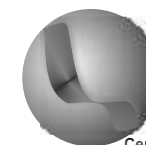


Série  
Energias Renováveis

# MICROCENTRAIS HIDRELÉTRICAS

**MME**  
Ministério de Minas e Energia

ISBN 978-85-60856-05-7



**CERPCH**  
Centro Nacional de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas

Fábio José Horta Nogueira  
Geraldo Lúcio Tiago Filho

Série  
Energias Renováveis

# MICROCENTRAIS HIDRELÉTRICAS

1<sup>o</sup> Edição

Organizado por Geraldo Lúcio Tiago Filho



Itajubá, 2007.

Obra publicada com o apoio do Ministério de Minas e Energia e da Fundação de Apoio ao Ensino Pesquisa e Extensão de Itajubá



#### Edição

Centro Nacional de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas

Presidente: Ivonice Aires Campos

Secretário Executivo: Geraldo Lúcio Tiago Filho

#### Revisão

Ângelo Stano Júnior

Adriana Barbosa

#### Organização

Prof. Dr. Geraldo Lúcio Tiago Filho

#### Colaboração

Camila Rocha Galhardo

#### Projeto Gráfico

Orange Design

#### Editoração e Arte-Final

Adriano Silva Bastos

CERPCH - Centro Nacional de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas

Avenida BPS, 1303 - Bairro Pinheirinho CEP: 37500-903 - Itajubá - MG - Brasil

Tel: (+55 35) 3629-1443 Fax: (+55 35) 3629 1265



Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá -  
Bibliotecária Margareth Ribeiro - CRB\_6/1700

N778m

Nogueira, Fábio José Horta

Microcentrais hidrelétricas / Fábio José Horta Nogueira e Geraldo Lúcio Tiago Filho ; organizado por Geraldo Lúcio Tiago Filho; revisão de Ângelo Stano Júnior e Adriana Barbosa ; colaboração Camila Rocha Galhardo ; editoração e arte-final de Adriano Silva Bastos. -- Itajubá, MG : FAPEPE,2007.

32p. : il. -- (Série Energias Renováveis)

ISBN: 978 - 85 - 60858 - 01 - 9

ISBN: 978 - 85 - 60858 - 05 - 7

1. Microcentrais hidrelétricas. 2. Energia hidráulica. I. Título.

CDU 621.311.21

# Sumário

1.0 – Introdução	04
1.1 – Vantagens e limitações das microcentrais hidrelétricas	06
1.2 – Justificativas para o uso das microcentrais hidrelétricas	07
1.3 – Exercícios	07
2.0 – Princípios de energia hidráulica	08
3.0 – Arranjos mais comuns	10
4.0 – Componentes das microcentrais	13
5.0 – Grupos geradores	19
5.1 – Turbinas hidráulicas	21
5.2 – Seleção das turbinas	25
5.3 – Reguladores de velocidade	26
5.4 – Geradores elétricos	27
5.5 – Chaveamento e proteção	28
5.6 – Transformadores elevadores	28
5.7 – Linha de transmissão	29
6.0 – Considerações finais	30
7.0 – Bibliografia	30

# Capítulo 1

## Introdução

O ser humano atual é dependente da energia, e é desnecessário dizer que ela é essencial para o desenvolvimento de suas atividades. Essa dependência tem aumentado com o passar do tempo, como se pode observar quando se faz uma comparação entre um homem pré-histórico e um homem moderno. Para o primeiro caso, o consumo energético diário era da ordem de 15 MJ, apenas a demanda do seu metabolismo vital, atendida somente pela ingestão de alimentos crus, pois ainda não se dominava a técnica do fogo. Com o passar do tempo e a evolução, o homem moderno elevou esse consumo para cerca de 45.000 MJ. Ou seja, esse consumo foi multiplicado três mil vezes. As tendências mostram que esse consumo vai crescer ainda mais.

Para atender a essa enorme demanda atual de energia a humanidade tem que lançar mão dos mais diferentes recursos energéticos tais como o petróleo, o carvão mineral, a energia hidráulica, a energia solar, a energia eólica e a energia atômica, entre outras. Algumas dessas fontes de energia são consideradas renováveis, outras têm uma expectativa de vida bem curta. Algumas delas apresentam sérios riscos ao ambiente, outras ainda são de alta tecnologia e de custo muito elevado.

Quando bem aplicada, a energia hidráulica é uma boa alternativa para atender esse suprimento energético. Ela apresenta custos razoáveis, emprega equipamentos duráveis e com tecnologia bem sedimentada, pode ser usada em pequenas ou grandes potências e, além disso, normalmente causa poucos impactos ambientais, sendo esses os principais argumentos para o seu estudo e a sua utilização.

A energia hidráulica já vem sendo utilizada há mais de 2000 anos. Na Idade Média as rodas d'água e as rodas nórdicas de eixo vertical ou "ghatta" (figuras 1.1 e 1.2) eram muito comuns. Elas eram feitas quase que totalmente de madeira, com algumas poucas partes (sujeitas a maior desgaste) feitas de metal ou pedra. Eram utilizadas mais comumente na moagem de grãos, mas o bombeamento de água para irrigação e o fornecimento de água também eram populares. Mais tarde, na época da Revolução Industrial, as rodas d'água foram usadas para acionamento de guindastes nas minas de carvão e de foles para a injeção de ar nas fornalhas. Gradualmente, estas máquinas simples de madeira foram sendo desenvolvidas com eficiências cada vez mais altas. Milhares destas máqui-

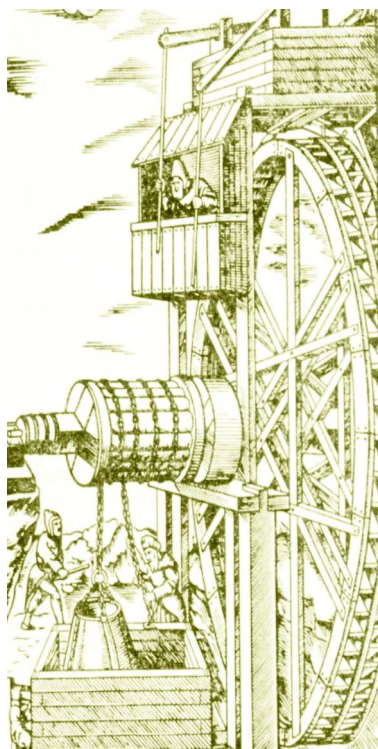


Figura 1.1 – Roda d'água antiga

nas tradicionais ainda são utilizadas para a moagem de grãos, e, algumas vezes, no acionamento de bombas e tornos mecânicos. A maioria delas é projetada para acionar apenas um equipamento. Isso pode reduzir sua viabilidade econômica, uma vez que não são utilizadas durante todo o tempo.

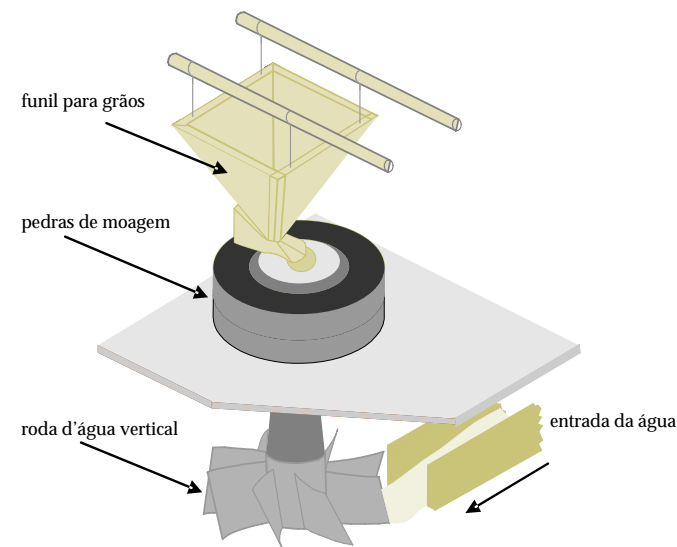


Figura 1.2 - Roda d'água de eixo vertical

Esta última questão ficou resolvida com o desenvolvimento dos grupos geradores hidráulicos, que realizam a conversão da energia hidráulica em energia elétrica, que pode ser transmitida a grandes distâncias e utilizada para acionar os mais variados tipos de equipamentos.

No Brasil existe um predomínio do uso da energia hidráulica como fonte primária para a geração de energia elétrica. A existência de grandes potenciais hidráulicos e a busca pela redução no custo de geração fez com que, por muito tempo, essa energia fosse produzida em grandes centrais hidrelétricas, apesar destas implicarem em um impacto ambiental considerável, resultante da formação do reservatório.

Nas últimas décadas, o aumento dos preços da energia, combinado com as recentes preocupações ambientais, fez com que o interesse pelas microcentrais aumentasse, visto que essas constituem uma fonte de energia segura e de baixo custo, particularmente em áreas mais remotas.

O desenvolvimento tecnológico acompanhou o renascimento desta fonte de energia. Máquinas tradicionais foram aperfeiçoadas utilizando-se materiais modernos, de maneira que elas possam acionar um diferente número de equipamentos. O advento da eletrônica de potência permitiu o desenvolvimento de controles eletrônicos para a velocidade e a tensão substituindo os complexos reguladores hidráulicos; o PVC e outros tubos plásticos estão substituindo o ferro e o aço e os modernos alternadores de alta velocidade e novos mancais reduziram de peso e de custo.

## 1.1 – Vantagens e limitações das microcentrais hidrelétricas

A seguir estão relacionadas algumas vantagens e desvantagens da utilização da energia hidráulica, que podem ajudar os leitores a julgar sua relevância para suas necessidades.

As principais vantagens da energia hidráulica são:

- A energia é produzida a uma taxa constante; sendo assim, a necessidade de armazenamento em baterias é quase inexistente e a energia está disponível a qualquer hora.
- Apresentam concepção simplificada, que lhes proporciona baixo custo de implantação e manutenção e facilidade na operação.
- A tecnologia é de fácil adequação para a fabricação e utilização em países em desenvolvimento ou em áreas remotas.
- Não se faz necessária a utilização de combustíveis e os custos de manutenção são baixos.
- A tecnologia é robusta e apresenta vida útil elevada, cerca de 20 anos, podendo atingir 50 a 60 anos de funcionamento sem maiores investimentos, com um baixo custo de reparos e manutenção.
- A manutenção das microcentrais é bastante simples. Resume-se na lubrificação periódica dos rolamentos e na substituição de correias de transmissão, quando necessário. Trabalhos de conservação das estruturas, tais como pintura e limpeza também são recomendados.
- Os custos totais, geralmente, são menores do que os custos das outras alternativas.
- Não há grandes barragens, obras hidráulicas importantes e grandes alagamentos; assim, os problemas enfrentados pelas grandes hidroelétricas, como o deslocamento de populações e a estratificação dos reservatórios, são evitados.
- As centrais não emitem dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) ou qualquer outro resíduo prejudicial à saúde, além de serem silenciosas e operarem com reduzida perda de calor.
- As microcentrais hidrelétricas ainda apresentam a vantagem de utilizarem uma tecnologia antiga, totalmente dominada e estabelecida.

Entre as suas maiores desvantagens podem ser citadas:

- É uma tecnologia de "local específico"; isto é, são necessários locais adequados próximos ao ponto onde a energia será utilizada.
- Nos pequenos riachos, onde são normalmente instaladas, a potência máxima é limitada e não pode ser aumentada caso haja um crescimento da demanda.
- Em alguns casos, a potência disponível é reduzida ou inexistente nos períodos de seca.

- Secas e mudanças na utilização da água e do solo podem reduzir a produção de energia.
- Em muitas regiões, a demanda não é grande o suficiente para favorecer a tecnologia adequada e os equipamentos necessários para uma fácil implantação.

## 1.2 – Justificativas para o uso das microcentrais hidrelétricas

As microcentrais hidrelétricas são as mais adequadas para serem implantadas nas fazendas para possibilitar o fornecimento de eletricidade às propriedades rurais. Elas são construídas aproveitando-se cursos d'água com vazões e quedas relativamente pequenas, através de obras simples, baratas e com os menores impactos ambientais.

Se as condições topográficas e hidrológicas forem adequados, a construção de uma microcentral hidrelétrica justifica-se em diversas situações, destacando-se os seguintes casos:

- Nas propriedades que se encontram localizadas distantes das redes de distribuição de eletricidade das concessionárias.
- Nas fazendas onde o consumo de energia elétrica é elevado.
- Nas propriedades onde se deseja abastecimento em rede trifásica e a concessionária só atende em rede monofásica. A vantagem das linhas trifásicas é a de permitirem o acionamento de motores trifásicos, que são mais baratos que os monofásicos, demandam menores custos de manutenção, e são encontrados com maiores potências.
- Para atender a povoados e comunidades rurais, cujos habitantes possuem baixa qualidade de vida.
- Para a inserção social, com uso da energia na melhoria das condições das atividades produtivas de uma fazenda ou de uma comunidade.
- Para atendimento a programas de universalização do uso da energia elétrica, etc.

## 1.3 - Aplicações

- 1 Você saberia dizer quanto de energia é consumida mensalmente em sua residência? (Dê uma olhada na sua conta de energia elétrica)
- 2 No seu município existem ou existiam centrais hidrelétricas? Onde? (Dica. Faça uma pesquisa entre seus conhecidos ou parentes mais velhos)
- 3 Listar outras vantagens e desvantagens das microcentrais hidrelétricas.

# Capítulo 2

## Princípios de Energia Hidráulica

A energia que é naturalmente dissipada em um curso d'água quando este escoar através de um desnível topográfico é dada pela seguinte expressão:

$$P_h = \rho \cdot g \cdot H \cdot Q$$

Onde:

$P_h$	potência hidráulica	W
$\rho$	massa específica da água	kg/m <sup>3</sup>
$g$	aceleração da gravidade	m/s <sup>2</sup>
$H$	altura da queda d'água	m
$Q$	vazão de água	m <sup>3</sup> /s

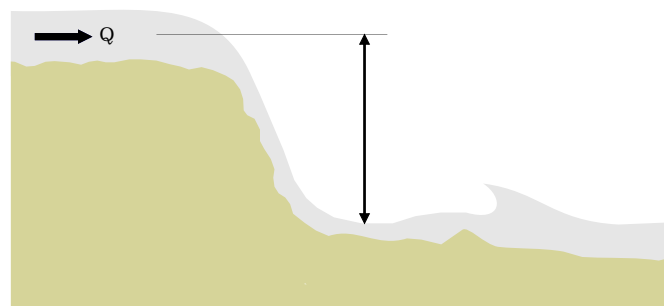


Figura 2.1 – Cálculo da potência hidráulica.

Desde muito tempo atrás o homem vem desenvolvendo técnicas para captar essa energia que é dissipada. Os equipamentos utilizados atualmente nas centrais hidrelétricas são capazes de converter uma grande parte da energia hidráulica disponível em energia útil. Apesar disso, durante essa conversão ocorrem perdas inevitáveis. Por esse motivo a potência hidráulica é corrigida por um rendimento que leva em

consideração todas essas perdas, sendo então a potência útil igual a:

$$P_u = g \cdot H \cdot Q \cdot \eta$$

Sendo:  $P_u$  potência útil kW  
 $\eta$  rendimento global da conversão

O rendimento global dos equipamentos utilizados nas microcentrais situa-se dentro da faixa de 50% a 70% sendo que os maiores valores são para os aproveitamentos de maior potência.

Se a água cai ou é conduzida de um nível mais alto para um nível mais baixo, então essa vazão de água resultante pode ser utilizada. Normalmente um conduto ou uma tubulação forçada é utilizado para levar a água declive abaixo, e disto resulta uma vazão de água sob pressão. Quando se permite que a água mova algum tipo de turbina, a pressão é então transformada em energia mecânica e pode ser utilizada no acionamento de um gerador elétrico ou um moinho de grãos ou algum outro tipo de equipamento.

Para se determinar a energia gerada, duas medições são necessárias: a queda d'água, que é a diferença da altura vertical pela qual a água cai, e a vazão existente, que é medida em metros cúbicos

por segundo. Os métodos apresentados nos volumes anteriores para as medidas de queda e para as medidas de vazão podem ser utilizados.

Determinada a potência, pode ser feita uma estimativa aproximada do custo da microcentral. Sabendo-se que o custo médio para cada kW instalado é da ordem de R\$ 4.500,00, basta multiplicar esse valor pela potência do aproveitamento para se obter o custo da microcentral. Ressalta-se que essa estimativa poderá falhar para os casos de potências abaixo de 20 kW.



### 2.1 – Aplicação

Suponha uma queda d'água com 45 metros de altura, a vazão medida é igual a 0,3 m<sup>3</sup>/s. Determinar a potência hidráulica e a potência útil desse aproveitamento supondo que o rendimento global seja de 75%.

Potência hidráulica:

$$P_h = \rho \cdot g \cdot H \cdot Q$$
$$P_h = 1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 45 \text{ m} \cdot 0,3 \text{ m}^3/\text{s}$$
$$P_h = 132435 \text{ W} \quad \text{ou}$$
$$P_h = 132,4 \text{ kW}$$

Potência útil:

$$P_u = g \cdot H \cdot Q \cdot \eta$$
$$P_u = 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 45 \text{ m} \cdot 0,3 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 0,75$$
$$P_u = 99,3 \text{ kW}$$

# Capítulo 3

## Arranjos Mais Comuns

Na prática o que define o arranjo de uma microcentral hidrelétrica é a forma do relevo, ou a topografia do local escolhido para a construção, e os locais que são apropriados para a construção de uma microcentral hidrelétrica podem variar extremamente. Incluem desde as posições montanhosas, onde há áreas de cachoeiras, de rápidos e de corredeiras das montanhas, passando pelos rios de planalto até chegar aos córregos e aos rios das planícies, mais largos e lentos.

Em alguns casos o desenvolvimento envolve pequenas obras e adaptações, já em outras situações exige construções de maior porte e soluções inteiramente novas.

As figuras a seguir ilustram as quatro disposições de arranjo das estruturas mais comuns para uma microcentral hidrelétrica.

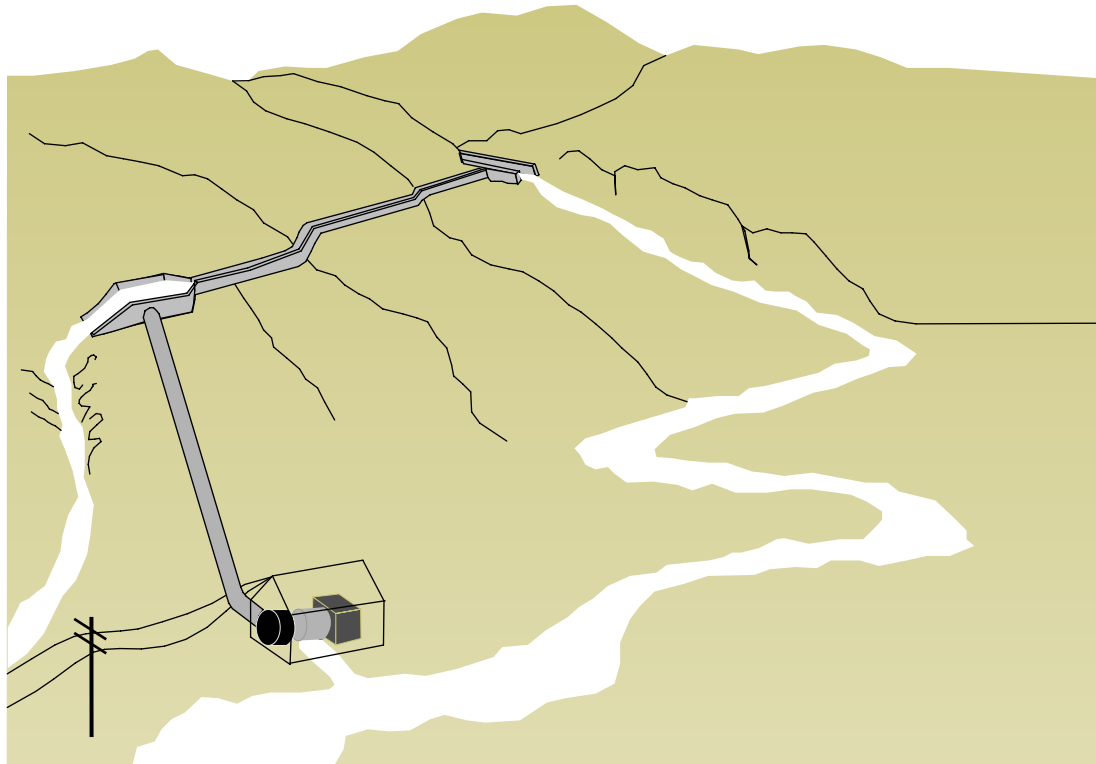


Figura 3.1 – Microcentral em desvio com canal de adução e conduto forçado

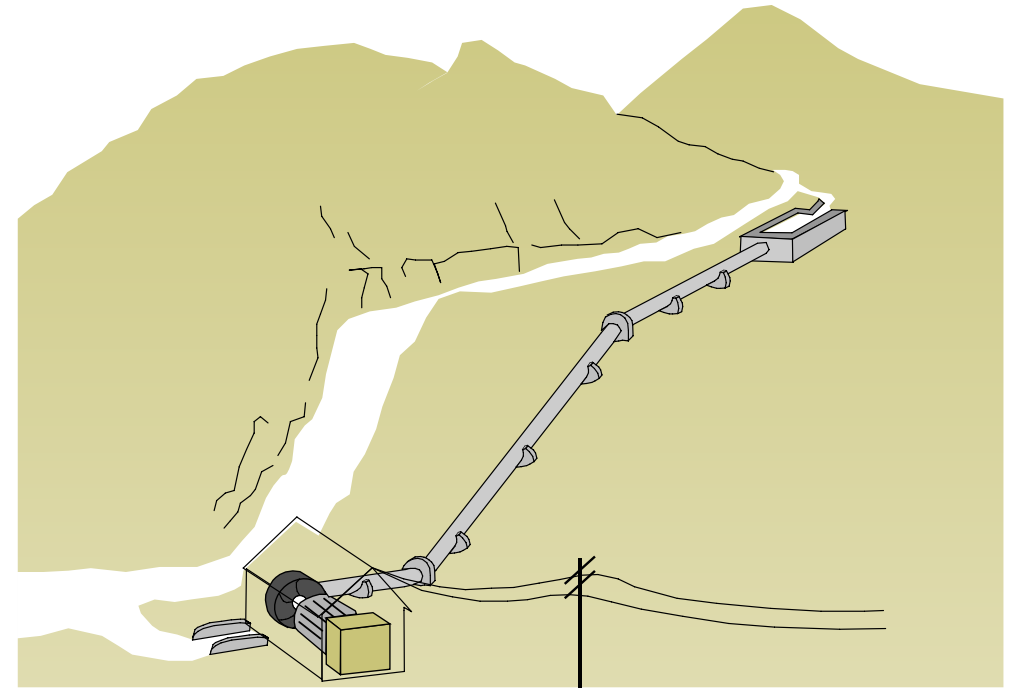


Figura 3.2 – Microcentral em desvio apenas com conduto forçado

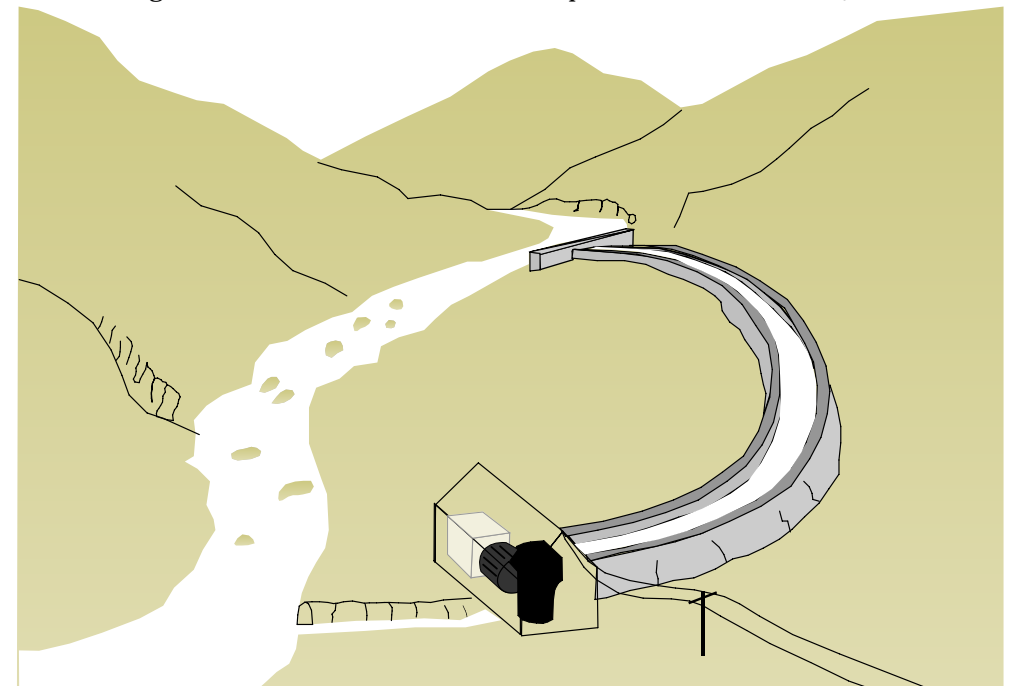


Figura 3.3 – Microcentral de baixa queda em desvio sem conduto forçado

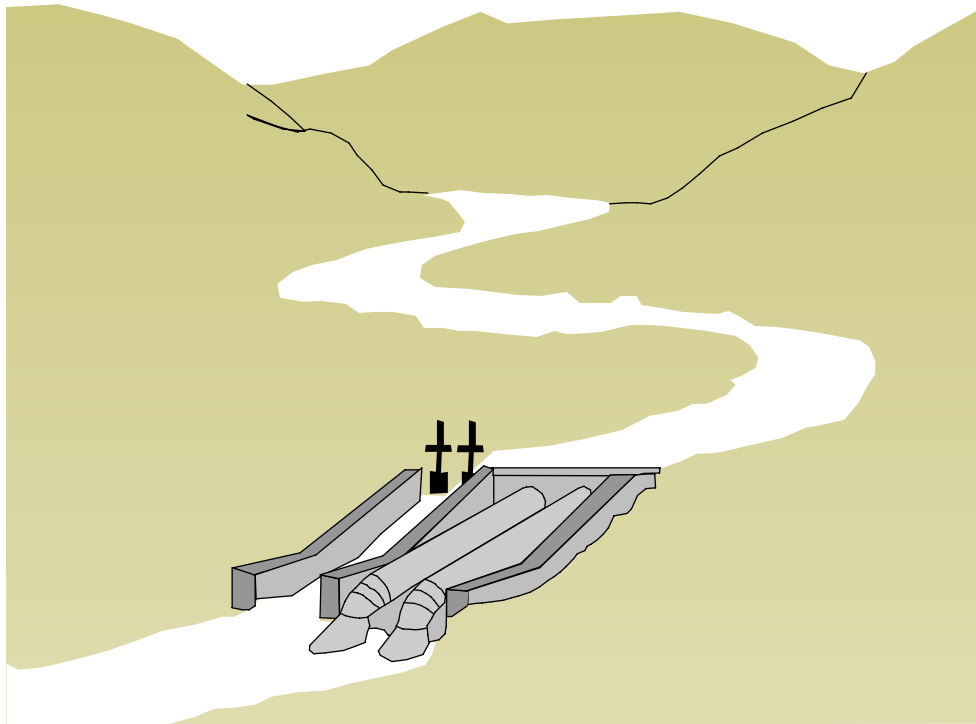


Figura 3.4 – Microcentral de baixa queda com represamento

# Capítulo 4

## Componentes das Microcentrais

Os componentes das microcentrais hidrelétricas podem ser divididos em dois grupos principais: as estruturas civis para o represamento, captação e adução da água e os componentes hidromecânicos e eletromecânicos

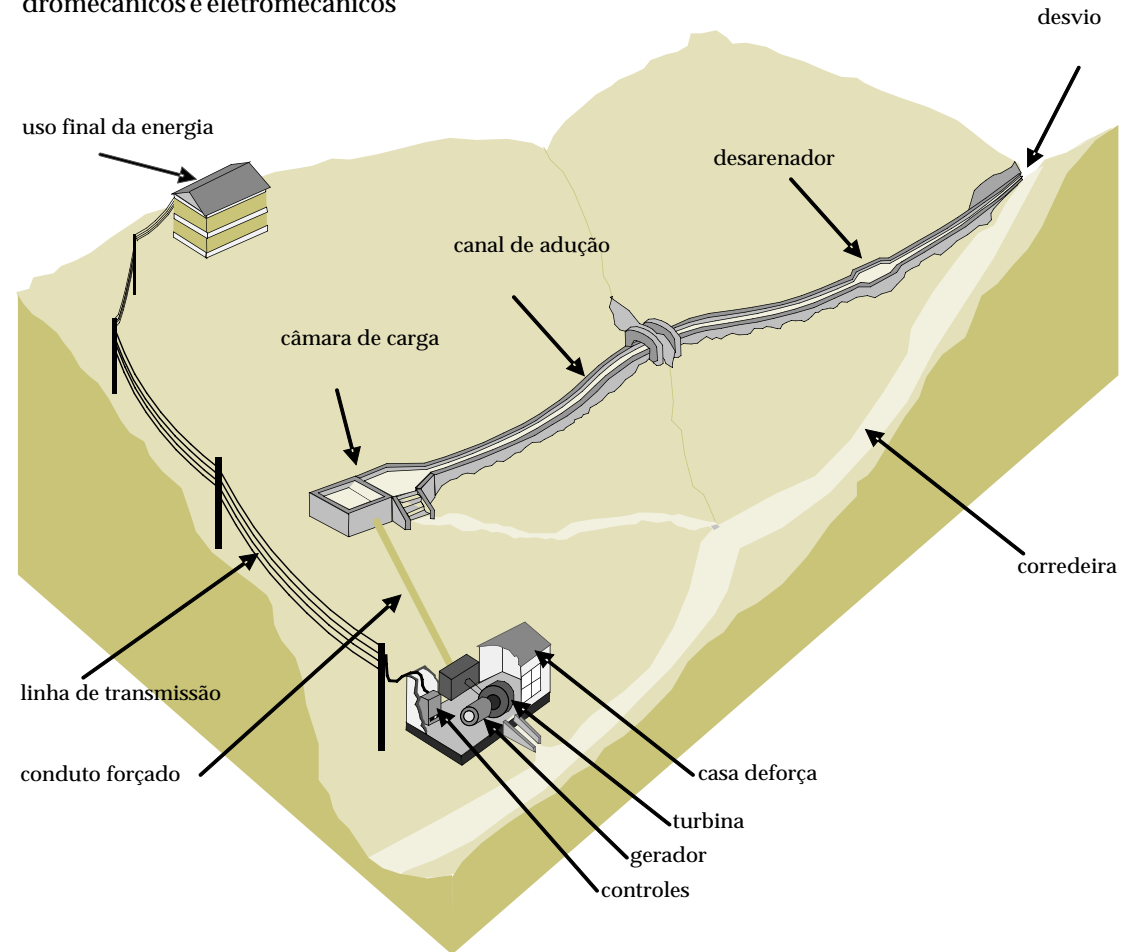


Figura 4.1 - Principais componentes de uma microcentral hidrelétrica

### 3.1 – Aplicação

- 1) Você saberia dizer as vantagens e desvantagens de cada tipo de arranjo de microcentral hidrelétrica?
- 2) Qual tipo de arranjo de microcentral hidrelétrica é mais adequado para a região que você mora?



### 4.1 Estruturas Civis

Entre as obras civis podem ser destacadas as seguintes estruturas:

Barragens e represas – As barragens armazenam grandes volumes de água por longos pe-



riodos, enquanto que as represas, estruturas menores, não tem essa finalidade. As barragens são, normalmente, estruturas relativamente altas, ao passo que as represas simplesmente "selam" e regularizam o leito do rio elevando o nível de montante e possibilitando o desvio da água do rio para a tomada d'água. Em rios que apresentam muitas pedras, represas naturais são freqüentemente utilizadas. Podem ser feitas de terra, madeira, pedras ou concreto.

As barragens raramente são construídas somente para uma microcentral, mas, algumas vezes, uma pequena barragem é integrada a uma microcentral de geração de energia para o controle de cheias e para o uso com sistemas de irrigação. Em alguns casos, essas barragens de microcentrais são adaptadas para o suprimento de água, ou utilizadas para fornecer uma vazão "remanescente", ou seja, a vazão mínima especificada pelos comitês reguladores para salvar peixes e plantas que estão à jusante (abaixo) da barragem. É uma estrutura que deve ser bem calculada, pois envolve sérias questões de segurança.

Vertedouro – Tem a função de proteger a barragem e as demais instalações nas ocasiões de chuvas intensas e águas altas, permitindo o escoamento das cheias com segurança. São dimensionados com as informações sobre a frequência e intensidade das maiores cheias registradas. Com um tratamento estatístico é possível prever, associado a um certo risco, um valor de cheia máxima. A figura 4.2 mostra uma barragem de concreto com um vertedouro incorporado.



Figura 4.2 – Barragem de concreto com vertedouro incorporado



Figura 4.3 – Tomada d'água vista do lado de montante

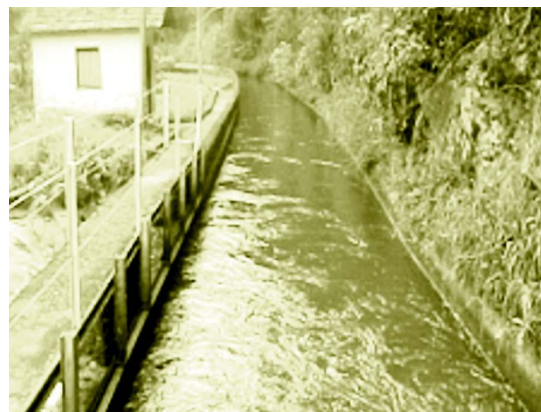


Figura 4.4 – Trecho de um canal de adução escavado em rocha e revestido



Figura 4.5 – Parte de um conduto metálico de baixa pressão



Figura 4.6 – Aspecto de uma câmara de carga e bloco de ancoragem de saída



Figura 4.7 – Aspecto de uma chaminé de equilíbrio

sável por captar a água de montante e levá-la até o sistema de adução, regular a vazão de entrada e retirar os detritos, folhas e galhos carregados pelo curso d'água. Normalmente é projetada para receber os seguintes acessórios: comporta de controle, uma seção de desarenação, comporta desarenadora e uma grade grossa.

Sistema de adução – Normalmente é constituído por um trecho com pequena declividade (baixa pressão), com um canal aberto ou uma tubulação de baixa pressão e por um trecho com declividade mais acentuada (alta pressão), o conduto forçado, esse sempre construído com tubos. Na maior parte dos casos, na transição entre o trecho de alta e o de baixa pressão é colocada uma câmara de carga. Quando o comprimento do conduto forçado é muito elevado é necessário usar as chaminés de equilíbrio.

As figuras ao lado mostram diversos exemplos de sistemas de adução, com canais abertos e fechados, chaminés de equilíbrio, câmaras de carga e condutos forçados.

Casa de máquinas – É no interior da casa de máquinas que estão abrigados a turbina, o gerador (ou o moinho ou qualquer outro equipamento) e o sistema de comando e controle. Normalmente a casa de máquinas deve ficar situada um pouco acima do nível de cheia do rio. Em centrais muito pequenas (abaixo de 1 kW) a casa de força geralmente possui o formato de uma caixa com uma tampa removível. Em centrais maiores, ela pode ser uma edificação com duas ou três salas para abrigar o equipamento eletromecânico e oferecer acomodação para os operadores.



Figura 4.8 - Conduto forçado e bloco de ancoragem da casa de máquinas



Figura 4.9 - Casa de máquinas e canal de fuga de uma microcentral hidrelétrica



Figura 4.10 - Canal de fuga restituindo a água ao leito natural do rio

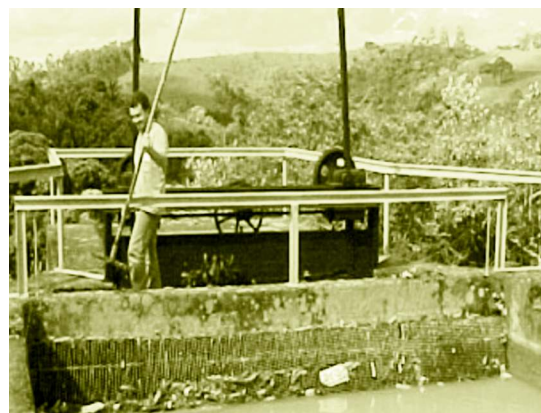


Figura 4.11 - Grades antes da entrada de um conduto forçado.



Figura 4.12 - Comportas planas na entrada de um canal

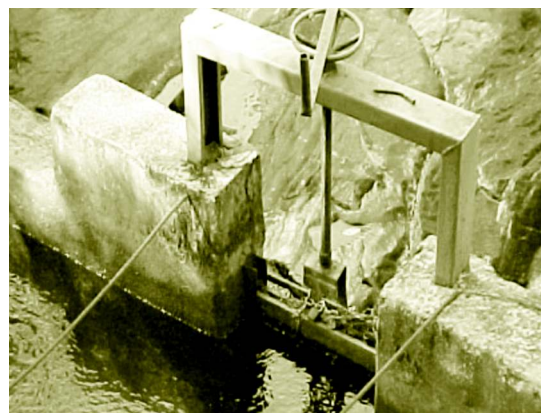


Figura 4.13 - Pequena comporta desarenadora em um canal

Canal de fuga - É um canal que tem a função de restituir ao leito original do rio a água que foi utilizada na geração. Nesse canal deve ser prevista a construção de uma soleira afogadora para

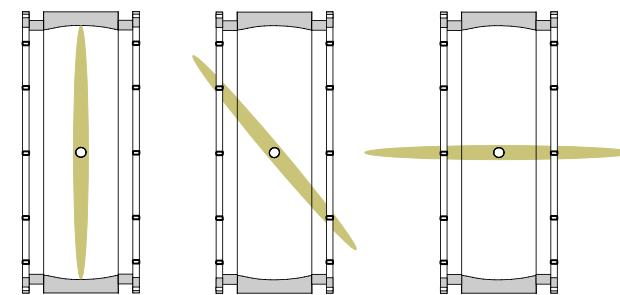


Figura 4.12 - Válvula borboleta

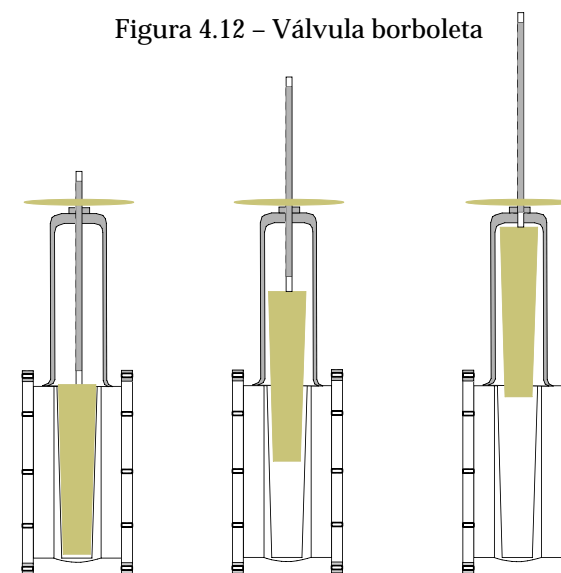


Figura 4.15 - Válvula de gaveta

# Capítulo 5

## Grupos Geradores

Não se sabe com exatidão quem, onde e há quanto tempo se aproveitou pela primeira vez a força e a energia da água em movimento. É provável que tenha vindo de um uso mais antigo da água, a irrigação.

Nos tempos antigos eram empregados diversos meios para retirar a água do curso dos rios e elevá-la a uma altura maior que suas margens, onde era conduzida até a plantação por meio de canais. Um desses equipamentos era a saquia (ou roda persa), constituída por uma grande roda de eixo horizontal e canecas fixadas em sua periferia. Essas rodas podiam ser movidas com as mãos ou por meio de tração animal.

Naquele tempo alguém deve ter notado que, quando a roda estava desatrelada do animal, a corrente de água fazia com que a roda girasse ao contrário. Concebeu-se assim a idéia revolucionária de que uma corrente de água contém energia e por conseqüência pode realizar trabalho.

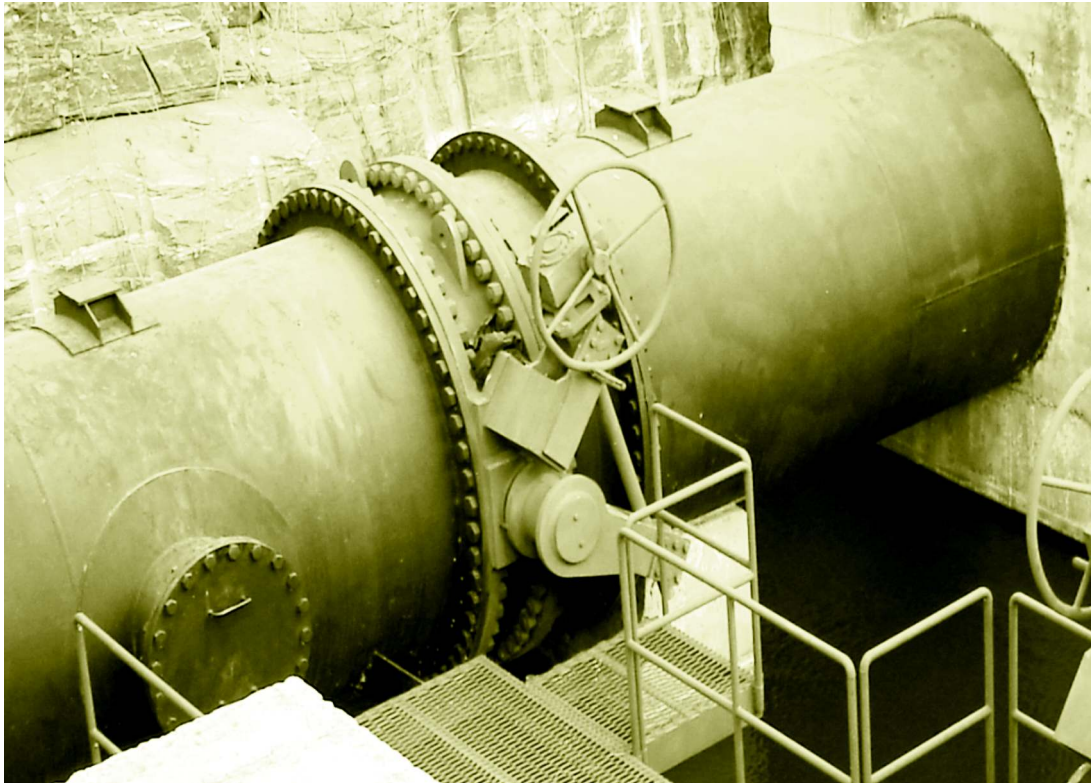


Figura 4.12 – Válvula borboleta com fechamento e abertura manuais

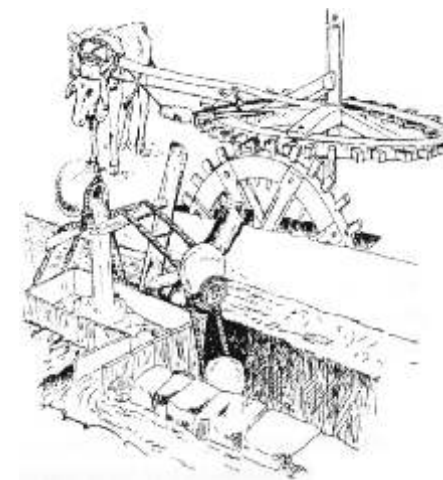


Figura 5.1 – Saquia movida por tração animal

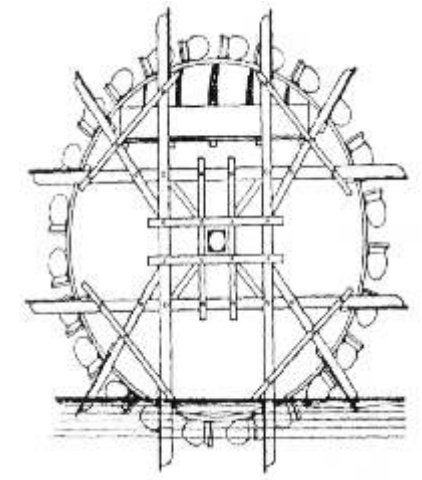


Figura 5.2 – Vista em corte da roda saquia

As primeiras rodas surgiram, provavelmente, na China e na Índia cerca de 2.000 anos atrás. Depois da Ásia passaram ao Egito e daí à Europa aproximadamente 600 anos depois. A primeira alusão literária foi feita por Antipater de Tesalônica e data do ano 80 AC: “Agora as donzelas que labutam nos moinhos podem descansar. O deus Ceres ordenou que as ninfas das águas assumam o seu penoso trabalho”.

Os romanos conheciam bem e usavam extensamente as rodas hidráulicas como fonte de energia mecânica. A história reconhece o nome do engenheiro Vitruvius com sendo o responsável por isso. Existem evidências que ao longo do aqueduto de Adriano foram instaladas diversas rodas hidráulicas para o acionamento de moinhos de trigo.

### 4.1 – Aplicação

- 1) Caso seja possível, faça uma visita a uma microcentral hidrelétrica e procure identificar os equipamentos existentes.

Foram os saxões que popularizaram a sua utilização na Grã-Bretanha e depois no restante da Europa. O documento mais antigo é o registro para a concessão de um moinho com roda hidráulica, dada pelo rei Ethelbert em 762 DC. Naquele tempo a profissão do construtor de moinhos, que viajava por todo país construindo moinhos novos e reparando os antigos, era bem remunerada e muito respeitada. No censo realizado na Grã-Bretanha, em 1086, foram contados mais de 5.000 moinhos.

As rodas hidráulicas comuns que operam principalmente com o peso da água são as de menor complexidade construtiva e, obviamente, foram as primeiras a serem construídas. Leonardo Da Vinci, Galileu e Descartes, entre outros, realizaram estudos teóricos e matemáticos sobre as rodas hidráulicas. Destaque especial merece o francês Parent que estudou o funcionamento das rodas hidráulicas e possibilitou o surgimento das rodas de impulso e de reação. Essas novas invenções eram mais vantajosas, pois permitiam que se aproveitasse a energia cinética contida na água, resultando em equipamentos menores e mais rápidos.

As rodas hidráulicas, devido principalmente à admissão parcial da água, possuem baixas rotações e baixos rendimentos. As turbinas hidráulicas surgiram para superar essas desvantagens.

O estudo das turbomáquinas se iniciou como ciência com Euler, em 1754, com a publicação da “Théorie plus complète des machines qui sont mises en mouvement par la réaction de l'eau”. Nesse texto ele desenvolve pela primeira vez a equação da variação da quantidade de movimento da água ao passar pelo rotor da máquina. Posteriormente, o engenheiro francês Claude Burdin, desenvolve a teoria “Des turbines hydrauliques ou machines rotatoire á grande vitesse” e usa o termo turbina pela primeira vez. Esse termo vem do latim turbo- inem, que significa rotação ou giro. Burdin foi um engenheiro teórico, mas seu discípulo Fourneyron foi um engenheiro prático que construiu a primeira turbina experimental digna desse nome em 1827. Ao longo de sua vida, Fourneyron construiu mais de uma centena de turbinas hidráulicas, instaladas em diferentes partes do mundo. Esse equipamento teve um êxito fabuloso, pois era capaz de aproveitar quedas muito maiores que as rodas hidráulicas conseguiam aproveitar. Era radial centrífuga, de injeção total e de escape livre, mas também havia a previsão para instalação de tubo de sucção.

Desde 1837 as turbinas hidráulicas de Henschel e de Jonval, idealizadas em 1843, competem com as de Fourneyron. Outras turbinas hidráulicas anteriores ao século XX foram a de Fontaine, e sobretudo a desenvolvida em 1851 por Girard. Os tipos mencionados não são os únicos, e, mesmo que algumas dessas tenham sobrevivido, não foram mais construídas devido a seu baixo rendimento.

Ainda na primeira metade do século XIX surgiu a turbina Pelton (1840), projetada pelo engenheiro americano Lester Pelton. As turbinas Pelton são usadas até hoje. A demanda crescente

por energia possibilitou o rápido desenvolvimento das turbinas. As turbinas Fourneyron evoluíram para as modernas turbinas Francis (1905) que tem esse nome em razão do seu inventor, James Francis. Do mesmo modo, a turbina do tipo Jonval evoluiu para a turbina Kaplan, proposta em 1913 pelo engenheiro austríaco Viktor Kaplan. Inicialmente essa turbina tinha pás fixas, mas posteriormente foi aperfeiçoada pelo mesmo Kaplan, com a introdução das pás móveis

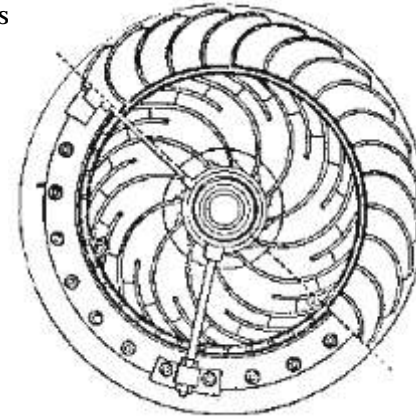


Figura 5.3 – Corte de um rotor Fourneyron

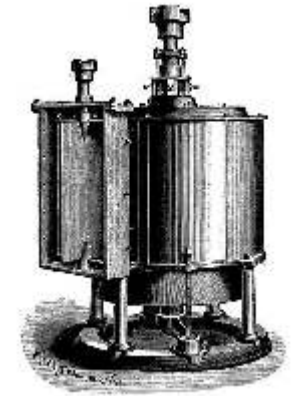


Figura 5.4 – Modelo de uma turbina de Jonval

## 5.1 – Turbinas hidráulicas

Basicamente as turbinas hidráulicas, sendo elas pequenas ou grandes, são classificadas como turbomáquinas motrizes de fluxo contínuo que operam segundo o princípio da ação ou da reação:

- Turbinas de ação:

Nas turbinas de ação, a energia hidráulica disponível é transformada em energia cinética para, depois de incidir nas pás do rotor, transformar-se em mecânica: tudo isto ocorre à pressão atmosférica. Classificam-se como turbinas de ação: as turbinas Pelton com um ou mais jatos, a turbina de Fluxo Cruzado, Michell-Banki, e a turbina Turgo.

- Turbinas de reação:

Nas turbinas de reação o rotor é completamente submerso na água. Com o escoamento da água, ocorre uma variação de pressão e de velocidade no escoamento, entre a entrada e a saída do rotor. Uma importante característica das turbinas de reação é o uso do tubo de sucção. O tubo de sucção permite a recuperação de parte da energia cinética da água que deixa o rotor. A soma da energia cinética mais a energia de pressão na saída da turbina é menor quando há o tubo de

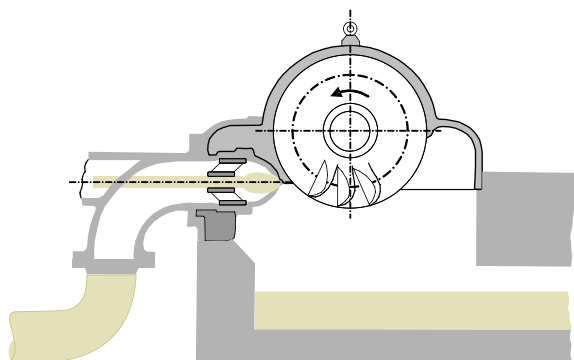


Figura 5.5 – Esquema de uma turbina do tipo Pelton de um jato

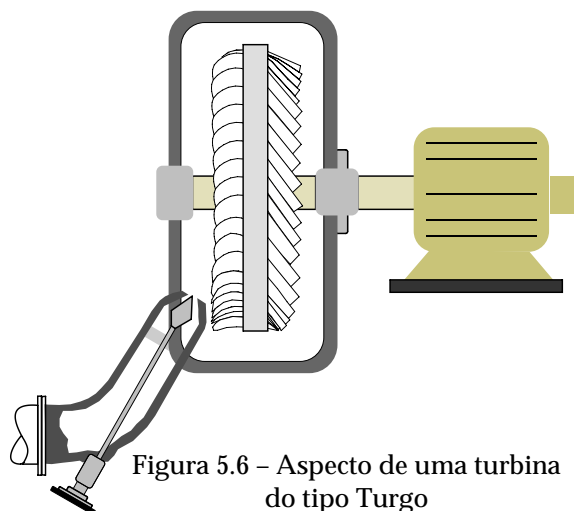


Figura 5.6 – Aspecto de uma turbina do tipo Turgo

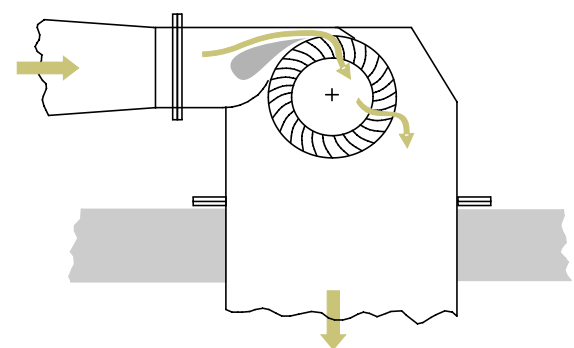


Figura 5.7 – Corte esquemático de uma turbina tipo cross flow

sucção instalado. São classificadas como turbinas de reação: a Francis, a hélice e a Kaplan, com suas variantes.

Existem diversos tipos de turbinas, cada qual adequada a um aproveitamento hidroenergético. A escolha adequada do tipo de turbina a ser utilizado num determinado aproveitamento depende de um número que é função da altura e vazão disponíveis e da rotação da máquina

- Turbinas do tipo Pelton:

As Turbinas Pelton são máquinas de ação e escoamento tangencial. Operam com altas quedas e baixas vazões. Podem ser de um jato, dois, quatro ou seis jatos e podem ser de eixo horizontal ou vertical. A energia hidráulica é transferida para o rotor pela ação do jato de água que sai do injetor e incide sobre pás bipartidas em forma de cunha. O rendimento é alto, podendo chegar até a 94%. O controle da vazão é realizado por um dispositivo chamado agulha ou injetor. As máquinas podem também possuir defletores de jato. Existem equipamentos pequenos com no máximo dois jatos e equipamentos de eixo vertical com até seis jatos.

A turbina Pelton tem um excelente comportamento a cargas parciais, sendo essa uma das justificativas deste tipo de máquina ser amplamente utilizada. Essa turbina foi desenvolvida para suprir a necessidade de construir usinas de altas quedas e baixas vazões, pois as turbinas Francis não operam bem nessas condições.

Turbinas do tipo Turgo:

Uma variante da turbina Pelton é a turbina Turgo. Nessa máquina o jato atinge as pás do rotor formando um pequeno ângulo com o eixo de rotação e a água sai por apenas um lado. Por possuir uma rotação mais elevada, se comparado a um rotor Pelton, o rotor Turgo torna o acoplamento direto ao gerador mais fácil, muitas vezes dispensando os multiplicadores de velocidade, aumentando a eficiência global total e diminuindo o custo de manutenção.

Turbinas cross flow:

As turbinas do tipo cross-flow também são conhecidas como turbinas do tipo Banki-Michell em homenagem a seus inventores. São usadas para uma larga escala de quedas e de vazões. Podem ser fabricadas para operar com descargas entre 0,02 m<sup>3</sup>/s e 10 m<sup>3</sup>/s e quedas entre 1 e 200 m. A água penetra na turbina, guiada por uma ou mais pás guias que conduzem o fluxo ao primeiro estágio do rotor. Na saída do rotor a água passa por um segundo estágio e é devolvida ao rio. É um equipamento de rendimento mais baixo, se comparado a outras turbinas, mas de custo muito acessível.

Devido às suas características específicas, estas turbinas cobrem o campo das turbinas tipo Pelton dois jatos até a Francis normal. Essa turbina mostra-se altamente indicada para ser usada em microcentrais hidrelétricas pelo baixo custo e construção simplificada.

Turbinas Francis:

As Turbinas Francis são máquinas de reação, com escoamento radial (lenta e normal) e escoamento misto (rápida). São máquinas ideais para médias vazões e quedas. O controle da vazão é realizado no distribuidor ou sistema de pás móveis.

São turbinas rigorosamente centrípetas, que permitem o uso de tubo de sucção e podem alcançar altos rendimentos, da ordem de 85 a 93%, sendo uma das mais utilizadas. Elas podem estar inseridas em uma caixa espiral, ou, em instalações de menor porte, sem caixa espiral, em caixas cilíndricas ou em um poço de caixa aberta.

Em instalações com vazões maiores, costuma-se duplicar o rotor em rotores gêmeos, que operam num mesmo eixo, cada um de um lado de uma caixa cilíndrica ou em caixas espirais separadas, ou unidos pela face anterior, inseridos em uma única caixa espiral. A esse tipo de arranjo, denomina-se turbina Francis gêmea.

O distribuidor das turbinas tipo Francis é constituído de um conjunto de pás dispostas em volta do receptor, e que podem ser orientadas por meio de um comando especial, de modo a darem, para cada valor da descarga, o escoamento com um mínimo de perdas hidráulicas. Todas as pás possuem um eixo de rotação paralelo ao eixo da turbina e, graças a um mecanismo, chamado anel de Fink, constituído por um anel concêntrico ao distribuidor e ligado a elas por bie-las, podem girar simultaneamente de um mesmo ângulo, fazendo a secção de escoamento variar de um máximo até o fechamento total.

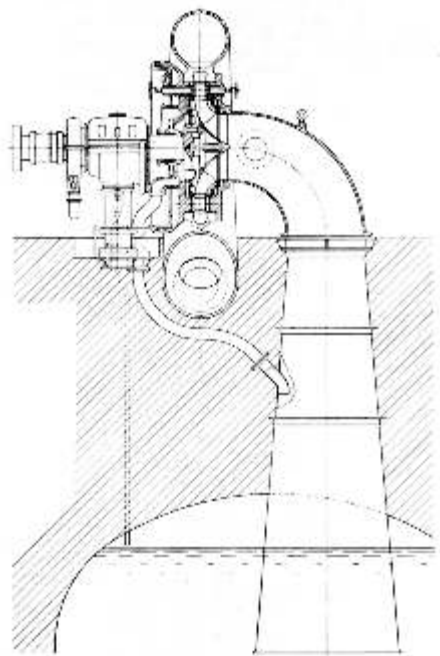


Figura 5.9 – Turbina Francis com caixa espiral

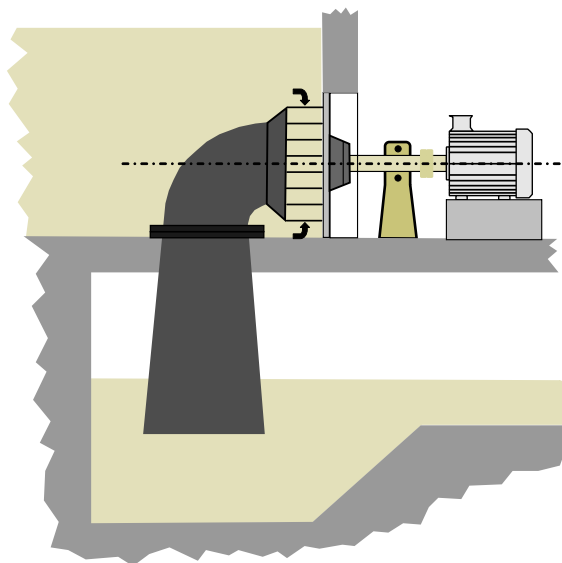


Figura 5.8 – Esquema de uma turbina Francis do tipo caixa aberta

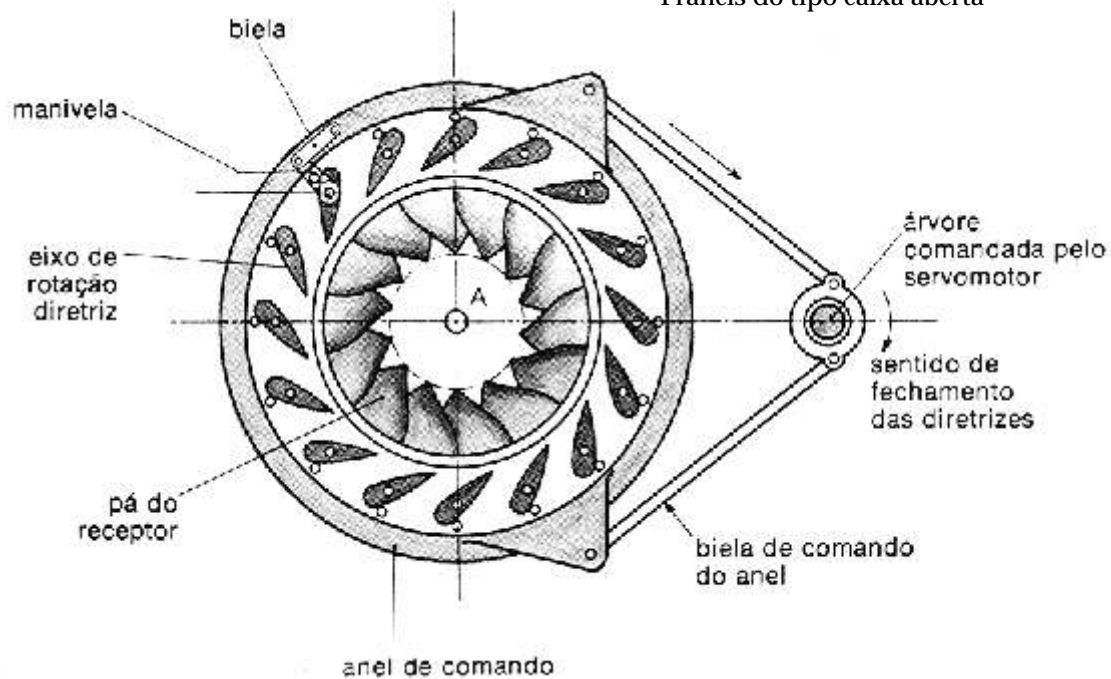


Figura 5.10 – Funcionamento do distribuidor de uma turbina Francis

### Turbinas axiais:

As turbinas axiais são caracterizadas pelo fato do fluxo escoar longitudinalmente ao eixo do rotor. Tais como as turbinas Francis, também são máquinas de reação. São máquinas que trabalham com baixas quedas e grandes vazões e, basicamente, estão divididas entre dois tipos, denominados Hélice e Kaplan.

O rotor Kaplan possui as mesmas características do rotor Hélice, exceto pelo fato de haver pás móveis que permitem a regulação da vazão através dele, o que confere a esse tipo de turbina a chamada dupla regulação. Ambos os rotores podem ser inseridos em uma caixa espiral de concreto ou de aço, em caixa aberta, ou ainda em caixa em forma de tubo, onde o escoamento se dá totalmente no sentido axial. Para esse último arranjo, dependendo da configuração do grupo gerador, se dá o nome de turbina tubular, em “S”, sifão ou bulbo. A turbina bulbo se caracteriza pelo arranjo compacto, denotado pelo uso de um rotor Kaplan acoplado ao gerador, que por sua vez é instalado no interior de um casulo inserido na água, daí o nome “bulbo”.

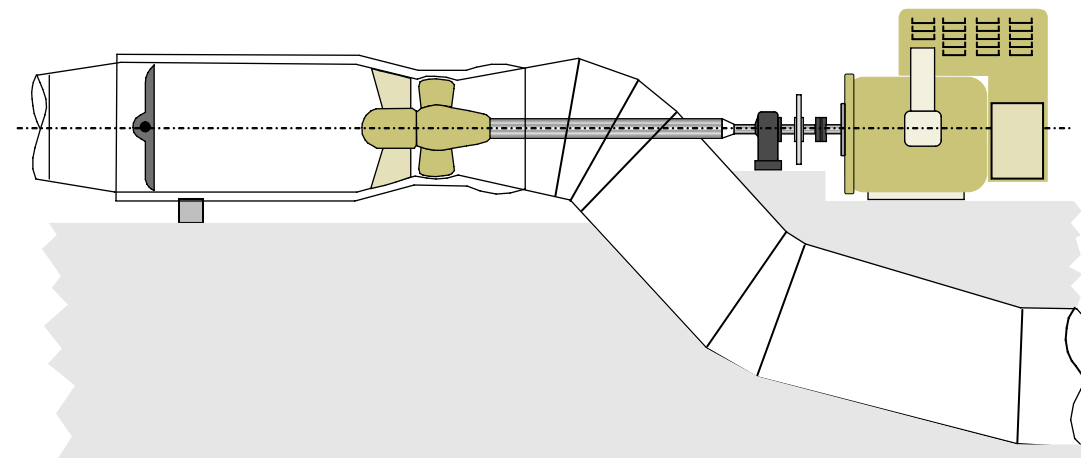


Figura 5.7 – Esquema de central hidrelétrica com turbina axial do tipo “S”

## 5.2 - Seleção das Turbinas

As turbinas hidráulicas são equipamentos cujos rendimentos dependem muito da condição adequada de operação, ou seja, o equipamento só dá bom rendimento se trabalhar nas condições para as quais foi projetado. De uma forma geral, as turbinas Pelton são mais indicadas para altas quedas, as máquinas Kaplan e Hélice são usadas em baixas quedas, e as turbinas Francis operam em quedas médias.

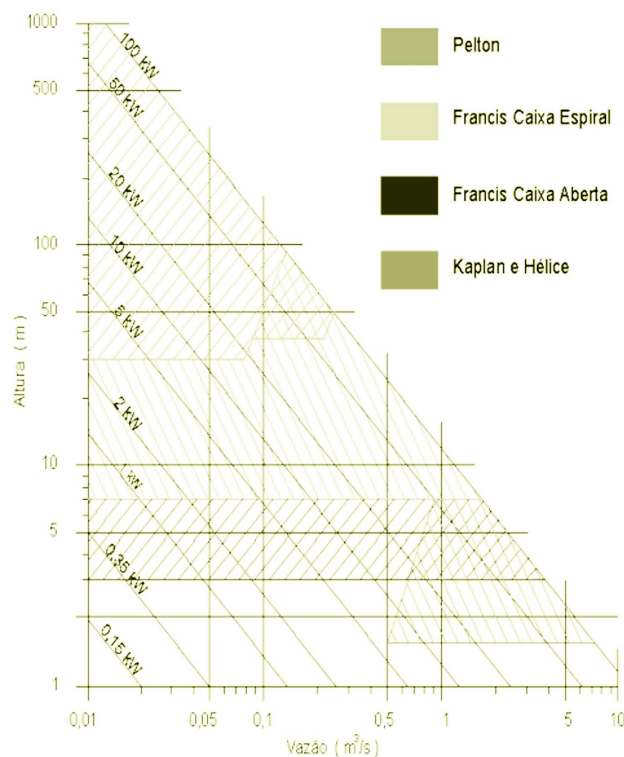


Figura 5.8 – Gráfico para seleção de turbinas apropriadas para microcentrais

Essas recomendações são muito vagas e simplistas, pois além da queda existem outros parâmetros que influenciam o desempenho do equipamento, sendo a vazão e a rotação os principais deles.

Na ocasião de um projeto, no momento da seleção de uma turbina, o ideal é contar com ajuda de técnicos experientes ou com a orientação de fabricantes com reconhecida tradição no mercado.

A Figura 5.8, mostra um gráfico que pode auxiliar a seleção do equipamento bastando conhecer a queda existente e a vazão de água disponível para cada máquina. Esse gráfico foi construído para uso em microcentrais, visto que a potência máxima é de 100 kW.

### 5.3 - Reguladores de Velocidade

Os reguladores de velocidade são necessários para manter constante a velocidade de rotação do conjunto gerador, e dessa forma, conforme vimos na cartilha de Eletricidade Básica, manter também constante a frequência de tensão gerada.

A regulação da velocidade pode ser feita ajustando-se a quantidade de água que passa pela turbina ou ainda mantendo-se constante a quantidade de água e a potência elétrica da carga conectada nos terminais do gerador. Esse segundo tipo de regulador é conhecido pelo nome de Regulador de Carga, e é adequado apenas para pequenas potências de geração, da ordem de até 20 [kW]. É constituído de um circuito eletrônico controlador que chaveia um banco de resistências de lastro, de forma a manter constante a soma entre a potência dissipada no lastro e a potência consumida pelas cargas, ou seja, a potência gerada pelo gerador.

Já os reguladores de velocidade são uma combinação de dispositivos e de mecanismos que detectam os desvios da velocidade e os convertem em uma mudança na posição de um servomotor. Quando o elemento sensor de velocidade detecta o desvio do ponto ajustado; este sinal

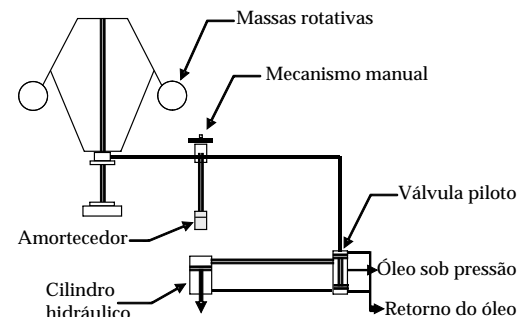


Figura 5.9 – Esquema de um regulador de velocidade hidromecânico

de desvio é convertido e amplificado para excitar um atuador, hidráulico ou elétrico, que controla o fluxo de água que passa pela turbina. Em uma turbina Francis, para reduzir o fluxo da água é necessário girar todas as pás do distribuidor, e um acionador potente é requerido, não só para superar as forças hidráulicas e de fricção, mas para manter as pás numa posição parcialmente fechada ou as fechar completamente. Diversos tipos de reguladores são disponíveis, dos puramente mecânicos aos hidromecânicos e os eletrohidráulicos. O regulador puramente mecânico é usado somente com as turbinas de menor potência em função de suas limitações de força e tempo de resposta muito longo.

### 5.4 - Geradores Elétricos

Os geradores são encarregados de transformar a energia mecânica, fornecida pela turbina, em energia elétrica. São máquinas de rendimento elevado, da ordem de 85 a 90% para a faixa de potência das microcentrais. A grande maioria dos geradores utilizados em microcentrais é do tipo síncrono, embora possam ser também utilizados geradores de indução, que na verdade são motores de indução operando como geradores. Nesse caso é necessário acoplar ao motor um banco de capacitores que será responsável pela formação do campo magnético necessário para a geração de energia elétrica (vide cartilha Eletricidade Básica). Além disso é necessário um dispositivo que permita o controle da velocidade, normalmente, nesse caso, um regulador de carga. Os geradores de indução apresentam custo inicial e de manutenção menor, embora sua eficiência seja de 2 a 4 % inferior à dos geradores síncronos.

Os geradores síncronos são mais caros do que geradores assíncronos e são usados nos sistemas onde a potência da carga representa uma proporção substancial da potência do gerador. Para funcionarem, os geradores síncronos precisam de um sistema de excitação, responsável pela produção do campo magnético necessário para a geração de tensão.

Os geradores de menor potência são do tipo autoregulado, nos quais a energia para excitação provém de uma amostra da própria tensão gerada. Esse sistema de excitação possui baixo custo, porém é o de pior desempenho. Uma segunda opção para a excitação é a utilização de máquinas auxiliares rotativas, acopladas no mesmo eixo do gerador principal, que podem ser de corrente contínua ou de corrente alternada do tipo síncrona. As excitatrizes do tipo máquina de corrente contínua necessitam de manutenção freqüente e além disso é necessária a utilização de

anéis e escovas para alimentação do campo da máquina principal. Já a opção pelas excitatrizes síncronas permite reduzir a frequência de manutenção e dispensa o uso de anéis e escovas para alimentação do campo da máquina principal. Esse é o motivo delas serem chamadas de excitatrizes sem escovas (brushless).

Em se tratando do nível de potência das microcentrais, é normal a opção por geração em baixa-tensão, geralmente no nível de 220/127 [V], que é a tensão padronizada da maioria dos equipamentos elétricos e eletrônicos existentes. No caso de geração para suprimento de máquinas agrícolas de grande porte ou similares, e no caso das distâncias entre a geração e a carga serem grandes, podem ser utilizadas tensões maiores, como 380 [V] e 440 [V]. É possível utilizar geradores em média tensão (2.200 [V], 4.000 [V]), porém raramente necessário, a menos que se opte por gerar nessa tensão para possibilitar o transporte a distâncias maiores, dispensando assim o uso de transformadores elevadores, utilizando apenas transformadores abaixadores. Nesse caso o custo do gerador sobe e é necessário um maior cuidado do ponto de vista da segurança dos operadores.

### 5.5 - Chaveamento e Proteção

Deve ser instalado entre o gerador e a carga, ou entre o gerador e o transformador, um equipamento de manobra que permita a ligação e o desligamento manual do gerador, bem como seu desligamento automático no caso de sobrecarga ou curto-circuito.

No caso de microcentrais utiliza-se normalmente disjuntores de baixa-tensão em caixa moldada, que são equipamentos robustos, e que apresentam boa segurança operacional e baixo custo. A corrente nominal do disjuntor deve ser igual ou ligeiramente superior à corrente nominal do gerador.

### 5.6 - Transformadores Elevadores

Se a distância entre o gerador e as cargas for grande devem ser utilizadas tensões de transmissão mais elevadas, de forma a reduzir a corrente e conseqüentemente as perdas e as quedas de tensão. Para elevação da tensão são utilizados os transformadores, cujo princípio de funcionamento foi discutido na cartilha Eletricidade Básica.

Na caso das microcentrais deve-se dar preferência à utilização de transformadores com tensão secundária de 13.800 [V], que é uma tensão padronizada de grande utilização, o que faz com que existam diversos fabricantes no Brasil, não só para o transformador, como também para os demais componentes necessários como chaves, pára-raios, isoladores, ferragens, entre outros. Essa variedade de fabricantes faz com que o preço desses componentes seja mais baixo do que aqueles dos equipamentos para tensões não tão usuais.

Esses transformadores são construídos para instalação ao tempo, o que permite que sejam montados em um poste no lado externo da casa de máquinas, proporcionando uma instalação simples, barata e segura.

É claro que, se são usados transformadores para elevar os níveis de tensão, é necessário utilizar também transformadores abaixadores, que reduzem novamente os níveis de tensão para valores compatíveis com as dos equipamentos eletroeletrônicos.

A avaliação da necessidade de uso de transformadores elevadores deve ser feita para cada caso, considerando os valores de potência a transmitir e a distância. De forma geral, no entanto, quando as distâncias são maiores do que 1.000 [m] torna-se viável realizar a transmissão em níveis de tensão elevados.

### 5.7 - Linha de Transmissão

A linha de transmissão é responsável pelo transporte da energia gerada até o ponto de consumo. No caso de linhas aéreas de transmissão, tanto em baixa-tensão quanto em média-tensão, deve ser dada preferência pela utilização de cabos de alumínio nu, que são mais baratos e mais leves.

A bitola do cabo deve ser escolhida em função da corrente nominal e da queda de tensão. No caso de potências muito pequenas, a bitola do cabo pode resultar muito pequena, o que implica em pequena resistência mecânica do condutor. Nesses casos o critério de especificação passa a ser a resistência mecânica. De forma geral não devem ser especificados condutores com bitola inferior a 10 [mm<sup>2</sup>].



### 5.7 – Aplicações

- 1) Fazer uma pesquisa procurando saber se na sua região existem pessoas aptas a fabricar ou fazer a manutenção em turbinas hidráulicas.
- 2) Usando o gráfico da figura 5.8 selecionar uma turbina hidráulica para um aproveitamento hidrelétrico com uma vazão de 0,1 m<sup>3</sup>/s e queda de 30 m.

Solução:

De acordo com o gráfico 5.8 a turbina mais adequada seria uma turbina do tipo Francis com caixa espiral. A potência aproximada da turbina seria de 20 kW.

- 3) Explicar porque, em alguns casos, devem ser utilizados transformadores elevadores de tensão nas linhas de transmissão.



# Capítulo 6

## Considerações Finais

As microcentrais produzem impacto ambiental muito reduzido, são de fácil operação e exigem pouca manutenção, além de apresentarem elevada vida útil.

Embora seu custo de instalação possa ser superior ao de outras opções, como por exemplo grupos geradores Diesel, o fato de não ser necessário nenhum combustível e a baixa manutenção permitem um rápido retorno do investimento, principalmente nos casos em que a energia é utilizada em um processo produtivo qualquer.

Os fabricantes brasileiros possuem tecnologia e capacidade adequada para fabricação de todos os componentes das microcentrais, a custos competitivos.

Por esses e outros motivos, as microcentrais são uma opção interessante para fornecimento de energia elétrica para locais isolados e áreas rurais.

## Bibliografia

MME, DNAEE, ELETROBRÁS “Manual de Microcentrais Hidrelétricas” 1985

MACINTYRE, A.J. “Máquinas Motrizes Hidráulicas”, Livros Técnicos e Científicos Editora, Rio de Janeiro, 1990.

EUROPEAN SMALL HYDROPOWER ASSOCIATION “Layman's Handbook on How to Develop a Small Hydro Site” 1998

CEPEL, ELETROBRÁS “Manual de Aplicação de Sistemas Descentralizados de Geração de Energia Elétrica para Projetos de Eletrificação Rural – Pequenas Centrais Hidrelétricas” 2000

THE BRITISH HYDROPOWER ASSOCIATION “A Guide to UK Mini-hydro Developments” 2005.

### Links da Internet:

British Hydropower Association:	<a href="http://www.british-hydro.org">www.british-hydro.org</a>
European Small Hydropower Association:	<a href="http://www.esha.be">www.esha.be</a>
Portal sobre microcentrais hidrelétricas:	<a href="http://microhydropower.net">microhydropower.net</a>
CERPCH:	<a href="http://www.cerpch.unifei.edu.br">www.cerpch.unifei.edu.br</a>