

Turbinas Hidráulicas e Condutos Forçados

Antonio Simões Costa

Março, 2003

1. Introdução

A geração de energia hidrelétrica faz uso de turbinas hidráulicas que acionam diretamente os hidrogeradores. Três tipos de turbinas são largamente utilizadas, dependendo das condições locais da usina, e em particular da altura da água em relação ao nível da turbina: turbinas *Pelton* ou *de impulso*, turbinas *Francis* ou *de reação* e turbinas *Kaplan* ou *de hélice*. Todas elas aproveitam a energia da água armazenada em um reservatório cujo nível é consideravelmente elevado em relação ao nível da turbina. A água é conduzida até a turbina através de um tubulação chamada *conduto forçado*, sendo posteriormente descarregada via conduto de sucção em um curso d'água abaixo da turbina.

Nas seções seguintes, serão descritos cada um dos tipos de turbinas acima mencionados, bem como o conduto forçado e instalações a ele associadas.

2. Turbinas Pelton ou de Impulso

A turbina Pelton ou de impulso é geralmente utilizada em usinas cuja altura d'água é maior do que 250 m, embora seja também utilizada para alturas menores. Há instalações nos Alpes europeus onde a altura chega a quase 1.800 m.

As turbinas de impulso são geralmente de eixo horizontal, com o gerador montado ao lado da turbina. O rotor da turbina é acionado direcionando-se o fluxo d'água contra as pás através de injetores, de modo a tirar proveito da grande quantidade de movimento da água. A Fig.2.1 mostra esquematicamente uma turbina Pelton em que um único injetor é utilizado (embora múltiplos injetores possam ser usados para direcionar a água em direção às pás). É também indicado na figura um dispositivo extrator para drenar a água das pás quando estas se movimentam no sentido ascendente, de modo a aumentar a eficiência da unidade.

A regulação de velocidade de turbinas Pelton é realizada ajustando-se o fluxo de água nos injetores através de válvulas de agulha que podem ser deslocadas longitudinalmente a fim de variar a abertura do injetor. A Fig. 2.2 ilustra este esquema, que pode ser comparado à regulagem do fluxo de água em certos tipos de mangueiras de jardim. O ajuste da válvula de agulha se presta a variações relativamente pequenas na vazão d'água e conseqüentemente na potência da turbina. Este esquema não se presta a grandes variações súbitas de vazão, contudo, já que turbinas de impulso são utilizadas para grandes alturas e condutos forçados longos. A razão para isto é que uma variação súbita de vazão provoca o fenômeno conhecido como *golpe de aríete*. Este consiste em uma onda de pressão viajante que se desloca ao longo do conduto forçado, com potencial de causar danos nesta

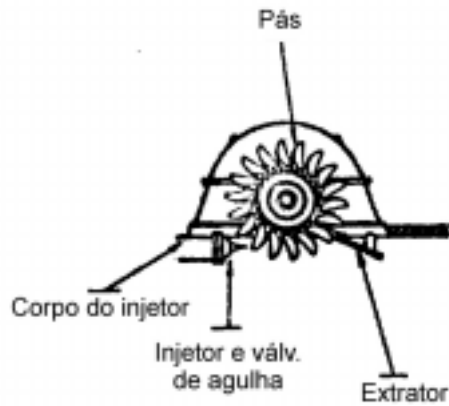


Figura 2.1: Turbina Pelton

tubulação. Conseqüentemente, outros meios devem ser usados para defletir a água das pás da turbina enquanto o injetor é fechado lentamente. Uma maneira de realizar isto é via defletores do jato d'água, conforme indicado nas Figs. 2.2 e 2.3. Verifica-se portanto que o regulador de velocidade de uma turbina de impulso deve controlar a válvula de agulha do injetor para variações normais, mas deve também responder a uma rejeição de carga deslocando rapidamente a placa defletora do jato d'água.

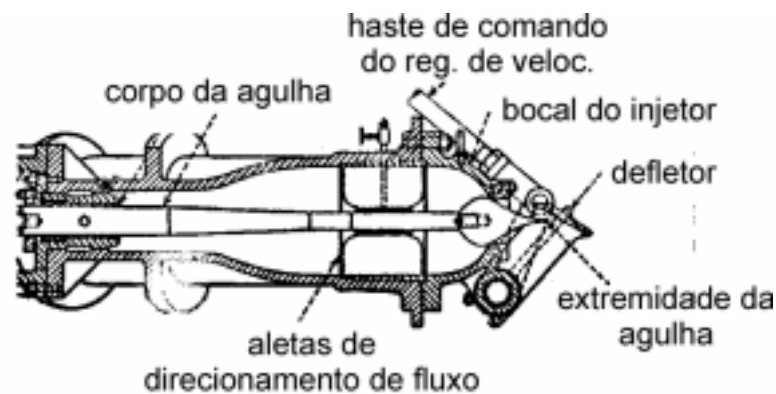


Figura 2.2: Injetor e válvula-agulha de uma turbina Pelton.

Em turbinas de impulso, a queda total de pressão da água ocorre no injetor, não havendo queda de pressão quando o jato d'água entra em contato com as pás. Toda a energia de entrada cedida ao eixo deve-se à energia cinética da água, que é transformada no trabalho mecânico de acionar o eixo ou é dissipada sob a forma atrito. Idealmente, a velocidade da água é reduzida a zero depois que ela incide sobre as pás da turbina. Na prática, porém, um resíduo de energia cinética ainda permanece, a qual é perdida quando a água é defletida para o duto de sucção.

A potência da água na saída do injetor, em KW é dada por:

$$P_{inj} = K H Q \quad (2.1)$$

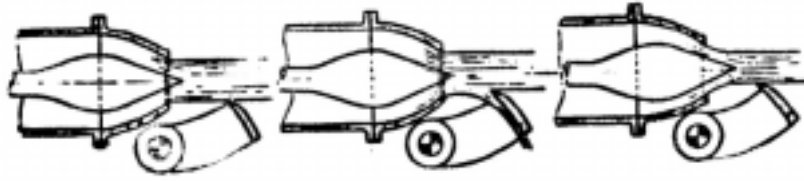


Figura 2.3: Ação de desvio do fluxo de água pelo defletor.

onde K é uma constante que depende das características da água e da geometria da abertura do injetor, H é a altura da água em metros e Q é a vazão, em m^3/s . Se η_t é o rendimento da turbina, a potência entregue ao eixo da turbina será dada por:

$$P_t = K H Q \eta_t \quad (2.2)$$

O máximo rendimento da turbina de impulso situa-se entre 80 e 90 %. A vazão Q depende da velocidade da água, da altura e do coeficiente do injetor. Se A é a área do jato d'água no injetor e V é a velocidade do jato, temos que:

$$Q = A V m^3/s \quad (2.3)$$

3. Turbinas Francis ou de Reação

Nas turbinas de impulso, a alta pressão no conduto forçado se transforma em quantidade de movimento, de modo que não ocorre queda de pressão na turbina. Na turbina de reação, por outro lado, uma parte da queda de pressão ocorre no injetor e o restante se dá na própria turbina. Consequentemente, a água ocupa completamente a cavidade ocupada pelo rotor e, ao fluir por ela, transfere tanto a energia de pressão quanto a energia cinética às pás do rotor. Como todas as pás da turbina são envolvidas neste processo de transferência de energia, o diâmetro de uma turbina de reação é menor do que de uma turbina de impulso de capacidade equivalente.

A maior parte das turbinas de reação em uso corrente são do tipo de fluxo radial, conhecidas como turbinas Francis. Neste projeto, a água sob pressão entra em um condutor em espiral (“caracol”) que circunda as pás móveis e flui através de pás fixas na direção radial para o interior da turbina. A água então passa pelo rotor no sentido descendente, exercendo pressão contra as pás móveis, desta forma acionando o rotor da turbina. O gerador normalmente é acionado pelo próprio eixo da turbina, conforme mostrado na Fig. 3.1. Encontram-se turbinas de reação tanto de eixo horizontal quanto de eixo vertical, porém este último arranjo é muito mais comum. O projeto de turbinas Francis é bastante versátil, sendo aplicável a instalações com alturas de queda desde menos de 10 m até cerca de 250 m .

O controle para uma turbina de reação é exercido sob a forma de aletas-guia móveis, chamadas coletivamente de *Distribuidor*, por onde a água flui antes de alcançar o rotor da turbina. A posição do distribuidor pode fazer com que a água tenha uma velocidade tangencial quando passa pelo rotor da turbina. Nesta posição, que corresponde normalmente a 80 – 90 % da abertura total, o rotor operará em sua máxima eficiência. Em qualquer outra posição do distribuidor, uma parte da energia é perdida devido a uma angulação

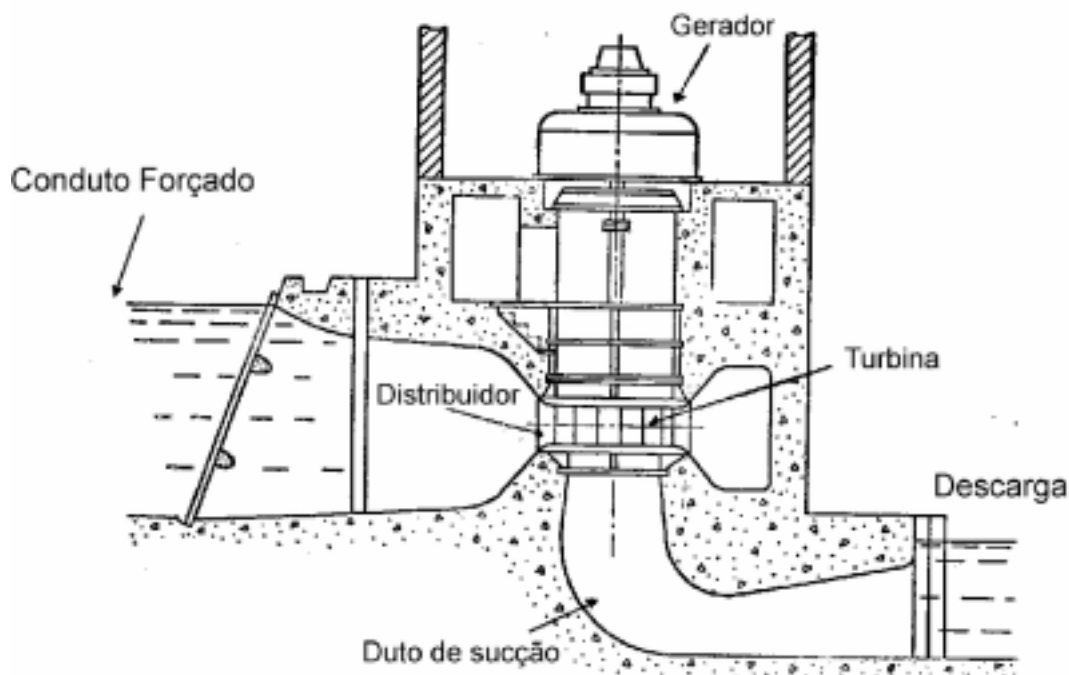


Figura 3.1: Arranjo típico de uma turbina Francis de eixo vertical.

menos eficiente do fluxo de água. Por mais que o distribuidor seja bem projetado, não é incomum que ocorram vazamentos na posição completamente fechada, já que o mesmo está sujeito à pressão integral do conduto forçado. Por isso uma válvula de fechamento é frequentemente instalada a montante da turbina para permitir o desligamento total da unidade.

O duto de sucção é uma parte integral e importante da turbina de reação, e tem duas finalidades: permite que o rotor da turbina fique acima do nível de descarga, e reduz a velocidade de descarga de modo a reduzir as perdas de energia cinética. Na Fig. 3.1, o duto de sucção é o tubo encurvado a 90° abaixo do rotor da turbina.

A importância do duto de sucção torna-se evidente quando se considera a energia da água que deixa o rotor. Em alguns projetos, esta energia pode ser de cerca de 50% da energia total disponível. Sem o duto de sucção, esta energia cinética seria perdida. Contudo, com o duto de sucção completamente vedado ao ar, forma-se um vácuo parcial devido à alta velocidade da água. Esta baixa pressão tende a aumentar a queda de pressão nas pás do rotor, aumentando assim a eficiência global da turbina.

As mesmas fórmulas (2.1) a (2.3) desenvolvidas para turbinas de impulso se aplicam igualmente a turbinas de reação.

O controle de velocidade de uma turbina de reação é feito mediante a alteração da posição do distribuidor. As comportas do distribuidor são defletidas simultaneamente através da rotação de um “anel de comando” no qual cada comporta está articulada. A força necessária para movimentar este conjunto é considerável, sendo usualmente necessário o uso de dois servomotores para este fim.

Um segundo dispositivo de controle usado em turbinas de reação é o regulador de pressão ou válvula de alívio, que é uma válvula acionada pelo anel de comando do distribuidor. Se há uma rejeição brusca de carga e o distribuidor é fechado muito rapidamente em resposta ao comando do regulador de velocidade, o regulador de pressão é aberto rapidamente. Isto evita a ocorrência de golpe de aríete contra o distribuidor. O regulador de pressão em seguida fecha lentamente para levar a água ao repouso de forma gradual.

4. Turbinas Kaplan

A turbina do tipo hélice é na verdade uma turbina de reação, pois utiliza uma combinação de pressão e velocidade da água para acionar o eixo. No entanto, ela emprega a velocidade da água em maior grau do que a turbina Francis.

A vantagem da turbina do tipo hélice com pás ajustáveis desenvolvida por Kaplan em 1919 é o alto rendimento sobre um espectro de alturas de queda e aberturas do distribuidor. Tanto a abertura do distribuidor quanto o ângulo das pás podem ser ajustados com a unidade em funcionamento. Isto permite otimizar a eficiência da turbina sobre uma larga faixa de condições de operação. As figuras 4.1 e 4.2 ilustram as diferenças entre os rotores das turbinas Francis e Kaplan.

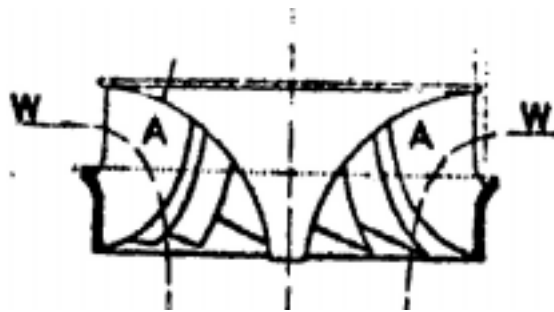


Figura 4.1: Rotor de turbina Francis. As aletas do rotor são identificada por “A” e o fluxo de água por “W”.

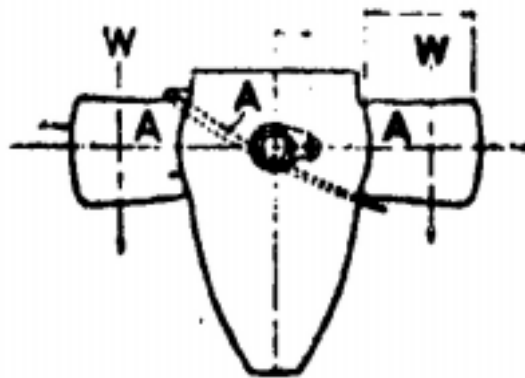


Figura 4.2: Rotor de turbina Kaplan. As aletas do rotor são identificada por “A” e o fluxo de água por “W”.

As turbinas Kaplan são usadas em instalações com alturas de queda de 15 m a 60 m. Comparada à turbina Francis, as unidades Kaplan operam a velocidades mais altas para uma mesma altura de queda. A velocidade da água através da turbina também é maior. O projeto do duto de sucção é igualmente importante nas aplicações da turbina Kaplan.

O ângulo das pás do rotor é ajustado através de um servomotor hidráulico, usualmente instalado no núcleo do rotor. Os rotores têm em geral de quatro a seis pás, embora um número maior de pás possa ser utilizado para alturas de queda maiores. A relação correta entre ângulo das pás do rotor e a vazão de água admitida pelo distribuidor da turbina é determinada por um mecanismo de cames operadas por um servomotor, que por sua vez é comandado a partir do regulador de velocidade. Quando se exige desempenho ótimo sobre uma larga faixa de alturas de água no reservatório, vários mecanismos como este podem ser necessários, de modo a compensar as variações de altura de água em cada período de tempo considerado. Esta flexibilidade é particularmente vantajosa quando ocorrem variações sazonais significativas na altura d'água.

A posição das pás do distribuidor, que controlam o fluxo de água de entrada para a turbina, pode ser ajustada em conjunto com as angulação das pás do rotor, com o objetivo de assegurar máxima eficiência de operação.

A Fig. 4.3 mostra uma comparação qualitativa de desempenho entre turbinas Kaplan, Francis e turbinas de hélice sem controle da posição das pás do rotor. Observa-se que as turbinas Kaplan têm condições de manter uma boa eficiência sobre uma faixa bem mais ampla de condições de operação que as demais. A diferença de desempenho é particularmente acentuada com relação à turbina de hélice com pás fixas no rotor.

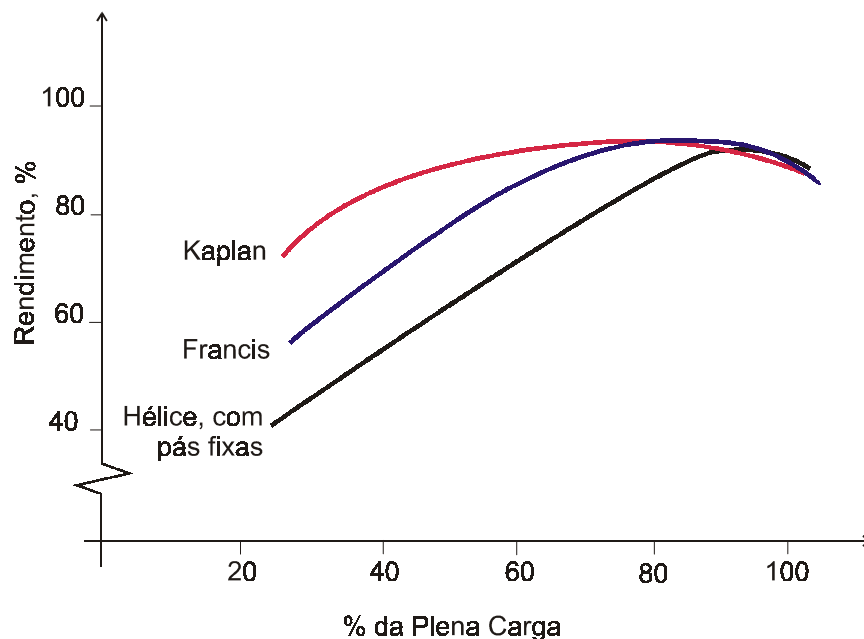


Figura 4.3: Comparação de desempenho da turbina Kaplan com outros tipos de turbina.

O aumento de eficiência das turbinas Kaplan implica em custos adicionais. Os custos de fabricação são mais elevados, assim como os custos de manutenção. O equipamento de operação da turbina é mais complexo e há uma redução de confiabilidade quando se faz a comparação com turbinas de fluxo axial de pás fixas.

Tradicionalmente o eixo de uma turbina Kaplan é vertical, porém existem projetos de eixo horizontal. Estes últimos são adequados para máquinas de baixa potência operando com alturas de queda muito pequenas. Este tipo de turbina é empregado em usinas maré-motrizes na França, por exemplo.

5. Conduitos Forçados e Chaminés de Equilíbrio

No que se segue, será suposto que o volume do reservatório da usina hidrelétrica é suficientemente grande para que a altura de queda possa ser considerada constante durante os períodos de interesse para análise de controle. Em outras palavras, a fonte de água será considerada como um “barra infinita”.

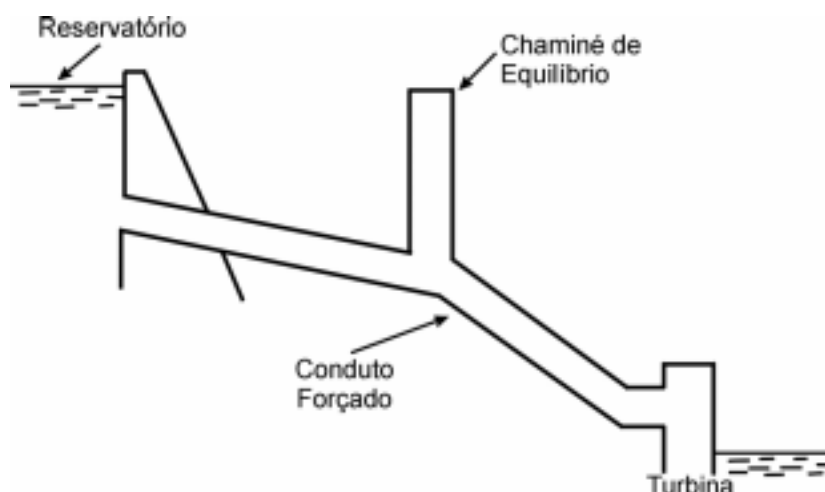


Figura 5.1: Conduto forçado e chaminé de equilíbrio.

A água é conduzida do reservatório para a turbina através do conduto forçado. O fluxo de água através do conduto forçado provoca uma perda de carga, cujo efeito é equivalente a uma redução na altura de queda.

Um dos problemas mais sérios associados ao projeto e operação de condutos forçados é o fenômeno do golpe de aríete. Este é definido como a variação em pressão, acima ou abaixo da pressão normal, causada por súbitas variações na vazão no conduto forçado. Em seguida a uma rápida variação da carga elétrica, o regulador de velocidade reage, provocando a abertura ou o fechamento do distribuidor. Isto faz com que uma onda de pressão percorra o conduto forçado, a qual pode provocar grandes esforços sobre suas paredes. A onda de pressão é refletida no outro extremo do conduto forçado e oscila ao longo do mesmo até ser amortecida por efeito do atrito. Em consequência, as paredes do conduto forçado deve ser bem reforçadas não apenas próximo à turbina, mas em toda sua extensão.

O fenômeno de golpe de aríete pode causar violentas oscilações de pressão que podem interferir com a operação da turbina. O regulador de pressão auxilia no controle do golpe de aríete positivo (onda viajando no sentido distribuidor-reservatório) mas não alivia o golpe de aríete negativo (em sentido contrário).

Para condutos forçados longos, costuma-se utilizar um dispositivo chamado *chaminé de equilíbrio* para aliviar tanto o golpe de aríete positivo quanto o negativo. Trata-se de

uma espécie de tanque localizado em um dado ponto do conduto forçado (ver Fig. 5.1). Para máxima eficiência, a chaminé de equilíbrio deveria estar o mais próximo possível da turbina. Porém, como deve ser suficientemente alta para resistir a golpes de aríete positivos sem transbordar, ela é geralmente instalada no início da descida mais inclinada do conduto forçado. A chaminé de equilíbrio deve ser alta o suficiente para evitar que ar seja sugado para dentro do conduto forçado.