



**ISEL**

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

DEEA – Secção de Economia e Gestão

# **ENERGIAS RENOVÁVEIS**

## **ENERGIA MINI-HÍDRICA**

**Cristina Camus  
Eduardo Eusébio**

**Março 2008**



## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. PERSPECTIVA HISTÓRICA

A energia produzida pela água tem sido utilizada desde os primórdios da civilização em processos relacionados com a agricultura, como o accionamento de rodas de água para moagem de grãos, corte de madeira, accionamento de bombas de água e mais recentemente na produção de energia eléctrica através de turbinas hidráulicas.

Entre os finais do século XIX e princípios do século XX, instalaram-se muitas centrais hidroeléctricas com potências compreendidas entre algumas dezenas e poucos milhares de quilowatts, hoje designadas por mini hídras (CMH).

Os progressos verificados na transmissão da energia eléctrica permitiram aos países mais industrializados investir em grandes centros de geração de energia eléctrica e todos os locais favoráveis à instalação de grandes aproveitamentos hidroeléctricos foram explorados o que levou a que a produção de energia eléctrica se concentrasse em poucas centrais de elevada potência instalada. As pequenas unidades de produção hidroeléctrica foram assim abandonadas.

Com os choques petrolíferos de 1973 e 1981, todo o quadro de referência mudou, tendo o valor da energia aumentado.

Os melhores locais para instalações de grande porte já estavam todos tomados e os progressos verificados na automação permitiram reduzir drasticamente as despesas de exploração das CMH. Nesta perspectiva renasce o interesse pelos pequenos aproveitamentos hidroeléctricos.

Em Portugal os recursos hidrológicos estão bem estudados existindo medições de caudais efectuadas ao longo de muitos anos.

A publicação do Dec. Lei nº 189/88 incentivando a produção de energia eléctrica a partir de fontes renováveis levou a que se instalassem em Portugal uma série de novos empreendimentos do modo que no final de 2001 existiam 98 CMH num total de 256MW.

### 1.2. CARACTERÍSTICAS

As mini hídras não são uma cópia reduzida das grandes centrais hídras, têm características próprias:

- Novas tecnologias com vista a reduzir os custos
- Obra civil orientada para sistemas compactos e simples, para reduzir trabalhos no local
- Turbinas normalizadas com bons rendimentos para uma larga gama de regimes de funcionamento
- Maior simplicidade de operação incluindo a automatização total da central (exploração em modo abandonado).
- Grande número de locais com bom potencial encontra-se em aproveitamentos de quedas baixas
- Utilização de máquinas assíncronas como geradores.

### 1.3. MOTIVAÇÃO E VANTAGENS

De entre as fontes de energia eléctrica renovável, a mini hídras era a que reunia as condições para um desenvolvimento rápido:



- Tecnologia com elevada eficiência (70% a 90%)
- Recurso facilmente previsível
- Taxa de variação e intermitência do recurso suave com pequenas variações de dia para dia
- Tecnologia robusta e madura à mais de 40 anos
- Baseada essencialmente em aproveitamentos de fio de água, os seus impactos ambientais não são muito significativos

## 1.4. SITUAÇÃO EM PORTUGAL

Existiam no final de 2001 as seguintes CMH:

CMH entradas em funcionamento após a publicação do Dec Lei 189/88	44	170 MW
Aproveitamentos titulados por antigas concessões	34	30 MW
Instalações do SENV (Sistema electro-produtor não vinculado)	20	56 MW
TOTAL	98	256 MW

Quadro 1.1 – Mini hídricas em Portugal no final de 2001

Nos últimos anos a capacidade mini hídrica estagnou devido às dificuldades de licenciamento. Prevê-se para 2010 uma capacidade de 400 MW.

## 2. PEQUENAS CENTRAIS HIDROELÉCTRICAS

A designação Central Mini Hídrica generalizou-se em Portugal para designar os aproveitamentos hidroeléctricos de potência inferior a 10 MW. Este é o limite geralmente usado como fronteira de separação entre as pequenas e as grandes centrais hidroeléctricas. As primeiras são consideradas renováveis; as segundas, embora usem um recurso renovável, produzem efeitos sobre o meio ambiente não desprezáveis e portanto a sua classificação como renováveis é problemática.

Para as Centrais Mini Hídricas utiliza-se a seguinte classificação recomendada pela UNIPEDE:

### 2.1. CLASSIFICAÇÃO RELATIVAMENTE À POTÊNCIA

Designação	P [MW]
Pequena Central Hidroeléctrica	< 10
Mini Central Hidroeléctrica	< 2
Micro Central Hidroeléctrica	< 0,5

Quadro 2.1. Designação das centrais relativamente à potência

## 2.2. CLASSIFICAÇÃO RELATIVAMENTE À ALTURA DE QUEDA

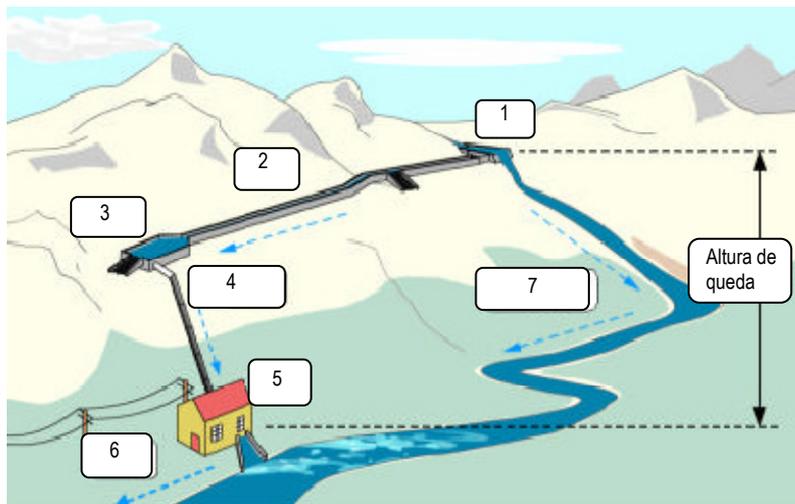
Designação	h [m]
Queda Baixa	2 - 20
Queda Média	20 - 150
Queda Alta	> 150

Quadro 2.2. Designação das centrais relativamente à altura de queda

Em regra, as centrais mini hídricas são centrais de fio de água, não sendo possível grande regularização do caudal afluente como ocorre nas centrais de albufeira.

## 2.3. ELEMENTOS CONSTITUINTES DE UMA CMH

Na figura seguinte apresentam-se os principais elementos que constituem uma CMH.



- 1 – Albufeira
- 2 – Canal de adução
- 3 – Câmara de carga
- 4 – Condução forçada
- 5 – Edifício da central
- 6 – Restituição
- 7 – Caudal ecológico

Figura 2.1. Elementos constituintes de uma CMH

## 2.4. CONFIGURAÇÕES DE CMH

De acordo com as características do local diferentes configurações são possíveis. Apresentam-se de seguida algumas alternativas:

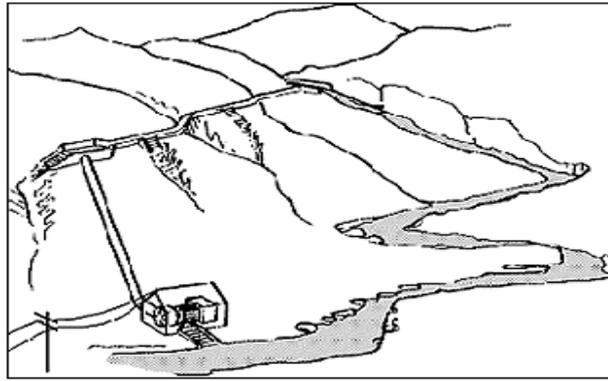


Figura 2.2. Central com canal de adução e conduta forçada com queda alta, longe da barragem

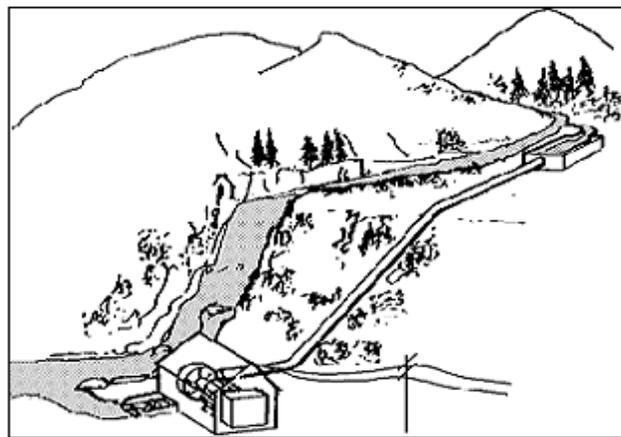


Figura 2.3. Central só com conduta forçada e queda alta perto da barragem

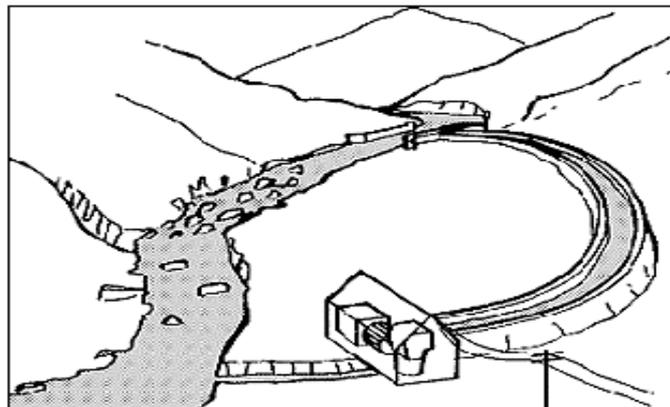


Figura 2.4. Central só com canal de adução e câmara de carga, queda baixa com central afastada da barragem

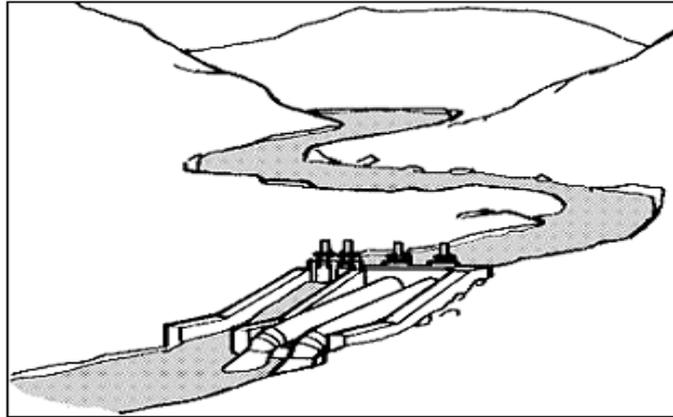


Figura 2.5. Central encastrada na barragem, queda baixa com central na própria barragem

### 3. ANÁLISE DO RECURSO HIDROGÁFICO

O estudo hidrológico em que se fundamenta o aproveitamento hidroelétrico tem de ser efectuado por especialistas em hidrologia. O engenheiro electrotécnico deve conhecer a lógica básica que orienta a estimação de caudais.

#### 3.1. CURVA DE DURAÇÃO DE CAUDAIS

O caudal que passa por uma secção de um rio é uma variável aleatória, com repartição não uniforme ao longo do ano.

Esta pode ser medida aproximadamente com base na velocidade da superfície  $v$ (m/s) e a secção transversal  $S$  (m<sup>2</sup>).

$$Q = \frac{8}{10} \times V \times S \quad (3.1)$$

Os estudos hidrológicos fornecem a probabilidade de ocorrência de caudais (geralmente valores médios diários) ao longo do ano. É necessária uma análise de registos ao longo de vários anos de forma a calcular o recurso hídrico ao longo do tempo de vida da CMH. O instituto da água dispõe de registos em determinados pontos.

Podem ser fornecidos os seguintes dados:

Caudais médios diários e caudais médios mensais, para calcular a energia média produzida

Caudais em ano seco, húmido e normal, para estudar cenários

Caudais de cheias, para o dimensionamento de estruturas de retenção de água e descarregadores

Caudais ecológicos, para calcular o caudal turbinável

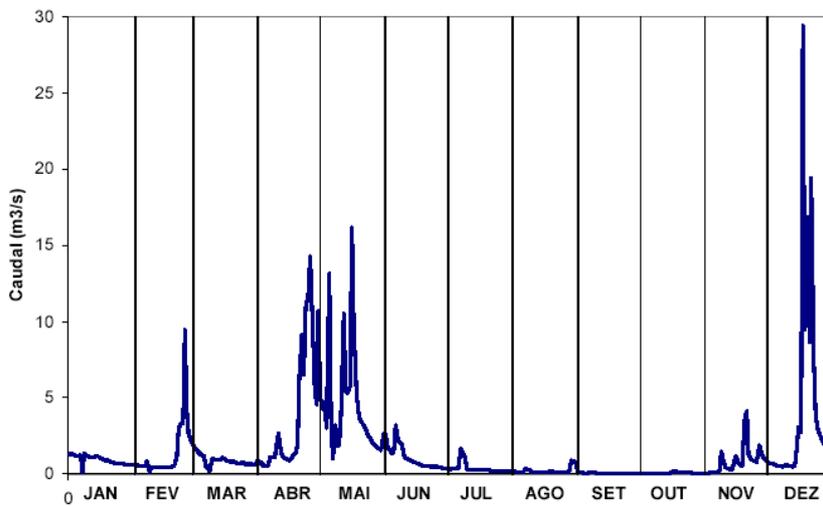


Figura 3.1. Curva cronológica de caudais

Esta curva é elaborada com observações realizadas ao longo de vários anos (30 – 40)

Com os dados assim apresentados como responder à seguinte questão:

Quantos dias por ano temos caudais superiores a  $5 \text{ m}^3/\text{s}$ ?

Para responder a este tipo de questões elabora-se a chamada curva de duração de caudais. Esta curva obtém-se por ordenação monótona decrescente dos valores medidos.

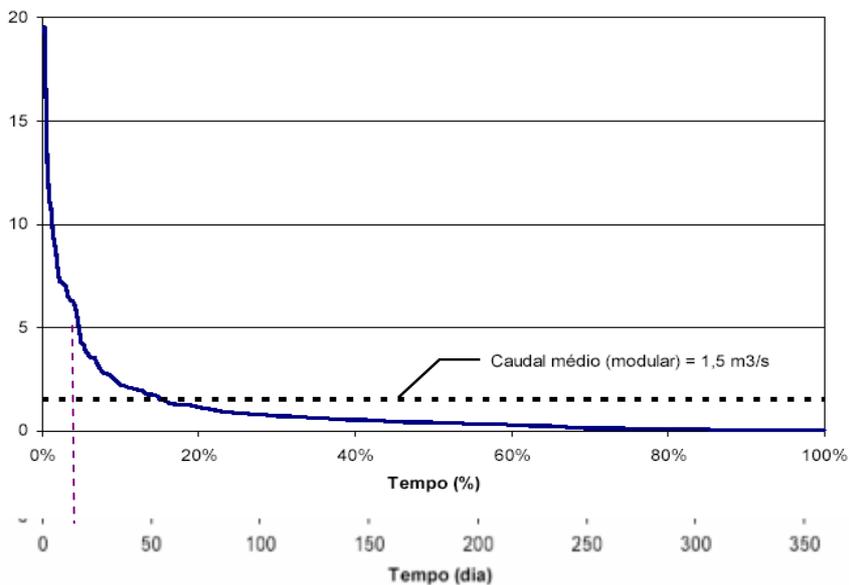


Figura 3.2. Curva de duração de caudais

Podemos assim verificar que existem cerca de 15 dias por ano com caudal médio superior a  $5 \text{ m}^3/\text{s}$ .

A curva de duração de caudais pode também ser adimensional passando o caudal a ser analisado em (pu) tomando como base o caudal médio, e o tempo será medido em % do tempo total

### 3.2. CORRELAÇÃO CAUDAL-PRECIPITAÇÃO

Os projectistas de CMH não têm possibilidade de dispor de registo de caudais durante um número significativo de anos precisamente no local onde se pretende construir o açude. Uma forma de obter a curva de duração de caudais para o local em estudo é fazer uma extrapolação a partir de um local conhecido com



as mesmas condições do local pretendido. Isto é possível pois verifica-se que a forma da curva de duração de caudais para dois locais mantêm-se inalterada desde que as condições climáticas, nomeadamente a distribuição das precipitações e a natureza e o revestimento superficial do solo, sejam semelhantes. Assim para o local que se pretende correlacionar com o local de referência com base na relação entre as bacias associadas aos locais os caudais obtêm-se pela fórmula:

$$Q_a = \frac{S_a}{S_b} \times Q_b \quad (3.2)$$

É possível também correlacionar os caudais com a pluviosidade média nas bacias hidrográficas. Estabelecendo uma correlação entre os caudais médios escoados por unidade de secção  $H_u$  (mm/ano) disponíveis para alguns anos e as precipitações  $H$  (mm/ano) registadas em idênticos períodos de tempo, obtêm-se as relações lineares do tipo:

$$H_u = b H - \alpha \quad (3.3)$$

Por exemplo para um curso de água situado no Norte de Portugal temos a relação:

$$H_u = 1,09 H - 464$$

E para um curso de água situado no Centro de Portugal temos a relação:

$$H_u = 0,94 H - 445$$

A correlação entre caudal e precipitação permanece ao longo dos anos alterando-se apenas nos anos muito secos ou muito húmidos sendo assim possível a partir dos registos udométricos estimar os caudais escoados ao longo de dezenas de anos e calcular o seu valor médio.

$$Q_{med} = S \times H_{u_{med}} \times 10^3 \text{ (m}^3\text{/ano)} \quad (3.4)$$

Onde

$S$  (km<sup>2</sup>) é a área da bacia hidrográfica

O caudal modular virá então

$$Q_{mod} = \frac{Q_{med}}{60 \times 60 \times 24 \times 365} \text{ (m}^3\text{/s)} \quad (3.5)$$



## 4. CÁLCULO DA ENERGIA PRODUZIDA

### 4.1. POTÊNCIA DISPONÍVEL

A Potência disponível que resulta da transformação da energia potencial de uma massa de água  $m$  em energia cinética ao haver um deslocamento  $h$  de uma massa de água de uma cota superior a uma inferior é dada por

$$P = \rho \times g \times Q \times h \quad (4.1)$$

onde

$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$  é o peso específico da água que passa pela central

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$  é a aceleração da gravidade

$Q$  é o caudal de água em ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$h$  é a altura de queda útil isto é, a diferença de cotas tendo em conta o atrito nas tubagens condutoras em (m).

Para a conversão em energia eléctrica, a energia cinética da água é transformada em energia cinética de rotação da turbina hidráulica, e esta energia mecânica da turbina finalmente em energia eléctrica.

A potência aproveitada virá então

$$P = \rho \times g \times Q \times h \times \eta \quad (4.2)$$

onde

$\eta$  é o rendimento da central

A variável que mais influência a potência a instalar é o caudal em virtude de ser o que apresenta maior variação. Normalmente nem todo o caudal afluyente é em geral aproveitado para obter energia devido a

- Exigências para abastecimento de água ou para rega
- Caudal ecológico

### 4.2. ANÁLISE DO FUNCIONAMENTO DE UMA CENTRAL

A altura de queda útil de um aproveitamento hidroeléctrico depende, para além da diferença entre cotas a montante e a jusante da central (altura de queda bruta), de muitos outros factores. A queda útil pode ser calculada através da seguinte expressão:

$$h = z_M - z_F - kQ_T^2 - AQ_a^B \quad (4.3)$$



Onde

$z_M$  é a cota a montante

$z_F$  é a cota de fundo a jusante

$k$  é o coeficiente de perda de carga do circuito hidráulico

$Q_T$  é o caudal turbinado na central

$Q_a$  é o caudal escoado para jusante da central

$A$  e  $B$  são coeficientes empíricos da curva de vazão correspondente à restituição

O rendimento de cada grupo turbina-gerador depende do caudal turbinado por uma função quadrática

$$\eta(Q_T) = a + bQ_T + cQ_T^2 \quad (4.4)$$

Sendo assim a potência será:

$$P = 9,81 \times (z_M - z_F - kQ_T^2 - AQ_a^B) \times (aQ_T + bQ_T^2 + cQ_T^3) \quad (\text{kW}) \quad (4.5)$$

Como esta expressão não é cómoda para manipular. Além de necessitar um conhecimento mais profundo do local a instalar a central bem como da configuração da própria instalação é vulgar, para efeitos de anteprojecto, usar a seguinte expressão para determinar a potência eléctrica numa CMH.

$$P = 7 \times Q_n \times h_b \quad (\text{kW}) \quad (4.6)$$

Onde

$Q_n$  é o caudal nominal

$h_b$  é a altura bruta de queda

### 4.3. ESCOLHA DAS TURBINAS

A turbina hidráulica corresponde a uma parcela muito significativa do custo de uma CMH (pode chegar até aos 50%) pelo que a sua selecção deverá ser criteriosa.

A escolha da turbina resulta da interacção de 3 parâmetros:

- 1- Queda
- 2- Caudal
- 3- Potência

#### 4.3.1. Tipos de turbinas

Existem vários tipos de turbinas usadas nas CMH:

1- Turbinas de acção ou impulsão, para quedas altas e caudais baixos

**PELTON**

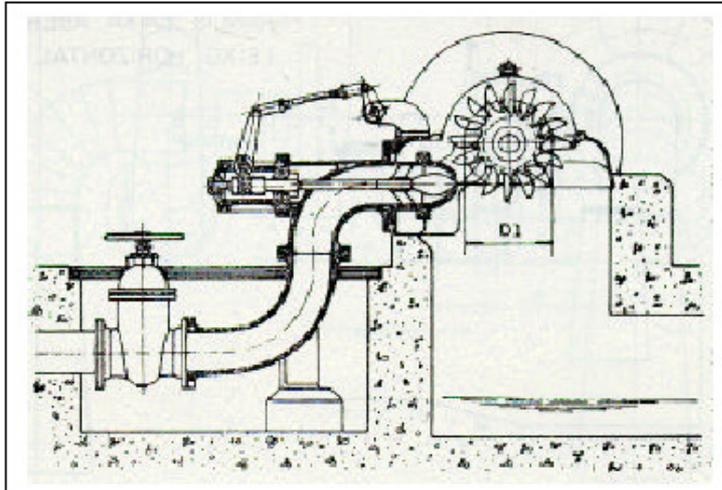


Figura 4.1. – Turbina Pelton

- São classificadas como turbinas de acção por possuírem a característica de transformar a energia cinética no jacto injectar.
- O uso é adequado para locais onde haja altas quedas e pequeno caudal.
- Apresenta bons rendimentos onde há grande variação de carga, podendo ser operadas entre 10 e 100% de sua potência máxima.

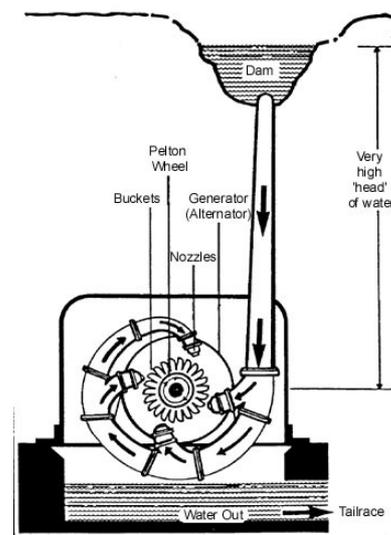
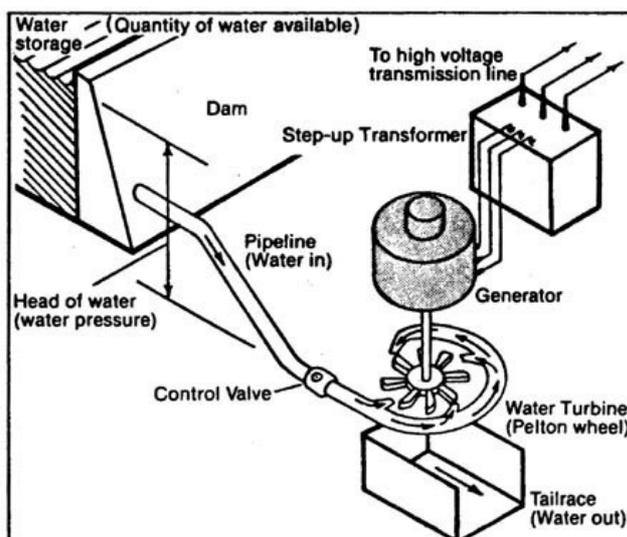


Figura 4.2. – Exemplo de utilização de uma turbina Pelton

### BANKI-MITCHEL

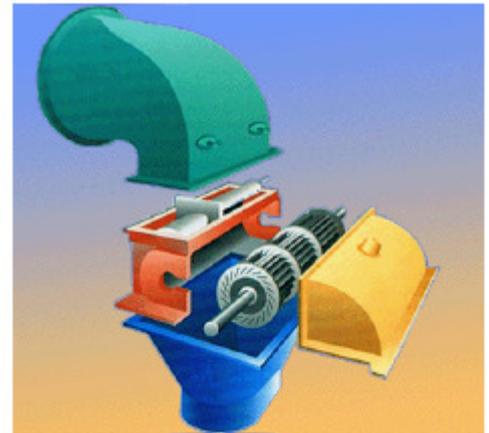
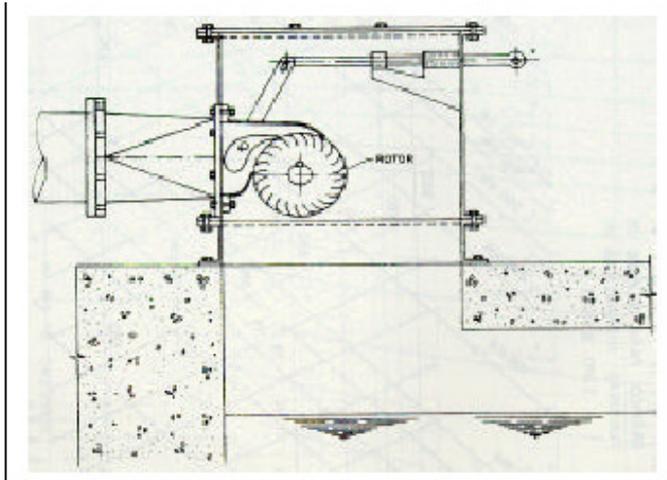


Figura 4.3. – Turbina Banki-Mitchel

- O seu rendimento é inferior aos das turbinas de projecto convencional, mas mantém-se num valor elevado ao longo de uma extensa gama de caudais.
- De tecnologia bastante simples requer poucos equipamentos para o seu fabrico e manutenção.
- O seu campo de aplicação atende quedas de 3 a 100 metros, vazões de 0,02 a 2,0 m<sup>3</sup>/s e potência de 1 a 100 kW.
- Devido à sua facilidade de padronização pode apresentar rotações específicas entre 40 e 200 rpm.

### 2- Turbinas de reacção para quedas baixas e caudais elevados

#### AXIAIS: KAPLAN E DE HELICE

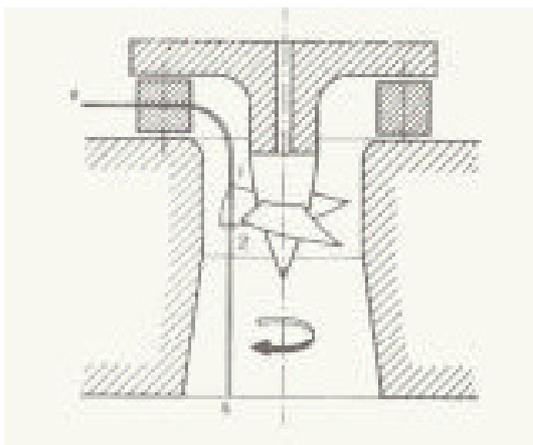


Figura 4.4. – Turbina Kaplan

- As turbinas de hélice não são reguláveis, este tipo de turbinas permite pouca variação no caudal (apenas controlado pelo distribuidor).

- As Kaplan são reguláveis, esta regulação pode ser dupla, mobilidade das pás da roda e do distribuidor.
- Usadas para grandes caudais e baixas quedas.
- Dificuldade de dimensionamento e custo de fabrico elevado.

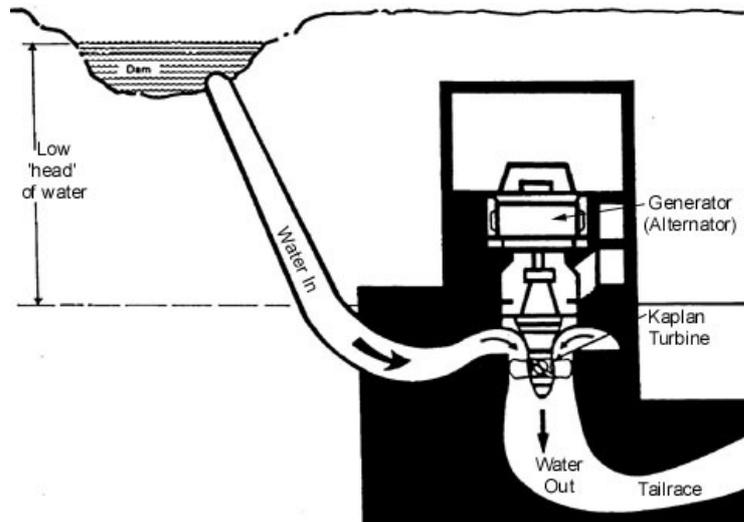


Figura 4.5. – Exemplo de aproveitamento com turbina Kaplan

### RADIAIS: FRANCIS

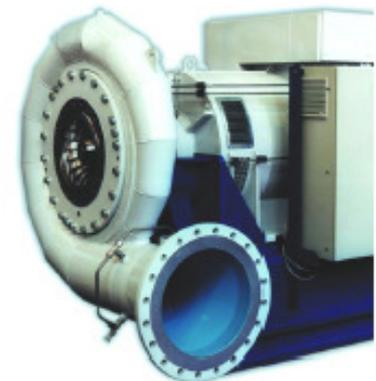
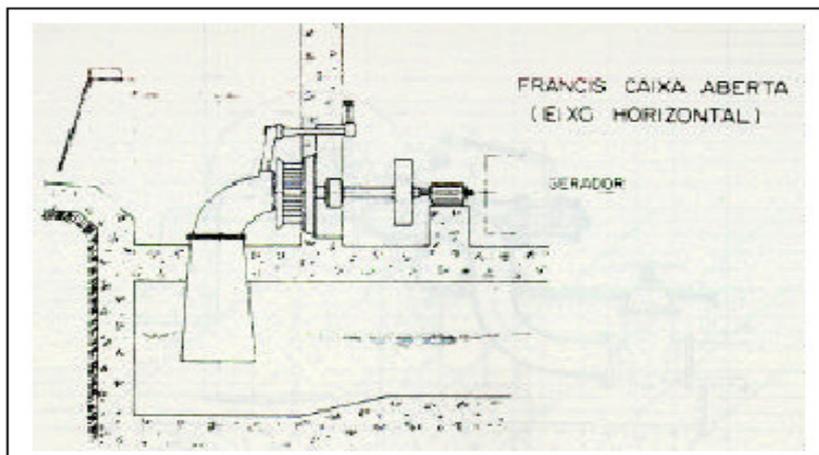


Figura 4.6. – Turbina Francis

- São turbinas adequadas para operação com condições intermédias de queda e de caudal.
- É a turbina de maior uso em quedas e caudais médios.
- Apresentam um alto rendimento (80% a 90%), tanto mais alto quanto maior for a potência.
- Esta turbina pode ser instalada em caixa espiral (média quedas, acima de 10 m), ou em caixa aberta (baixa queda, abaixo de 10 m).

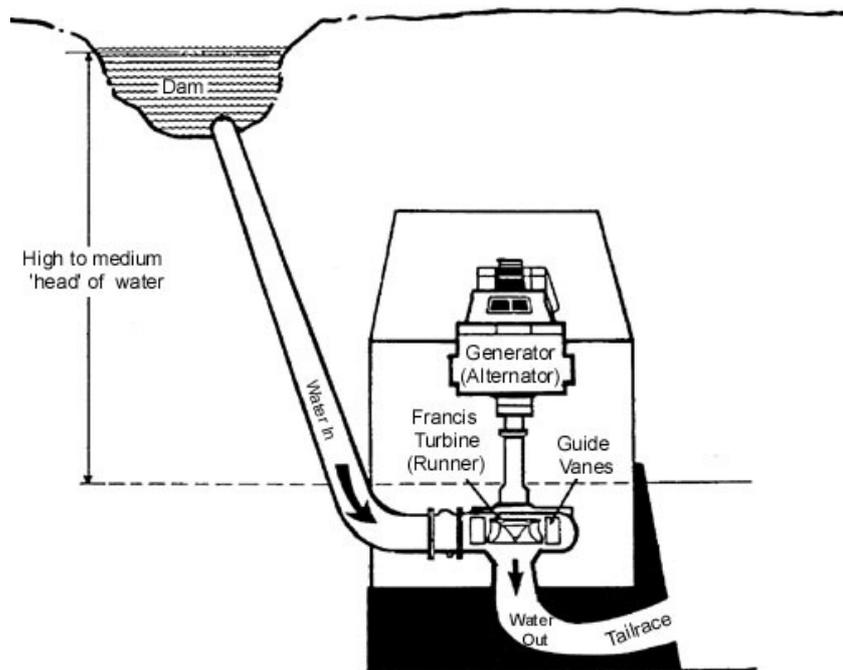


Figura 4.7. – Exemplo de aproveitamento com turbina Francis

### 4.3.2. Limites de exploração

A turbina é escolhida para um determinado caudal nominal que se verificará em cerca de 20% a 30% dos dias em ano médio. Como o rendimento da turbina depende do caudal é natural que sejam impostos alguns limites de exploração e seja fixada uma faixa de exploração admissível em torno do caudal nominal sem variação apreciável do rendimento.

Fora desta faixa a turbina será desligada por falta de rendimento.

Assim os limites de exploração para cada tipo de turbina serão:

Turbina	$\alpha_1 = \frac{Q_{\min}}{Q_n}$	$\alpha_2 = \frac{Q_{\max}}{Q_n}$
Pelton	0,1 a 0,2	1,15
Francis	0,3 a 0,4	1,15
Kaplan com dupla regulação	0,25	1,25
Kaplan com rotor regulado	0,4	1,0
Kaplan com distribuidor regulado	0,75	1,0

Tabela 4.8 – Limites de exploração para as diferentes turbinas

Estes limites de exploração são estipulados mais ou menos a partir das curvas de rendimento das centrais procurando-se trabalhar com caudais em que a turbina mantenha pelo menos cerca de 80% a 90% do rendimento.

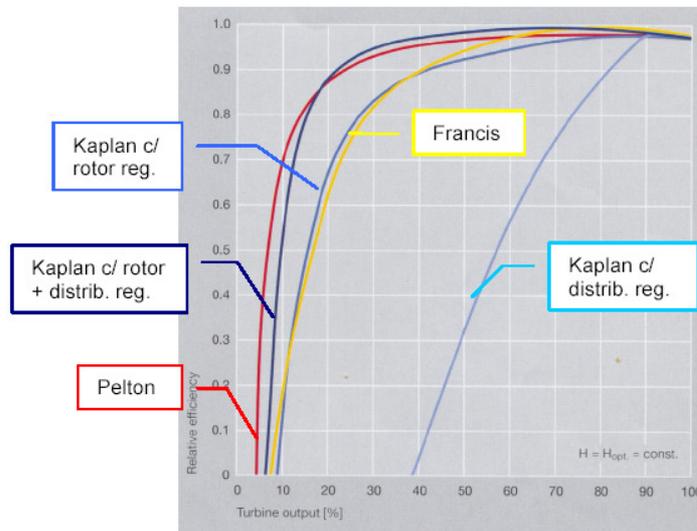


Figura 4.9. – Curvas de rendimento das diferentes turbinas

Para escolher a turbina adequada para determinado caudal e queda utiliza-se o seguinte ábaco:

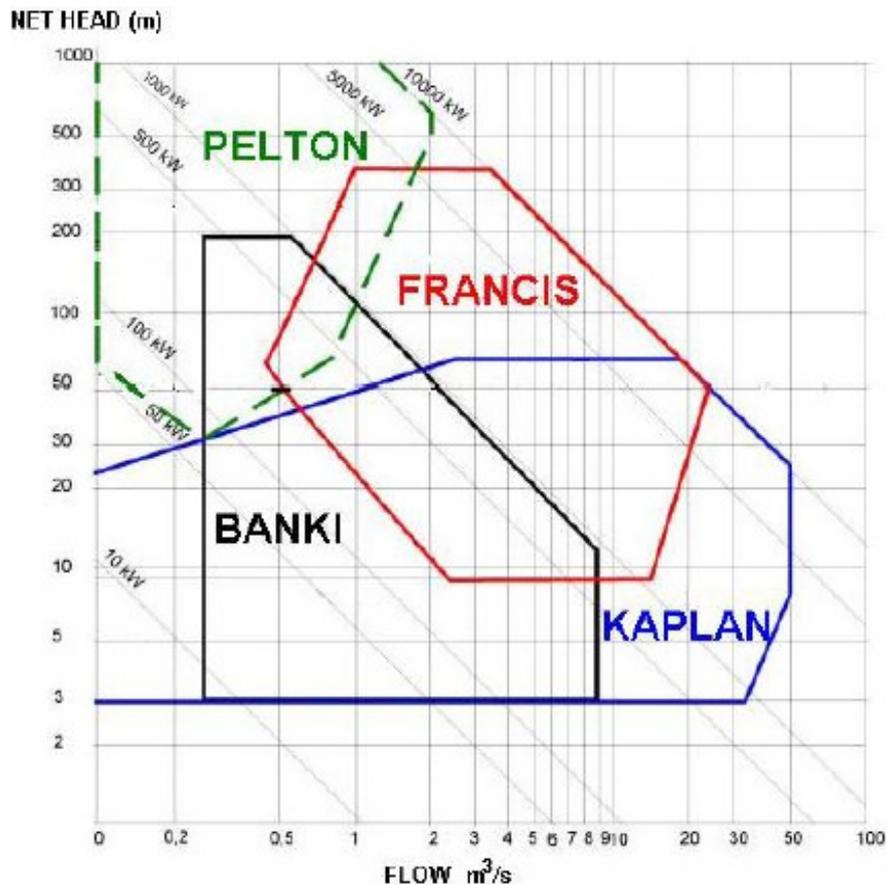


Figura 4.10. – Ábaco para escolha de turbinas

### 4.3. CÁLCULO DA ENERGIA ANUAL PRODUZIDA

O ponto de partida para o cálculo da energia a produzir, em ano médio é a curva de duração de caudais. Essa curva poderá ser dada por uma expressão  $Q(t)$ .

A partir da equação da curva de duração de caudais calcula-se o caudal médio, que em falta de outros dados poderá ser considerado o caudal nominal para efeitos de escolha da turbina.

$$Q_n = Q_{med} = \frac{1}{365} \int_0^{365} Q(t) dt \quad (4.7)$$

A seguir calcula-se a potência nominal da turbina a instalar pela expressão (4.6).

A gama de potências nominais dos equipamentos existente no mercado é discreta, pelo que a opção se fará pelo grupo turbina/gerador, de entre os que o mercado oferece, cuja potência nominal mais se aproxima do valor calculado.

A potência nominal do grupo turbina/gerador define o caudal nominal através da equação (4.6)

Há portanto que proceder à correcção da estimação inicial do caudal nominal, em face do valor de potência efectivamente instalada.

Uma vez escolhida a turbina definem-se os seus limites de exploração e calculam-se o caudal máximo e o caudal mínimo da turbina e os dias a que esses caudais correspondem bem como o caudal de cheia  $Q_c$  (caudal acima do qual a queda é insuficiente e, portanto, não é possível recolher energia). Fica assim definida a zona de exploração da central como mostra na figura abaixo.

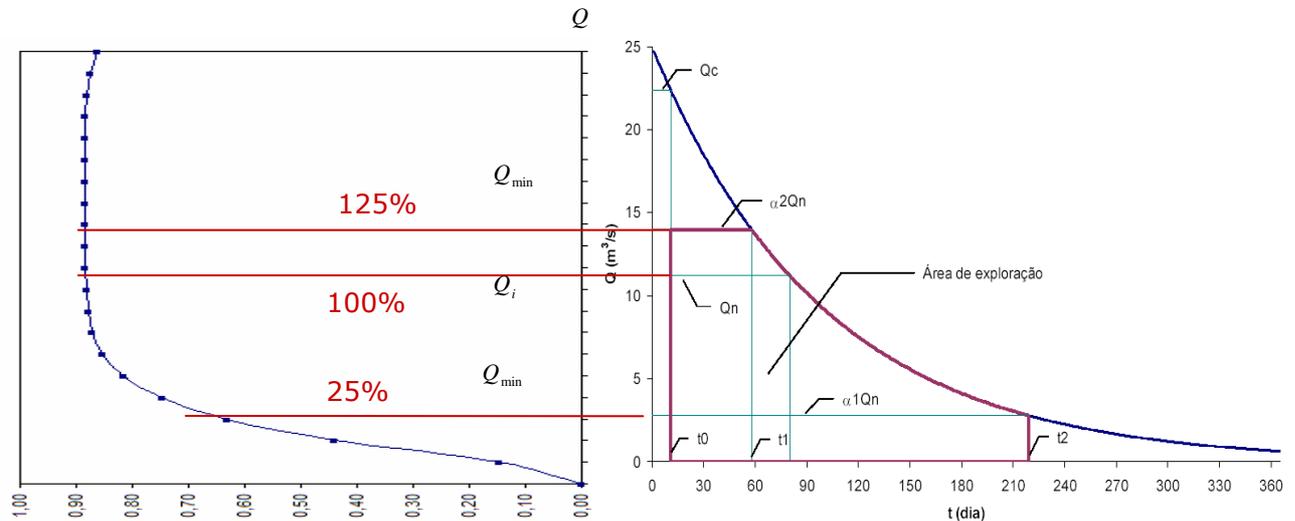


Figura 4.11- Zona de exploração da central para o caso de uma Kaplan

A equação geral para calcular a energia a produzir em ano médio será:

$$E_a = 24 \times \int_0^{365} P(t) dt = 24 \times 9,81 \times \int_0^{365} Q(t) \times h_u(t) \times \eta(t) dt \quad (\text{kWh}) \quad (4.8)$$

Usando a expressão simplificada fica:

$$E_a = 24 \times 7 \times h_b \times \left[ (t_1 - t_0) \alpha_2 Q_n + \int_{t_1}^{t_2} Q(t) dt \right] \quad (\text{kWh}) \quad (4.9)$$

### Exemplo 1

Os registos hidrológicos efectuados ao longo de 25 anos em determinado local apresentam como 365 valores médios cuja curva de duração de caudais é apresentada a seguir:

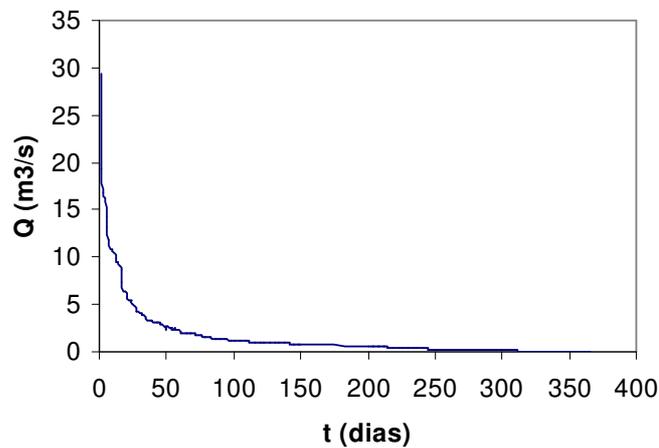


Figura 4.12- Curva de duração de caudais

e pode ser aproximada através de um ajuste exponencial pela seguinte expressão analítica:

$$Q(t) = 6,2847 e^{-0,0135t} \quad (\text{m}^3/\text{s})$$

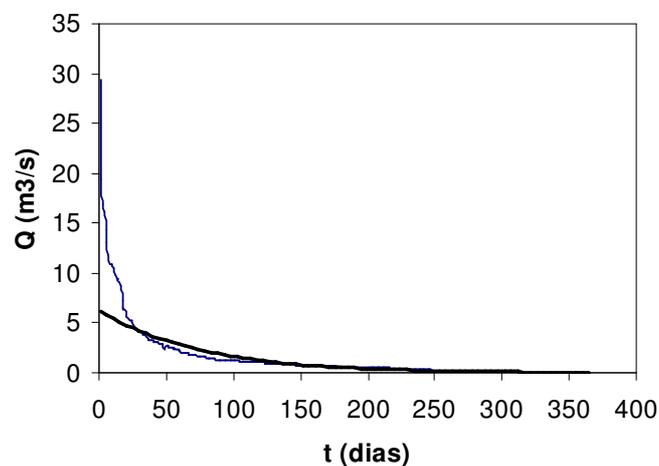


Figura 4.13- Curva de duração de caudais com ajustamento exponencial

Pretende-se instalar no rio em estudo uma central mini hídrica e sabe-se que a altura de queda bruta é de 200 m. Calcular

- O caudal médio afluente
- O tipo de turbina e a respectiva potência nominal
- Uma estimativa da energia anual produzida

Solução:

$$a) Q_{med} = \frac{1}{365} \int_0^{365} Q(t) dt = \frac{6,2847}{365} \int_0^{365} e^{-0,0135t} dt = 1,2662 \text{ m}^3/\text{s}$$

- b) Relativamente à turbina tanto se pode escolher uma Pelton como uma Francis. Vamos optar por Pelton

$$\text{Potência nominal} \quad P = 7 \times Q_n \times h_b = 1772,68 \text{ kW}$$

Vamos escolher uma potência de 2000 kW

$$\text{Caudal corrigido} \quad Q_n = \frac{P}{7 \times h_b} = 1,4286 \text{ m}^3/\text{s}$$

- c) O Caudal de cheia deve ser um dado do projecto; na ausência deste dado toma-se normalmente o dobro ou 2,5 do caudal nominal.

Vamos considerar  $Q_c = 2Q_n = 2,8572 \text{ (m}^3/\text{s)}$ .

Para este caudal tiramos da expressão de  $Q(t)$  o valor de  $t_0 = 58$  dias.

Para uma turbina Pelton os limites de exploração são:  $\alpha_1 = 0,15$  e  $\alpha_2 = 1,15$

a que correspondem respectivamente os caudais  $Q_{min} = 0,2143 \text{ (m}^3/\text{s)}$  e  $Q_{max} = 1,643 \text{ (m}^3/\text{s)}$ .

Para estes caudais mínimo e máximo calculam-se a partir da expressão de  $Q(t)$  os valores de  $t_2 = 250$  dias  $t_1 = 99$  dias.

Energia anual produzida

$$E_a = 24 \times 7 \times h_b \times \left[ (t_1 - t_0) Q_{max} + \int_{t_1}^{t_2} Q(t) dt \right] = 5838 \text{ MWh}$$

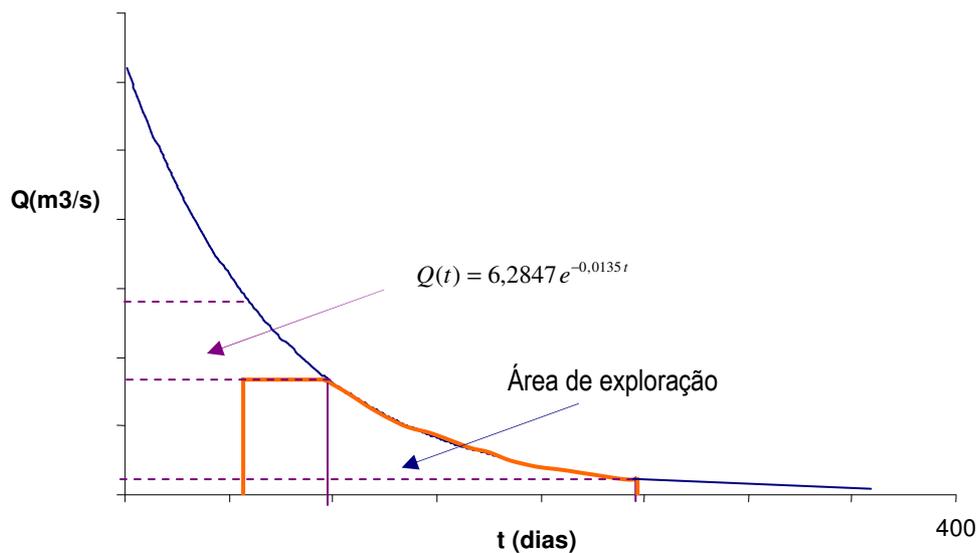


Figura 4.14- Curva de duração de caudais com zona de exploração da central

#### 4.4. CÁLCULO DA ENERGIA ANUAL PRODUZIDA COM DOIS GRUPOS TURBINA/GERADOR

Podemos instalar a mesma potência numa CMH recorrendo a mais do que uma turbina. Deste modo será possível aproveitar mais caudal afluente e aumentar a área de exploração da central na curva de duração de caudais. O benefício correspondente a este aumento de energia anual produzida deve ser comparado com o custo adicional correspondente a mais grupos instalados.

##### 4.4.1. Instalação de dois grupos turbina/gerador iguais

Neste caso a repartição de caudais entre turbinas segue uma regra prefixada. Uma repartição possível poderá ser a seguinte para determinado caudal afluente  $Q_a$ :

$Q_a$	Turbina 1	Turbina 2
$0 < Q_a < Q_n / 2$	$Q_a$	0
$Q_n / 2 < Q_a < \alpha_2 Q_n$	$Q_a / 2$	$Q_a / 2$

Tabela 4.2 – Repartição de caudais entre turbinas

Uma outra repartição possível poderá ser a seguinte:

$Q_a$	Turbina 1	Turbina 2
$0 < Q_a < \alpha_1 Q_n$	$Q_a$	0
$\alpha_1 Q_n < Q_a < \alpha_2 Q_n$	$Q_a / 2$	$Q_a / 2$

Tabela 4.3 – Repartição de caudais entre turbinas

O caudal máximo turbinável  $Q_{MT}$  é

$$Q_{MT} = \alpha_2 Q_n \quad (4.10)$$

O caudal mínimo de exploração é menor do que no caso de existir apenas uma turbina, sendo dado por

$$Q_{mT} = \alpha_1 Q_n / 2 \quad (4.11)$$

Assim, a área de exploração é acrescida de uma área adicional sendo produzida mais energia.

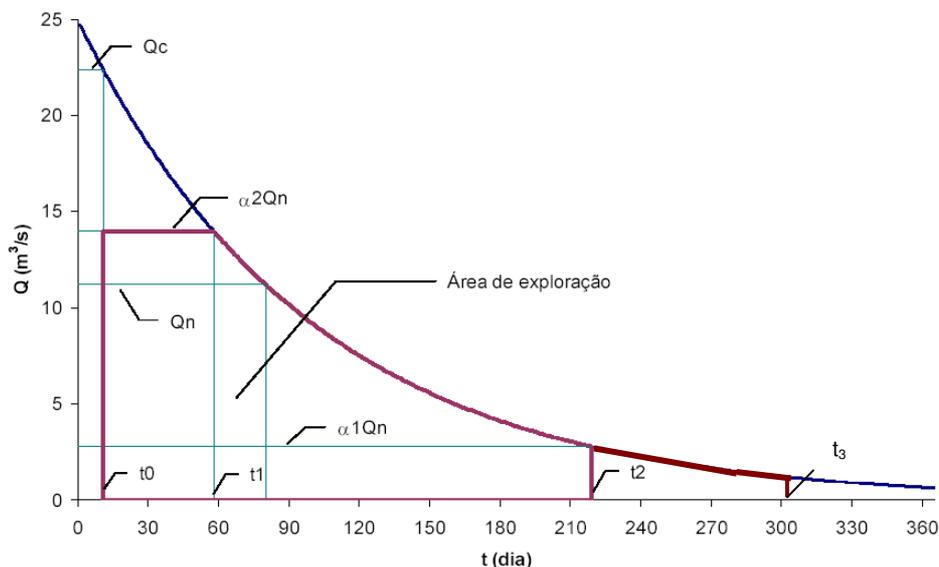


Figura 4.15- Curva de duração de caudais com zona de exploração da central acrescentada

A energia adicional produzida será:

$$E_{adic} = 24 \times 7 \times h_b \times \int_{t_{21}}^{t_3} Q(t) dt \quad (\text{kWh}) \quad (4.12)$$

### Exemplo 2

Considere a CMH do Exemplo 1, equipada com dois grupos turbina/gerador iguais. Calcular uma estimativa da energia adicional anualmente produzida com esta configuração:

*Solução:*

As duas turbinas serão de 1000 kW cada uma e o caudal nominal de cada será  $Q_{n1}=Q_{n2}=Q_n/2=0,7143$  ( $m^3/s$ ).

O caudal máximo turbinável é  $Q_{MT} = \alpha_2 Q_n = 1,643$  ( $m^3/s$ ), mas o limite mínimo de exploração passou a ser  $Q_{mT} = \alpha_1 Q_n/2 = 0,10715$  ( $m^3/s$ ). A este valor de caudal corresponde um valor para  $t_3 = 302$  dias.

A energia adicional produzida será:

$$E_{adic} = 24 \times 7 \times h_b \times \int_{250}^{302} Q(t) dt = 270 \quad \text{MWh}$$

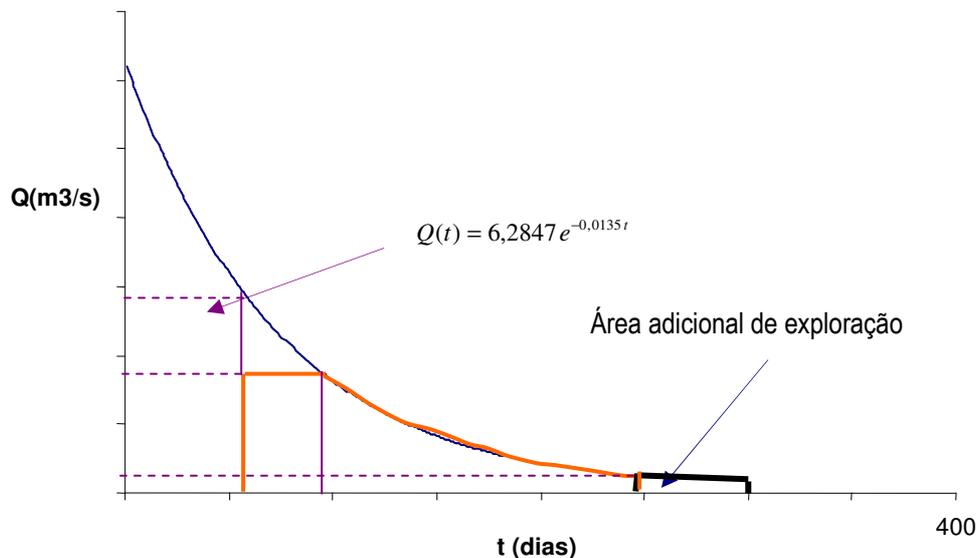


Figura 4.16- Curva de duração de caudais com zona de exploração da central acrescentada

#### 4.4.2. Instalação de dois grupos turbina/gerador diferentes

Uma alternativa para aumentar a energia produzida consiste em instalar um segundo grupo, com potência inferior ao primeiro, para aproveitar apenas a parte da curva de duração de caudais que não é coberta pelo grupo principal. Neste caso o segundo grupo é dimensionado de modo a satisfazer a seguinte equação:

$$\alpha'_2 Q_{n2} = \alpha_1 Q_n \quad (4.13)$$

Onde  $Q_{n2}$  é o caudal nominal da turbina secundária e  $\alpha'_2$  é o factor relativo ao seu limite máximo de exploração.

### Exemplo 3

Considere que na CMH do Exemplo 1 se pretende instalar um segundo grupo turbina/gerador de potência inferior, para aproveitar caudais não cobertos pelo grupo principal. Calcular uma estimativa da energia adicional anualmente produzida com esta configuração.

*Solução:*

Para a segunda turbina o caudal nominal será  $Q_{n2} = \alpha'_1 Q_n / \alpha'_2 = 0,186 \text{ (m}^3/\text{s)}$ .

A potência necessária será  $P = 7 \times 200 \times Q_{n2} = 260 \text{ kW}$

Podemos escolher uma turbina de 200 ou de 300 kW. Vamos optar por 300 kW.

O caudal nominal corrigido é  $Q_{n2} = 0,214 \text{ m}^3/\text{s}$

O caudal mínimo turbinável será:  $Q_{n2\text{min}} = 0,032 \text{ m}^3/\text{s}$

Para este caudal pode-se turbinar todo o ano excepto nos dias de caudal de cheia,  $t'_3 = 365$  dias

A energia adicional anualmente produzida será:

$$E_{adic} = 24 \times 7 \times h_b \times \int_{250}^{365} Q(t) dt = 422 \text{ MWh}$$

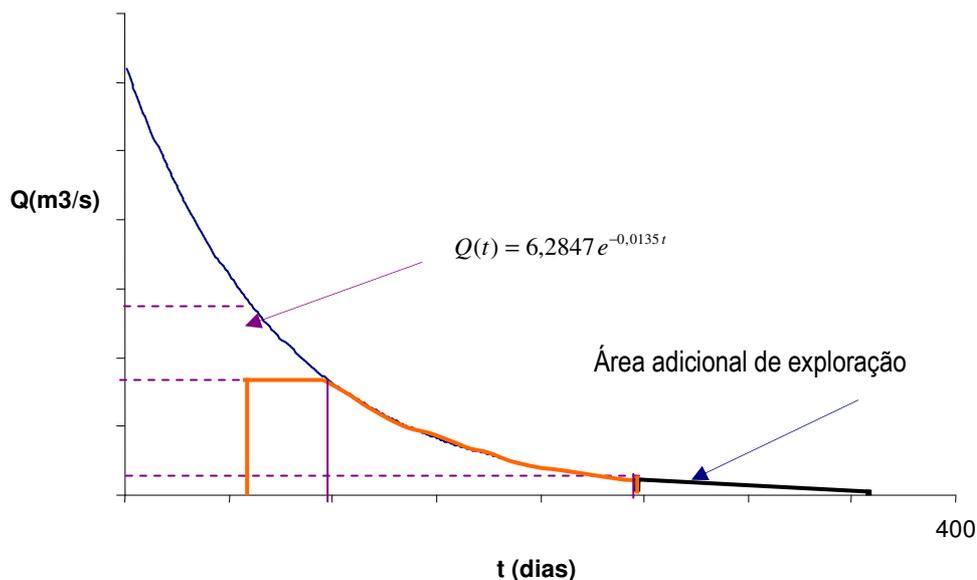


Figura 4.17- Curva de duração de caudais com zona de exploração da central acrescentada



## **BIBLIOGRAFIA**

Rui M. G. Castro, "Introdução à energia mini-hídrica", IST, Janeiro de 2004

Claúdio Monteiro, "Produção distribuída e Energias Renováveis"- FEUP

BHA-British Hydropower Association, " A guide to UK mini-hydro developments, 2005

[www.vatech-hydro.com](http://www.vatech-hydro.com)