

O MODELO DAM_FEUP PARA A ANÁLISE DE VIABILIDADE DE APROVEITAMENTOS HIDROELÉTRICOS DE PEQUENA E MÉDIA DIMENSÃO

The Dam_FEUP Model for the Feasibility Analysis of Small and Medium Hydropower Plants

ANDREIA MOREIRA ⁽¹⁾ e FRANCISCO TAVEIRA-PINTO ⁽²⁾

⁽¹⁾ Bolseira de Investigação, FEUP,
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, ammoreira@fe.up.pt

⁽²⁾ Professor Catedrático, FEUP,
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, fpinto@fe.up.pt

Resumo

A produção elétrica com recurso à construção de centrais mini-hídricas (CMH) é um assunto referido nas estratégias futuras para as energias renováveis. Verifica-se que as metodologias para o estudo destes sistemas não sofreram evoluções significativas nas últimas décadas, não tendo acompanhado a evolução tecnológica com aplicação nesta área. Os métodos clássicos para avaliação do potencial hídrico de um curso de água são ainda amplamente utilizados, abarcando procedimentos com analogias e incertezas.

Com este trabalho pretende-se dar um contributo na melhoria desse aspeto, abordando metodologias mais recentes para a realização do estudo hidrológico. Os Sistemas de Informação Geográfica, SIG, são expostos como uma ferramenta essencial nos processos de preparação de dados para a utilização de modelos de simulação hidrológica. Neste estudo é apresentado o modelo de simulação hidrológica SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*).

É desenvolvido também um modelo que sistematiza os principais processos de cálculo num estudo de viabilidade de uma CMH, permitindo a definição de uma solução técnica com os melhores indicadores de rentabilidade.

Palavras-chave: Centrais mini-hídricas, sistemas de informação geográfica, SWAT, Dam_FEUP, viabilidade.

Abstract

The electric production using small hydropower plants (SHP), is a theme referred in the future strategies for the renewable energies. It is verified that the methodologies for the study of those systems hasn't seen significant developments in the last decades, by not having followed the technological evolution with application in this area. The classic methods for evaluation of potential water flows are still largely used, covering procedures with analogies and significant uncertainty.

This thesis tries to give a contribution to improve that aspect, approaching recent methodologies to perform hydrological studies. Geographical Information Systems (GIS), are presented as an essential tool in the process for preparing data used by hydrologic simulation models. In this work, the hydrologic simulation model SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*), to estimate the daily flow regime is presented.

A model calculation is also developed, incorporating the essential for the design of SHP, which systematizes the process of calculation required in a feasibility study, allowing the definition of a technical solution with the best indicators of viability.

Keywords: Small hydropower plants, geographical information system, SWAT, Dam_FEUP, viability.

1. Introdução

A preocupação a nível mundial com o fenómeno de aquecimento global do Planeta tem vindo a enfatizar cada vez mais a importância e as vantagens da produção de energia com recurso a fontes renováveis (Monterroso, 2005).

A utilização da energia hídrica para produção de energia elétrica permite a redução da dependência energética do país, fomentando o aproveitamento de um recurso natural.

As CMH são fontes de energia renováveis e de impacto ambiental reduzido (Portela *et al.*, 2010) visto que não estão associadas à emissão de CO₂ ou de outros gases com efeito de estufa.

Estas permitem ainda reduzir o risco de inundações através do efeito de regularização dos açudes e constituem uma das mais valiosas respostas à questão de como proporcionar às comunidades rurais isoladas os benefícios da eletricidade e respetivo progresso associado (Ramos *et al.*, 1999).

Em Portugal, é a partir da década de 80 que se regista um maior desenvolvimento desta atividade, em parte fomentada pelas políticas energéticas comunitárias e nacionais quanto à importância da exploração destes recursos, figura 1. Contrariamente, o início do século XXI caracterizou-se por um abrandamento na exploração deste recurso, que se pretende inverter com as políticas energéticas nacionais para a energia.

A Estratégia Nacional para a Energia, ENE 2020, apresenta um número significativo de objetivos a atingir até 2020, defendendo o reforço da utilização da energia hidroelétrica, nomeadamente a proveniente das CMH.

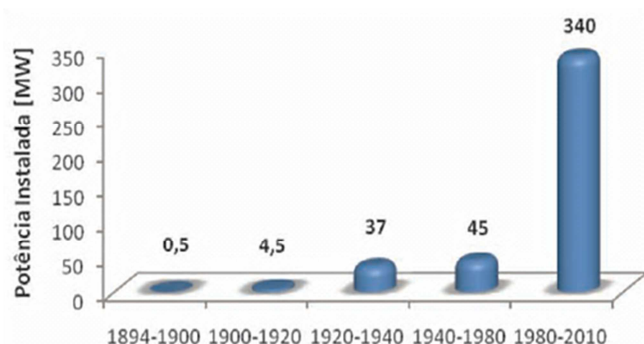


Figura 1. Evolução da potência instalada em pequenas centrais hídricas, em Portugal (Ferreira e Costa, 2011).

Ainda, o Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis, PNAER, refere que entre 2010 e 2020 se prevê a instalação de mais 350 MW de potência em CMH, Figura 2.

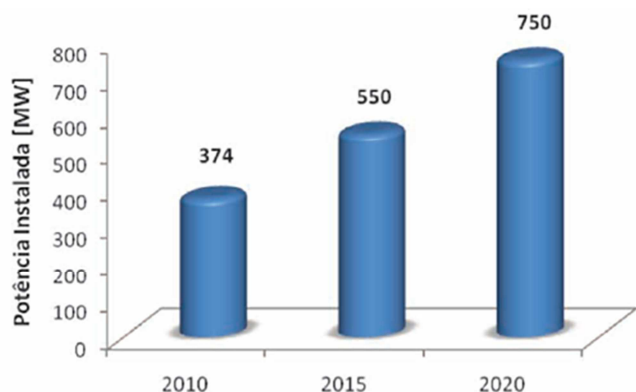


Figura 2. Previsão da evolução da potência instalada em CMH em Portugal - 2010 a 2020 (Ferreira e Costa, 2011).

Portugal possui ainda potencial por explorar para produção de energia hidroelétrica, sobretudo nas bacias hidrográficas a Norte do rio Tejo, em especial para as regiões hidrográficas dos rios Lima e Douro (Ferreira e Costa, 2011).

2. Metodologias para a Análise de Viabilidade de Aproveitamentos Hidroelétricos de Pequena e Média Dimensão

2.1. Introdução

Neste ponto são apresentadas metodologias para realização do estudo de viabilidade de CMH, desde o estudo do recurso hídrico para definição da lei de caudais afluentes na secção em estudo, à escolha de uma solução técnica e quantificação da sua rentabilidade.

Na seleção dos métodos para avaliação do potencial hídrico de um curso de água expõem-se abordagens atuais, nomeadamente, a utilização de Sistemas de Informação Geográfica, SIG.

A definição e otimização da escolha de uma solução técnica foram automatizadas num modelo de cálculo, o modelo Dam_FEUP.

Introduzindo alguns dados como a série de caudais médios diários anuais e as características gerais da obra, este modelo permite a realização de uma análise de viabilidade rápida e eficaz. A Figura 3 apresenta uma esquematização geral da metodologia que será apresentada.

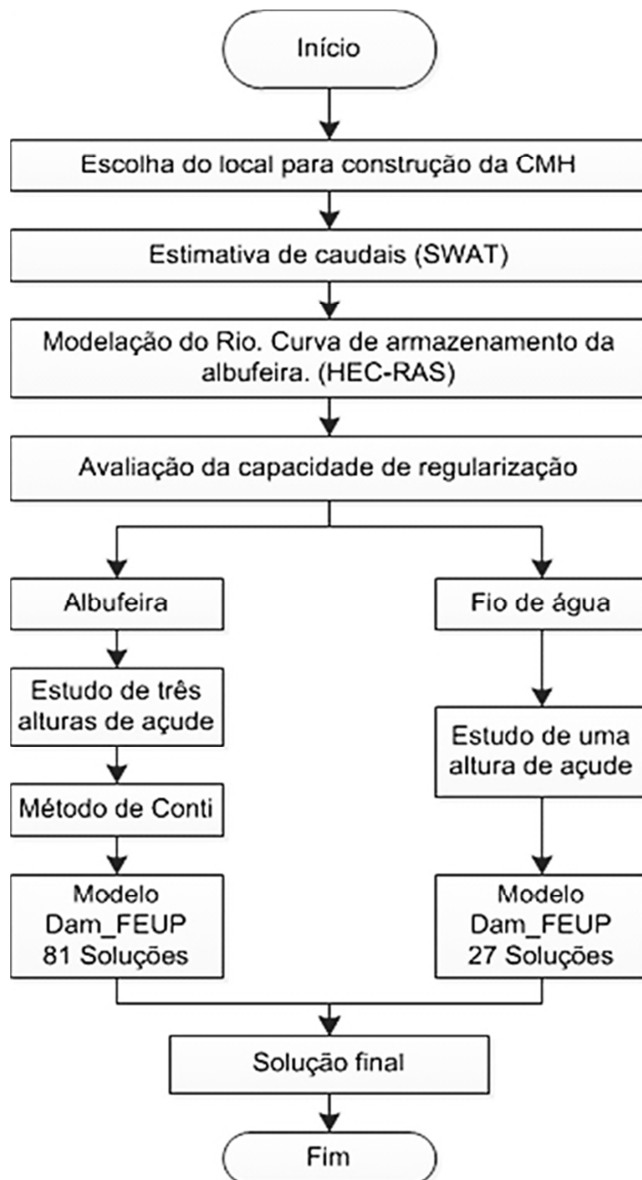


Figura 3. Esquema geral da metodologia proposta.

2.2. Estudo do recurso hídrico

O estudo hidrológico tem por vista a determinação da série de caudais médios diários anuais na secção de construção da obra de retenção. Neste estudo, a quantificação de caudais é realizada com recurso a um *software* de modelação hidrológica. A simulação hidrológica pretende reproduzir, com ajuda informática, todos os processos físicos que compõem o ciclo hidrológico numa bacia hidrográfica, utilizando um modelo matemático que os represente adequadamente. Os modelos de simulação hidrológica concebidos até à atualidade incluem modelos de simulação de eventos, que podem modelar um evento único de precipitação, e modelos de simulação contínua, que permitem simular o escoamento causado por chuvas com intervalos de dias ou horas, ao longo de grandes períodos de tempo (Naranjo e Valdivieso, 2003).

Neste estudo, foi aplicado o modelo de simulação hidrológica *Soil and Water Assessment Tool*, SWAT, desenvolvido pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos em conjunto com a Universidade do Texas.

O modelo SWAT pode ser utilizado recorrendo à interface gráfica ArcSWAT, a qual funciona como uma extensão do software ArcGIS.

A utilização deste modelo prevê a inserção por parte do utilizador de uma grande variedade de informação, a qual é função do fenómeno que se pretende simular. Para o necessário efeito é essencial a inserção de parâmetros meteorológicos e fisiográficos da bacia hidrográfica onde se insere o curso de água em estudo.

O processo de preparação do modelo inicia-se pela delimitação da bacia hidrográfica, figura 4. Para tal é necessário um modelo digital do terreno, MDT. O MDT é um conjunto de dados em suporte numérico (malha raster), que permite associar a qualquer ponto sobre o plano cartográfico o valor correspondente à sua altitude (Matos, 2007).

Nesta fase, o modelo SWAT tendo em conta a informação altimétrica, procede ao traçado das linhas de água, usando as operações de *flow direction and accumulation*. Às diversas linhas de água geradas são associadas áreas de influência, de tal forma que a bacia hidrográfica é dividida em sub-bacias.

O SWAT, para simular os processos físicos, para além de dividir a bacia em sub-bacias, como foi referido, divide ainda estas em Unidades de Resposta Hidrológica (HRU). É ao nível das HRU que são aplicadas as equações integradas no modelo, nomeadamente equações de balanço hidrológico.

Estas são definidas tendo em conta as características de ocupação do solo, constituição geológica dos solos e declives, em cada sub-bacia. Assim a informação relativa à ocupação e constituição dos solos deverá ser introduzida no modelo sob a forma de uma malha *raster*, a sobrepor ao MDT.

A informação referida é determinante na forma como se processa a gestão da água que se precipita na bacia hidrográfica. Os parâmetros meteorológicos previstos pelos SWAT são: a precipitação, a temperatura, a humidade relativa, a radiação solar e a velocidade do vento. Em caso de inexistência de dados para alguns destes parâmetros, os mesmos poderão ser deixados em branco.

As estações meteorológicas permitem a obtenção de séries de dados tais como precipitações, direção e velocidade do vento e, menos comumente, de radiação solar e temperatura do ar. Assim, a informação disponível deve ser inserida no modelo, localizando neste as estações meteorológicas com influência na bacia hidrográfica.

Uma vez inseridos os dados recolhidos no modelo de simulação SWAT, e após a sua execução, é essencial proceder à sua validação. Durante este processo os parâmetros de maior influência sobre a simulação da vazão são calibrados para que o modelo se ajuste às observações da forma mais consistente possível.

2.3. Características da albufeira

A determinação das características da albufeira, em especial da sua curva de armazenamento ou curva característica, será um dado essencial no modelo de cálculo Dam_FEUP.

Para realizar esta tarefa optou-se pela utilização do software *Hydrologic Engineering Centers River Analysis System*, HEC-RAS, do U.S. Army Corps of Engineers.

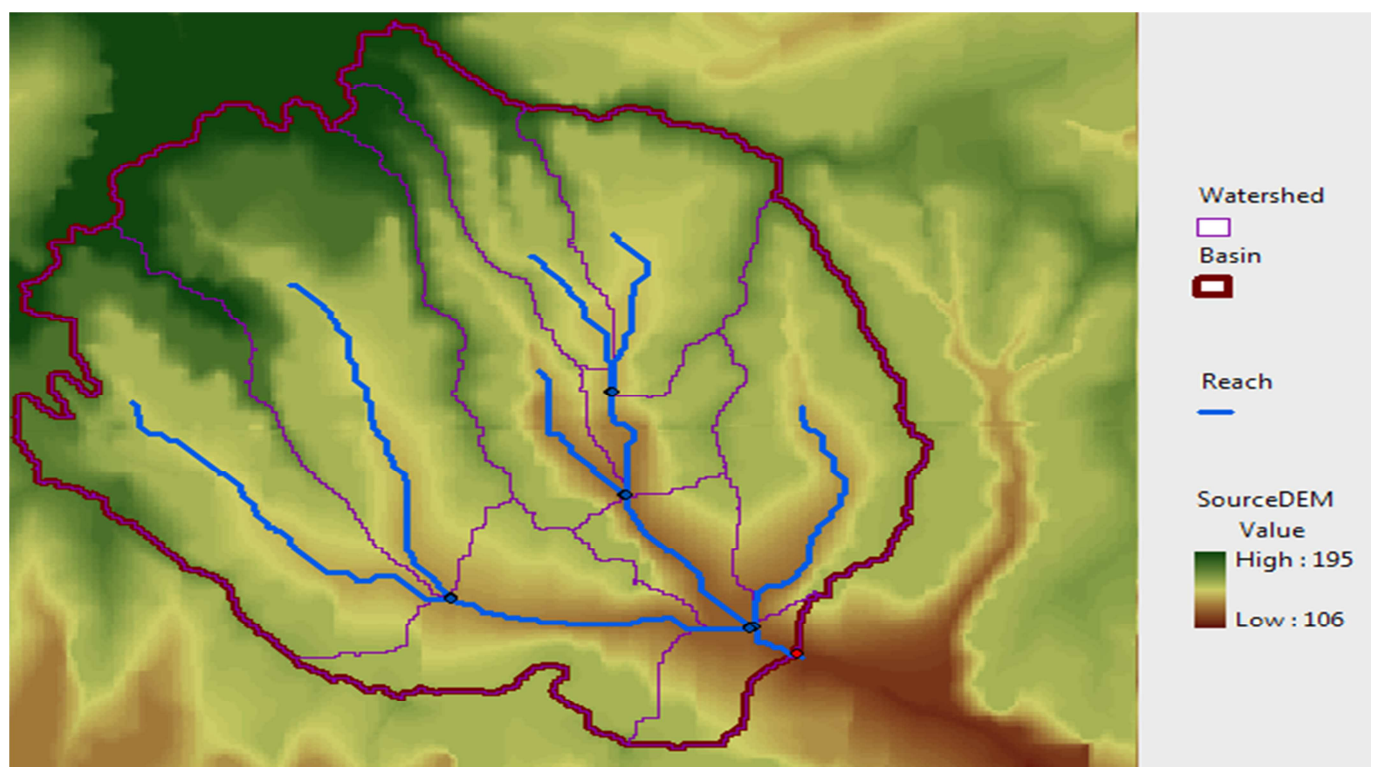


Figura 4. Delimitação da bacia hidrográfica no SWAT.

O HEC-RAS é um modelo de simulação 1D que se destina ao cálculo do escoamento em superfície livre em linhas de água naturais, permitindo a inserção de obras artificiais como açudes (Lança *et al.*, 2012).

A utilização deste software requer um MDT que contenha o curso hídrico a estudar e cartas militares atualizadas a sobrepor ao primeiro, facilitando a visualização da zona em estudo e a posterior realização de correções aos perfis transversais.

A preparação dos dados necessários à execução do HEC-RAS é feita na aplicação HEC-GeoRAS, a qual funciona como uma extensão do software ArcGIS. É nesta fase que são definidos os perfis transversais do rio a analisar, respetiva extensão e espaçamento. No HEC-RAS procede-se à implantação do açude, ao estabelecimento do escoamento no rio e à inserção de parâmetros como a rugosidade do canal natural. O modelo de cálculo HEC-RAS realiza o cálculo hidráulico de todas as secções transversais do curso de água, previamente definidas.

Mediante o estabelecimento de um regime de caudais permanente, é possível avaliar o volume de água existente entre duas secções sem existência do açude e com a existência de açudes de diferentes alturas. Este procedimento permitirá estimar o volume de água que é possível encaixar com a construção de açudes de diversas alturas, isto é, a capacidade total das albufeiras geradas, e assim construir a curva característica da albufeira.

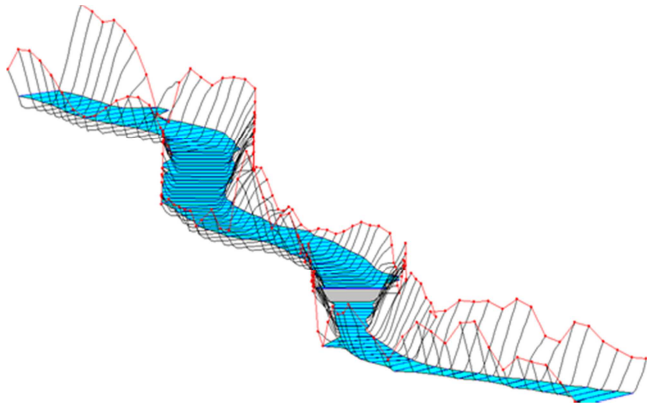


Figura 5. Visualização a 3D de um curso de água, definição de perfis transversais e implantação de um açude, no software HEC-RAS.

2.4. Modelo de cálculo Dam_FEUP

2.4.1. Conceção geral

Sendo a viabilidade técnica e económica de um aproveitamento hidroelétrico variável em função das características que se preconizam para a obra, entende-se desde logo que um estudo de viabilidade deve concomitantemente auxiliar na procura da solução mais viável. É sobre esta base conceptual que o modelo Dam_FEUP assenta.

Este modelo permite que, após a realização do estudo hidrológico do curso de água, bem como a análise das condições topográficas disponíveis no local de construção, sejam estudadas diversas soluções técnicas para o aproveitamento.

O modelo Dam_FEUP, para ser executado, requer os seguintes dados:

- Série anual de caudais médios diários, obtida de acordo com 2.2;
- Curva de armazenamento da albufeira, obtida de acordo com 2.3;
- Características gerais do empreendimento, tais como: o tipo de circuito, com ou sem canal de derivação; secção de implantação do açude; traçado e extensão da conduta forçada; extensão da ligação à rede; entre outros.

Após executado, o modelo permite obter como principal resultado as características técnicas da solução mais viável e os parâmetros quantificadores da respetiva viabilidade económica.

2.4.2. Capacidade de regularização

A existência de capacidade de regularização afeta os volumes disponíveis para turbinamento e a sua distribuição temporal.

Num aproveitamento a fio de água os caudais turbináveis são, a menos das reservas, os disponíveis na secção do açude a cada instante. Por seu turno, existindo capacidade de regularização, o caudal turbinado corresponderá a um volume temporariamente armazenado na capacidade disponível da albufeira.

O modelo Dam_FEUP inicia-se pela abordagem à existência de capacidade de regularização de caudais. Esta é avaliada através do índice de regularização específica, Re (Neves, sem data), dado pela equação

$$Re = \frac{\text{capacidade útil da albufeira}}{\text{caudal integral em ano médio}} \quad [1]$$

A capacidade útil da albufeira depende da altura atribuída ao açude e pode ser estimada através da curva característica da albufeira. Sempre que o índice de regularização apresente valores próximos de zero ou significativamente superiores a zero o modelo recomendará o estudo do aproveitamento como sendo a fio de água ou com regularização, respetivamente.

No caso de se tratar de um aproveitamento a fio-de-água o modelo irá estudar uma determinada altura de açude. Se existir capacidade de regularização o modelo Dam_FEUP prevê o estudo de três soluções de altura de açude.

A definição da(s) altura(s) de açude é realizada pelo utilizador do modelo, mediante as características locais, nomeadamente do leito e margens, assim como das conclusões decorrentes do estudo de eventos de cheia.

2.4.3. Aproveitamentos a fio de água

Num aproveitamento a fio de água a série de caudais médios diários anual disponível para produção elétrica é facilmente obtida, por subtração dos caudais reservados aos afluentes em cada dia. O modelo Dam_FEUP estima o caudal ecológico aplicando o método de Tennant.

A conceção hidráulica de uma CMH requer a definição de elementos como o caudal e a potência a instalar, grupos eletromecânicos e diâmetro da conduta forçada. Estes procedimentos constituirão os designados passos 1, 2 e 3 que se abordam de seguida.

Por último, um quarto passo tem por finalidade quantificar a produção energética anual para cada solução definida nos três passos anteriores. À medida que o modelo de cálculo for percorrendo os três primeiros passos mencionados, o número de soluções em estudo desmultiplicar-se-á no sentido de estudar o espectro de soluções onde se localizará a que possuiu melhores indicadores económicos.

Passo 1 – caudal a instalar

Na decisão do caudal a instalar é tido em conta que este é usualmente garantido durante 20% a 30% do ano sendo usualmente superior ao caudal módulo (Monteiro). É também prática corrente admitir o caudal instalado com um valor entre 1,5 a 2 vezes o caudal módulo. Com base nesta informação e na curva de caudais classificados afluentes, o modelo Dam_FEUP gera um intervalo de valores onde o caudal a instalar estará localizado.

Nesse intervalo, três caudais serão escolhidos automaticamente: o menor (Q1), o maior (Q3) e um intermédio (Q2). Desde logo existirão três soluções diferentes a analisar, no que concerne ao caudal instalado. Qualquer caudal diferente dos mencionados, pode ser introduzido manualmente.

Passo 2 – seleção dos grupos eletromecânicos

Neste passo o modelo contempla três possibilidades: um grupo para turbinar o caudal instalado (solução do tipo A); dois grupos de igual potência para turbinar o caudal instalado (solução do tipo B); e dois grupos diferentes, turbinando um deles dois terços do caudal instalado e o outro o restante terço (solução do tipo C). Cada uma destas possibilidades será atribuída aos três caudais instalados previamente definidos, pelo que no final deste processo existirão já nove soluções para o aproveitamento em estudo.

Neste passo é ainda definido o tipo de turbina e determinado o espectro de caudais turbináveis em cada uma das soluções.

Passo 3 – diâmetro da conduta forçada

Em pequenos aproveitamentos poder-se-á usar, como fórmula indicativa para o cálculo do diâmetro económico, em cm, a equação 2 (Proença, sem data).

$$D_{eco} = K Q^{0,388} \left(\frac{L}{H} \right)^{0,240} \quad [2]$$

em que K representa uma constante dependente do material, que para o aço vale 52,815, Q o caudal em m³/s, L o comprimento da conduta em m e H a queda bruta em m.

Para cada caudal instalado definido no passo 1, o modelo determinará o diâmetro económico. O diâmetro económico permite identificar a gama de diâmetros onde se situará aquele que corresponde à melhor solução.

Deste modo serão selecionados três diâmetros a estudar, na referida gama e para cada caudal instalado, gerados discretamente de 10 em 10 cm.

Poderá então concluir-se que, no final deste passo estão definidas 27 soluções, correspondentes às possíveis combinações de caudal instalado, grupos eletromecânicos e diâmetro da conduta forçada, Figura 6. A cada solução corresponderão diferentes proveitos e custos.

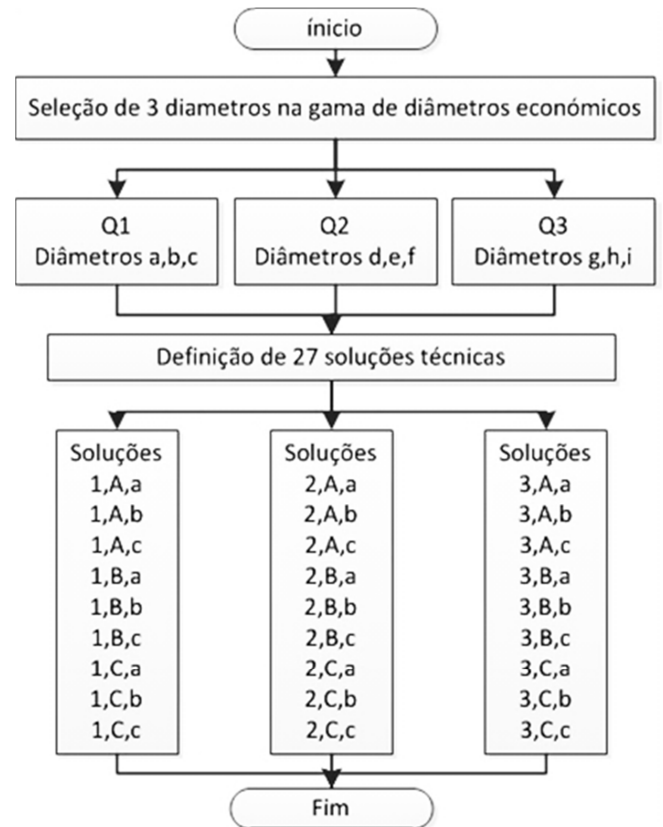


Figura 6. Nomenclatura das 27 soluções técnicas em estudo.

Passo 4 – energia produzida

A determinação da energia produzida pressupõe o conhecimento do caudal que está a ser turbinado durante um certo intervalo de tempo, da queda útil e do rendimento dos grupos. Este processo inicia-se pela leitura da curva de caudais classificados disponíveis para turbinar, em cada solução, no sentido de avaliar o tempo ao longo do qual é possível turbinar o caudal máximo, assim como ao fim de quanto tempo as turbinas são desligadas. Deste modo, para cada período de tempo em que é turbinado um caudal constante são efetuados os seguintes cálculos: velocidade do escoamento na conduta forçada, perda de carga contínua, perdas de carga localizadas, queda útil e rendimento da(s) turbina(s).

Na avaliação das perdas de carga o modelo tem em conta fatores como o tipo de circuito hidráulico e a configuração das condutas na proximidade da central. O Quadro 1 mostra as perdas de carga a ter em conta até à central.

Quadro 1. Perdas de carga até à proximidade da central.

Perdas de carga	Tipo de circuito	
	Com canal	Sem canal
Localizada na tomada de água	×	✓
Localizada na saída da câmara de carga	✓	×
Contínua na conduta forçada	✓	✓
Localizada nas curvas em planta e perfil da conduta forçada	✓	✓

As perdas de carga a considerar na proximidade da central serão função do tipo de solução adotada no que se refere aos grupos eletromecânicos. O modelo Dam_FEUP considera que o circuito nesta zona tem a configuração esquemática representada na Figura 7, existindo apenas o ramo T2 em soluções do tipo A.

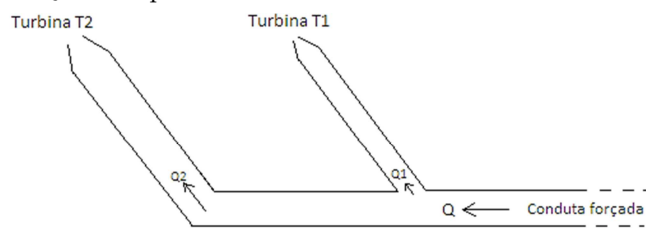


Figura 7. Esquema representativo do circuito hidráulico na proximidade da central.

O Quadro 2 apresenta as perdas de carga a considerar quando a água é conduzida às turbinas T1 e T2, podendo concluir-se que nestas a queda útil disponível (e consecutivamente a energia produzida) será distinta. O modelo contém a informação referente a ábacos e gráficos existentes na literatura, para cálculo de perdas de carga localizadas.

Quadro 2. Perdas de carga localizadas na proximidade da central.

Perdas de carga	Tipo de solução		
	A	B e C	
		T1	T2
Localizada na bifurcação	×	✓	✓
Localizada em curva	✓	×	✓
Localizada em convergente	✓	×	✓

O modelo Dam_FEUP contém ainda as curvas de rendimento para os diferentes tipos de turbinas inseridos na sua estrutura, nomeadamente Francis, Kaplan e Pelton.

No final deste passo, para além da quantificação da energia total produzida em ano médio e da potência instalada, é possível extrair também outras informações como o tempo de funcionamento da central por ano, nomeadamente o tempo de funcionamento de cada turbina.

2.4.4. Aproveitamentos com capacidade de regularização

Quando se verifica que existe a possibilidade de realizar regularização dos caudais afluentes, a definição da série temporal de caudais disponíveis para turbinar será distinta da apresentada para aproveitamentos a fio de água, uma vez que terá de se atender ao volume temporariamente armazenado na capacidade útil da albufeira.

Nos aproveitamentos com regularização, ainda que igualmente se proceda à subtração das reservas de caudal às aflúncias, existe a problemática de definir a lei de regularização dos caudais.

Um método habitualmente utilizado para esta finalidade é o método do fio tenso, ou de Conti.

Este tem uma abordagem simples e prática, pelo que se apresenta como um bom método para aplicar nas fases preliminares de um projeto, como o estudo de viabilidade. Uma vez calculada a lei de regularização máxima dos caudais afluentes, a série de caudais disponíveis para produção elétrica poderá ser determinada subtraindo à primeira os caudais reservados.

A cada solução de altura do açude corresponderão diferentes leis de regularização de caudais, pelo que para cada altura de açude serão estudadas as 27 soluções técnicas, de acordo com os critérios explicitados no item anterior.

Em suma, a diferença que se verifica no cálculo da produção energética de um aproveitamento a fio de água ou com regularização, por parte do modelo Dam_FEUP, é que no primeiro caso os caudais a instalar são calculados com base no caudal módulo dos caudais afluentes disponíveis para produção, enquanto no segundo caso, estes são calculados com base no caudal módulo ou médio dos caudais regularizados.

2.4.5. Estrutura de custos e indicadores de viabilidade

A realização da orçamentação de uma CMH, em fase de estudo de viabilidade, acarreta naturalmente uma incerteza significativa, fruto da inexistência de um projeto detalhado da obra, assim como da maior probabilidade de as características técnicas da mesma virem a ser aperfeiçoadas ao longo do processo.

A metodologia utilizada para realizar a estimativa de custos teve por base a análise de orçamentos de CMH já construídas, podendo assim dizer-se que se elaborou um orçamento com base em casos semelhantes. O modelo Dam_FEUP, na sua estrutura de custos, contém informação relativa a 7 CMH, 5 delas relativamente atuais, com características distintas. A orçamentação é realizada discretizando os custos em 5 grupos: Obras de engenharia civil, Equipamento eletromecânico e elétrico, Equipamento hidromecânico, Ligação à rede e Outros. Sempre que possível foram definidas curvas de custos para as diferentes componentes acima mencionadas.

A viabilidade das soluções estudadas é representada pelos indicadores: valor líquido atualizado, VAL; número previsível de anos de amortização, ROI (*return on investment*); e taxa interna de rentabilidade, TIR.

3. Caso de Estudo: Central Mini-Hídrica do Lourido, Felgueiras

3.1. Introdução

Neste ponto pretende-se verificar a aplicabilidade das metodologias anteriormente expostas mediante a sua aplicação a um caso de estudo.

O caso de estudo que será apresentado diz respeito ao mini-aproveitamento hidroelétrico instalado recentemente no rio Bugio, no lugar do Lourido, concelho de Felgueiras.

Os estudos para a realização do aproveitamento hidroelétrico de Lourido iniciaram-se no ano de 1988 e só foram retomados em 2006.

A CMH do Lourido possui um circuito tradicional, com canal de derivação, e uma queda bruta significativa de cerca de 90 m, e entrou em funcionamento no início de 2012.



Figura 8. Açude e tomada de água da CMH do Lourido.

3.2. Estudo hidrológico

Seguindo a metodologia apresentada iniciou-se o estudo hidrológico pela recolha de informação sobre a bacia hidrográfica.

O rio bugio apresenta uma bacia hidrográfica de cerca de 50,3 km², localizando-se a sua foz a poucas centenas de metros a jusante da restituição. A delimitação da bacia hidrográfica e o traçado das linhas de água foi realizada automaticamente no SWAT, com base num MDT com resolução de 25×25 m.

A caracterização da ocupação e constituição do solo da bacia hidrográfica foi realizada com a informação disponível na carta de ocupação do solo CORINE Land Cover de 2006 (Caetano *et al.*, 2009) e na carta litológica do Atlas do Ambiente Digital. O modelo SWAT permite a inserção de uma grande variedade de parâmetros caracterizadores da ocupação e constituição dos solos, salientando-se o Número de Escoamento ou CN e a classe hidrológica do solo, respetivamente. Verifica-se que cerca de 85% da bacia hidrográfica tem uma ocupação do solo correspondente a agricultura, matos ou floresta e os solos são de natureza granítica. Foi ainda recolhida e tratada a informação disponível nas estações meteorológicas que, de acordo com a construção do polígono de Thiessen, têm influência na bacia hidrográfica, nomeadamente as estações de Arada, Carvalho, Fafe e Moreira do Rei.

Estas estações possuem registos de precipitação média diária em período de tempo médio a longo, suficiente para a realização de estimativas de caudais com fiabilidade.

Uma vez definidos todos os detalhes necessários à execução do modelo SWAT, foi realizada uma simulação no período de 1/1/1970 a 31/12/2000, o que permitiu a estimativa de um caudal módulo de cerca de 1,5 m³/s e um caudal integral de 531 m³.

3.3. Características da albufeira

A determinação da curva característica da albufeira foi realizada com base no procedimento descrito em 2.4, isto é, com o auxílio do *software* HEC-RAS.

Os perfis transversais analisados foram definidos com um espaçamento de 5 m e uma extensão de 50 m.

A informação obtida para os perfis transversais do rio através do MDT teve de ser devidamente corrigida, uma vez que a resolução deste não é compatível com as modestas dimensões do rio Bugio.

3.4. Aplicação do modelo Dam_FEUP

3.4.1. Avaliação da capacidade de regularização

A definição da altura a atribuir ao açude foi influenciada por algumas restrições, nomeadamente a localização da central hidroelétrica do aproveitamento do Corvete, localizada a poucos metros a montante, e a existência de uma pequena ponte imediatamente a montante da retenção.

Esta última, conjuntamente com a morfologia das margens, condiciona bastante a altura do açude, não permitindo que este tenha mais que 2 m para que esta não seja inundada.

Assim, foi estimado o índice de regularização para as alturas de açude entre 1 a 1,8 m, Quadro 3.

Quadro 3. Avaliação da capacidade de regularização.

Altura do açude (m)	Capacidade útil da albufeira (m ³)	Índice de regularização	Tipo de exploração
1	12,63	0,02	Fio de água
1,2	20,30	0,04	
1,4	29,64	0,06	
1,6	41,71	0,08	
1,8	57,61	0,11	

Para qualquer uma das alturas estudadas verifica-se que o modelo Dam_FEUP indica a exploração do aproveitamento hidroelétrico a fio de água.

Quadro 4. Caudais instalados a estudar, tipo de turbina e gama de caudais turbinados para cada solução.

Caudal Instalado (m ³ /s)	Tipo de turbina	Gama de Caudais Turbinados - Distribuição por Turbina (m ³ /s)								
		A			B			C		
		QMT	Qmt	QMT	QMT0,5	Qmt	QMT	QMT 2/3	QMT 1/3	Qmt
2,50	Francis	2,88	0,88	2,88	1,44	0,50	2,88	1,92	0,96	0,29
2,75		3,16	0,96	3,16	1,58	0,55	3,16	2,11	1,05	0,32
3,00		3,45	1,05	3,45	1,73	0,60	3,45	2,30	1,15	0,35

3.4.2. Estudo de soluções. Produção energética

O estudo de soluções, inicia-se pela definição de três possibilidades de caudais a instalar, definidas com base nos caudais passíveis de utilização para produção elétrica.

Seguidamente apresenta-se a seleção do tipo de turbina e a gama de caudais turbinados para as nove soluções geradas até ao momento, Quadro 4.

A definição de três diâmetros possíveis de aplicar, em cada solução de caudal instalado, irá perfazer as 27 possibilidades de soluções técnicas, Quadro 5.

Quadro 5. Diâmetros da conduta forçada em estudo.

Caudais máximos a turbinar (m³/s)	Diâmetro económico (m)	Diâmetros a estudar (m)
2,88	1,4	1,20
		1,30
		1,40
		1,30
3,16	1,4	1,40
		1,50
		1,30
3,45	1,5	1,40
		1,50
		1,30

Executando o algoritmo referente ao passo 4 foi determinada a produção energética anual e a potência instalada para as 27 soluções em estudo, figura 9.

3.4.3 Estimativa de custos e indicadores de viabilidade.

Uma vez avaliada a produção energética média anual foram realizadas estimativas orçamentais para as 27 soluções técnicas analisadas.

O Quadro 6 apresenta o custo global de cada solução.

Por último foram determinados os indicadores económicos. Do ponto de vista comparativo, uma solução técnica de CMH será tanto melhor quanto maior for o seu VAL e TIR, e quanto menor for o número previsível de anos necessários para o retorno do investimento.

Quadro 6. Orçamento total para as 27 soluções técnicas em estudo.

Sol.	Invest. (€)	Sol.	Invest. (€)	Sol.	Invest. (€)
1, A, a	3,63	2, A, d	3,81	3, A, g	3,95
1, A, b	3,78	2, A, e	3,98	3, A, h	4,11
1, A, c	3,95	2, A, f	4,15	3, A, i	4,28
1, B, a	4,00	2, B, d	4,19	3, B, g	4,32
1, B, b	4,15	2, B, e	4,36	3, B, h	4,49
1, B, c	4,33	2, B, f	4,53	3, B, i	4,67
1, C, a	4,00	2, C, d	4,20	3, C, g	4,34
1, C, b	4,15	2, C, e	4,37	3, C, h	4,51
1, C, c	4,33	2, C, f	4,54	3, C, i	4,68

Deste modo, através da disposição ordenada destes indicadores, é possível avaliar qual a solução, de entre as estudadas, que apresenta maior viabilidade.

O Quadro 7 apresenta as 5 soluções com melhores indicadores de viabilidade.

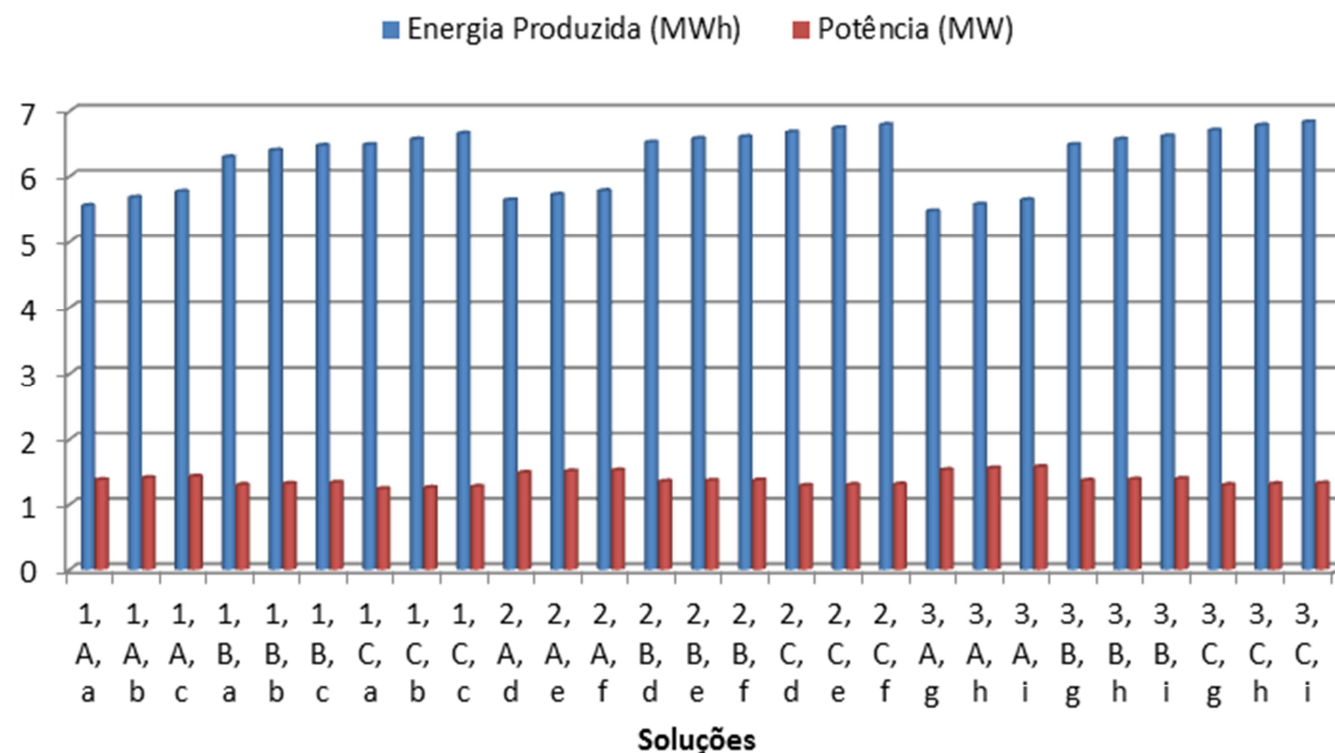


Figura 9. Produção energética média anual e potência instalada para as diversas soluções técnicas estudadas.

Quadro 7. Soluções técnicas com os melhores indicadores de viabilidade.

Sol.	VAL	Sol.	ROI	Sol.	TIR
2, C, d	3462,4	1, C, a	8,80	1, C, a	11,08
1, C, a	3443,8	2, C, d	8,97	2, C, d	10,99
1, C, b	3383,1	1, B, a	9,02	1, B, a	10,84
3, C, g	3368,2	1, C, b	9,06	1, C, b	10,77
2, C, e	3352,1	1, A, a	9,17	1, A, a	10,73

4. Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

Sendo as CMH uma importante parcela na aposta em energias renováveis, o desenvolvimento e melhoramento das metodologias de análise de viabilidade técnica e económica destas constitui igualmente um foco de interesse. A metodologia de quantificação de caudais apresentada constitui uma alternativa à tradicional analogia entre bacias hidrográficas. A utilização de ferramentas SIG e de modelos de simulação hidrológica permite um estudo mais detalhado do funcionamento hidrológico da bacia face aos métodos clássicos, uma vez que proporcionam uma visão alargada da bacia hidrográfica, facilitando o seu planeamento, exploração e prospeção de um curso de água.

Relativamente à conceção técnica e ao cálculo hidráulico de uma CMH, com o modelo Dam_FEUP, procurou-se automatizar o processo, não descurando a adaptabilidade do mesmo às possíveis configurações do circuito hidráulico e regime de exploração. O modelo constitui uma ferramenta interessante num estudo de viabilidade, pela sua rapidez, detalhe e procura focada da solução mais rentável, através da pesquisa da combinação das características técnicas mais proveitosas.

A atual situação económico-financeira nacional que conduziu a cortes nos subsídios concedidos às energias verdes mantém boqueados os investimentos nesta área, privando o país das conhecidas vantagens inerentes às CMH. Neste aspeto, o melhoramento das metodologias de análise de viabilidade de CMH e a sua concomitante otimização, poderão assumir uma posição motriz, justificando investimentos e maximizando indicadores de rentabilidade.

Em virtude das condicionantes de tempo associadas a este trabalho de investigação houve necessidade de limitar o alcance da abordagem em alguns aspetos. Assim, futuramente poderão ser realizados outros desenvolvimentos, nomeadamente em relação ao modelo Dam_FEUP.

Estes desenvolvimentos poderão passar quer pela melhoria do layout da ferramenta informática Dam_FEUP, tornando-a mais comercial e de simples uso por parte de um futuro utilizador, quer pela amplificação das potencialidades do modelo, nomeadamente inserir rotinas simples de pré-dimensionamento, desenvolver o estudo de aproveitamentos com regularização em cascata, entre outros.

Referências

- Caetano, M., Araújo, A., Nunes, A., Nunes, V., Pereira, M. (2009). *Accuracy assessment of CORINE Land Cover 2006 for continental Portugal*. Relatório técnico: Instituto Geográfico Português.
- Ferreira, L., Costa, A. (2011). *Pequenas centrais hidro-eléctricas em Portugal: passado, presente e futuro*. Renováveis magazine.
- Lança R., Martins, C., Mendes, J. (2012). *Metodologia para o estudo hidráulico e sedimentológico em pontes. Aplicação à ribeira de Oeiras, entre as localidades de Corte de Pão e Água e de Morena, concelho de Mértola*. Instituto Superior de Engenharia. Universidade do Algarve.
- Matos, J. (2007). *Modelos Digitais do Terreno*. Instituto Superior Técnico.
- Monteiro, C. (sem data). *Mini-Hídrica – apontamento*. FEUP.
- Monterroso, A. (2005). *A Qualidade dos Estudos de Impacte Ambiental - O caso dos projectos de Mini-Hídricas em Portugal*. Faculdade de Engenharia e Faculdade de Arquitectura da Universidade do Porto.
- Naranjo, G., Valdivieso, F. (2003). *Aplicación del modelo SWAT para la estimación de caudales y sedimentos en la cuenca alta del río Catamayo*. Universidad Técnica Particular de Loja - Ecuador.
- Neves, M. (sem data). *Elementos sobre Aproveitamentos Hidroeléctricos*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Portela, M., Leitão, A., Godinho, F. (2010). *Produção de Energia em Pequenos Aproveitamentos Hidroelétricos em Portugal. Potencialidades e Constrangimentos ao seu Desenvolvimento*. Revista Recursos Hídricos, pp. 39-57.
- Proença, M. (sem data). *Apontamentos Aproveitamentos Hidráulicos e Obras Fluviais II - Tomadas de água*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Ramos, H., Almeida, A., Portela, M., Almeida, A. (1999). *Guidelines for design of Small Hydropower Plants*.