



**II Workshop**  
**Clima e Recursos**  
**Naturais 2010**

nos Países de Língua Portuguesa  
15 a 19 Novembro • Bragança • Portugal

LIVRO DE ACTAS

**II Workshop**  
**Clima e Recursos**  
**Naturais 2010**

nos Países de Língua Portuguesa  
15 a 19 Novembro . Bragança . Portugal

**Título:** II Workshop Clima e Recursos Naturais – Bragança, Portugal - 15 a 19 de  
Novembro 2010 – Livro de Actas  
**Editores:** Tomás de Figueiredo, Luís Frölen Ribeiro, António Castro Ribeiro  
**Edição:** Instituto Politécnico de Bragança  
**Impresdsão:** Serviços de Imagem do IPB

**ISBN:** 978-972-745-114-2

Tomás de Figueiredo, Luís Frólén Ribeiro, António Castro Ribeiro (editores)

**II Workshop**  
**Clima e Recursos**  
**Naturais 2010**

nos Países de Língua Portuguesa  
15 a 19 Novembro . Bragança . Portugal

LIVRO DE ACTAS



Novembro de 2010

## Reconhecimento do potencial para produção hidro-eléctrica distribuída: nota metodológica

Tomás de Figueiredo<sup>a</sup>; Fernando M. Pereira<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Centro de Investigação de Montanha – CIMO, Instituto Politécnico de Bragança (ESAB/IPB), Apartado 1172, 5301-855 Bragança, Portugal, Email: tomasfig@ipb.pt

<sup>b</sup> Mestrando em Energias Renováveis e Eficiência Energética, Instituto Politécnico de Bragança

### Resumo

A produção hidro-eléctrica distribuída, em centrais mini ou micro-hídricas, é um modelo interessante, e por vezes imperioso, de produção de energia num contexto em que se impõe a minimização dos impactos, sobre ecossistemas e populações, dos empreendimentos projectados para responder a crescente procura energética. O reconhecimento do potencial para a produção hidro-eléctrica numa região requer informação de natureza topográfica e hidrológica, esta com extensão temporal garantindo fiabilidade nas estimativas de caudais. A espacialização da informação hidrológica, pontual na sua origem, é um requisito e o suporte de um SIG é importante neste contexto. Com este trabalho pretende-se dar um contributo metodológico para o problema da avaliação do potencial para a produção hidro-eléctrica distribuída à escala regional e a nível do estudo de reconhecimento. O problema é colocado em termos da optimização da localização de uma central mini-hídrica numa linha de água, tendo por objectivo a maximização da potência a instalar. Constituem restrições do modelo de optimização elementos da topografia local e os caudais expectáveis face a aos recursos hídricos superficiais e à definição adequada de um caudal residual, ou ecológico. O desvio da solução óptima permite graduar o potencial ao longo da linha de água, eventualmente expresso em termos classificados. Apresenta-se e justifica-se a formulação de base e simula-se uma situação ilustrativa da sua aplicação numa região de montanha em Portugal. Discutem-se os resultados e aborda-se o problema da aplicação da metodologia em condições de escassez de informação.

### Abstract

Hydro-electric generation distributed in mini or micro power plants is an interesting and sometimes imperative model for power generation in a context of increasing energy demand and where minimal impacts of this activity on ecosystems and human communities are increasingly expected. Reconnaissance survey of hydro-power generation potential at regional scale requires topographical and hydrological information. In the latter case, the reliability of discharge estimates is very much dependent on records length. As discharge is point data, hydrological information mapping is required and the support of a GIS recommended. This note aims at contributing to methodologies available for the appraisal of the potential for distributed hydro-power generation, at regional scale and at reconnaissance study level. The approach followed states the problem of optimizing the location of a small hydro along a stream, set in terms of maximum power installed. Model constraints refer to local topography, surface water resources and stream ecology, determining available discharge and power. Deviations from optimal location allow classifying the potential for power generation along the stream. Basic rationale of this methodological approach is presented and discussed, and it is applied to a mountain area in Northern Portugal as a simulation exercise. Data scarcity implications are discussed and recommended procedures provided for improving model outcomes.

## 1. Introdução

A produção hidro-eléctrica distribuída, em centrais mini ou micro-hídricas, é um modelo interessante, e por vezes imperioso, de produção sustentável de energia num contexto em que se impõe a minimização dos impactos, sobre ecossistemas e populações, dos empreendimentos projectados para responder a crescente procura energética (Castro, 2008; Penche, 1998). Os pequenos aproveitamentos hidro-eléctricos têm em simultâneo tradição e potencial, em especial em zonas de montanha (Ramos & Almeida, 2000; Euromontana, 2009).

O reconhecimento do potencial para a produção hidro-eléctrica numa região, do ponto de vista conceptual, deveria anteceder a fase de estudo prévio de aproveitamentos específicos, o que nem sempre é cumprido na prática. O reconhecimento requer informação de natureza topográfica e hidrológica, esta com uma base temporal determinante da fiabilidade das estimativas de caudais (Mays, 2001). A espacialização da informação hidrológica, pontual na sua origem, é um requisito e o suporte de um SIG é pois importante neste contexto (e.g., Sarkar & Gundekar, 2007; Navigant Consulting, 2006).

Com este trabalho pretende-se dar um contributo metodológico para o problema da avaliação do potencial para a produção hidro-eléctrica distribuída à escala regional e a nível do estudo de reconhecimento.

## 2. Formulação do problema

### 2.1 Formulário de base

O problema em questão é o da avaliação da distribuição espacial do potencial para a produção hidro-eléctrica a partir de centrais de pequena e muito pequena potência, em estudo de reconhecimento dos recursos disponíveis a uma escala regional (Figura 1).

Para efeitos da sua formulação, o problema é abordado em duas fases.

#### Fase 1 – Solução óptima

Nesta fase, o problema colocado é o da optimização da localização de uma central mini-hídrica numa linha de água, tendo por objectivo a maximização da potência a instalar, estimada por (Castro, 2008):

$$P = P(X) = \gamma nc(X) Hb(X) Q(X) = k Hb(X) Q(X) \quad (1)$$

com P, potência, kW; X, variável de posição no espaço, no caso reduzida a uma dimensão pois que se trata da localização na linha de água, m; k, factor que incorpora conversão de unidades, peso volúmico da água ( $\rho$ , kN m<sup>-3</sup>), e rendimento global do empreendimento (nc); Hb, altura de queda bruta, m; Q, caudal da linha de água, m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>.

No rendimento global, por óbvia simplificação, incluem-se: (i) rendimentos mecânicos e eléctricos (turbina, gerador); (ii) o complementar relativo de perdas associadas à operação, seja por razões hidrológicas seja por razões de gestão e manutenção do empreendimento; (iii) o complementar relativo das perdas de carga no circuito hidráulico. Com poucas excepções e em diferentes níveis, X afecta os aspectos incluídos em nc.

A altura de queda bruta, diferença entre as cotas (H) da tomada de água (ta) e da restituição ou da central, consoante o tipo de turbina (rt), é função da localização (X), no perfil longitudinal do rio, desses elementos do empreendimento:

$$Hb(X) = Hta - Hrt = H(Xta) - H(rt) \quad (2)$$

O perfil longitudinal é eventualmente representável por uma função H(X), positiva, monótona e crescente; por conseguinte, X é igual à distância (L) medida ao longo da linha de água para montante, a partir da secção de referência (X0) (variáveis em m nas equações 2 e 3):

$$L = X - X_0 \tag{3a}$$

$$0 \leq L \leq L_{max} \tag{3b}$$

$L_{max}$ , comprimento máximo da linha de água, assume-se dado e definido pela posição do ponto em que o caudal disponível é nulo, a significar que, nesse ponto, o caudal iguala o maior de entre os caudais mínimo turbinável e residual.

Definem-se ainda, neste passo, outras variáveis auxiliares como o comprimento do troço perturbado ( $L_{tp}$ ), o comprimento do troço pristino a montante da tomada de água ( $L_{pm}$ ) e o declive médio no troço perturbado ( $Stp$ ):

$$L_{tp} = X_{ta} - X_{rt} \tag{4a}$$

$$L_{pm} = L_{max} - X_{ta} \tag{4b}$$

$$Stp = \frac{H_b}{L_{tp}} \tag{4c}$$

O caudal é o afluyente na secção da tomada de água,  $Q(X_{ta})$ , tendo, portanto, origem na área da bacia drenando para o troço pristino a montante dessa secção ( $A_{pm}$ , Figura 1).

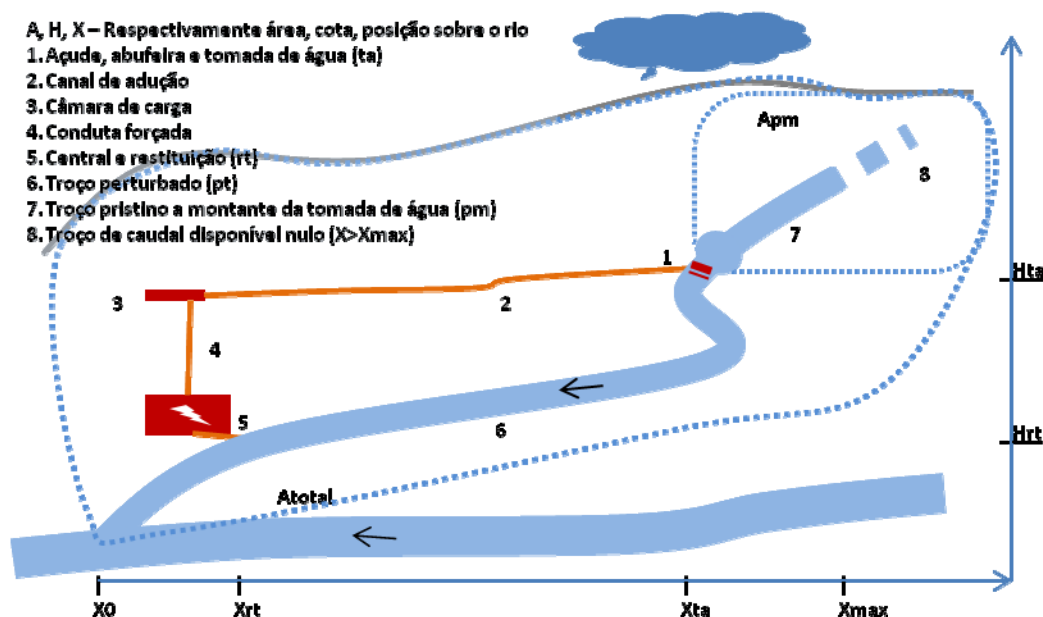


Figura 1. Representação esquemática dos componentes de uma central mini-hídrica e das variáveis e elementos relevantes para a formulação do problema

Retomando a equação 1, faz-se notar que, para uma localização da central dada por  $X_{rt}$ , a potência resulta do produto de  $H_b(X_{ta})$  e  $Q(X_{ta})$ , ambas funções positivas e monótonas, a primeira crescente e a segunda decrescente. Esse produto é uma função não monótona, com um máximo na localização óptima (Figura 2). Sendo a expressão analítica das funções conhecida, a localização óptima obtém-se por:

$$\frac{\partial Q(X_{ta})}{\partial X_{ta}} = 0, \forall X_0 \leq X_{rt} \leq X_{ta} \tag{5}$$

Todavia, mais comumente as funções assumem ou convertem-se para forma discreta e a localização óptima obtém-se por via numérica.

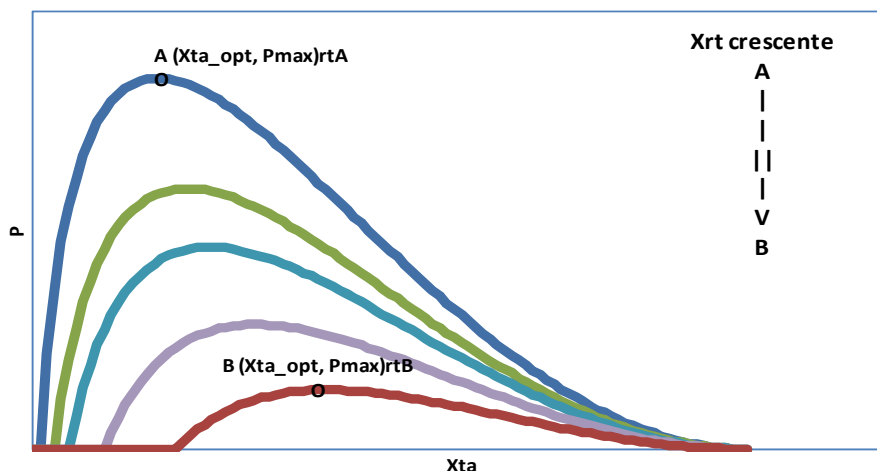


Figura 2. Exemplo da variação da potência a instalar (P) com a posição da tomada de água (Xta) para diferentes localizações da central / restituição (Xrt)

### Fase 2 – Distribuição espacial da potência

Recorda-se que se procura não apenas a localização óptima mas também a distribuição espacial de P, uma vez que soluções não óptimas podem ser as adoptadas face a outras restrições que não as topográficas e hidrológicas (e.g., ligação à rede eléctrica para sistemas não isolados). Assim, importa conhecer P em qualquer ponto da rede hidrográfica. Na prática, isto pode significar aplicar a equação 1 para  $X_0 \leq X_{rt} < X_{max}$  e  $X_{rt} < X_{ta}$ . No entanto, outras vias podem ser adoptadas, sobretudo se se impuserem limites na extensão do circuito hidráulico (representável pelo comprimento do troço perturbado,  $L_{tpmax}$ ), situação em que P é calculada para  $X_0 \leq X_{rt} \leq X_{max}$  e  $X_{rt} < X_{ta} < X_{rt} + L_{tpmax}$ .

## 2.2 Pressupostos, restrições e requisitos

A unidade espacial de abordagem é necessariamente a bacia hidrográfica, pois que se trata de avaliar recursos ao longo da correspondente rede hidrográfica. Por outro lado, é pressuposto da avaliação o desvio integral do caudal disponível para a produção eléctrica, não se acolhendo a hipótese de utilização parcial. Finalmente, é assumido também que a maximização da potência a instalar a essa escala traduz fielmente o objectivo da avaliação. É pois fundamental definir previamente a ordem hierárquica da bacia que se constitui como unidade de avaliação, pois disso depende o máximo estimável do potencial de recursos energéticos. Com efeito, não se podem esperar potenciais elevados quando a bacia é pequena e o nível hierárquico baixo e, em contrapartida, não interessará a abordagem à grande bacia de nível hierárquico elevado se o enfoque é em centrais de baixa potência.

Incluem-se como restrições básicas da formulação as de sinal das variáveis e funções.

Para além disso, pode introduzir-se uma restrição de natureza hidráulica, concretamente um limite mínimo para o declive global entre tomada de água e restituição ( $Stp_{min} > 0$ ). De facto,  $Stp_{min}$  é tomado como o declive máximo da linha da energia no circuito hidráulico, correspondendo portanto à perda de carga unitária global máxima neste circuito (Ramos & Almeida, 1999).

A restrição relativa ao comprimento máximo do circuito hidráulico, acima indicada como  $L_{tpmax}$ , é introduzida na aplicação do formulário sempre que seja opção para a avaliação da distribuição espacial da potência estimada.

Uma das restrições hidrológicas fundamentais diz respeito ao caudal residual. É parcialmente acomodada na formulação através de  $L_{max}$ ; todavia, não é subtraído a  $Q$  dentro do intervalo de localização possível da central e tomada de água. Uma vez que o seu valor é proporcionalmente baixo, rondando 3 a 5% de  $Q$  (Castro, 2008), pode assumir-se que a correcção a introduzir para obter o caudal disponível (correspondentemente um factor de 0,97 a 0,95) fica acomodada em  $k$  (equação 1).

São requisitos para aplicação do formulário descrito, o conhecimento das características topográficas e hidrológicas da região objecto de reconhecimento. As funções  $nc(X)$ ,  $H_b(X)$  e  $Q(X)$ , ou mais simplesmente a variação com  $X$  dos factores da potência, devem ser conhecidos com o detalhe compatível com a fase de reconhecimento. No entanto, é em regra forçoso recorrer a estimativas e aproximações, seja do ponto de vista de procedimento seja quanto aos valores a assumir como dados do problema.

Em concreto e, repita-se, em fase de reconhecimento, pode adoptar-se o modelo simplificado de estimativa da potência, em que o rendimento se considera constante (Castro, 2008). Deste modo, assume-se para  $k$  (equação 1), como dado do problema, o valor de 7, a significar um rendimento global de 71% (ou de 75% se a questão do caudal residual, aflorada acima, for aqui acomodada).

Na mesma linha, o perfil longitudinal do curso de água é um requisito de aplicação da metodologia que se aproxima, em regra, com ferramentas de SIG. O requisito mais exigente refere-se aos valores de caudal médio diário, sendo que as ferramentas de SIG jogam ainda aqui um papel importante no tratamento espacial deste factor. Na verdade, pode adoptar-se a aproximação baseada no conceito de caudal específico ( $q$ ,  $m^3 s^{-1} km^{-2}$ ;  $A$ , área da bacia hidrográfica,  $km^2$ ) (Lencastre & Franco, 1984):

$$Q(X) = q(X) A(X) = q Apm(X) \quad (6)$$

Trata-se de considerar  $q$  constante em toda a extensão da bacia, assumindo como dado do problema um valor baseado em estudos hidrológicos antecedentes na região que demonstrem a fiabilidade desta aproximação. Ferramentas de SIG facilitam a estimativa de  $Apm$ , a área drenando para o troço pristino a montante da tomada de água (Figura 1), sem prejuízo de outras e mais simples aproximações, caso não se disponha de modelo digital de terreno.

### 3. Exemplo de aplicação: dados, resultados e discussão

Com vista a ilustrar procedimentos e resultados da aplicação da metodologia descrita, apresenta-se em seguida um exemplo, cujos dados de base (Quadro 1) correspondem a uma bacia e curso de água fictícios, mas cujos elementos caracterizadores fundamentais, topográficos e hidrológicos, se aproximam dos da bacia do Rio Sabor, em Gimonde, Bragança (Gonçalves, 1985; (Figueiredo & Ribeiro, 2010).

Quadro 1. Dados de base do exemplo de aplicação

Símbolo, designação e descrição	Valor/expressão e unidades
$k$ – factor da equação da potência (eq.1)	7
$L_{max}$ – comprimento máximo da linha de água (eq. 3)	40km
$A_{total}$ – área total da bacia (Figura 1)	400km <sup>2</sup>
$K_f$ – factor de forma da bacia (Lencastre & Franco, 1984)	$K_f = A/L^2$ $K_f = 0,25$
$H(X)$ – perfil longitudinal da linha de água	$H = X^{1,85}$ ( $H$ e $X$ , m)
$q$ – caudal médio específico	15 L s <sup>-1</sup> km <sup>-2</sup>

Adoptou-se, portanto, neste exemplo a aproximação à estimativa do caudal apontada na equação 6. Para este efeito, tomou-se o factor de forma ( $K_f$ ), calculado para o global da bacia, como constante em toda a sua extensão. Outras aproximações são evidentemente

possíveis, designadamente a utilização da curva hipsométrica da bacia, quando exista. Neste caso, porém, a área drenando para um ponto na linha de água é função da altitude e não da posição do ponto. Embora discreta, a curva pode ser ajustada a funções contínuas (Strahler, 1964). A resolução altimétrica dos modelos digitais de terreno pode ser um constrangimento quando esta aproximação se aplica em plataforma SIG.

A função adoptada para representar o perfil longitudinal do rio tem um expoente que permite obter um desnível entre cotas extremas semelhante ao da bacia do Sabor em Gimonde. Não procura, todavia, representar o perfil deste rio em toda a sua extensão nesta bacia.

Os resultados da aplicação da metodologia nestas condições mostram-se nas Figuras 3 a 5. O valor máximo da potência máxima estimada foi de perto de 2,7MW, correspondendo à instalação da central / restituição na secção de referência, deste modo aproveitando todo o potencial hidrológico e topográfico da bacia (Figura 3). A diminuição desse potencial para montante traduz-se numa redução da potência para 30% do valor máximo mencionado quando a restituição se localiza na secção média do perfil longitudinal da linha de água e torna-se insignificante no quinto mais elevado desse perfil.

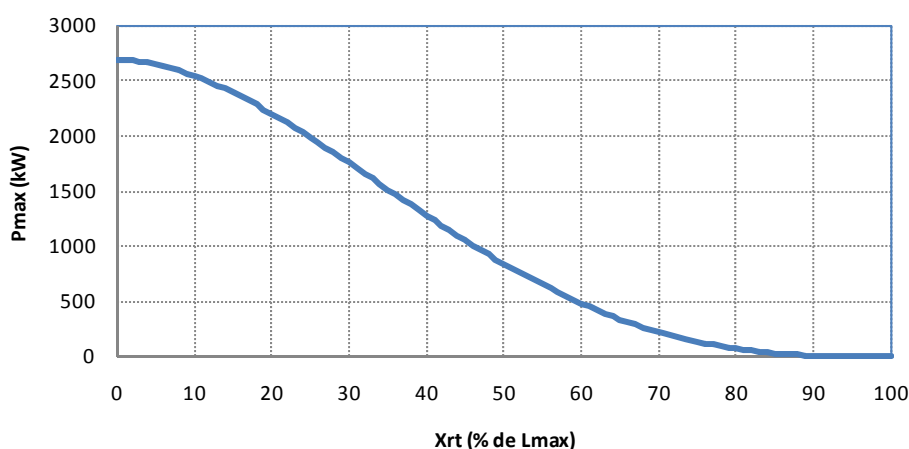


Figura 3. Variação da Potência máxima disponível, Pmax, com a localização da restituição para montante da secção de referência, Xrt (% comprimento máximo do rio, Lmax)

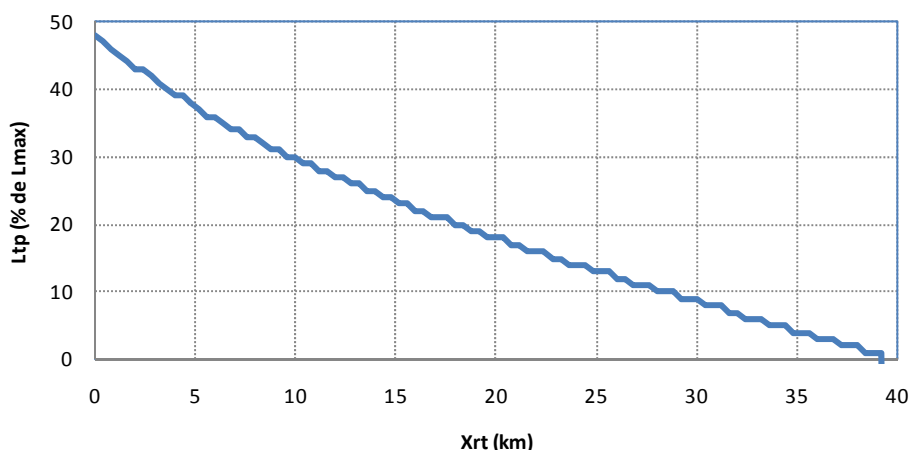


Figura 4. Variação do comprimento do troço perturbado, Ltp (% comprimento máximo rio, Lmax), com a localização da restituição para montante da secção de referência, Xrt

Como seria de esperar, o comprimento do troço perturbado decresce monotonamente com a deslocação da restituição para montante (Figura 4). Os valores obtidos nesta simulação são claramente elevados em relação ao que é comum encontrar-se em centrais em operação (e.g., Ramos & Almeida, 2000). Nas condições deste exemplo, o declive médio do troço

perturbado ( $Stp$ ), calculado para a localização óptima de tomada de água em cada posição da restituição, é superior a 1,2%. Ainda assim, surge clara dos resultados a necessidade de introduzir nos procedimentos uma restrição relativa ao comprimento máximo aceitável para o troço perturbado, face aos elevados valores de perda de carga no circuito hidráulico expectáveis nessas condições. A isto acresce a complexidade construtiva que acarretam tão longos comprimentos como os deste exemplo para o circuito hidráulico (Penche, 1998).

A Figura 5 mostra estimativas da potência também para soluções de localização não óptimas, seja da tomada de água seja da restituição. O intervalo de soluções de localização para obter determinada classe de potência é bem mais estreito no caso da tomada de água do que no da restituição. De resto, por razões de perda de carga no circuito hidráulico mas também de custo do investimento, localizações da tomada de água a montante da posição óptima devem ser evitadas.

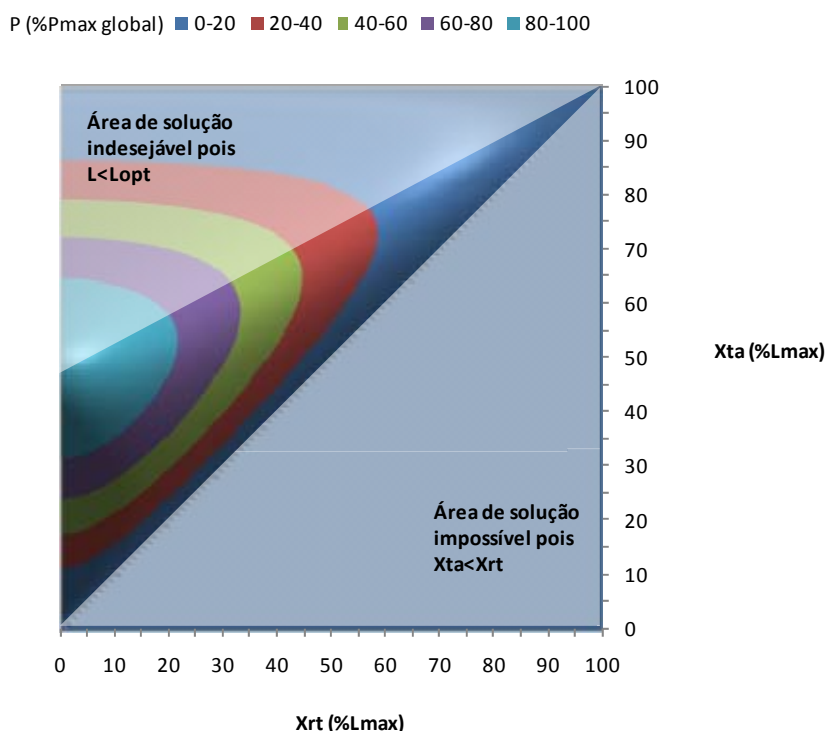


Figura 5. Distribuição espacial da potência estimada ( $P$ , expressa em termos classificados) de acordo com a localização da tomada de água ( $X_{ta}$ ) e da restituição ( $X_{rt}$ ).

#### 4. Comentários finais

O exercício apresentado tem em vista ilustrar a conceptualização de uma metodologia para o reconhecimento do potencial para a produção hidro-electrica distribuída à escala regional. Nessa medida, vale a pena sublinhar que tanto pode ser aplicado utilizando aproximações muito simplistas à representação dos factores da potência estimada (recursos hídricos, condições topográficas, rendimento), quando escasseia a informação, como incluir informação detalhada e espacialmente distribuída.

Embora não essencial, o recurso a um SIG é um passo óbvio para a sua aplicação. As ferramentas que nesse quadro se podem utilizar ou conceber, carecem ainda da devida exploração, de resto, objecto de trabalhos em curso (Pereira, 2010). A Figura 6 ilustra com um exemplo de Trás-os-Montes (Rio Angueira, Bacia Hidrográfica do Douro), os resultados da exploração de ferramentas disponíveis directamente numa aplicação de SIG. No caso, foi fixado em 1 km o comprimento do circuito hidráulico.

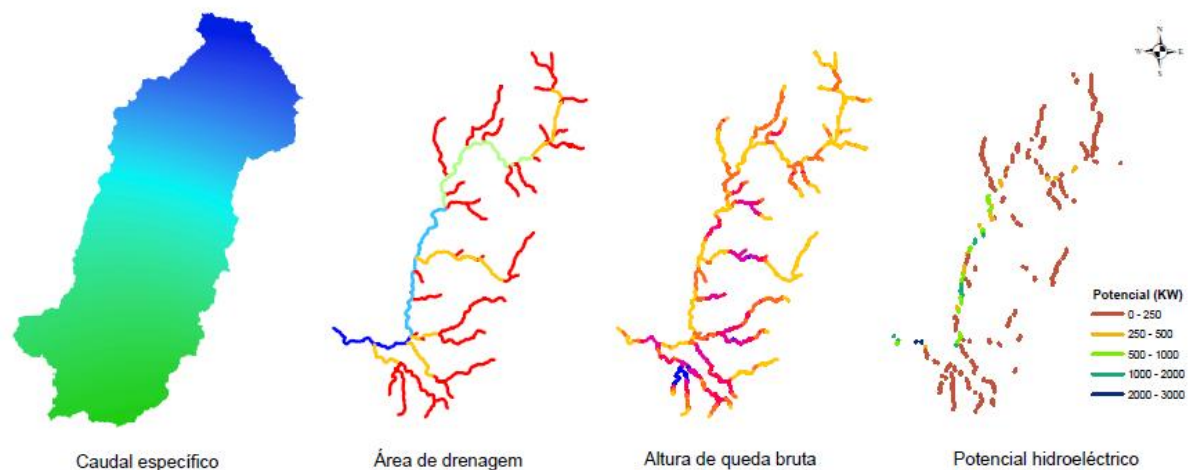


Figura 6. Exemplo de aplicação à Bacia do Rio Angueira (Douro) com base num SIG (as imagens têm carácter ilustrativo e a legenda diz respeito ao potencial hidro-eléctrico).

### Referências bibliográficas

- Castro, R.M., 2008. Introdução à Energia Mini-Hídrica (Texto de Apoio) (3.1 ed.). Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Euromontana, 2009. Energy in mountain regions: Strategy. Euromontana, Paris.
- Figueiredo, T. de; Ribeiro, I., 2010. escoamentos fluviais na montanha portuguesa: análise, síntese e tendências. II Workshop sobre Clima e Recursos Naturais nos Países de Língua Portuguesa, WSCRA2010. Instituto Politécnico de Bragança: 8pp.
- Gonçalves, D.A., 1985. Contribuição para o estudo da bacia superior do rio Sabor (Influência da circulação geral e regional na estrutura da baixa atmosfera). Instituto Universitário de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real.
- Lencastre, A.; Franco, F., 1984. Lições de Hidrologia. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Monte da Caparica.
- Mays, L.W., 2001. Water Resources Engineering. Wiley, New York.
- Navigant Consulting, 2006. Statewide Small Hydropower Resource Assessment. PIER Final Project Report. California Energy Commission, Public Interest Energy Research (PIER) Program, USA.
- Penche, C., 1998. LAYMAN'S HANDBOOK on how to develop a small hydro site (2ª ed.). Comissão Europeia, Bruxelas.
- Pereira, F.M., 2010. Potencial Hidroeléctrico na Bacia Hidrográfica do Rio Douro: exercício de avaliação. Dissertação (em preparação). Mestrado em Energias Renováveis e Eficiência Energética, Instituto Politécnico de Bragança.
- Ramos, H.; Almeida, A.B., 1999. Small Hydropower Schemes as an Important Renewable Energy Source. Hidroenergia 99, Vienna: 7pp.
- Ramos, H.; Almeida, A.B., 2000. Small Hydro as one of the oldest Renewable Energy Sources. Water Power and Dam Construction, Small Hydro, Lisbon: 9pp.
- Sá Marques, J.A.; de Lima, J.P. (Eds.), 1995. Hydroelectric Power Plants (Lecture notes of the international course). Faculdade de Ciência e Tecnologia, Universidade de Coimbra.
- Sarkar, S.; Gundekar, H.G., 2007. Geomorphological Parameters: Are they Indicators for Installation of a Hydropower Site? International Conference on Small Hydropower, Sri Lanka: 7pp.
- Strahler, A.N., 1964. Quantitative Geomorphology of Drainage Basins and Channel Networks. In: V.T. Chow (Ed.), Handbook of Hydrogeology. MacGraw-Hill, Boca Raton. pp. 4-39 - 4-79.