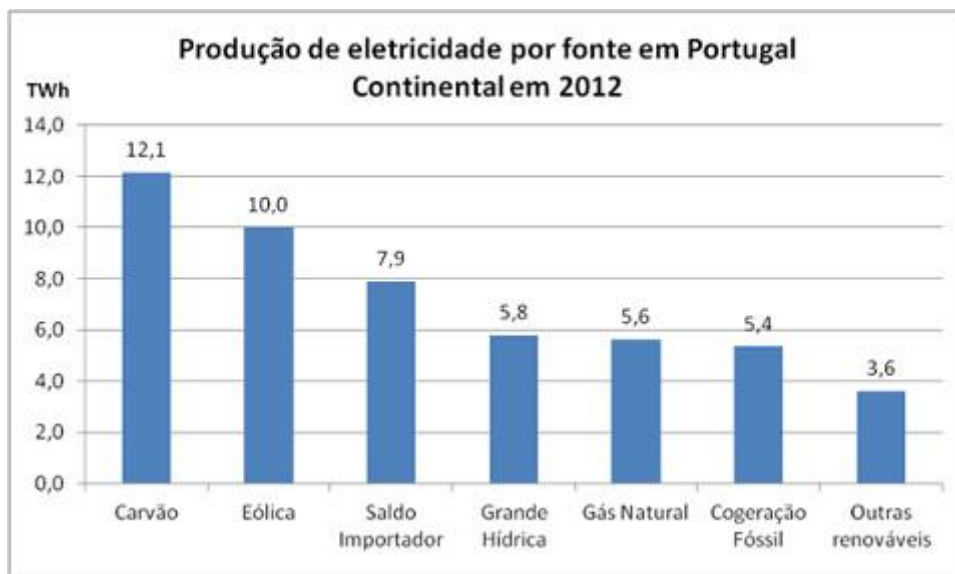


Figura 6 Produção eléctrica (2012) [EDP]

1.4 Geração de Hidroelétricidade

A energia hidroelétrica é uma fonte que se renova constantemente graças ao ciclo hidrológico. Este tipo de energia é obtida através da energia potencial de uma massa de água. Ulteriormente, esta é convertida em energia elétrica através da passagem por uma turbina, que por sua vez faz funcionar o alternador, permitindo obter corrente elétrica de média tensão. Depois, essa tensão é elevada pelos transformadores, com o objectivo de reduzir as perdas no transporte, e injectada na rede para ser distribuída pelos consumidores.



Figura 7 Transformações energéticas

Com o intuito de se usar a energia hídrica de uma forma mais eficiente, as centrais hídricas podem ser reversíveis. Para que uma central hídrica reversível possa operar é necessário que existam 2 reservatórios: um com cota mais baixa e o outro de cota superior. Os reservatórios são interligados por um circuito hidráulico onde existe um conjunto turbina-bomba reversível acoplada a uma máquina elétrica, permitindo que a central funcione tanto em modo de geração, quando a água flui do reservatório superior para o inferior (normalmente durante o dia), como em modo de bombagem, quando a água é bombeada do reservatório inferior para o reservatório superior (durante a noite, onde existem mais horas de vazio). Para a mudança de regime é necessário a alteração do sentido de rotação da turbina. O funcionamento da central é supervisionado e comandado através do centro de controlo. [4]

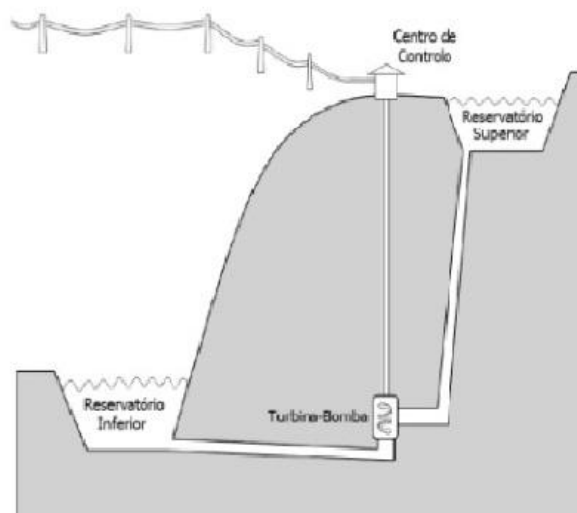


Figura 8 Esquema de uma central reversível

As vantagens das centrais hidroelétricas em relação a outras centrais de produção de energia são descritas a seguir: [1]

- a) Não emitem gases de efeito estufa;
- b) Centrais Hidroelétricas podem alcançar rendimentos até 90%;

- c) Oferecem um funcionamento fiável e flexível;
- d) Não se degradam facilmente;
- e) É possível armazenar a água e usar esta para outros meios (rega, consumo humano);
- f) São capazes de satisfazer os pedidos de electricidade em pouco tempo;
- g) Produção flexível capaz de suprir o diagrama de carga nos períodos de maior solicitação de energia eléctrica;
- h) Não necessitam de grandes gastos em combustível fóssil;
- i) Baixos custos de manutenção;

1.5 Projecção de uma central

Para se poder efectuar uma estimativa correcta da energia eléctrica que se pode gerar é necessário um registo fiável dos caudais e de outros dados hidrológicos. Devem ser feitos os seguintes registos: [1]

- a) Dados diários e/ou mensais de caudais durante um longo período de tempo (pelo menos 10 anos);
- b) Requisitos de caudal mínimo a jusante;
- c) Curvas de caudal-duração;
- d) Relação entre a altura e a descarga;
- e) Áreas de drenagem;
- f) Objectivos do projecto, armazenamento disponível e normas de funcionamento;
- g) Perdas por evaporação;
- h) Perdas por infiltração;
- i) Caudal ecológico;
- j) Dados de descarga máxima anual;

A capacidade das turbinas deve ser de uma potência tal que possa aproveitar o caudal disponível durante 20 a 40% do tempo.

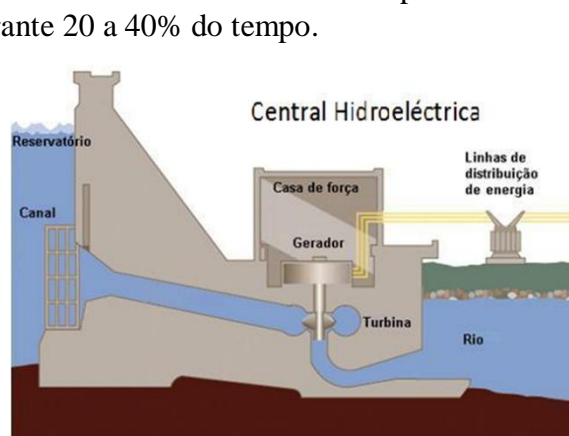


Figura 9 Constituintes de uma central

1.6 Custos de uma central hidroelétrica

Para construir uma central é necessária a realização de um estudo económico a priori. Os parâmetros que influenciam os custos de investimento e o posterior retorno económico são:

- a) Localização do projecto;
- b) Presença e tamanho do reservatório;
- c) Potência hipotética a gerar durante o período-base e o de pico;
- d) Controlo de cheias, necessidade de água para rega ou para produção agrícola e industrial;

A tabela a seguir mostra os custos de investimento consoante o tipo de central hidroelétrica a construir para países da OCDE:

Categoria	Potência	Armazenamento	Carga	Custos de investimento (USD M/MW)
1. pequena	< 10 MW	Escoamento do Rio	Período-base	2-4
2. média	10-100 MW	Escoamento do Rio	Período-base	2-3
3. média	100-300 MW	Reservatório	Período-base e pico	2-3
4. grande	>300 MW	Reservatório	Período-base e pico	<2

Tabela 2 Custos de investimento de uma Central [18]

Os custos de produção de electricidade variam desde os 50 aos 100 USD/MWh. Quanto aos custos de manutenção, variam entre os 5 e os 20 USD/MWh para os tamanhos 3 e 4, duplicando esse valor para os tamanhos 1 e 2.

1.7 Potência de uma central

A potência de uma central hidroelétrica pode ser vista pela seguinte equação:

$$P = 9,81\rho Q h \mu \quad (1)$$

onde P é a Potência da central, ρ é a densidade da água, Q o caudal de descarga, h é a altura de caída e μ é o rendimento da central. [4]

No sistema da central há que considerar as perdas por evaporação e as perdas hidráulicas nas condutas onde a água passa até chegar às turbinas. Dentro de certos limites, as perdas hidráulicas são controláveis, pois diminuem com o aumento das condutas e também com uma boa escolha do tipo de geometria das mesmas.

O caudal disponível, contabilizando as perdas associadas pode sofrer alterações mediante: [1]

- a) Regulação através dos descarregadores;
- b) Construção de reservatórios;
- c) Sistema de bombeamento;

2. Empreendimento de fins múltiplos de Alqueva

O estágio foi realizado a tempo integral na Empresa de Desenvolvimento e Infraestruturas do Alqueva, S.A (EDIA). A EDIA é uma empresa pública e é a empresa responsável pela conceção e construção e exploração do Empreendimento de fins Múltiplos de Alqueva (EFMA Enquanto gestora do projeto Alqueva, a EDIA tem como missão contribuir para a dinamização da economia, do desenvolvimento social e preservação do ambiente desenvolvendo ações de gestão que potenciem o território, valorizem os recursos hídricos e a promovam regadio.

O EFMA - Empreendimento de Fins Múltiplos de Alqueva é um projeto centrado na barragem de Alqueva e é constituído por um conjunto de infraestruturas agrupadas, sendo a albufeira de Alqueva a mãe d'água do projeto com capacidade para garantir autossuficiência durante 4 anos consecutivos de seca.

A albufeira de Alqueva é o maior lago artificial da Europa e estende-se por 83 km ao longo dos concelhos de Moura, Portel, Mourão, Reguengos de Monsaraz e Alandroal, ocupando uma área de 250 km². A capacidade total de armazenamento da albufeira de Alqueva é de 4 150 milhões de m³, sendo de 3 150 milhões de m³ o seu volume utilizável em exploração normal.

O projeto de Alqueva assenta no conceito de fins múltiplos e na gestão integrada da sua reserva estratégica de água, nomeadamente no uso da água para abastecimento público, com o reforço a 5 barragens que abastecem cerca de 200 000 habitantes; no uso da água para a agricultura, com uma área equipada de regadio de cerca de 120 000 hectares; no uso da água para a indústria; e no uso da água para produção de energia limpa e para o turismo.

O projeto de Alqueva é, atualmente, o maior investimento alguma vez realizado no Alentejo.

Descrição sumária, o Empreendimento de Fins Múltiplos de Alqueva é um sistema composto pelas seguintes infraestruturas, ilustrado na figura 1:

Barragem de Alqueva

Altura - 96 m
Comprimento do coroamento - 458 m
Capacidade Total - 4 150 hm³
Nível de Pleno armazenamento - cota 152 m
Nível Mínimo de Exploração – cota 130 m
Capacidade Útil - 3 150 hm³
Espelho de água - 250 km²
Comprimento da albufeira - 83 km
Margens - 1 160 km

Central Hidroelétrica de Alqueva

Potência instalada – Alqueva I e II - 2 x 260 MW

Total : 520 MW

Barragem de Pedrógão (contra embalse de Alqueva)

Altura - 43 m

Comprimento - 448 m

Capacidade total - 106 hm³

Capacidade útil - 54 hm³

Espelho de água - 11 km²

Comprimento da albufeira - 23 km

Margens - 118 km

Central Mini Hídrica de Pedrógão

Potência instalada - 10 MW

Sistema Global de Rega

Área - 119 139 ha

Extensão da rede primária - 382 km

Extensão da rede secundária –1 620 km

Barragens, Reservatórios e Açudes – 69

Estações elevatórias - 47

Mini Hídricas - 5

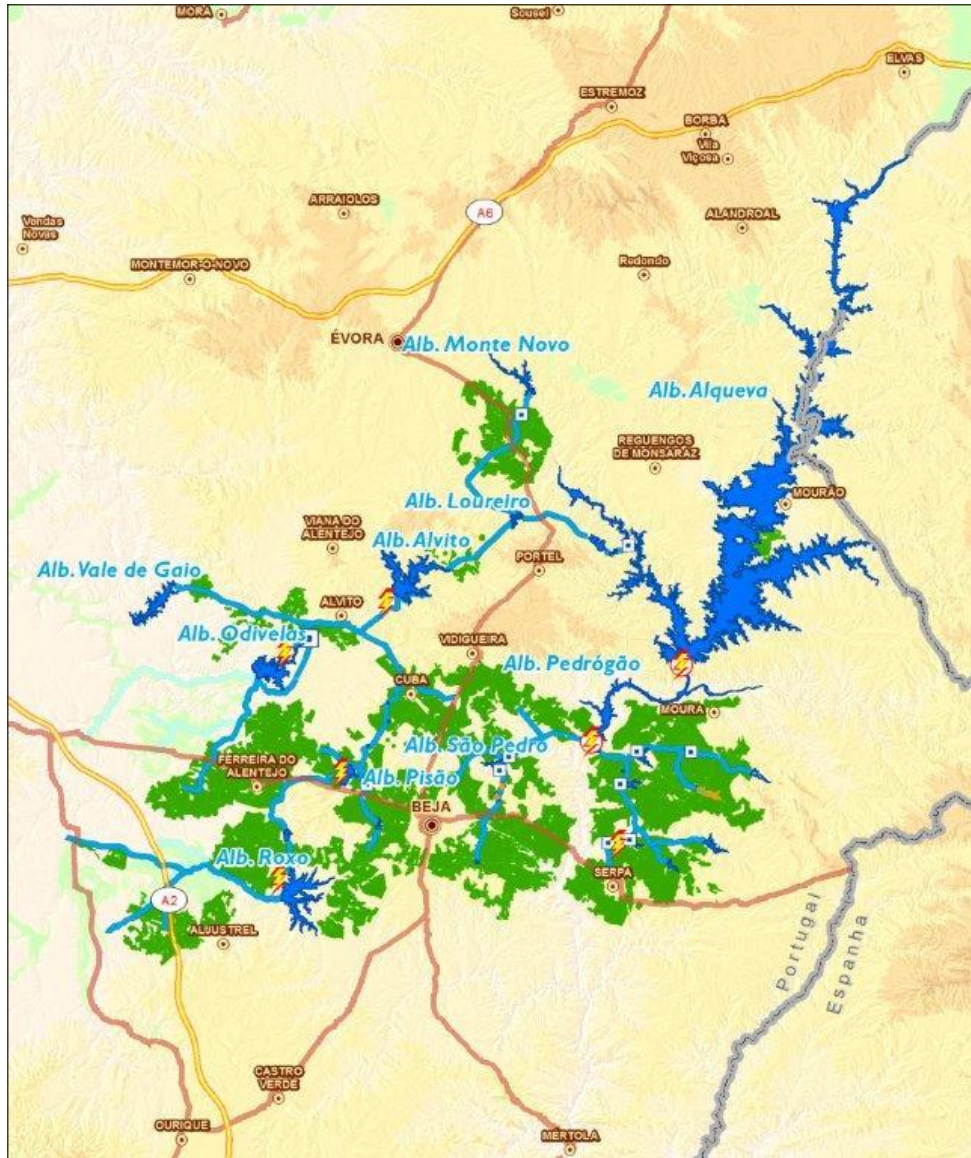


Figura 10- Empreendimento de fins múltiplos de Alqueva

2.1 Central Hidroelétrica de Alqueva:

O esquema geral da central a montante pode ser visualizado na seguinte figura:

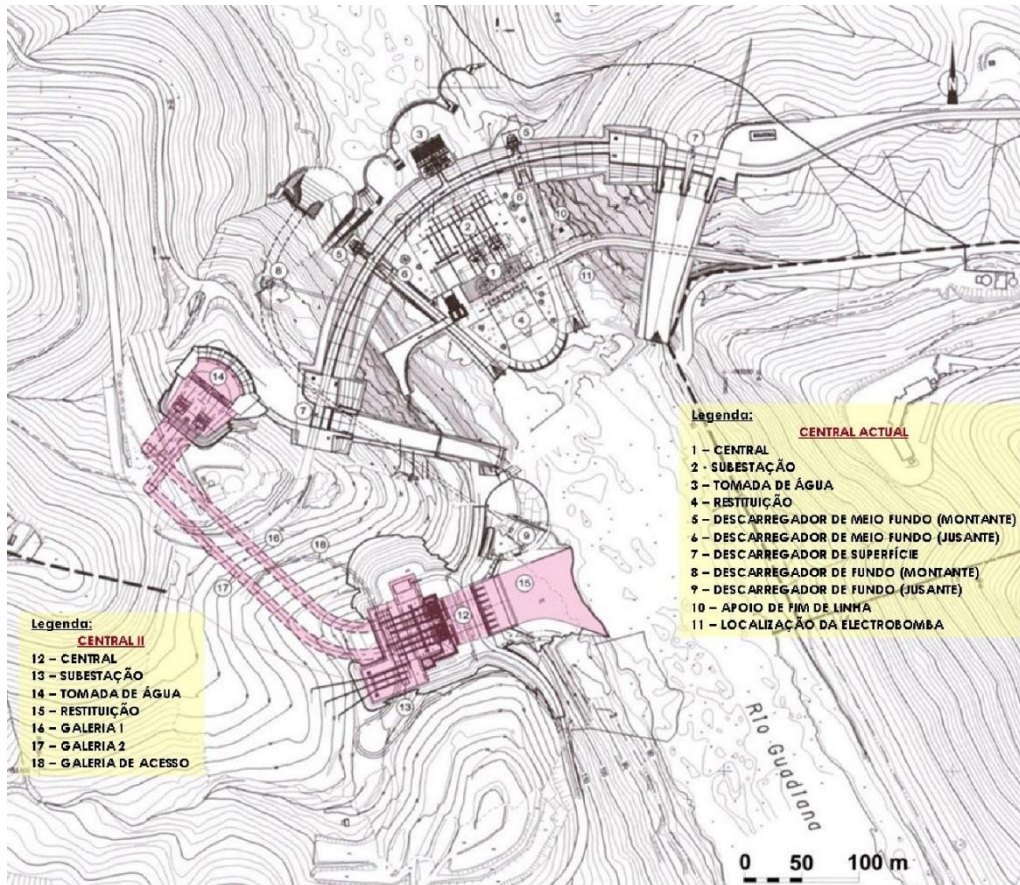


Figura 10 Alqueva I e II

A Barragem de Alqueva é do tipo de abóbada de dupla curvatura e está equipada, em termos de órgãos de segurança, com um descarregador de superfície, dois de meio fundo e dois de fundo. Estes órgãos são destinados a conferir à barragem a necessária capacidade de escoamento logo que sejam ultrapassados os valores de nível pleno de armazenamento, situado à cota 152m, e sempre que se registem valores elevados de aflúncias de caudais.[13]

Os descarregadores de superfície proporcionam uma capacidade de vazão total de 6300 m³/s, por meio da acção das comportas de serviço, de tipo segmento, de tipo segmento.

As turbinas da central são do tipo Francis de eixo vertical e com alternador-motor. O diâmetro da roda é de 6 m. Esta turbina consegue atingir 136,36 r.p.m, o que corresponde a um rendimento de 85%.

No ano de 2013 foram finalizadas as obras destinadas ao reforço de potência da central. A energia produzida, em valor médio anual, por esta Central (381 GWh) passou a corresponder a 4% de toda a energia produzida em Portugal. Este valor será suficiente para abastecer os consumos dos concelhos de Évora, Beja, Portel, Moura e Vidigueira.[12]

Características:

- a) Potência instalada (turbinas) – Alqueva I e II - 2 x 260 MW ;
- b) Caudal nominal turbinável- 203,2 m³/s;
- c) Queda útil nominal- 66,9 m ;

O aproveitamento possui a capacidade de recuperação dos caudais turbinados pelo meio de bombagem e utilizando o mesmo circuito hidráulico, com captação na albufeira de Pedrogão situada a jusante da albufeira de Alqueva. Em modo bomba, a potência é de 106,9 MW e o caudal nominal é de 140,2 m³/s.

O Programa Nacional de Barragens (PNBEPH) alega que estes aproveitamentos de bombagem consomem mais energia daquilo que as turbinas conseguem produzir usando a mesma quantidade de água. Para contornar esse problema, a bombagem é feita durante os períodos de vazio, onde a tarifa de electricidade atinge valores mais baixos. Economicamente a escolha de bombagem de água torna-se mais rentável. [7]

3. Evaporação

A evaporação é o fenómeno em que uma substância na fase líquida passa para a fase de vapor. Para isso é necessário que existam trocas de calor e de massa entre a superfície evaporante e a sua fronteira.

Quando existe evaporação, a temperatura da superfície da água diminui, pois por cada grama de água que muda de estado estão se a retirar 600 cal (2512,08 J) da superfície. A perda de água por evaporação diminui a sua qualidade- como apenas a água pura muda de estado, a concentração de impurezas torna-se maior. [3]

Nos casos que necessitem de um balanço hídrico, é importante quantificar este conceito, pois assim os escoamentos e as recargas de uma albufeira podem ser feitas de forma mais eficiente. Além disso, o planeamento e projecto de aproveitamentos também se fará de uma forma mais eficaz, existindo uma definição de armazenamento mais correcta.

É impossível medir a evaporação de grandes superfícies directamente. Os estudos que existem são baseados em parâmetros terrestres onde não se verificam as condições sobre a superfície aquática livre (advecção, viscosidade, etc). Por isso foram elaborados vários métodos indirectos, empíricos e semi-empíricos que conseguem formular resultados aceitáveis. Este trabalho vai dar ênfase a 3 métodos de cálculo de evaporação: Coeficiente de Tina Evaporométrica; Fórmula de Kohler; Evaporação através da Fórmula de Brutsaert.

3.1 Factores que influenciam a evaporação [8]

- a) Radiação Solar;
- b) Temperatura do ar;
- c) Temperatura da água à superfície;
- d) Humidade Relativa;
- e) Velocidade do vento;

3.1.1 Radiação solar

Na maior parte das situações é a principal fonte de energia dos processos evaporativos. É responsável por aquecer o ar e aumentar a temperatura da água.

A radiação solar é medida num local próximo da tina. É registada através de um piranómetro e os dados registados devem ser contínuos.

3.1.2 Temperatura do ar

Quanto maior for a temperatura do ar, mais vapor de água a vizinhança da albufeira pode conter, aumentando assim a capacidade evaporativa.

Torna-se conveniente dispor de registos contínuos de temperatura juntamente com valores de humidade.

3.1.3 Temperatura da superfície da água

O aumento da temperatura da água aumenta a energia cinética das moléculas, fazendo com que a mudança de fase do estado líquido para o gasoso ocorra com maior facilidade.

Para cada instalação há um modelo de termómetro que se consegue adaptar mais convenientemente.

3.1.4 Humidade Relativa

Quanto maior for a diferença entre a pressão de vapor da superfície e a do ar, maior evaporação irá ocorrer.

A medição desta grandeza faz-se no mesmo local onde são feitas as medições de temperatura do ar.

3.1.5 Vento

Permite que o processo evaporativo continue. Quando existe evaporação, na camada de ar junto à superfície líquida há um aumento de vapor de água. O vento vai retirando essa camada de ar, impedindo que o vapor de água sature. É também responsável pelo aumento de energia cinética das moléculas.

3.2 Estações Meteorológicas

Uma estação meteorológica (ou evaporométrica) é um local onde são recolhidos dados para análise da evaporação. Encontra-se equipada com os seguintes instrumentos de medição e de registo das variáveis referentes à evaporação: [2]

- a) Tina evaporométrica;
- b) Pluviómetro;
- c) Sensores de temperatura/humidade;
- d) Piranómetro;
- e) Anemómetro;
- f) Sensor de direcção do vento

Antigamente a instrumentação era analógica, pelo que requeria a visita regular de técnicos para o registo de dados. Hoje em dia, os instrumentos analógicos foram substituídos por sensores electrónicos digitais. Estes, se substituídos e instalados correctamente, evitam alguns erros humanos, proporcionam o registo de dados contínuos e evitam trabalho de campo e algumas deslocações.

3.3 Estação de Alqueva

Trata-se de uma estação meteorológica que tem por base uma tina evaporométrica para a estimação da evaporação na albufeira de Alqueva, juntamente com outro tipo de sensores.

A estação encontra-se a montante da Barragem Hidroeléctrica de Alqueva. Situa-se na primeira ilha a montante do paredão.

Coordenadas:

- 1 Latitude: 38°12'18.3"N
- 2 Longitude: 7°30'03.6"W



Figura 11 Localização da estação de Alqueva-Ilha

A estação de Alquilha é uma estação automática. Este tipo de estação possibilita a recolha de dados meteorológicos de uma forma automatizada e segundo um passo de tempo estabelecido. A informação dada pelos instrumentos de medição é enviada para um 'Data Logger' (memória do sistema), que com base nos valores instantâneos determina as médias horárias dos elementos climáticos medidos. Os dados ficam armazenados no 'Data Logger' até serem exportados através de um computador ou por via telefónica (GSM). Para que isso seja possível é necessário que exista um painel solar gerador de energia. Esse painel vai alimentar uma bateria, que por sua vez irá fazer funcionar os sensores e o modem, para que o registo contínuo de dados se torne possível.

3.3.1 Tina evaporométrica Classe A

Nas tinas de Classe A, o objectivo é ajustar a evaporação da tina em relação à albufeira, tendo em conta os ganhos e perdas de calor nas paredes e no fundo, pois o material metálico comporta-se como um elemento resistivo.

Este tipo de tina é recomendado pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) como instrumento paradigmático de referência. A sua fiabilidade e rendimento foram estudados em condições climáticas muito diversas e numa boa gama de latitudes e altitudes. Esta tina é constituída por materiais resistentes e anti-corrosão, proporcionando uma relação estável com os elementos meteorológicos que determinam a evaporação.

Pode ser instalada de 3 maneiras diferentes: [1]

- a) Enterradas no solo:
 - Reduzem-se os efeitos na fronteira- radiação directa nas paredes laterais e trocas de calor entre a atmosfera e a tina;
 - Difícil instalação, limpeza e reparação;
- b) Flutuantes:
 - Evaporação aproxima-se da realidade, pois os efeitos fronteira são atenuados;
 - Possibilidade de transferência de água por salpico devido às oscilações da plataforma;
- c) Sobre a superfície (estrado de madeira):
 - Evaporação é superior devido à energia radiante interceptada pelas paredes laterais;
 - Trocas de calor são mais acentuadas mas os efeitos podem ser minimizados isolando termicamente a tina;

As tinas instaladas à superfície estão apoiadas num estrado de madeira a 15 cm do solo, de modo a que o ar possa circular livremente na parte de baixo. [11]

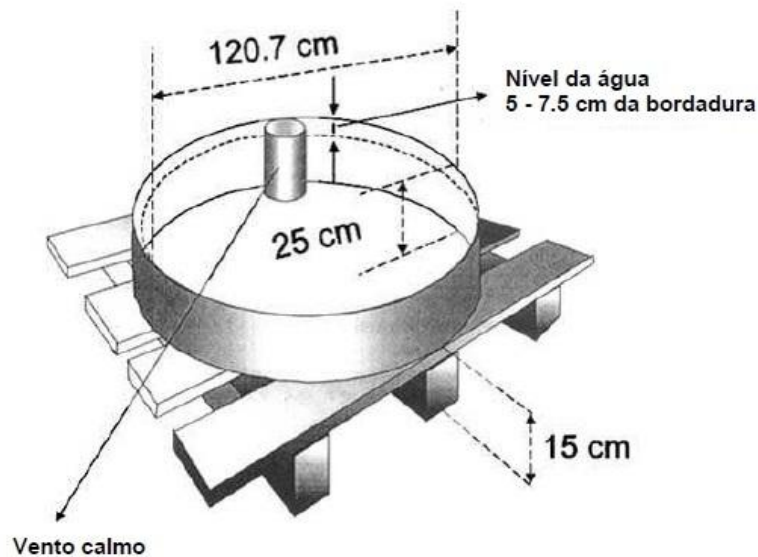


Figura 12 Medidas padrão de uma tina Classe A à Superfície

A tina evaporométrica de Classe A deve permanecer com a água a variar entre os 5 e os 7 cm da borda superior de modo a conferir fiabilidade aos dados registados. Se a água estiver abaixo desse registo, o volume de água na tina será menor, o que vai fazer com que a evaporação aumente mediante essas condições.

A manutenção da água na profundidade recomendada evita erros que podem chegar a 15% da evaporação estimada.

Além disso é necessário efectuar a limpeza da tina regularmente, removendo poeiras, óleos, fungos, etc. Deste modo evita-se problemas de reflexão e perdas de propriedades da água capazes de interferir com a evaporação.

O valor da precipitação deve ser descontado aquando das medições de nível da tina. [5]

Recomendações para a instalação/manutenção de tinas evaporométricas

- a) Preferência por um local onde se consigam manter niveladas (exceção para as flutuantes);
- b) Livres de obstruções (árvores, edifícios, arbustos, etc), pois estas funcionam como elementos viscosos e influenciam a medição dos parâmetros referentes á evaporação;
- c) A tina não deve estar sujeita a sombras;
- d) Existência de uma vedação para proteger os instrumentos de animais. Não deve prejudicar o escoamento do vento;
- e) A altura das ervas não deve exceder os 7,5cm;

A descrição dos outros sensores referentes à estação encontra-se em anexo

4. Determinação da evaporação em tinas evaporométricas, lagos e albufeiras

4.1 Método evaporométrico- Coeficiente de tina

A relação entre a evaporação de uma albufeira e uma tina evaporométrica pode ser feita pela seguinte equação: [5]

$$E_l = k_{tina} E_{tina} \quad (2)$$

onde E_l é a evaporação da superfície da albufeira, k_{tina} é uma constante proporcional adimensional e E_{tina} é a evaporação registada na tina.

O coeficiente k_{tina} não existe à escala diária, por isso utilizou-se a seguinte aproximação: considerar-se que a evaporação no lago é equivalente à Evapotranspiração máxima em relva sem restrições hídricas. Esses coeficientes estão tabelados e dependem da Humidade Relativa e da velocidade do vento. Assim já se torna possível registar os valores diários de evaporação, se bem que se trata de uma correlação entre evaporação e evapotranspiração. Usou-se, então, a seguinte tabela para a determinação de k_{tina} : [15]

Humedad Relativa	Caso A, Tina rodeada de cubierta Verde (grama)				Caso B, Tina rodeada de superficie desnuda (barbecho)			
		Baja < 40%	Media 40-70%	Alta > 70%		Baja < 40%	Media 40-70%	Alta > 70%
>								
Velocidad del Viento ↓	Distancia de la Cubierta Verde				Distancia de la Superficie Seca			
Ligero (<2 m/s)	1	0,55	0,65	0,75	1	0,70	0,80	0,85
	10	0,65	0,75	0,85	10	0,60	0,70	0,80
	100	0,70	0,80	0,85	100	0,55	0,65	0,75
	1000	0,75	0,85	0,85	1000	0,50	0,60	0,70
Moderado (2-5 m/s)	1	0,50	0,60	0,65	1	0,65	0,75	0,80
	10	0,60	0,70	0,75	10	0,55	0,65	0,70
	100	0,65	0,75	0,80	100	0,50	0,60	0,65
	1000	0,70	0,80	0,80	1000	0,45	0,55	0,60
Fuerte (5-8 m/s)	1	0,45	0,50	0,60	1	0,60	0,65	0,70
	10	0,55	0,60	0,65	10	0,50	0,55	0,65
	100	0,60	0,65	0,70	100	0,45	0,50	0,60
	1000	0,65	0,70	0,75	1000	0,40	0,45	0,55
Muy fuerte (> 8 m/s)	1	0,40	0,45	0,50	1	0,50	0,60	0,65
	10	0,45	0,55	0,60	10	0,45	0,50	0,55
	100	0,50	0,60	0,65	100	0,40	0,45	0,50
	1000	0,55	0,60	0,65	1000	0,35	0,40	0,45

Tabela 3- parâmetros para cálculo de k_{tina} [15]

4.2 Método de Brutsaert

A utilização desta equação surge da necessidade de calcular a evaporação para períodos onde os registos de água na tina contêm anomalias ou não satisfazem os critérios definidos pela OMM. [1]

Segundo Brutsaert, a taxa de evaporação (em mm/dia) numa superfície de água de área A com $0,5 \text{ m}^2 < A < 5 \text{ m}^2$ pode ser determinada por: [10]

$Ev_{Brutsaert} = 3,623 A^{-0,066} (e_s - e_a)u$, onde A é a área da superfície da tina; $e_s - e_a$ é a diferença entre a pressão de saturação e a pressão actual de vapor do ar [KPa] e u é a velocidade do vento média diária em m/s.

As pressões de vapor foram calculadas da seguinte maneira: [14]

$$e_s = \frac{e^0(T_{Max}) + e^0(T_{Min})}{2} \quad (3)$$

$$e^0(T) = 0,6108e^{\left[\frac{17,27T}{237,3+T}\right]} \quad (4)$$

onde T_{Max} é a temperatura máxima diária, T_{Min} é a temperatura mínima diária em °C.

$$e_a = e^0(T_{Min}) \frac{HR_{max}}{100} \quad (5)$$

onde HR_{max} é a humidade relativa máxima diária em percentagem. O uso desta equação justifica-se com o facto de, por vezes, os valores de HR_{min} registados conterem grandes erros de medição. Por isso, apenas temos em conta os valores de HR_{max} .

4.3 Fórmula de Kohler

Este modelo é uma das maneiras para calcular a evaporação de uma albufeira através da evaporação da tina. O método sugerido por Kohler et al. [6] constitui uma referência para a determinação da evaporação diária de uma albufeira através dos dados da tina.

Segundo esta fórmula, a evaporação diária de um lago poderá ser obtida pela expressão: [6]

$$E_l = 0,7[E_{tina} + 0,00642 p \alpha_{tina} (0,37 + 0,0255U_{tina})\theta(T)] \quad (6)$$

onde E_l e E_{tina} são a evaporação do lago e a evaporação registada na tina (mm/dia), p é a pressão atmosférica, α_{tina} é a fracção de energia aduzida à tina, por advecção, que é mobilizada para a evaporação, U_{tina} é o percurso diário do vento sobre a tina, em km.

$\theta(T)$ é uma função da diferença de temperaturas entre a água da tina e o ar circundante, calculada através de:

$$\theta(T) = (T_{tina} - T_a)^{0,88}; \text{ se } T_{tina} > T_a \quad (7)$$

$$\theta(T) = [-(T_{tina} - T_a)]^{0,88}; \text{ se } T_{tina} < T_a \quad (8)$$

$$\theta(T) = 0; \text{ se } T_{tina} = T_a \quad (9)$$

onde T_{tina} e T_a são as temperaturas médias diárias da tina e do ar em °C.

Em relação a α_{tina} , Kohler et al. (1955) apresentam ábacos para o seu cálculo em altitudes de 300 a 3000 metros. Rodrigues (1995) transcreveu esses ábacos para a altitude mínima de 300 metros:

$$\alpha_{tina} = 0,35 + 0,01044T_{tina} + 0,000559U_{tina}; \text{ se } 0 \leq U_{tina} < 160 \quad (10)$$

$$\alpha_{tina} = 0,43 + 0,01044T_{tina} + 0,000249(U_{tina} - 160); \text{ se } 160 \leq U_{tina} < 320 \quad (11)$$

$$\alpha_{tina} = 0,47 + 0,01044T_{tina} + 0,000124(U_{tina} - 320); \text{ se } 320 \leq U_{tina} < 480 \quad (12)$$

$$\alpha_{tina} = 0,49 + 0,01044T_{tina} + 0,000062(U_{tina} - 480); \text{ se } U_{tina} \geq 480 \quad (13)$$

A fórmula de Kohler dá-nos a evaporação na albufeira em mm/dia. Será necessário a conversão da evaporação para unidade de volume. Para isso, usa-se a relação de cotas de albufeira com a área inundada: [16]

$$A_{inundada} = 0,00204 \times (h - 100)^{2,93} + 25 \quad (14)$$

Onde A é a área inundada em km^2 e h é a cota da albufeira em m.

Assim:

$$Ev_{lago}(\text{m}^3) = A_{inundada}(\text{m}^2) \times \frac{Ev_{lago}(\text{mm})}{1000} \quad (15)$$

Segunda Parte

5. Auditoria à estação de Alquilha

No dia 2 de Outubro de 2014 efectuou-se uma visita à ilha onde está instalada a estação meteorológica. Verificou-se que a tina evaporométrica está instalada à superfície. No entanto, já não estava suportada pelo estrado de madeira. Com o passar do tempo, este foi-se deteriorando, sendo substituído por blocos de cimento.



Figura 13 Suporte actual da tina evaporométrica

A tina encontrava-se nivelada e os blocos que a suportavam permitiam que o ar circulasse livremente por baixo da tina. O interior da tina precisava de manutenção e limpeza, pois observou-se a existência de lismos dentro da mesma, bem como alguma corrosão. Esses factores influenciam a evaporação.



Figura 14 Interior da tina evaporométrica

Após esta auditoria pode-se concluir que é necessário a definição de alguns procedimentos relativos à estação, no sentido de tornar os valores registados mais fiáveis. Hoje em dia já existem várias tinas automáticas de evaporação. Neste instrumento o nível de água consegue manter-se constante- existe um tanque suplementar que adiciona água em caso de evaporação ou a retira em caso de precipitação. Em ambos os casos o volume de água suplementar ou em défice é medido. A mudança de paradigma para o tanque automático era uma boa solução para melhorar os valores do registo

A manutenção da estação de Alquilha é feita pela empresa Bruno & Lopes-Engenheiros Civis Associados Lda, subcontratada pela EDIA. É essencial que as estações sejam inspeccionadas periodicamente para assegurar o funcionamento correcto de todos os sensores de medição e para que exista uma limpeza adequada da tina evaporométrica. Com a visualização dos relatórios de manutenção da estação, verifica-se que nem sempre isso aconteceu. Por essa razão, é provável que não se obtenha um registo válido e de qualidade dos dados.

Os observadores devem ter formação em climatologia e saberem realizar observações científicas.É necessário que consigam familiarizar-se com os instrumentos e estarem conscientes de possíveis fontes de erros. As actividades de manutenção devem ser as seguintes:

- a) Manutenção adequada de todos os instrumentos;
- b) Anotar as observações;
- c) Controlo de registos efectuados;
- d) Controlo do equipamento anexo (logger, bateria, painel solar);
- e) Comentar as mudanças de vegetação e limpar a que prejudica o bom funcionamento dos sensores;
- f) Controlar o nível de água;

No geral, as actividades de manutenção foram cumpridas pela Empresa. Houve cuidado em relatar as anomalias observadas e a correcção das mesmas.

6. Metodologia de validação e tratamento de dados de tina

Como referido anteriormente, este estágio surge no âmbito da empresa EDIA necessitar que os dados da estação meteorológica de Alquilha sejam trabalhados. Além disso, será útil a criação de uma ferramenta que servisse de paradigma para que, futuramente, a empresa possa laborar novos dados.

A empresa disponibilizou os dados da estação que vão desde o dia 13-08-2006 até ao dia 02-10-2014, num total de 95624 dados horários (linhas de excel). Os dados são horários e os parâmetros medidos são:

- a) Precipitação;
- b) Evaporação na tina;
- c) Velocidade do vento;
- d) Direcção do vento;
- e) Temperatura da água da tina;
- f) Temperatura do ar;
- g) Humidade relativa;
- h) Radiação;
- i) Tensão e temperatura interna da bateria;

Para cálculos de evaporação as alíneas d),i) e h) serão desprezadas. Os dois primeiros são parâmetros meramente qualitativos. A radiação não é utilizada nas equações escaladas, mas poderia ser importante no caso de se utilizar um balanço energético para calcular a evaporação.

Este registo não é contínuo, existindo algumas falhas nos registos, bem como valores anómalos. Essas falhas são justificadas através dos relatórios de manutenção da estação. A próxima tabela elucida o período de falhas:

Intervalo de tempo	Justificação
03-01-2012 a 23-08-2012	Sensor de temperatura de água danificado; tina completamente seca e com vários focos de ferrugem
30-01-2013 a 21-05-2013	Mau funcionamento do sensor de temperatura e humidade do ar e o sensor de velocidade do vento
20-03-2014 a 28-05-2014	Sensor de temperatura de água não estava a funcionar correctamente

Tabela 4- Período de erro nos dados da estação

Para completar os dados de Alquilha, através dos dados de base do Serviço Nacional de Informação de Recursos Hídricos [SNIRH] efectuou-se o levantamento de

mais alguns dados que se viriam a verificar vantajosos no cálculo da evaporação, como valores de pressão e de cotas da albufeira de Alqueva.

A metodologia proposta foi a seguinte:

i) determinar a Evaporação na tina diária por diferença das leituras no nível na tina mais a soma do o valor da precipitação, expurgando eventuais outliers, valores aberrantes e anómalos;

ii) calcular Evaporação através da fórmula de Brutsaert para os mesmos dias com dados de Evaporação na tina diária obtidos em i);

iii) obter uma regressão linear $Evap_Brutsaert / Evap_tina$. Atingir elevados coeficientes de determinação (preferencialmente $R^2 > 0,7$);

iv) determinar $Evap_tina$ para os períodos sem registos de tina com base nas regressões obtidas em iii): $Evap_tina = a + b \times Evap_Brtusaert$, (**a** e **b** obtidos em iii) para o período comum;

v) obter Evaporação no lago a partir de $Evap_tina$ calculada em iv) para todo o período de registo, tendo em conta a formula de Kohler ou coeficientes de tina da tabela;

vi) calcular $Evap_lago$ em volume por dia;

Após alguma reflexão, concluiu-se que seria mais acessível e útil que a ferramenta de cálculo estivesse disponível em Microsoft Excel. A execução de um programa em Fortran, por exemplo, levaria à instalação do programa no computador onde se irá futuramente calcular a evaporação- torna-se mais fácil que a ferramenta esteja ao alcance do utilizador comum, e é mais banal um PC ter Microsoft Office do que Fortran instalado.

Posto isto, decidiu-se fazer o programa recorrendo à gravação de Macros em Excel: estas são usadas quando pretendemos fazer tarefas que se consideram rotineiras. Sendo assim, e desde que cumpramos os passos descritos em cada macro realizada, bem como outro tipo de instruções, o cálculo da evaporação torna-se fácil e quase automática.

O paradigma do programa é o seguinte: expurgar valores erróneos, execução de macros, cálculo de equações, regressão linear e uso da mesma, e cálculo de evaporação na Albufeira de Alqueva.

Os dados fornecidos e levantados são dados horários. As fórmulas estudadas utilizam dados diários, então tem que se realizar uma primeira filtragem para que os dados passem a valores diários. Estabeleceu-se que os gradientes de evaporação diários iriam ser registados em todas as 09:00 UTC de cada dia.

O U. S. Weather Service Substation Observation recomenda que, para valores de evaporação que se possam comparar com o lago, o nível de água na tina tem de ser de 180mm no mínimo. Ao fazer a filtragem, os dados verificaram-se escassos. Assim, foi necessário alargar um pouco o critério para os dados que nos forneceram. Definiu-se que se deveria filtrar os dados para valores sempre maiores do que 150 mm. Quanto

menor o volume de água na tina, mais propício é a sua temperatura aumentar, contribuindo assim para maiores valores de evaporação. Por essa razão, é necessário o estabelecimento de um critério de nível mínimo de nível de água.

Além disso, os sensores de água da tina apenas registam a altura a que a água se encontra na tina. Foi necessário calcular a diferença de altura para dias seguidos e, posteriormente, somar os valores de precipitação para os mesmos dias. Esses cálculos dão-nos o que realmente evaporou. Após estes cálculos, foi necessário fazer uma nova filtragem- valores negativos de evaporação não fariam sentido após somar-se a precipitação. Esses valores consistiam erros de medição. Além disso, durante a visualização dos dados verificou-se que, durante o Inverno, existiam valores de evaporação diários superiores a 5cm. Concluiu-se que não se tratavam de valores fidedignos: foi então necessário fazer nova filtragem dos dados. Conjugando com os valores de temperatura média diária, estabeleceu-se que quando esta fosse menor que 19 °C e o valor de evaporação diária fosse superior a 5cm, o registo não seria validado.

Usaram-se outro tipo de parâmetros com a finalidade de utilizar as equações descritas anteriormente:

1. Para Método Evaporométrico:
 - Dados de Velocidade do vento e humidade relativa para determinação do coeficiente de tina;

2. Para Evaporação por Brutsaert:
 - Dados de temperatura do ar para cálculo de pressões de vapor;
 - Dados de Velocidade do vento;

A partir da determinação da evaporação a partir desta fórmula executar-se-á uma regressão linear- compara-se a diferença entre o nível da tina diário com o cálculo da evaporação da superfície através da equação de Brutsaert. Para calcular a área da tina utilizou-se o valor padrão do diâmetro da mesma (1,207m).

3. Para fórmula de Kohler
 - Dados de Pressão da Estação de Alqueva 24L/02F para cálculo do valor de pressão constante;
 - Dados de Temperatura do ar e da tina para cálculo da fracção de energia aduzida à tina e para o gradiente de temperaturas;
 - Dados de Velocidade do vento para cálculo de percurso médio diário do vento;

A pressão atmosférica foi um dos parâmetros que necessitou de alguns ajustamentos. Esta grandeza não é medida na estação de Alquilha, então foi necessário a procura de uma solução. Recorrendo à plataforma do SNIRH, através da estação meteorológica da

Albufeira de Alqueva (24L/02F), levantou-se os dados de pressão atmosférica aí medidos. Tentou-se fazer um gráfico de dispersão entre a pressão da Albufeira de Alqueva (24L/02F) e a temperatura do ar de Alquilha. Esta dispersão não conteve valores de R^2 satisfatórios, e assim teve-se de redefinir um processo alternativo. Estabeleu-se um valor de pressão atmosférica constante igual a 1005 hPa- trata-se de um valor médio anual medido na estação 24L/02F. Tal procedimento justifica-se pelo facto da variação da pressão não alterar muito o resultado final da evaporação, podendo assim adoptar-se um valor constante da mesma.

Em anexo encontra-se disponível o ficheiro do programa que se executou para ficar disponível para a empresa. O ficheiro deve ser visto como um documento de instruções. Existem alguma repetição de conceitos já falados até aqui, com o intuito de integrar a pessoa que queira utilizar o documento dos passos que deve executar.

7. Balanço hídrico da albufeira

O balanço hídrico entende-se como o resultado da quantidade de água que entra e sai num determinado intervalo de tempo. Neste caso irá proceder-se ao cálculo do balanço hídrico na albufeira de Alqueva.

A equação do balanço hídrico pode ser vista por:

$$\dot{Q}_{in}(x) - \dot{Q}_{out}(x) = \Delta Volume \text{ na albufeira (16)}$$

onde $\dot{Q}_{in}(x)$ são as entradas de água na albufeira – precipitação, retornos de água e afluentes, e $\dot{Q}_{out}(x)$ as saídas de água – turbinado e descarregado, água utilizada para regadio, infiltrações e evaporação. A equação é calculada em função do nível volumétrico da albufeira.

O balanço hídrico é importante em obras de engenharia, planeamento de áreas de uso agrícola, florestal e vias fluviais, entre outras.

No nosso caso, utilizou-se o balanço hídrico para calcular o volume de água infiltrado, pois essa propriedade não consta nos dados fornecidos.

Para que exista concordância de unidades, definiu-se que o balanço hídrico será expresso em unidades volumétricas. O caudal volumétrico será multiplicado pelo tempo. Os dados hidrológicos em milímetros (precipitação, por exemplo) são multiplicados pela área inundada.

O período de tempo em que foi feito o balanço hídrico foi durante a campanha de ALqueva hydro-meteorologica EXperiment (ALEX), de Junho a Setembro de 2014. Foi o período em que a EDP forneceu dados mais completos relativos ao balanço hídrico, como caudal turbinado e bombeado.

Os valores de infiltração mensais obtidos foram os seguintes:

Mês	Infiltração (hm ³)
Julho	214,7
Agosto	255,5
Setembro	363,7

Tabela 5- Dados de infiltração calculados

8. Potencial Hidroeléctrico do reservatório

A Potência mensal pode ser vista através da seguinte equação, baseada na unidade curricular de Planeamento e Gestão de Recursos Hídricos:

$$P = 0,00781 \times h_T \times \eta \times \dot{V}_T \quad (17)$$

onde h_T é a queda útil (cota a montante – cota a jusante), η é o rendimento da turbina (0,85) \dot{V}_T é o volume alocado à produção de energia.

A tabela posterior elucida os resultados obtidos:

Mês	Potência total (MW)
Junho	161,2581972
Julho	202,1727298
Agosto	173,5056967
Setembro	201,6407242

Tabela 6- Potência mensal da central de Alqueva

9. Potência perdida por evaporação

Um das curiosidades que surgiram ao longo do trabalho foi a hipotética potência/energia que as perdas de água por evaporação conseguiriam gerar. Recorrendo à equação 17), efectuou-se o cálculo hipotético da potência evaporativa. Usou-se os valores de diferença de cota a montante e jusante para calcular a queda útil a utilizar.

Escolheu-se o período em que decorreu o ALEX e o Inverno de 2013-2014, com o intuito de haver uma base de comparação para diferentes estações.

Os resultados obtidos estão declarados na seguinte tabela:

Mês	Potencia perdida (MW)
Dezembro	1,424
Janeiro	3,954
Fevereiro	4,867
Março	4,003
Junho	14,174
Julho	18,365
Agosto	17,985
Setembro	9,583

Tabela 7- Potência perdida por evaporação

Como se pode observar, a evaporação poderia gerar uma potência considerável. Dado que a central de Alqueva tem uma potência nominal de 520 MW, no mês de Agosto, por exemplo, haveria muito energia perdida que se poderia aproveitar.

Conclusão

Após a realização deste trabalho, conseguiu-se tirar algumas conclusões em diferentes ramos subjacentes aos recursos hídricos. Em primeiro lugar, conclui-se que a Hidroelectricidade tem um potencial de crescimento enorme. Torna-se imperativo que exista uma mudança de mentalidade para com o planeta Terra- é a única “casa” que temos e devemos cuidar bem dela. Por essa razão, devemos trabalhar para encontrar soluções sustentáveis e que ao mesmo tempo consigam satisfazer as necessidades energéticas do Homem enquanto espécie. A aposta nas energias renováveis pode-se tornar uma boa resolução. Assim sendo, a Hidroelectricidade pode ter a sua importância na busca de soluções para diminuir a dependência mundial dos combustíveis fósseis, pois há muito potencial energético que, com a devida capacidade de investimento, se pode aproveitar.

Em segundo lugar, chegou-se à conclusão de que a evaporação é um factor importante na formulação do balanço hídrico de uma albufeira, bem como na projecção de uma central hidroeléctrica. Num só dia de Verão os valores de evaporação podem exceder os 350 dm³.

No cálculo da potência média diária hipotética que o volume de água perdida por evaporação conseguiria gerar, durante os 3 meses da campanha ALEX 2014 estaria-se a perder cerca de 60 MW.

Outro tipo de notas conclusivas é relativo à estação meteorológica de Alqueva-Ilha. Se a EDIA mantém o interesse em estimar a evaporação na albufeira através daquela estação, existem alguns factores a melhorar: uma das sugestões seria a instalação de um tanque automático para encher/esvaziar a tina evaporométrica. Como referido ao longo do trabalho, para que a diferença de nível de água na tina seja comparável à evaporação na albufeira, o volume de água deve-se situar entre os 5 e os 7,5 cm do rebordo da tina. Durante a interpretação dos dados, verificou-se que se se seguisse essa “regra”, ficaríamos com poucos dados disponíveis. Assim, foi necessário um ajustamento na filtragem dos dados, considerando como válidos níveis superiores a 150mm. Só dessa forma foi possível que o trabalho conseguisse prosseguir com algum critério.

A limpeza da tina também deverá ser feita com mais regularidade, pois a existência de lismos e sujidade é um dos factores que influencia a evaporação.

O trabalho efectuado teve a sua importância no controlo de qualidade dos dados registados pelos sensores. Conclui-se que os procedimentos práticos nunca são equivalentes ao funcionamento cabal que encontramos na teoria. Surgem sempre problemas práticos pelo caminho. A função do engenheiro é vencer essas adversidades é garantir que os problemas técnicos que surgem são ultrapassados.

Referências Bibliográficas

1. Organización Meteorológica Mundial- **Guía de Prácticas Hidrológicas: Adquisición y proceso de datos, análisis, predicción y otras aplicaciones**. 5ª edição. OMM-N.º 168, 1994. ISBN 92-63-30168-9.
2. World Meteorological Organization-**Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation**. 7ª edição. Suíça: Chairperson, Publications Board, 2008. ISBN 978-92-63-10008-5.
3. MIRANDA RODRIGUES, Carlos- Cálculo da evaporação de albufeiras de grande regularização do sul de Portugal. Évora : [s.n.], 2009. Dissertação apresentada à Universidade de Évora para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia dos Recursos Hídricos.
4. VASCONCELOS, Tiago- Análise Técnico-Económica de um Aproveitamento Hidroeléctrico: Aproveitamento Hidroeléctrico do Baixo Sabor. Lisboa : [s.n.], 2012. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Electrotécnica e de Computadores.
5. JENSEN, Marvin- Estimating evaporation from water surfaces. **In** «ASCE Manual 70». 2ª Edição. 2008. Capítulo VI.
6. KOHLER, M. A.; NORDENSON, T. J.; FOX, W. E. – **Evaporation from pans and lakes**. Washington: Department of commerce of U. S. A., 1955. Research paper n.º 38.
7. MOREIRA, Rui- Potencial hidroeléctrico Português desaproveitado. Porto : [s.n.], 2009. Dissertação realizada no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores Major Energia.
8. OLIVEIRA, Rodrigo- Instituto Superior Técnico. Dinâmica de Bacias Hidrográficas e Aquíferos. 2011
9. Dados de base [Internet]. Disponível em <http://snirh.apambiente.pt/index.php?idMain=2&idItem=3>
10. Brutsaert, W. (2005). *Hydrology: an introduction*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 608 p.
11. SANTOS, M; MAIA, J- Calibração da ETo estimada pelo método de Hargreaves e Tina Evaporométrica Classe A. 2008
12. EDP- EDP duplica capacidade hidroelétrica do Alqueva. [23 de Janeiro de 2013]. Disponível em <http://www.edp.pt/pt/media/noticias/2013/Pages/EDPduplicacapacidadehidroel%C3%A9ctricadoAlqueva.aspx>
13. EDP-Alqueva-Informação Técnica. Disponível em http://www.a-nossa-energia.edp.pt/centros_produtores/info_tecnica.php?item_id=5&cp_type=he§ion_type=info_tecnica
14. ALLEN, Richar, et al.- Meteorological Data. Air Humidity. **In** «Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements)».2006. Páginas 36 a 40.
15. Grassi, C. (1998). Fundamentos de riego. Centro intercambio de desarrollo e investigación ambiental y territorial-CIDIAT. Mérida-Venezuela.
16. DSIGC- Duarte Carreira – Curvas Cota-Área e Cota-Volume da Albufeira de Alqueva. 14-05-2004. Solicitação
17. REN- **Hidroelectricidade em Portugal: memória e desafio**. Lisboa: REN- Rede Eléctrica Nacional, S.A., 2002. ISBN 972-95877-1-x
18. IEA- **Renewable Energy Essentials: Hydropower** . International Energy Agency, 2010.

Anexo I

Descrição dos sensores da Estação Meteorológica de Alqueva-Ilha

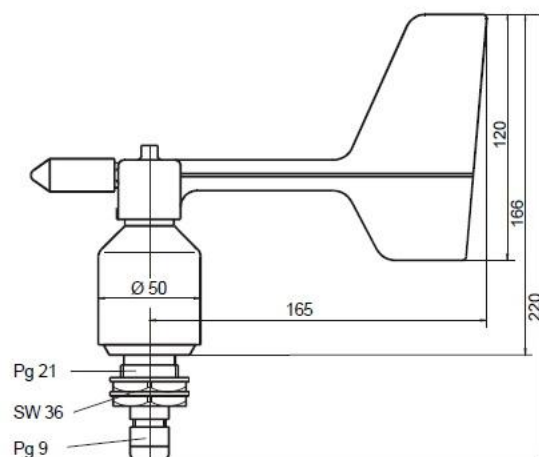
Sensor de Direcção do Vento



Figura 15 Sensor de direcção do vento

Parâmetros:

- a) Intervalo de medida: [0 a 360°];
- b) Incerteza: 5°;
- c) Resolução: 11,25°;
- d) Temperatura de funcionamento: [-40°C a 70°C];
- e) Carga máxima de vento: 80 m/s durante 30 minutos;
- f) Peso: 1,1 kg;
- g) Dimensões:



Nota: Ao efectuar a montagem deste sensor há que ter em atenção que o direcção inicial deve ser a direcção Norte (N).

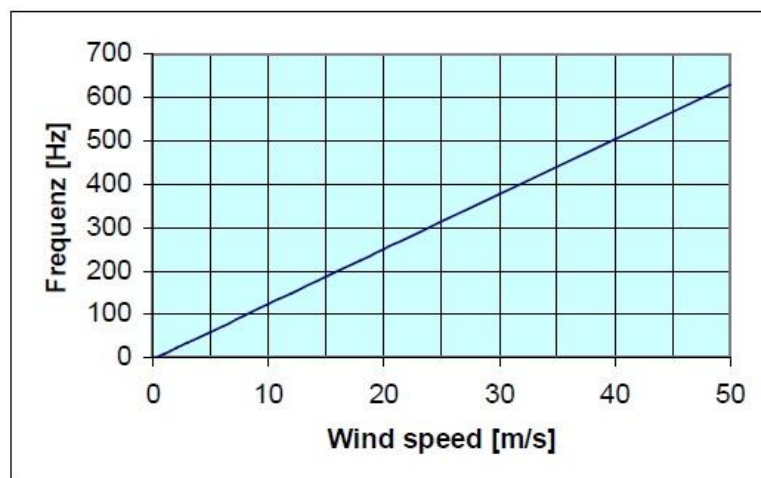
Sensor de velocidade do vento



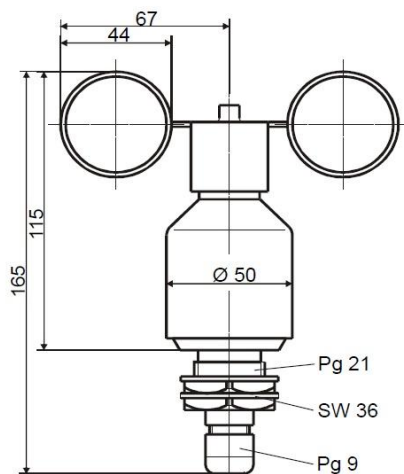
Figura 16 Sensor de velocidade do vento

Parâmetros:

- a) Alcance: [0,5 a 50 m/s];
- b) Velocidade de arranque: 0,5 m/s;
- c) Carga máxima de vento: 80 m/s durante 30 minutos;
- d) Incerteza: 0,5 m/s ou 3% do valor medido;
- e) Resolução: 0,1 m/s, 11 batimentos/revolução;
- f) Interface: 0,5 m/s corresponde a 2 Hz, 50 m/s corresponde a 630 Hz;
- g) $V[\text{m/s}] = 0,07881 f[\text{Hz}] + 0,32$;



- h) Temperatura de funcionamento: [-40°C a 70°C];
- i) Peso: 0,75 kg;
- j) Dimensões:



Sensor de Temperatura do ar/Humidade Hygroclip



Figura 17 Sensor de temperatura/humidade do ar

Parâmetros:

- Humidade Relativa (HR)
 - a) Alcance: [0 a 100%];
 - b) Resolução: 0,1%;
 - c) Incerteza a 23°C: $\pm 1,5\%$;
- Temperatuda do ar
 - a) Alcance: [-40 a 85°C];
 - b) Resolução: 0,12°C;
 - c) Incerteza: $\pm 0,3^\circ\text{C}$;

Sensor de Temperatura da água Gealog RS485:



Figura 18 Sensor de temperatura da água

Parâmetros:

- a) Alcance: [-5 a 45°C];
- b) Incerteza: [-5 a 35°C]<0,1°C ;]35 a 45°C]<0,3°C;
- c) Resolução: 20mK;

Sensor de nível da água Gealog

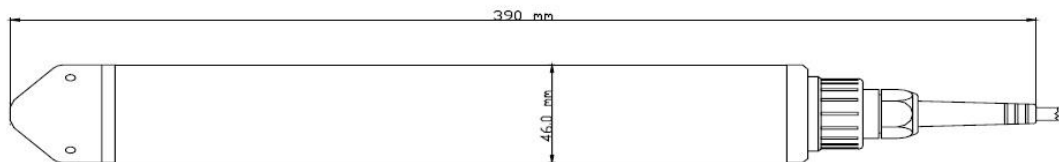


Figura 19 Sensor de nível de água

Parâmetros:

- a) Instalação: deve ser colocado num tubo com pelo menos 5cm de diâmetro;
O nível de água é medido através de uma sonda de pressão;

- b) Alcance- 70cm, 3m, 10m, 20m, 30m, 70m- escolhe-se o intervalo correspondente à máxima variação do nível da água;
- c) Dimensões:



Indicador de precipitação 52203:



Figura 20 Indicador de precipitação

Parâmetros:

- Funcionamento: a água cai pelo topo do indicador dirigindo-se por gravidade a uma bifurcação com dois canais: quando o primeiro enche baixa, despejando e ao mesmo tempo fazendo um batimento que acciona um sinal eléctrico. Em seguida é o outro canal que enche, repetindo-se o processo enquanto houver precipitação;
- Área da superfície: 200cm^2 ;
- Resolução: 1 batimento= $0,1\text{mm}$ de precipitação;
- Incerteza: 2% a partir de 25mm/h , 3% a partir de 50mm/h ;

Anexo II

Paradigma para tratamento dos dados de Alquilha e posterior metodologia para cálculo de evaporação na Albufeira

Com o intuito de deixar uma ferramenta para futuro cálculo da evaporação através dos dados registados pela estação de Alquilha, esta parte do trabalho trata da descrição dos passos feitos e da gravação de programas em Excel (Macros), de forma a facilitar o tratamento dos dados. A empresa EDIA poderá usufruir do programa quando achar necessário, devendo seguir a ordem pré-estabelecida na descrição. De notar que a interface é importante na interpretação e posterior filtragem de qualquer dado que se poderá verificar erróneo. Como complemento, podem-se usar os relatórios de manutenção para consultar algum problema que possa ter ocorrido.

Primeiramente, há que ter em atenção que tipo de separador numérico está definido no Excel. Ao extrair os dados do texto para o Excel, o separador decimal é o ponto final. Se o separador decimal do excel for a vírgula, ele não lerá os valores como número, mas sim como texto. Sendo assim, ter-se-á de utilizar o comando “substituir” para trocar os pontos finais por vírgulas.

A metodologia definida é a seguinte:

i) determinar a Evaporação na tina diária por diferença das leituras no nível na tina mais a soma do o valor da precipitação, expurgando eventuais outliers, valores aberrantes e anómalos;

ii) calcular Evaporação através da fórmula de Brutsaert para os mesmos dias com dados de Evaporação na tina diária obtidos em i);

iii) obter uma regressão linear $Evap_Brutsaert / Evap_tina$. Atingir elevados coeficientes de determinação (preferencialmente $R^2 > 0,7$);

iv) determinar $Evap_tina$ para os períodos sem registos de tina com base nas regressões obtidas em iii): $Evap_tina = a + b \times Evap_Brtusaert$, (**a** e **b** obtidos em iii) para o período comum;

v) obter Evaporação no lago a partir de $Evap_tina$ calculada em iv) para todo o período de registo, tendo em conta a formula de Kohler ou coeficientes de tina da tabela;

vi) calcular $Evap_lago$ em volume por dia;

Os dados brutos da estação consistem em dados horários. Como as equações utilizam dados diários, existem a necessidade de passar os dados da estação para esse formato.

De forma a ter acesso às macros, é necessário que a opção “Programador” esteja disponível na barra de ferramentas do Excel. Caso não esteja, deve proceder-se da seguinte maneira:

1. Clique no **Botão do Microsoft Office**  e, em seguida, clique em **Opções do Excel**.

2. Na categoria **Popular**, em **Opções principais para trabalhar com o Excel**, seleccione a caixa de verificação **Mostrar separador Programador no Friso** e, em seguida, clique em **OK**.

Para as macros funcionarem correctamente, deve-se seleccionar a tabela com que se quer trabalhar.

Os passos seguinte são recomendados para ter acesso às macros gravadas:

1. Abra o Editor do Visual Basic (VBE) no computador que você deseja transferir o arquivo clicando em " Alt " e " F11 " no seu teclado, após a abertura do Microsoft Excel;
2. Clique em “arquivo” e em seguida “Importar arquivo”;
3. Seleccione as macros da pasta “Macros.zip.” que foi fornecida e clique em “Abrir”;

Para determinar i), formaram-se as seguintes macros:

- a) subt_precipit – Separa a hora da data; calcula a soma da precipitação diária(dados de precipitação devem estar na coluna D);
- b) dados_evap_diarios_filtrados- estabelece um filtro primário do registo de nível de água na tina- alinha os dados diariamente e para as 9:00 UTC; filtra os valores entre os 150 e os 250 mm, de forma a eliminar outliers e a que os valores de evaporação se tornem mais fidedignos
- c) dia – estabelece o dia das células para, posteriormente, se poder calcular o nível de água na tina para dias consecutivos

Em seguida, deve-se utilizar uma função de excel para garantir que a diferença do nível de água na tina consistem em dias seguidos:

= se (dia_{n+1} - dia_n =1; inserir_nível_tina_n - inserir_nível_tina_{n+1} + inserir_valor_precipitação_n; “não se trata de dias seguidos”)

Assim obter-se-á o nível real de evaporação registada.

Nota: O índice n refere-se ao número da célula

Posteriormente, é necessário uma nova interpretação dos dados de nível de água na tina: a partir deste momento, qualquer registo de valor negativo deixa de fazer sentido e deve ser eliminado, tratando de um valor anómalo.

Para ii)

É preciso gravar Macros referentes ao cálculo das equações. Assim:

- a) subt_soma_vento- calcula o somatório das velocidades do vento registadas- este registo deve estar na coluna E;
- b) subt_médias – calcula diversos valores médios necessários- Velocidade do vento em E, Temperatura da água em H, Temperatura do ar em I e Humidade Relativa em J;
- c) subt_max- devolve os valores máximos de Temperatura do ar e de Humidade Relativa registados;
- d) subt_min- devolve os valores mínimos de Temperatura do ar e de Humidade Relativa registados;

Os dados resultantes destas macros podem ser utilizados para cálculo da equação 1) disponível em anexo, bem como a escrita da função de excel subjacente.

Além destas macros calcularem os parâmetros que futuramente nos vão interessar, também transformam cada linha da folha num dia diferente. Pode-se utilizar qualquer uma das folhas geradas para calcular $Ev_{Brutsaert}$, por exemplo, para todos os dias disponíveis. Estes cálculos serão importantes aquando do estabelecimento da alinha iv) da metodologia.

De seguida, para garantir que $Ev_{Brutsaert}$ está concomitante com a alínea i) da metodologia, pode-se utilizar a função ‘procv’ do excel. Esta função garante que o conteúdo de uma célula é procurada numa outra matriz, e devolve o conteúdo da coluna que pretendemos. Para isso precisamos de garantir que a coluna de ‘data’ é igual nas duas folhas- uma formatação de célula para a forma dd-mm-aaaa, por exemplo, será suficiente.

Nota: Ao copiar os valores relacionados com a função ‘procv’ de uma coluna para outra, perde-se a formatação. Isso poderá ser resolvido se, ao copiar a coluna se escolha a opção ‘colar especial- valor’.

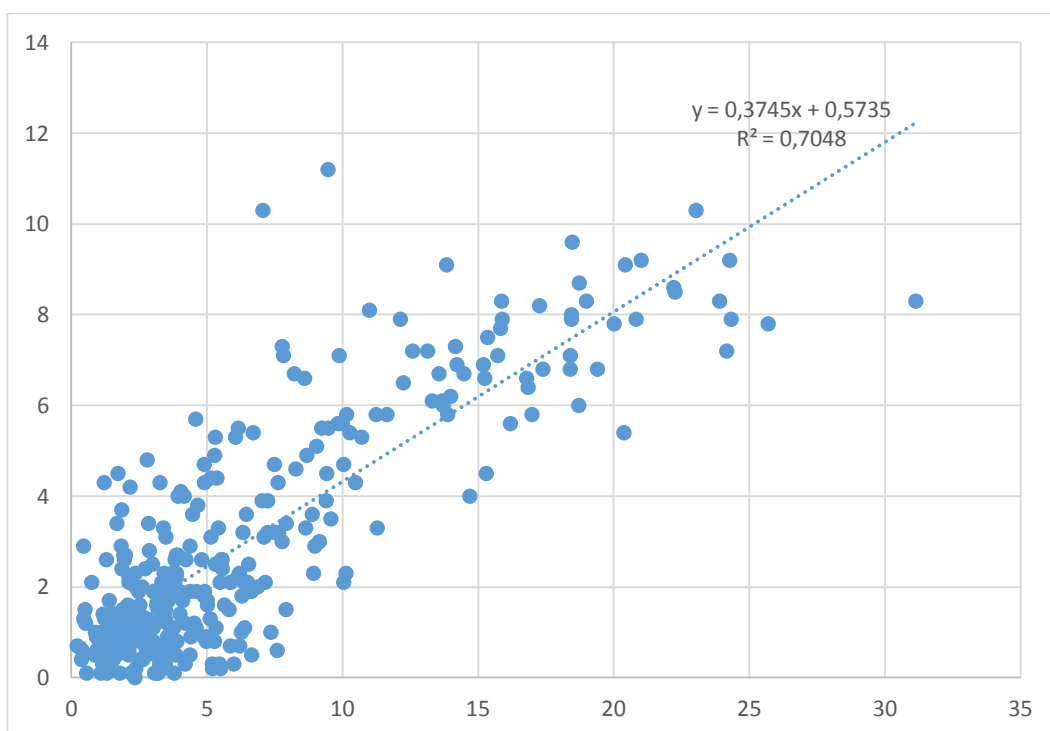
Para iii)

O objectivo desta alínea da metodologia é obter uma regressão linear entre i) e ii), com valores de R^2 superiores a 0,7.

Por vezes, os resultados não se verificam satisfatórios. Uma das soluções para correcção da regressão pode ser uma nova detecção de outliers: deve-se visualizar cada parâmetro, interpretá-lo e ter bom senso na definição dos mesmos. Torna-se essencial a eliminação de grande parte de erros de medição. Por exemplo, durante a visualização dos dados de 2006 a 2014, verificou-se que, durante os meses de inverno, existiam valores de diferença de nível de água na tina superiores a 10mm/dia. Tais valores não faziam sentido. Assim, estabeleceu-se que, quando a temperatura do ar média do ar fosse inferior a 19°C e o nível superior a 5mm/dia, o resultado consistia num erro de medição.

Alternativamente, pode-se separar temporalmente os resultados obtidos, com o intuito de detectar algumas zonas temporais que estejam a prejudicar o valor de R^2 . As sugestões são: por época seca (de Abril a Agosto) e húmida (de Setembro a Março); Anualmente ou por estação do ano. No caso estudado, verificou-se que se eliminasse os resultados de 2012, o valor de R^2 se tornava superior a 0,7. No ano de 2012 a dispersão do gráfico era muito maior do que nos restantes anos. De referir que o objectivo da alínea iii) é o estabelecimento de um gráfico de regressão satisfatório- é preferível ter um menor número de valores, mas que sejam fidedignos do que ter um grande número de valores em que a sua génese não se aproxima da realidade. Podem-se usar os relatórios de manutenção com vista à consulta de algumas situações negativas que se possam ter passado na estação meteorológica.

O gráfico resultante foi o seguinte:



Para iv)

Deve-se utilizar a equação gerada por iii) para calcular a diferença de nível de água na tina para os dias que não se consideraram em i).

Para v)

É necessário usar as equações 2) e 3) e a formulação em excel disponível no Anexo, com vista ao cálculo da evaporação na albufeira em mm/dia.

Mais uma vez, pode-se tornar necessário a expurga de alguns valores anómalos relacionados com as variáveis das equações usadas: no caso de estudo, encontravam-se valores de temperatura de tina superiores a 50°C, que ulteriormente seriam eliminados. Além disso, existiam valores de U_{tina} aberrantes que necessitaram igualmente de uma filtragem. Os valores calculados referentes à Fórmula de Kohler que sejam superiores ao nível de água na tina não se devem ter em conta.

Para vi)

Utiliza-se a equação 4) do Anexo para calcular a evaporação da albufeira em m^3 . Será necessário possuir dados diários de cota da Albufeira.

Anexo de equações

Equações necessárias para cálculo de evaporação:

- 1) Evaporação por Brutsaert:

$$Ev_{Brutsaert} = 3,623 A^{-0,066} (e_s - e_a) u \quad (1)$$

$$e_s = \frac{e^0(T_{Max}) + e^0(T_{Min})}{2} \quad (2)$$

$$e_a = e^0(T_{Min}) \frac{HR_{max}}{100} \quad (3)$$

$$e^0(T) = 0,6108 e^{\left[\frac{17,27T}{237,3+T} \right]} \quad (4)$$

Formatação em Excel:

$$\begin{aligned} &= 3,623 * ((PI() * ((1,207/2)^2))^{-0,066}) * (\\ &(((0,6108 * EXP((17,27 * \underline{Inserir Tmax do ar}) / (237,3 + \underline{Inserir Tmax do ar}))) + \\ &(0,6108 * EXP((17,27 * \underline{Inserir Tmin do ar}) / (237,3 + \underline{Inserir Tmin do ar})))) / 2) - \\ &(((0,6108 * EXP((17,27 * \underline{Inserir Tmin do ar}) / (237,3 + \underline{Inserir Tmin do ar})))) * \\ &\underline{Inserir HRmax} / 100)) * \underline{Inserir Vvento média} \end{aligned}$$

2) Coeficiente de Tina

$$E_l = k_{tina} E_{tina} \quad (5)$$

k_{tina} é determinado pela tabela sugerida por Grassi:

Humedad Relativa	Caso A.				Caso B.			
	Tina rodeada de cubierta Verde (grama)				Tina rodeada de superficie desnuda (barbecho)			
		Baja < 40%	Media 40-70%	Alta > 70%		Baja < 40%	Media 40-70%	Alta > 70%
Velocidad del Viento ↓	Distancia de la Cubierta Verde				Distancia de la Superficie Seca			
Ligero	1	0,55	0,65	0,75	1	0,70	0,80	0,85
(<2 m/s)	10	0,65	0,75	0,85	10	0,60	0,70	0,80
	100	0,70	0,80	0,85	100	0,55	0,65	0,75
	1000	0,75	0,85	0,85	1000	0,50	0,60	0,70
Moderado (2-5 m/s)	1	0,50	0,60	0,65	1	0,65	0,75	0,80
	10	0,60	0,70	0,75	10	0,55	0,65	0,70
	100	0,65	0,75	0,80	100	0,50	0,60	0,65
Fuerte (5-8 m/s)	1000	0,70	0,80	0,80	1000	0,45	0,55	0,60
	1	0,45	0,50	0,60	1	0,60	0,65	0,70
	10	0,55	0,60	0,65	10	0,50	0,55	0,65
Muy fuerte (> 8 m/s)	100	0,60	0,65	0,70	100	0,45	0,50	0,60
	1000	0,65	0,70	0,75	1000	0,40	0,45	0,55
	1	0,40	0,45	0,50	1	0,50	0,60	0,65
> 8 m/s	10	0,45	0,55	0,60	10	0,45	0,50	0,55
	100	0,50	0,60	0,65	100	0,40	0,45	0,50
	1000	0,55	0,60	0,65	1000	0,35	0,40	0,45

Formatação em Excel:

a) Para determinar k_{tina} :

=SE(E(Inserir vvento média<2;Inserir HR média<40);"0,75";SE(E(Inserir vvento média<2;Inserir HR média>=40);"0,85";SE(E(Inserir vvento média>=2;Inserir vvento média<5;Inserir HR média<40);"0,70";SE(E(Inserir vvento média>=2;Inserir vvento média<5;Inserir HR média>=40);"0,80";SE(E(Inserir vvento média>=5;Inserir vvento média<8;Inserir HR média<40);"0,65";SE(E(Inserir vvento média>=5;Inserir vvento média<8;Inserir HR média>=40;Inserir HR média<70);"0,70";SE(E(Inserir vvento média>=5;Inserir vvento média<8;Inserir HR média>=70);"0,75";SE(E(Inserir vvento média>=8;Inserir HR média<40);"0,55";SE(E(Inserir vvento média>=8;Inserir HR média>=40;Inserir HR média<70);"0,60";SE(E(Inserir vvento média>=8;Inserir HR média>=70);"0,65"))))))))

b) Para E_l

= Inserir ktina * Inserir Evap tina

3) Evaporação da albufeira através de Kohler

$$E_l = 0,7[E_{tina} + 0,00642 p \alpha_{tina} (0,37 + 0,0255U_{tina})\theta(T)] \quad (6)$$

$$\alpha_{tina} = 0,35 + 0,01044T_{tina} + 0,000559U_{tina}; \text{ se } 0 \leq U_{tina} < 160 \quad (7)$$

$$\alpha_{tina} = 0,43 + 0,01044T_{tina} + 0,000249(U_{tina} - 160); \text{ se } 160 \leq U_{tina} < 320 \quad (8)$$

$$\alpha_{tina} = 0,47 + 0,01044T_{tina} + 0,000124(U_{tina} - 320); \text{ se } 320 \leq U_{tina} < 480 \quad (9)$$

$$\alpha_{tina} = 0,49 + 0,01044T_{tina} + 0,000062(U_{tina} - 480); \text{ se } U_{tina} \geq 480 \quad (10)$$

$$\theta(T) = (T_{tina} - T_a)^{0,88}; \text{ se } T_{tina} > T_a \quad (11)$$

$$\theta(T) = [-(T_{tina} - T_a)]^{0,88}; \text{ se } T_{tina} < T_a \quad (12)$$

$$\theta(T) = 0; \text{ se } T_{tina} = T_a \quad (13)$$

Valores de pressão: Foi definido um valor de pressão constante. Esta variável não é medida na estação de Alquilha. Utilizou-se a estação de Alqueva ([24L/02F](#)) para retirar os valores de pressão atmosférica. Como não se conseguiu estabelecer uma boa regressão linear entre a pressão da estação de Alqueva e a Temperatura ou Humidade de medida em Alquilha, e visto que a pressão é um parâmetro que pouco influencia o resultado da Evaporação através de Kohler, definiu-se o valor constante de 100,52 kPa. Este valor é baseado em valores médios anuais medidos pela estação de Alqueva ([24L/02F](#)).

Formatação em Excel:

a) Para U_{tina} :

$$=(\text{Inserir Soma Vvento}*3600)/1000$$

b) Para α_{tina} :

$$=SE(\text{Inserir Utina}<160;0,35+(0,01044*\text{Inserir Temperatura média tina})+(0,000559*\text{Inserir Utina});SE(E(\text{Inserir Utina}>=160;\text{Inserir Utina}<320);0,43+(0,01044*\text{Inserir Temperatura média tina})+(0,000249*(\text{Inserir Utina}-160)));SE(E(\text{Inserir Utina}>=320;\text{Inserir Utina}<480);0,47+(0,01044*\text{Inserir Temperatura média tina})+(0,000124*(\text{Inserir Utina}-320)));SE(\text{Inserir Utina}>=480;0,49+(0,01044*\text{Inserir Temperatura média tina})+(0,000062*(\text{Inserir Utina}-480))))))$$

c) Para $\theta(T)$:

$$=SE(\text{Inserir Temperatura média tina} > \text{Inserir temperatura média ar}; (\text{Inserir Temperatura média tina} - \text{Inserir temperatura média ar})^{0,88}; (\text{Inserir temperatura média ar} - \text{Inserir Temperatura média tina})^{0,88})$$

d) Para E_l :

$$=0,7 * (\text{Inserir nível tina} + (0,00642 * 100,523 * \text{Inserir } \alpha_{\text{tina}} * (0,37 + (0,0255 * \text{Inserir } U_{\text{tina}}) * \text{Inserir } \theta(T))))$$

4) Evaporação do lago em m^3

Equação Cota-Área.

$$A = 0,00204 \times (h - 100)^{2,93} + 25 \quad (14)$$

onde h é a cota da albufeira.

Formatação em Excel:

$$=((0,00204 * ((\text{Inserir cota albufeira} - 100)^{2,93}) + 25) * 1000 * \text{Inserir Evap Kohler})$$

Lista de Símbolos

Símbolo	Descrição/Designação	Unidade
A	Área	(m ²)
α_{tina}	Fracção de energia aduzida à tina	-
E_l	Evaporação no lago	(mm/dia)
e_a	Pressão actual de vapor	(kPa)
e_s	Pressão de saturação de vapor	(kPa)
E_{tina}	Evaporação na tina	(mm/dia)
$E_{v_{Brutsaert}}$	Evaporação por Brutsaert	(mm/dia)
h	Cota a que a água se encontra	(m)
HR	Humidade relativa	(%)
HR_{max}	Humidade relativa máxima diária	(%)
k_{tina}	Coefficiente de tina	-
p	Pressão atmosférica	(kPa)
T	Temperatura do ar	(°C)
T_{Max}	Temperatura máxima diária	(°C)
T_{Min}	Temperatura mínima diária	(°C)
θ	Gradiente de temperatura	-
u	Velocidade média diária do vento	(m/s)
U_{tina}	Percurso médio diário do vento	(km)