

TRABALHO PRÁTICO: ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICO-ECONÓMICA DE UMA PEQUENA CENTRAL HIDROELÉTRICA, PCH

Objetivo geral e constituição do grupo

Pretende-se com o Trabalho Prático aplicar os conhecimentos apresentados nas aulas da disciplina de **Energia Hídrica** com o objetivo de proceder ao **dimensionamento preliminar** e à **análise da viabilidade económica de uma pequena central hidroelétrica com exploração a fio-de-água**.

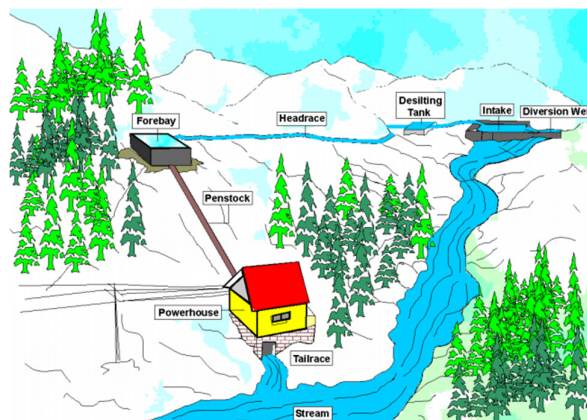
O Trabalho Prático, que será realizado em **grupos de três elementos**, deverá compreender **quatro partes** com entregas individualizadas.

Caso de estudo

O Trabalho Prático tem em vista o **pré-dimensionamento** e a **análise preliminar da viabilidade técnico-económica de uma pequena central hidroelétrica (PCH) com exploração a fio-de-água**, entendendo-se por tal que a **potência da central é inferior a 10 MW** e que a **albufeira criada pelo açude onde está instalada a tomada de água do circuito hidráulico não tem qualquer capacidade de regularização dos caudais afluentes**.

Do estudo deverá resultar: (i) a **indicação das principais características hidrológicas e energéticas da PCH**; (ii) a **descrição geral da composição do respetivo circuito hidráulico e o pré-dimensionamento das suas principais componentes**; e (iii) a **análise da viabilidade económica do projeto, baseada numa análise de custos/benefícios, mediante o recurso a indicadores de viabilidade económica**.

A cada Grupo é atribuído uma PCH como caso de estudo. Para o efeito, é dado um pequeno excerto da carta militar à escala 1/25000 com o trecho de rio onde se insere o circuito hidráulico da PCH. Tal circuito inicia-se na tomada de água do açude, a que se segue um canal com escoamento em superfície livre, a câmara de carga promovendo a transição entre o escoamento em superfície livre no canal para o escoamento em pressão na conduta forçada, esta conduta que alimenta a central hidroelétrica onde está instalado o grupo turbina-gerador e, por fim, a restituição dos caudais turbinados ao curso de água, conforme a figura que se segue. Fixado os caudais de dimensionamento da PCH, Q_{max} , e ecológico no trecho de rio entre as secções do açude e de restituição da central, Q_{eco} , são derivados para o circuito hidráulico todos os caudais fluviais até ao limite de Q_{max} , tendo previamente sido assegurado Q_{eco} . Havendo caudais fluviais remanescentes da soma de Q_{max} com Q_{eco} , os mesmos são lançados para jusante sobre a soleira descarregadora do açude. Caso contrário, o caudal derivado para o circuito hidráulico é inferior ao de dimensionamento.



Esquema geral da PCH.

Parte 1 – CONCEÇÃO GERAL DO CASO DE ESTUDO. BACIA HIDROGRÁFICA DA PCH E RESPETIVA CARACTERIZAÇÃO

Antecedendo a realização do trabalho é necessário importar para o AUTOCAD as cartas topográficas onde se inserem a PCH e o respetivo circuito hidráulico e bacia hidrográfica. Nesta importação é fundamental assegurar que as cartas estão corretamente georreferenciadas e à escala correta. Se tal não acontecer, não será possível executar o trabalho. Segue-se a descrição das principais tarefas a desenvolver.

1) Conceção geral do circuito hidráulico

Esta tarefa refere-se à conceção de uma solução possível para o circuito hidráulico da PCH tendo por base o excerto da carta militar à escala 1/25 000 com o trecho de rio onde se insere o circuito hidráulico da PCH fornecido ao grupo, bem como a constituição geral prevista para tal circuito, antes descrita.

Para o efeito, será necessário propor a secção de inserção do açude, onde se inicia o circuito hidráulico, e a secção de inserção da central. Embora muito preliminarmente, pode admitir-se que o canal se insere a uma cota cerca de 5 m acima da cota da secção de implantação do açude. Nesse pressuposto, a diferença entre as cotas da secção de implantação do açude acrescida de 5 m e a cota da secção de restituição da central define a queda bruta topográfica sob a qual ocorrerá a produção de energia. A localização da central hidroelétrica deve ser tal que, relativamente à cota do açude, conduza a uma queda topográfica apreciável.

Contudo, é necessário atender a que a localização relativa do açude e da central hidroelétrica resulta de um compromisso entre a queda topográfica, o comprimento do circuito hidráulico e a área da bacia hidrográfica na secção do açude. Com efeito, fixada a localização da central, quanto mais para montante se inserir o açude, maior será o desnível topográfico e, logo, a queda suscetível de ser aproveitada na produção de energia. Contudo, ao deslocar-se o açude para montante, por um lado, diminui-se a respetiva bacia hidrográfica e, logo, as aflúências ao açude e, por outro lado, aumenta-se o comprimento do circuito hidráulico, ou seja, o custo da PCH. Como a energia produzida é proporcional à queda e ao volume de água utilizado, o objetivo é identificar a maior queda topográfica compatível com uma dada localização do açude, sem que isso determine uma bacia hidrográfica na secção do açude muito reduzida ou um circuito hidráulico muito longo.

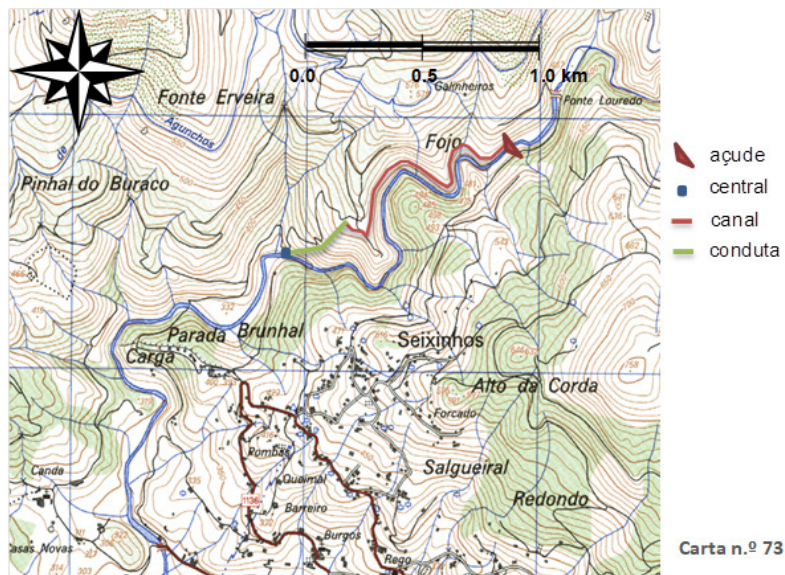
À escala de trabalho (1/25 000) considere que o canal segue a curva de nível sensivelmente localizada 5 m acima de cota do leito do rio onde se insere o açude, como antes referido.

Dispondo de uma solução para a PCH e tendo-a já implementado no AUTOCAD, o Grupo deverá:

- Atribuir uma designação à PCH.
- Identificar o curso de água em que se insere o açude, bem como a respetiva bacia hidrográfica principal, de entre as grandes bacias hidrográficas nacionais.
- Definir com o maior rigor possível as características gerais do circuito hidráulico, em termos de cotas de inserção do açude e da central da PCH, respetiva queda bruta e comprimentos das suas componentes principais (canal e conduta). Preliminarmente, considere que a cota do plano de água que será criado pelo açude (nível de retenção normal, Nrn) estará 10 m acima da cota do talvegue na secção de inserção da obra, ou seja, 5 m acima da cota do canal.
- Localizar com rigor as secções do rio de implantação do açude e de restituição da central hidroelétrica mediante indicação das respetivas coordenadas cartográficas (M,P) (em m) no sistema Hayford Gauss que informa a cartografia à escala 1/25000 e correspondentes coordenadas geográficas (graus, minutos e segundos) no sistema WGS84. Para transformação das primeiras coordenadas nas segundas recorra a <http://www.igeoe.pt/coordenadas/>).

Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia
Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente – Ano letivo 2021/2022

- Apresentar um mapa da totalidade ou de parte de Portugal Continental, por exemplo, obtido a partir do *Google Earth*, de modo a possibilitar a localização geral da PCH no contexto do País.
- Identificar a freguesia, concelho e distrito em que se localiza o açude (e.g., <https://www.pordata.pt/Municipios/> e <https://www.pordata.pt/Municipios/Freguesias-54>).
- Produzir uma figura, perfeitamente perceptível, com o esquema geral da PCH. Tal figura terá necessariamente de conter o norte e a escala gráfica e indicar claramente as componentes relevantes nela esquematizadas e as cartas topográficas a que se refere, conforme seguidamente se exemplifica.



Esquema geral da PCH de
 Fonte Erveira, no rio Louredo,
 sobre cartografia à escala
 1/25 000.

2) Caraterização fisiográfica da bacia hidrográfica e da respetiva rede de drenagem

A segunda etapa refere-se à caraterização fisiográfica da bacia hidrográfica, compreendendo as seguintes tarefas:

- Delimitação, à escala 1/25 000, da bacia hidrográfica na secção de inserção do açude da PCH e cálculo da correspondente área.
- Obtenção da curva hipsométrica, com e sem unidades. Para o efeito, considere, no mínimo, 10 curvas de nível, não equidistantes e definindo áreas parcelares equilibradas entre si (ou seja, sem que umas sejam muito grandes e outras muito pequenas). Incluir no relatório um quadro com os valores de base da curva hipsométrica e a correspondente curva, com dois eixos horizontais. Apresentar ainda uma figura/planta com a representação das áreas consideradas na obtenção da curva hipsométrica.
- Com base na anterior curva, cálculo da altura e da altitude médias (incluir na curva hipsométrica a representação da altitude média).
- Identificação do traçado do rio principal e seu destaque nas figuras relativas à bacia hidrográfica.
- Obtenção do perfil longitudinal do rio principal, considerando, para o efeito, as interseções do rio com todas as curvas de nível.
- Com base no anterior perfil, cálculo dos declives médio, equivalente e 10-85% (necessariamente sob a forma de um quadro de valores e de uma figura com os segmentos de reta que definem os diferentes declives esquematizados).

Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia
Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente – Ano letivo 2021/2022

- Calcule o tempo de concentração da bacia hidrográfica da PCH, adotando para o efeito a média dos resultados fornecidos pelas fórmulas de Giandotti (à esquerda) e de Temez (à direita):

$$t_c = \frac{4 \sqrt{A} + 1.5 L}{0.8 \sqrt{hm}}$$

$$t_c = 0.3 \left(\frac{L}{dm^{0.25}} \right)^{0.76}$$

em que são:

- tc tempo de concentração (h);
- A área da bacia hidrográfica (km²);
- L desenvolvimento do curso de água principal (km);
- hm altura média da bacia hidrográfica (m);
- dm declive médio do curso de água principal (-).

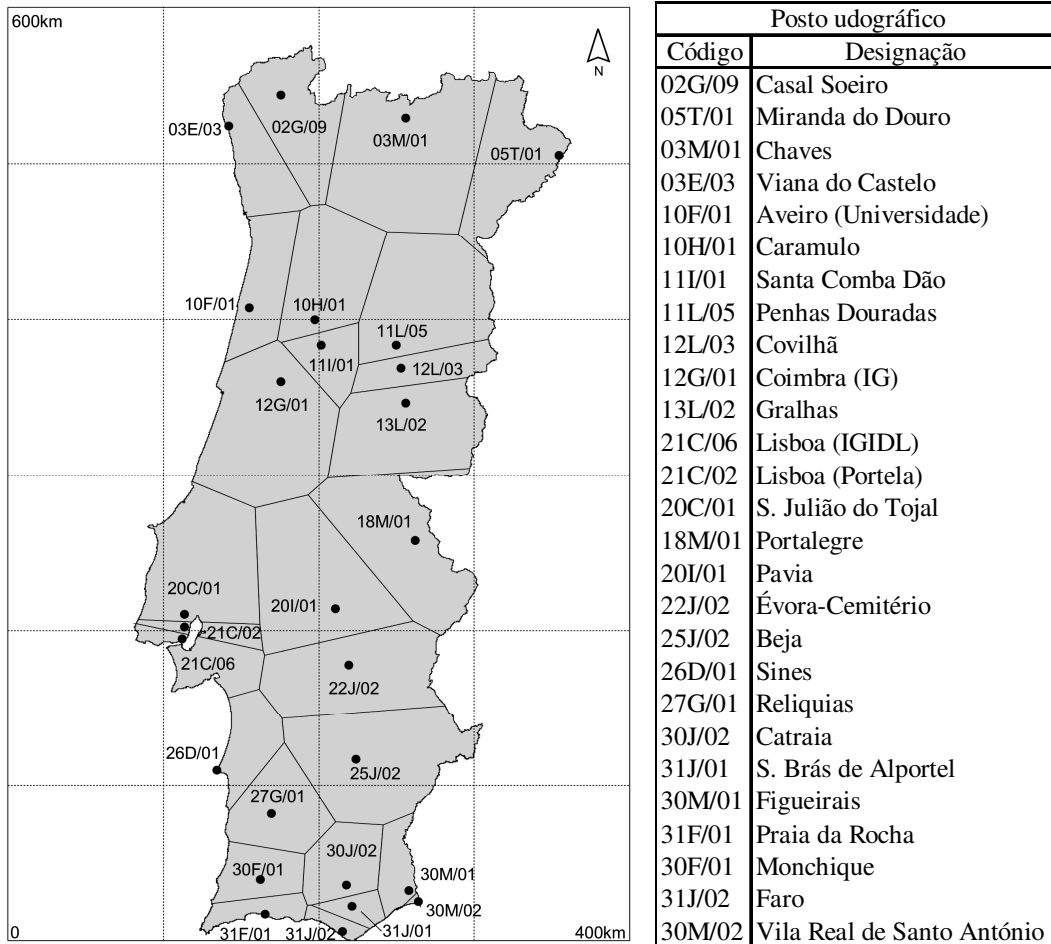
Parte 2 – CÁLCULO DAS PRECIPITAÇÕES ANUAL MÉDIA E INTENSA COM PERÍODO DE RETORNO DE 100 ANOS SOBRE A BACIA HIDROGRÁFICA

As afluências à secção do açude do caso de estudo dependem das precipitações que ocorrem na respetiva bacia hidrográfica. A avaliação de tais afluências será efetuada em termos anuais médios, tendo por base a estimativa da precipitação anual média na bacia hidrográfica a qual, por sua vez, será avaliada a partir dos registos disponíveis em postos udométricos localizados no interior ou nas proximidades da bacia hidrográfica do caso de estudo.

O dimensionamento de algumas das componentes do pequeno aproveitamento hidroelétrico, com ênfase para o respetivo açude, requer a caracterização da cheia de projeto afluente ao mesmo. Para o efeito adotar-se-á a cheia com período de retorno de 100 anos ou cheia centenária. A estimativa do respetivo caudal máximo, habitualmente designado por de ponta de cheia (*peak flood discharge*), depende das precipitações intensas que ocorrem na bacia hidrográfica, a cuja caracterização também é necessário proceder.

1. Por consulta do Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos, SNIRH (<http://snirh.apambiente.pt/>), identifique e postos udométricos inseridos na bacia hidrográfica do açude do pequeno aproveitamento hidroelétrico e nas suas imediações e dispondo de séries tão longas quanto possível de precipitações anuais.
2. A partir da análise, por um lado, das séries de precipitações anuais disponíveis nos anteriores postos e, por outro lado, da influência de tais postos na bacia hidrográfica do açude do pequeno aproveitamento hidroelétrico, selecione os postos a utilizar na estimativa da precipitação anual média naquela bacia. **(havendo alternativa, não deverão ser consideradas as séries de precipitação com menos de 20 anos)**
3. Apresente, sob a forma de um quadro, as coordenadas no sistema Hyaford Gauss, bem como as amostras de precipitações anuais nos anteriores postos e os respetivos parâmetros estatísticos (média, desvio-padrão e coeficiente de assimetria).
4. Com base nas anteriores médias, calcule a precipitação anual média na bacia hidrográfica da PCH por aplicação do método de Thiessen (os resultados têm necessariamente de ser compilados sob a forma de um quadro de valores, em que a cada posto é feito corresponder a respetiva precipitação anual média, área de influência e peso, e de uma figura representativa, devidamente informada – norte geográfico, escala, legenda, ...).
5. Por consulta de BRANDÃO, C.; RODRIGUES, R.; COSTA, J. P., 2001, *Análise de fenómenos extremos. Precipitações intensas em Portugal Continental*. DSRH-INAG, Instituto da Água. Lisboa, Portugal (disponível no SNIRH, em “Mediateca → Hidro-biblioteca”), selecione uma curva intensidade-duração-frequência, curva IDF, aplicável à caracterização das precipitações intensas na bacia hidrográfica do açude do pequeno aproveitamento hidroelétrico. Tal curva deve ser tal que lhe corresponda uma área de influência que previsivelmente inclui a anterior bacia hidrográfica. Para o efeito, atenda à figura incluída na página seguinte, reproduzida dos slides de apoio à UC.
6. Com base na anterior IDF, calcule a precipitação máxima anual com o período de retorno de 100 anos e com duração igual ao tempo de concentração da bacia hidrográfica na secção do açude (precipitação de projeto).
7. Por aplicação da fórmula racional, calcule o caudal de ponta da cheia centenária. Para o efeito, adote o valor de 0.8 para o coeficiente C.

Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia
Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente – Ano letivo 2021/2022



Postos udométricos dispendo de curvas intensidade-duração-freqüência

Parte 3 – CARATERIZAÇÃO DO REGIME FLUVIAL NA SECÇÃO DA TOMADA DE ÁGUA DO PEQUENO APROVEITAMENTO HIDROELÉTRICO: DISPONIBILIDADES HÍDRICAS ANUAIS E DIÁRIAS E CAUDAIS RESERVADOS. SIMULAÇÃO DA EXPLORAÇÃO DA CENTRAL HIDROELÉTRICA. VALORES ANUAIS MÉDIOS DOS DIFERENTES VOLUMES EM PRESENÇA E DA ENERGIA PRODUZIDA

Uma vez definido o circuito hidráulico do pequeno aproveitamento hidroelétrico (designadamente, no que respeita à configuração geral e à queda topográfica) e fixado o respetivo caudal de dimensionamento, a produção de energia depende dos volumes afluentes (valores e padrões temporais) à secção do açude do caso de estudo.

A presente parte do trabalho prático tem por objetivo **caracterizar o regime fluvial na secção da tomada de água do aproveitamento, na média dos anos, mas também à escala diária**. Com base nessa caracterização, proceder-se-á à **simulação da exploração diária do aproveitamento**, com o objetivo de **estimar a produção de energia elétrica**. Para o efeito, será necessário considerar um regime de caudais ecológicos a reservar no trecho do curso de água entre as secções do açude e de restituição da central.

1. Estime o **escoamento anual médio afluente** à secção da tomada de água do pequeno aproveitamento hidroelétrico. Para o efeito, aplique a **fórmula de Turc** e as **relações regionais desenvolvidas por Quintela (1967)**, representadas na Figura 1, e recorra a **mapas do género do exemplificado na Figura 2**. No caso dos dois primeiros modelos é necessário estimar previamente a temperatura anual média na região em que se insere a bacia hidrográfica para o que pode utilizar o mapa da temperatura anual média disponível no SNIRH (em “Grandes números → Galeria de Imagens”) ou, preferencialmente, aceder a <https://sniamb.apambiente.pt/content/geo-visualizador> → Atlas do Ambiente → Temperatura do ar ou outra variável hidrológica.

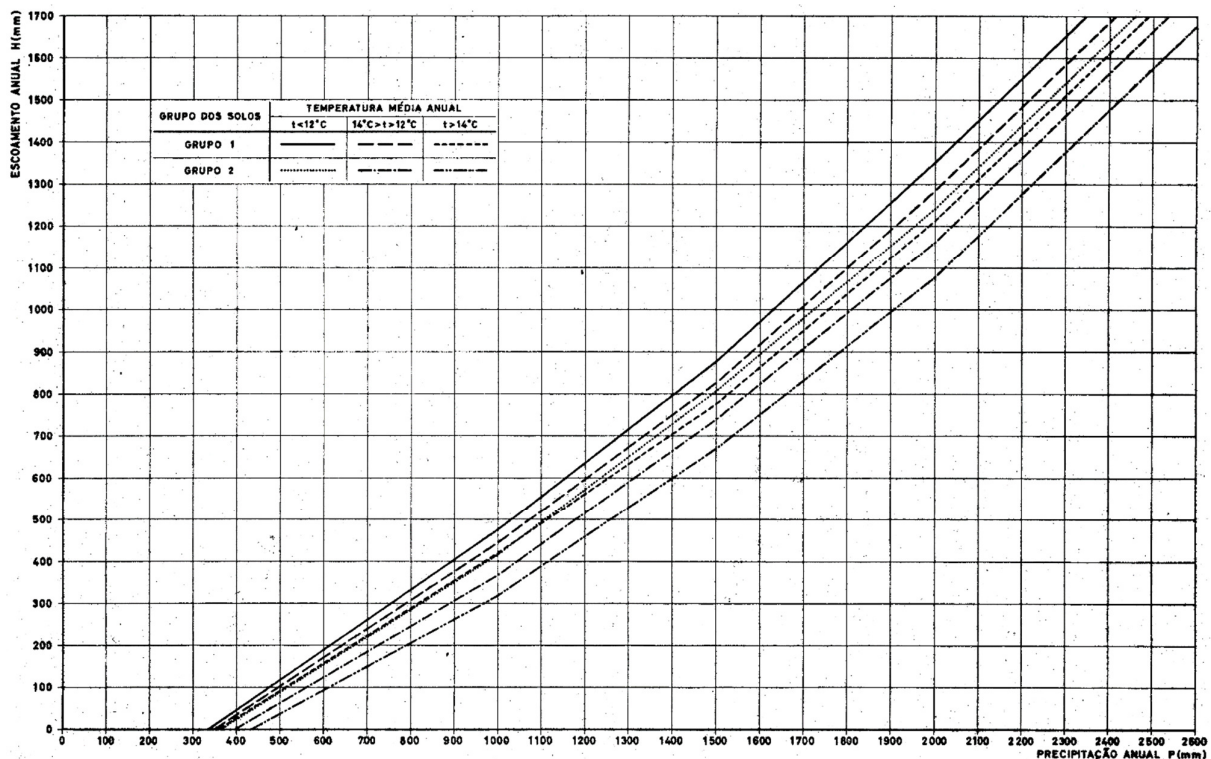


Figura 1 – Relações regionais de Quintela.

Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia
 Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente – Ano letivo 2021/2022

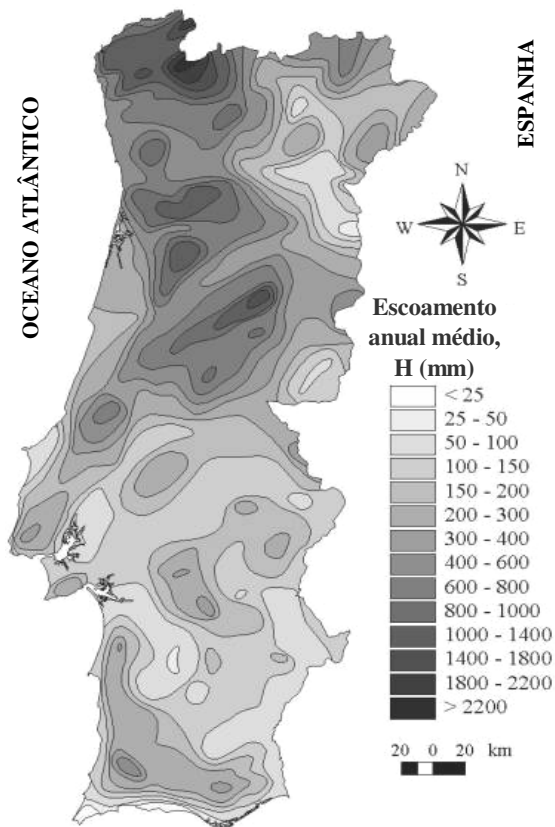


Figura 2 – Mapa da altura do escoamento anual médio em Portugal Continental.

Especificamente no que respeita às relações regionais de Quintela, considere que os solos ocorrentes na bacia hidrográfica são do tipo 1.

Atendendo aos três resultados assim obtidos, adote um valor para a **altura do escoamento anual médio, H, na bacia hidrográfica do pequeno aproveitamento hidroelétrico** (a discutir com o docente da UC se os resultados dos três modelos forem muito diferentes entre si). Todos os valores de base e resultados relativos à estimativa em causa têm de ser apresentados sob a forma de um *quadro*. Inclua no seu relatório uma *figura* com a localização esquemática da bacia hidrográfica sobre o mapa de isolinhas do escoamento anual médio.

- Atendendo à altura do escoamento anual médio que obteve, estime o volume anual médio do escoamento afluente ao pequeno aproveitamento hidroelétrico (expresso em m^3 e em milhões de m^3 ou hm^3) e o respetivo módulo, Q_{modPCH} (m^3/s). Indique todos os cálculos que efetuar.
- Nesta alínea será obtida uma **série de caudais médios diários** representativa do regime do escoamento afluente à PCH.

Para o efeito, aceda ao SNIRH escolhendo: SNIRH -> Dados de base -> Monitorização -> Rede hidrométrica -> Bacia hidrográfica (a especificar por cada grupo)

Tendo por base o mapa das estações hidrométricas (EHs) que então aparece, identifique, uma estação em **condições naturais**, inserida tão perto quanto possível da bacia hidrográfica do pequeno aproveitamento hidroelétrico (de modo a assegurar a proximidade entre as alturas do escoamento anual médio nesta bacia e na da estação hidrométrica, bem como a proximidade dos condicionamentos geológicos). **Não podem ser selecionadas estações hidrométricas localizadas nos grandes cursos de água do território nacional – ex.:**

Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia
Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente – Ano letivo 2021/2022

rios Douro, Tâmega, Mondego ou Tejo – pois, não só dominam bacias hidrográficas com áreas incomparavelmente superiores à da bacia em estudo, mas também, muito provavelmente, não transcrevem condições de escoamento naturais.

4. Recolha os registos de caudais médios diários durante um período contínuo de pelo menos 10 anos. Por uma questão de simplificação, despreze os dias 29 de fevereiro dos anos bissextos.

Na recolha dos caudais médios diários utilize **primeiramente a opção “relatório”** (exemplificada na Figuras 3 e 4) para poder visualizar os caudais ano a ano e assim identificar facilmente se os registos são contínuos, como exigido, ou se existem falhas de registos. Havendo falhas, tem de averiguar se, para essa mesma estação, existe algum outro período com dimensão superior ou igual a 10 anos e sem falhas. Se tal não acontecer, terá de identificar outra estação hidrométrica.

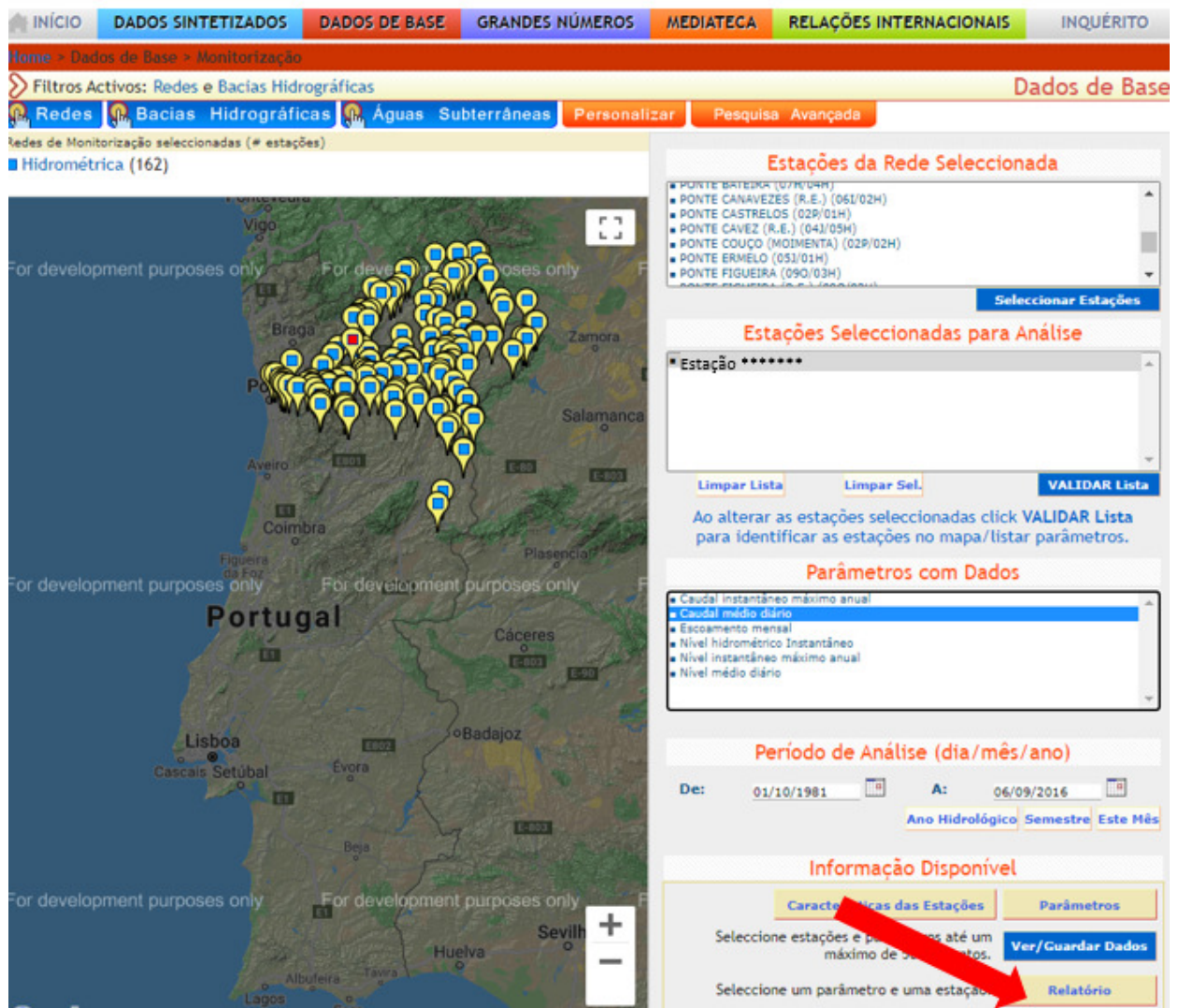


Figura 3 – Seleção pela opção de apresentação de dados em formato de “Relatório”.

Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia
Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente – Ano letivo 2021/2022

Caudal médio diário (m³/s) - Ano Hidrológico 1960/61

Dia	OUT	NOV	DEZ	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET
1	2.20	98.00	27.00	22.00	12.00	5.90	3.10	4.20	16.00	3.30	1.20	0.00
2	5.30	59.00	31.00	17.00	11.00	5.60	3.00	3.90	11.00	4.00	0.44	0.00
3	7.40	44.00	24.00	24.00	11.00	5.50	2.90	3.80	9.30	11.00	0.30	0.00
4	3.30	59.00	22.00	22.00	10.00	5.30	2.70	3.50	8.00	3.70	0.24	0.00
5	15.00	44.00	22.00	19.00	9.60	5.10	2.70	3.20	7.00	2.80	0.21	0.00
6	6.70	35.00	24.00	17.00	9.30	5.00	6.40	3.10	6.50	2.30	0.16	0.00
7	4.60	31.00	66.00	17.00	9.30	4.90	10.00	3.00	5.70	2.00	0.11	0.00
8	3.90	41.00	57.00	16.00	9.00	4.60	6.90	2.80	5.20	1.60	0.11	0.00
9	4.20	30.00	38.00	16.00	8.60	4.40	5.40	2.60	4.80	1.30	0.08	0.00
10	3.50	28.00	32.00	15.00	8.40	4.30	4.80	2.50	4.20	1.20	0.11	0.00
11	3.00	31.00	30.00	15.00	8.20	4.20	4.50	2.30	3.90	0.98	0.10	0.00
12	2.70	36.00	27.00	13.00	8.00	4.00	4.00	2.10	3.50	0.84	0.07	0.00
13	5.00	32.00	26.00	12.00	7.60	3.90	3.80	2.00	3.20	0.75	0.19	0.00
14	6.70	27.00	30.00	12.00	7.50	3.90	3.60	1.90	2.90	0.72	0.18	0.00
15	4.20	25.00	25.00	12.00	7.30	3.70	3.60	1.80	2.80	0.68	0.13	0.00
16	3.50	31.00	23.00	11.00	7.10	3.50	3.70	1.70	2.70	0.58	0.13	0.00
17	3.10	57.00	21.00	11.00	6.80	3.40	7.20	1.80	2.40	0.58	0.09	0.00
18	2.90	40.00	20.00	11.00	6.60	3.30	5.80	1.80	2.10	0.55	0.05	0.03
19	2.90	35.00	19.00	12.00	6.30	3.40	4.70	1.60	2.00	0.49	0.05	0.57
20	9.10	30.00	22.00	11.00	6.20	4.70	4.50	1.50	1.70	0.41	0.03	0.47
21	33.00	112.00	18.00	11.00	6.30	5.60	4.20	1.40	1.50	0.34	0.01	0.35
22	96.00	72.00	17.00	16.00	6.40	6.60	4.10	1.40	1.30	0.31	0.03	0.23
23	62.00	57.00	16.00	19.00	6.10	5.90	4.70	1.40	1.40	0.19	0.02	0.21
24	64.00	43.00	17.00	16.00	5.90	5.20	4.70	3.00	1.50	0.19	0.01	0.21
25	93.00	39.00	15.00	15.00	9.40	4.70	4.60	11.00	2.40	0.17	0.00	0.19
26	44.00	38.00	14.00	12.00	7.70	4.70	7.10	13.00	3.70	0.15	0.00	0.19
27	46.00	46.00	26.00	12.00	6.70	4.20	4.90	9.10	5.00	0.14	0.00	0.09
28	34.00	35.00	21.00	12.00	6.10	3.90	5.40	11.00	3.30	0.10	0.00	0.13
29	28.00	30.00	19.00	13.00	-	3.60	6.10	7.60	2.60	0.02	0.00	1.10
30	34.00	27.00	17.00	11.00	-	3.30	4.80	7.10	2.20	0.08	0.00	2.60
31	41.00	-	17.00	11.00	-	3.20	-	19.00	-	0.26	0.00	-
N. Valores	31	30	31	31	28	31	30	31	30	31	31	30
Min.	2.20	25.00	14.00	11.00	5.90	3.20	2.70	1.40	1.30	0.02	0.00	0.00
Máx.	96.00	112.00	66.00	24.00	12.00	6.60	10.00	19.00	16.00	11.00	1.20	2.60
Média	21.75	43.73	25.26	14.61	8.01	4.50	4.80	4.39	4.33	1.35	0.13	0.21
#dias com dados												365
Escoamento Mensal (dam ³)	58251	113357	67651	39139	19388	12053	12433	11759	11215	3605	350	550

Figura 4 - Exemplo que um ano com registos apresentado em formato de “Relatório”.

- Após ter a certeza de que dispõe de um período contínuo sem falhas, identifique esse período na janela que, para o efeito aparece no SNIRH e solicite e recolha os dados através da **opção Ver/Guardar Dados** (dados em coluna) – ver slides 405 e seguintes.
- Tendo por base os caudais médios diários registados na estação hidrométrica que escolheu, no período de 10 anos, igualmente por si escolhido, calcule o módulo relativo à estação hidrométrica, $Q_{mod_{EH}}$.
- Com base nos valores de $Q_{mod_{PCH}}$ e $Q_{mod_{EH}}$, transponha a série de caudais médios diários relativa à estação hidrométrica para a secção do açude do pequeno aproveitamento hidroelétrico.
- Por utilização da série transposta, obtenha a **curva de duração média anual do caudal médio diário relativa à secção do açude** do pequeno aproveitamento hidroelétrico (curva com e sem unidades).
- De modo a caracterizar o regime do escoamento mensal na bacia hidrográfica do pequeno aproveitamento hidroelétrico e a determinar o regime de caudais ecológicos, obtenha, a partir dos caudais médios diários na

Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia
Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente – Ano letivo 2021/2022

secção do açude, o volume afluente (hm³) em média em cada mês, bem como a fração que tal volume representa em relação ao volume anual médio nessa mesma secção. Represente os anteriores dozes volumes mensais médios num diagrama cronológico com dois eixos verticais, um com unidades e outro adimensional, por referência ao volume anual médio, conforme exemplificado na Figura 5.

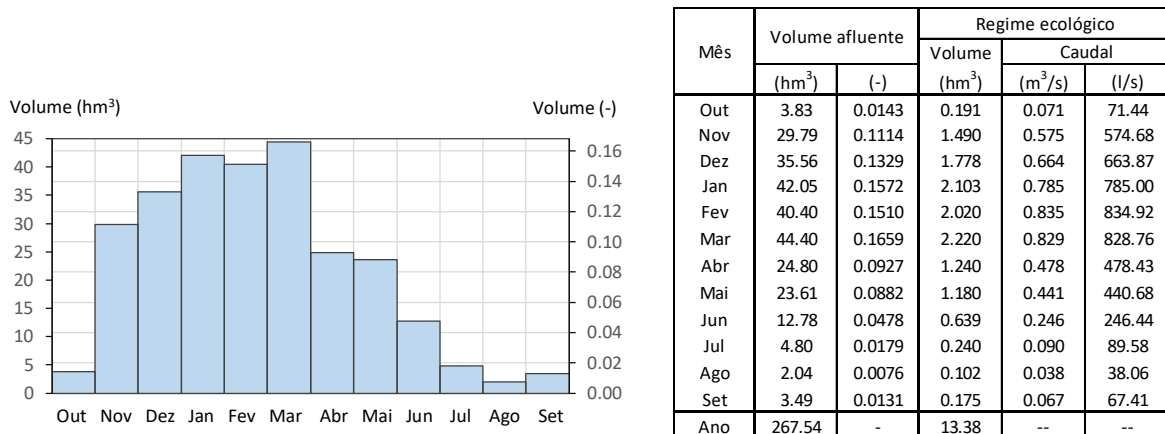


Figura 5 – Exemplo: escoamentos mensais médios afluentes à secção da tomada de água do pequeno aproveitamento hidroelétrico expressos em volume e em fração do escoamento anual médio e correspondente regime de caudais ecológicos.

- Defina um regime de caudais ecológicos a reservar no trecho fluvial compreendido entre o açude do pequeno aproveitamento hidroelétrico e a restituição da respetiva central. Considere que o volume afeto a fins ecológicos representa 5% do volume anual médio da bacia hidrográfica. Reparta esse volume pelos diferentes meses do ano de acordo com o diagrama mensal médio adimensional que obteve no ponto anterior. Por divisão pelo número de segundos de cada mês, transforme o volume nesse mês num caudal médio ecológico a reservar na secção do açude (considere que o mês de fevereiro tem 28 dias) – ver exemplo da Figura 5.
- Determine o caudal de dimensionamento ou caudal máximo turbinável do pequeno aproveitamento hidroelétrico, Q_{max} , considerando que o mesmo é igual a 1.8 do caudal modular na respetiva bacia hidrográfica, ou seja, $Q_{max} = 1.8 Q_{mod_{PCH}}$.
- Tendo por base a série de caudais médios diários afluentes ao açude do pequeno aproveitamento hidroelétrico antes obtida, simule, dia a dia, a exploração do aproveitamento. Para o efeito aplique o procedimento de cálculo indicado nos slides da UC.

Exemplifique os resultados que obteve sob a forma de um quadro (Figura 6) incluindo ainda no mesmo alguns dos valores diários dos caudais turbinados, ecológicos, descarregados sobre o açude e circulantes no trecho interferido entre o açude e a central e bem como os correspondentes volumes diários. Ano a ano, calcule e apresente os valores correspondentes às anteriores grandezas, bem como, para o período adotado na simulação, as respetivas médias mensais e anuais.

Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia
Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente – Ano letivo 2021/2022

		Estação hidrométrica	Pequeno aproveitamento hidroelétrico											
Data		Caudal afluente (m³/s)	Caudal afluente		Caudal ecológico		Caudal turbinado			Caudal sobre o descarregador		Caudal no trecho interferido		
Ano	Dia		Caudal (m³/s)	Volume (dam³)	Caudal (m³/s)	Volume (dam³)	Caudal (m³/s)	Volume (dam³)	Energia produzida (GWh)	Caudal (m³/s)	Volume (dam³)	Caudal (m³/s)	Volume (dam³)	
Valores anuais	1	1												
		2												
		3												
													
		363
		364												
	365													
	Total anual													
	2	1												
		2												
		3												
													
		363
		364												
	365													
Total anual														
3	1													
	2													
	3													
													
	363	....	...	....	...	....	....	....	....	...	....	...	....
	364													
365														
Total anual														
....													
N	1													
	2													
	3													
													
	363	....	...	....	...	....	....	....	....	...	....	...	....
	364													
365														
Total anual														
Valores anuais médios (hm³)														

		River gauge station	Small hydropower scheme											
Date		Discharge (m³/s)	Inflow		Ecological flow		Turbined flow			Flow over the spillway		Flow in the interfered river reach		
Year	Day		Discharge (m³/s)	Volume (dam³)	Discharge (m³/s)	Volume (dam³)	Discharge (m³/s)	Volume (dam³)	Energia produzida (GWh)	Discharge (m³/s)	Volume (dam³)	Discharge (m³/s)	Volume (dam³)	
Annual values	1	1												
		2												
		3												
													
		363
		364												
	365													
	Annual total	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	
	2	1												
		2												
		3												
													
		363
		364												
	365													
Annual total	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--		
3	1													
	2													
	3													
													
	363	....	...	....	...	....	....	....	....	...	....	...	....
	364													
365														
Annual total	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--		
....													
N	1													
	2													
	3													
													
	363	....	...	....	...	....	....	....	....	...	....	...	....
	364													
365														
Annual total	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--		
Mean annual volumes (hm³)		--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	

Figura 6 – Exemplo de quadro organizativo dos resultados do procedimento de simulação da exploração diária do pequeno aproveitamento hidroelétrico.

Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia
Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente – Ano letivo 2021/2022

13. A energia produzida num dado intervalo de tempo pode ser preliminarmente estimada pela seguinte fórmula:

$$E = \frac{V H_{\text{energia}}}{\frac{3600}{9.8 \eta}}$$

em que:

E energia produzida no intervalo de tempo (GWh)

V volume turbinado no intervalo de tempo (hm³)

η eficiência média da central hidroelétrica, preliminarmente considerada constante e aproximadamente igual a 0.86

H_{energia} queda útil (m) para efeitos de cálculo da energia produzida, preliminarmente considerada constante e igual a 97.5% da queda bruta topográfica, a qual, por sua vez, pode ser considerada igual à cota do canal menos a cota do rio na secção de restituição da central

Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia
Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente – Ano letivo 2021/2022

Parte 4 – DIMENSIONAMENTO PRELIMINAR DO PEQUENO APROVEITAMENTO HIDROELÉTRICO. CUSTOS E RECEITA. ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÓMICA

Caraterizado o regime hidrológico na bacia hidrográfica do pequeno aproveitamento hidroelétrico e estimada a produção anual média no mesmo, pretende-se, na presente parte, dimensionar as principais componentes do seu circuito hidráulico, estimar os custos inerentes à execução do aproveitamento e concluir sobre a viabilidade económica do respetivo investimento.

1. Açude:

- 1.1 Apresente um corte esquemático do açude, indicando no mesmo as seguintes cotas: (i) mínima da fundação; (ii) do leito do rio; (iii) da crista da soleira do descarregador, ou seja, do nível de retenção normal, N_{rn} ; (iv) do nível de máxima cheia, N_{MC} ; (v) da crista do açude. Apresente os cálculos necessários à definição do nível de máxima cheia, N_{MC} , e ao comprimento da soleira descarregadora. Para o efeito, limite a diferença de cotas entre os níveis de máxima cheia, N_{MC} , e de retenção normal, N_{rn} , a 3 ou, quanto muito, 3.5 m, conforme consta dos slides da UC.
- 1.2 Apresente o perfil transversal do vale na secção de implantação do açude, indicando no mesmo: (i) a cota do leito do rio; (ii) a largura que considerou para o leito do rio; (iii) a largura do vale à cota do coroamento do açude.
- 1.3 Estime, com o maior rigor possível, os volumes de betão e de escavação necessários à execução do açude e o respetivo custo de execução das obras de construção civil.
- 1.4 Resuma a generalidade da anterior informação (desde cotas, a volumes e custos) sob a forma de um quadro.

2. Canal e câmara de carga:

- 2.1 Dimensione a secção transversal do canal (ou seja, calcule os valores de b e h).
- 2.2 Apresente um corte esquemático do canal e da respetiva plataforma de execução, indicando com rigor todas as dimensões em presença (tanto da plataforma, como do canal), bem como o declive que considerou para a inclinação média da encosta ao longo do canal.
- 2.3 Estime as quantidades de trabalho, por metro linear e no total, necessárias à execução do canal, relativas à escavação, à cofragem, ao betão armado e ao betão de regularização.
- 2.4 Organize, sob a forma de um quadro, a seguinte informação: (i) caudal máximo derivável; (ii) comprimento do canal; (iii) dimensões da secção transversal do canal; (iv) para as diferentes componentes, quantidades de trabalho (por metro linear e no total) e com correspondentes custos; (v) custo da construção civil do canal, por metro linear e no total; (vi) custo da construção civil da câmara de carga, considerado aproximadamente igual a cerca de 50 m de canal.

3. Conduta forçada:

- 3.1 Dimensione o diâmetro da conduta forçada.
- 3.2 Organize, sob a forma de um quadro, a seguinte informação: (i) caudal máximo derivável; (ii) diâmetro da conduta; (iii) comprimento em planta e comprimento total da conduta; (iv) perda de carga unitária e perda de carga total ao longo da conduta; (v) espessura da conduta, sem e com folga para corrosão; (vi) peso da

Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia
Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente – Ano letivo 2021/2022

conduta, por metro linear e total; (vii) custo da conduta, entendido como o custo do aço; (viii) custo das obras de construção civil da conduta.

- 3.3 Confirme que a perda de carga ao longo da conduta, acrescida do decréscimo de cota da soleira do canal e de uma folga de pelo menos 1 m não excede cerca de 5% da queda topográfica bruta (simplificadamente entendida como a diferença de cotas entre o canal e o rio na secção de restituição da central).

4. Central hidroelétrica:

- 4.1 Especifique o tipo de turbina e calcule a potência a instalar, bem como o correspondente custo da central hidroelétrica. Para o efeito, atenda à informação e às fórmulas de cálculo apresentadas nos slides da UC.
- 4.2 Organize, sob a forma de um quadro, a seguinte informação: (i) caudal máximo derivável; (ii) queda bruta; (iii) queda de cálculo da energia; (iv) queda de cálculo da potência instalada; (v) rendimento médio global da central hidroelétrica; (vi) potência instalada; (vii) tipo de turbina; (viii) custo total da central hidroelétrica e correspondentes custos da construção civil e do equipamento. Considere que os dois custos mencionados em (viii) representam 25% e 75% do custo total da central, respetivamente.

5. Outras componentes de obra:

- 5.1 Defina, embora de modo muito geral, outras componentes do projeto, com ênfase para os acessos à zona do açude e trecho inicial do canal, ao trecho final do canal e câmara de carga e à central. Para o efeito, atenda a eventuais caminhos e acessos representados nas cartas topográficas. Pode ainda recorrer ao *Google Earth*.
- 5.2 Relativamente ao custo da linha de interligação à rede elétrica nacional, tendo por base topografia à escala 1/25000, identifique uma linha elétrica nas proximidades da central hidroelétrica à qual tal central possa ser hipoteticamente ligada e aplique ao comprimento da ligação que assim resultar o custo unitário de 70 €/m. Considere que o custo que assim resultar tem lugar no ano -1. Se o comprimento da ligação que identificou exceder 2 km, fale com a docente da UC.

6. Outros custos

- 6.1 Os critérios necessários ao cálculo de outros custos, para além dos anteriormente mencionados, constam da base de cálculo em Excel, fornecida no endereço da UC para efeitos de elaboração da análise económica.

7. Análise económica

- 7.1 Proceda à análise económica da viabilidade do investimento no pequeno aproveitamento hidroelétrico. Para tanto, considere um sistema de preços de mercado constantes relativos a 2021 e o período de análise de 35 anos após início da exploração do aproveitamento. Considere as taxas de atualização de 3, 4 e 5%. Atenda ao ficheiro de Excel que lhe foi disponibilizado, do qual constam (i) os critérios aplicáveis aos custos de investimento e aos custos anuais que, embora sendo parte integrante do projeto, não foram objeto da estimativa precedente, (ii) custos aplicáveis a equipamentos diversos e (iii) a calendarização geral de todos custos e receitas.

Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia
Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente – Ano letivo 2021/2022

7.2 Considere que o investimento tem lugar nos anos -2 e -1 e que a entrada em exploração ocorre no início do ano 1 (instante 0), ano ao qual se referem os preços de mercado (2020). Admita que no ano 25 existem custos de reposição dos equipamentos, avaliados em 50% do total do equipamento.

7.3 Considere a tarifa aplicável à venda da energia de 50 €/MWh (0.05 €/kWh).

Figura – Base da análise económica

CUSTOS DE INVESTIMENTO (€)										TIR (%)		
ano -2	ano -1	ano 1	....	....	....	ano 25	....	ano 35		Taxa de atualização		
										3.0%	4.0%	5.0%
1 - Estudos e projetos (3% de c.civil; 2/3 ano -2 + 1/3 ano -1)												
2 - Fiscalização (5% de c.civil; 1/3 ano -2 + 2/3 ano -1)												
3 - Construção civil, c.civil (30% ano -2 + 70% ano -1)												
3.1 - Açude e órgãos anexos												
3.2 - Canal (I = ****)												
3.3 - Câmara de carga e de válvulas												
3.4 - Conduta forçada (I=****; 350 euro/m)												
3.5 - Central hidroelétrica (25% do total)												
3.6 - TOTAL PARCIAL												
4 - Equipamento, equi (20% ano -2 + 80% ano -1)												
4.1 - Açude e órgãos anexos (10% c.civil)												
4.2 - Canal (I=****; 2.5% c.civil)												
4.3 - Câmara de carga e de válvulas (25% c.civil)												
4.4 - Conduta forçada (I = ****)												
4.5 - Central hidroelétrica (75% do total)												
4.6 - TOTAL PARCIAL												
5 - Ligação à rede elétrica nacional (70 €/m)												
6 - Estaleiro, desvio provisório, imprevistos e acessos (20.0% c.civil; 70% ano -2 + 30% ano -1)												
TOTAL DOS CUSTOS DE INVESTIMENTO												
CUSTOS DE EXPLORAÇÃO (€/ano)												
ano -2	ano -1	ano 1	....	....	....	ano 25	....	ano 35				
1 - Operação e manutenção												
1.1 - Custos de operação												
1.2 - Manutenção das obras de construção civil (0.5% c.civil)												
1.3 - Manutenção dos equipamentos (2.5% equi)												
2 - Custos administrativos (2500 euros/MW)												
TOTAL DOS CUSTOS DE EXPLORAÇÃO												
RECEITA												
ano -2	ano -1	ano 1	....	....	....	ano 25	....	ano 35				
1 - Produção de energia												
1.1 - Produção de energia anual média (GWh)												
1.2 - Preço unitário (€/kWh)												
1.3 - Receita anual média (€/ano)												
		0.050	....	....	....	0.050	....	0.050				

INVESTMENT COST (€)										IRT (%)		
YEAR -2	YEAR -1	YEAR 1	....	....	....	YEAR 25	....	YEAR 35		Discount rate		
										3.0%	4.0%	5.0%
1 - Studies and design (3% of civil c.; 2/3 year -2 + 1/3 year -1)												
2 - Site supervision (5% of civil c.; 1/3 year -2 + 2/3 year -1)												
3 - Civil construction, civil c. (30% year -2 + 70% year -1)												
3.1 - Weir and related components												
3.2 - Canal (I = ****)												
3.3 - Surge tank/forebay and valve chamber												
3.4 - Penstock (I=****; 350 euro/m)												
3.5 - Powerhouse (25% of total)												
3.6 - PARTIAL TOTAL												
4 - Equipment, equi (20% year -2 + 80% year -1)												
4.1 - Weir and related components (10% civil c.)												
4.2 - Canal (I=****; 2.5% civil c.)												
4.3 - Surge tank/forebay and valve chamber (25% civil c.)												
4.4 - Penstock (I = ****)												
4.5 - Powerhouse (75% of total)												
4.6 - PARTIAL TOTAL												
5 - Interconnection to the national grid (70 €/m)												
6 - Building site, coffer dam, unforseen and roads (20.0% civil c.; 70% ano -2 + 30% ano -1)												
TOTAL OF THE INVESTMENT COSTS												
EXPLOITATION COSTS (€/year)												
YEAR -2	YEAR -1	YEAR 1	....	....	....	YEAR 25	....	YEAR 35				
1 - Operation and maintenance												
1.1 - Operation costs												
1.2 - Maintenance of the civil works (0.5% civil c.)												
1.3 - Maintenance of the equipment (2.5% equi)												
2 - Administrativ costs (2500 euros/MW)												
TOTAL OF THE EXPLOITATION COSTS												
INCOME												
YEAR -2	YEAR -1	YEAR 1	....	....	....	YEAR 25	....	YEAR 35				
1 - Energy production												
1.1 - Mean annual energy production (GWh)												
1.2 - Sale unit cost (€/kWh)												
1.3 - Mean annual income (€/year)												
		0.050	....	....	....	0.050	....	0.050				