

Universidade Federal de Juiz de Fora
Faculdade de Engenharia
Graduação em Engenharia Elétrica

Arlon de Moraes Melo

Estudos hidrelétricos: análise sobre teoria e prática aplicada

Juiz de Fora
2019

Arlon de Moraes Melo

Estudos hidrelétricos: análise sobre teoria e prática aplicada

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora, na área de concentração em Sistema de Energia, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Israel Filipe Lopes

Juiz de Fora

2019

Arlon de Moraes Melo

Estudos hidrelétricos: análise sobre teoria e prática aplicada

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora, na área de concentração em Sistema de Energia, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovado em: 03 de Dezembro de 2019.

BANCA EXAMINADORA

Dr. Eng. Israel Filipe Lopes - Orientador
Universidade Federal de Juiz de Fora

Dr. Eng. Cristiano Gomes Casagrande
Universidade Federal de Juiz de Fora

RESUMO

A principal fonte de energia elétrica do Brasil, sempre predominante na matriz energética do país já há muitos anos é a energia hidrelétrica. Com o crescente aumento da demanda de energia, torna-se indispensável um estudo mais detalhado desse tipo de aproveitamento, visando o melhor entendimento da fonte de energia, propiciando aumento na eficiência e otimização dos recursos hídricos disponíveis. O aproveitamento eficiente do potencial de geração de energia elétrica influencia diretamente no desenvolvimento do país, já que um dos maiores desafios mundiais é conseguir atender à crescente demanda de energia. Este trabalho traz um estudo teórico sobre o funcionamento das hidrelétricas, desde o potencial hidráulico disponível até a geração de energia, passando pelos principais equipamentos presentes em uma usina, seu funcionamento, os fundamentos teóricos por trás de cada etapa de geração e formas usuais de se projetar equipamentos de forma a se obter a maior eficiência. Por fim, são feitos alguns estudos de caso, em usinas reais, com o intuito de se observar a validade dos conceitos apresentados na parte teórica, assim como identificar, de forma básica, como é feito o projeto de usina.

Palavras-chave: Geração hidráulica, Aproveitamento energético, Usina hidrelétrica

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	7
1.1 MOTIVAÇÃO	7
1.2 OBJETIVOS.....	7
2 ENERGIA HIDRÁULICA	8
2.1 ALTURA DE QUEDA	8
2.2 VAZÃO DE UM APROVEITAMENTO	12
3 HIDRELÉTRICAS	13
3.1 TIPOS DE APROVEITAMENTO HIDRELÉTRICO	19
3.2 SISTEMA TURBINA-GERADOR	20
3.3 GERADOR.....	21
3.4 TURBINAS.....	22
3.4.1 TURBINAS DE AÇÃO.....	22
3.4.2 TURBINAS DE REAÇÃO.....	24
3.4.3 ESCOLHA DA TURBINA	27
3.5 DIÂMETRO DA TUBULAÇÃO	30
4 ESTUDOS DE CASO	31
4.1 ITAIPU BINACIONAL	31
4.2 USINA HIDRELÉTRICA A	33
4.3 USINA HIDRELÉTRICA B	35
4.4 USINA HIDRELÉTRICA C	38
4.5 USINA HIDRELÉTRICA DE HENRY BORDEN	40
4.6 USINA HIDRELÉTRICA DE PICADA.....	42
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	46
5.1 TRABALHOS FUTUROS	46

INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

Na grande maioria dos países, os padrões de produção e consumo de energia são baseados em combustíveis fósseis. Porém, isso não ocorre no Brasil, onde as condições tanto de relevo quanto de clima são bastante favoráveis ao aproveitamento hidrelétrico, principal fonte de energia elétrica do país.

O sistema elétrico brasileiro opera de forma coordenada, de modo a minimizar os custos globais de produção de energia. Por ser a principal fonte de energia elétrica do país, o governo, juntamente com institutos de pesquisa e desenvolvimento, vem investindo na automação de usinas hidrelétricas, com o intuito de minimizar os custos de operação, melhorar a produtividade, qualidade e segurança.

O aproveitamento eficiente do potencial de geração de energia elétrica influencia diretamente no desenvolvimento do país, já que um dos maiores desafios mundiais é conseguir atender à crescente demanda de energia.

Sendo um país privilegiado por seu imenso potencial hidrelétrico, a matriz de energia elétrica brasileira foi, ao longo dos anos, sendo moldada à base de grandes usinas hidrelétricas. Em decorrência dessa demanda, alguns pontos são de suma importância quando se trata de uma usina hidrelétrica, como os melhores equipamentos a serem utilizados de forma que o processo de geração seja eficiente, a melhor localização para a usina, o tipo certo de usina para um melhor aproveitamento, entre outros.

1.2 OBJETIVOS

Os principais objetivos deste trabalho são mostrar a importância das usinas hidrelétricas, como ocorre o processo de transformação de energia hidráulica em energia elétrica, os princípios teóricos correspondentes e os principais equipamentos presentes em uma usina.

Serão verificadas as etapas de dimensionamento de alguns aproveitamentos hidrelétricos existentes no Brasil, através da análise da teoria presente na literatura técnica e da realização de estudos de caso de hidrelétricas em funcionamento, onde serão calculados os potenciais aproveitamentos e os equipamentos que melhor se adequam àquelas situações, de forma a comparar os aspectos teóricos estudados com a realidade das usinas.

2 ENERGIA HIDRÁULICA

A energia potencial da água está relacionada a dois fatores principais, a altura de queda da usina, que é a diferença entre o nível do reservatório e o nível do rio a jusante e a vazão turbinada do aproveitamento. Com essas duas informações determina-se a capacidade de geração de energia do aproveitamento, o tipo de turbina a ser empregada, o tipo de barragem e o reservatório (ANEEL, 2008).

Com estes dois dados, calcula-se, de forma ideal, a potência hidráulica do aproveitamento [1]:

$$P = \gamma \cdot Q \cdot H \quad (2.1)$$

Em que:

P: Potência hidráulica do aproveitamento, em W;

γ : peso específico do fluido, em N/m³, no caso da água, 9810N/m³;

Q: vazão do aproveitamento, em m³/s;

H: altura de queda disponível, em m.

2.1 ALTURA DE QUEDA

A altura disponível para um aproveitamento é calculada considerando as perdas de carga existentes e os efeitos da canalização através da seguinte relação (SIMONE, 2010):

$$H = H_{top} - \sum H_p \quad (2.2)$$

Em que:

H: altura disponível do aproveitamento, em m;

H_{top}: altura topográfica, em m;

H_p: perda de carga, em m.

As perdas de carga são as perdas energéticas que ocorrem durante todo o processo de geração de energia, iniciando na adução do fluido de trabalho e

finalizando na restituição do mesmo ao curso d'água. A exemplo de tais perdas, têm-se (SIMONE, 2010):

- Perdas no conduto forçado;
- Perdas no canal livre ou adução;
- Perdas no bocal da tomada d'água;
- Perdas por aceleração no reservatório;
- Perdas nas grades de proteção do sistema de adução;
- Perdas nos trilhos das comportas.

Essas perdas de carga podem ser calculadas de diversas formas, através de inúmeras equações empíricas encontradas na literatura que atendem a condições energéticas específicas do fluido. Alguns exemplos, são as fórmulas de Scobey e Hazen-Williams (SIMONE, 2010). De acordo com Pereira (2015) as perdas de carga em sistemas de adução e restituição geralmente estão entre 2 % e 5 % da altura topográfica.

As perdas de carga ocorrem de duas formas, podendo ser distribuídas, quando ocorrem ao longo do trecho da tubulação onde não há variação de velocidade, como em condutos forçados e tubos de sucção, ou localizadas, quando ocorrem em elementos especiais da tubulação, como curvas, conexões e válvulas por exemplo (SIMONE, 2010)

Em uma tubulação, calcula-se a velocidade de escoamento da seguinte forma:

$$V = \frac{Q}{A} \quad (2.3)$$

Em que:

V: velocidade de escoamento, em m/s;

Q: vazão do aproveitamento, em m³/s;

A: área do conduto, em m²

As perdas predominantes acontecem nos condutos forçados e uma das maneiras de calculá-las é através da fórmula de Scobey:

$$J = 410 * K_S * \frac{V^{1,9}}{Dh^{1,1}} \quad (2.4)$$

Em que:

J: perda de carga, em m/km;

Ks: coeficiente de Scobey, que vale 0,32 para tubulações de aço-carbono, 0,34 para cimento amiantado e 0,38 para concreto armado;

V: velocidade média de escoamento, em m/s;

Dh: diâmetro hidráulico, em cm.

Finalmente, tem-se:

$$\Delta H = J * L \quad (2.5)$$

Em que:

ΔH : perda de carga, em m;

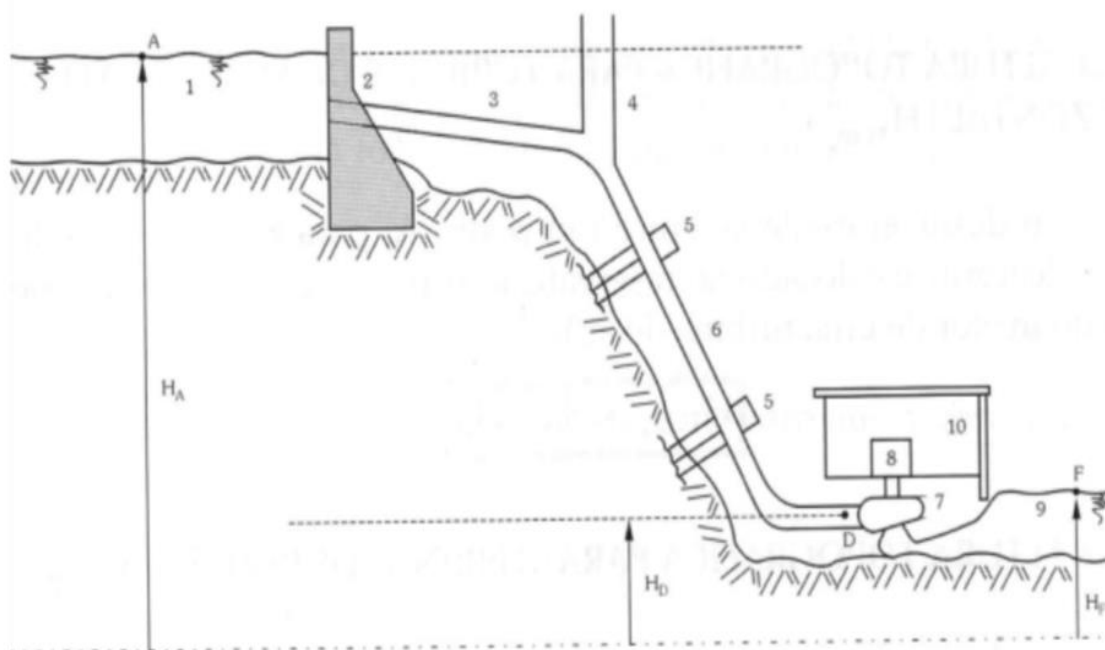
J: perda de carga, em m/km;

L: comprimento do conduto, em m.

Em um aproveitamento hídrico, desprezando as perdas de carga e supondo canalização ideal, a altura disponível para se utilizar em um aproveitamento hidroenergético é determinada pela altura topográfica.

Na figura 1 pode ser observada a altura topográfica:

Figura 1 - Altura Topográfica



Fonte: (SIMONE, 2010)

A altura topográfica é definida como:

- Para turbinas de ação:

$$H_{top} = H_a - H_d \quad (2.6)$$

Em que:

H_{top} : altura topográfica, em m;

H_a : altura do reservatório, em m;

H_d : altura de entrada de água na turbina de ação, em m.

- Para turbinas de reação:

$$H_{top} = H_a - H_f \quad (2.7)$$

Em que:

H_{top} : altura topográfica, em m;

H_a : altura do reservatório, em m;

H_f : altura do canal de fuga, em m.

2.2 VAZÃO DE UM APROVEITAMENTO

A vazão em um curso d'água pode ser definida como sendo o volume de água que passa em uma seção reta do curso em uma unidade de tempo. Essa variável, geralmente medida em m³/s, juntamente com a queda d'água disponível determina a potência elétrica que pode ser extraída.

Existem diversos métodos para medição de vazão, tanto para tubulações forçadas quanto para canais abertos, como rios e lagos. Para tubulações, temos por exemplo a medição de vazão por diferencial de pressão, medidores de vazão mecânicos, como os rotâmetros, medidores de vazão magnéticos e medidores ultrassônicos. Para canais abertos, temos métodos especificados para grandes vazões e para pequenas vazões (SIMONE, 2010).

Para grandes vazões, destaca-se os métodos da mancha salgada (Allen), de pressão-tempo (Gibson) e os métodos dos molinetes e da diluição. Já para pequenas vazões, além de podermos usar os métodos anteriores caso as dimensões permitam, pode ser utilizado o método do vertedor, métodos gravimétrico e volumétrico, medidor de pressão diferencial e método da tela móvel (SIMONE, 2010).

A energia que pode ser extraída de um aproveitamento e transformada em outra forma de energia, é calculada através da relação da potência gerada em um dado horizonte de tempo, logo (ELETROBRÁS, 2019):

$$E = P \cdot t \quad (2.8)$$

Em que:

E: Energia do aproveitamento, em kWh;

P: Potência do aproveitamento, em kW;

t: Horizonte de tempo, em s.

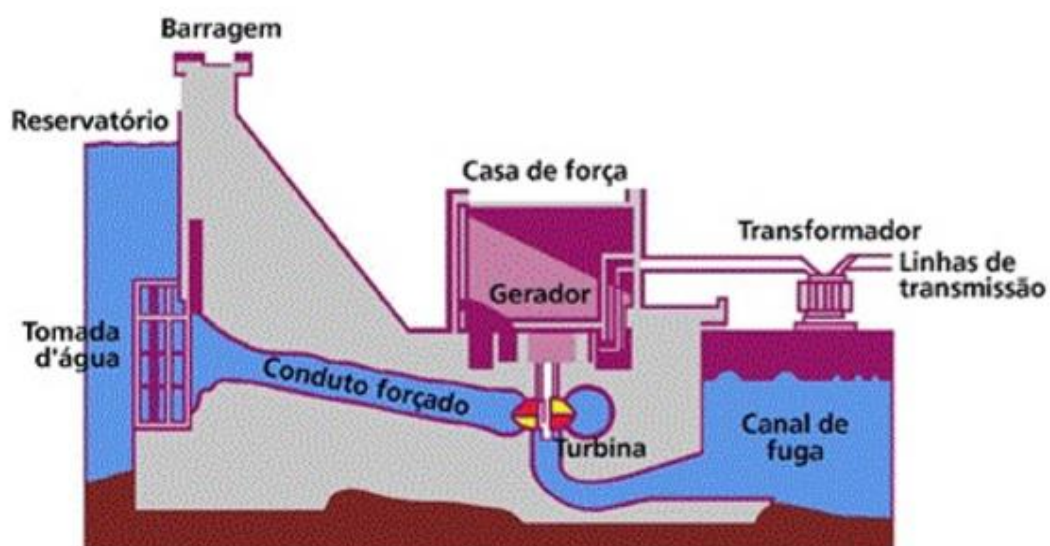
3 HIDRELÉTRICAS

A geração de energia a partir de uma fonte hídrica acontece através de turbinas hidráulicas, que são um tipo de máquinas hidráulicas. A turbina recebe a energia mecânico-hidráulica do fluxo de água e a converte em energia mecânico-motriz, que acionará o gerador, produzindo energia elétrica (SIMONE, 2010).

A Eletrobrás define usina hidrelétrica como sendo um conjunto de obras e equipamentos cuja finalidade é a geração de energia elétrica através de aproveitamento do potencial hidráulico existente em um rio. O potencial hidráulico é proporcionado pela vazão hidráulica e concentração dos desníveis existentes ao longo do rio (ELETROBRÁS, 2019).

A figura 2 mostra a composição de uma usina hidrelétrica:

Figura 2 - Usina Hidrelétrica Típica



Fonte: (PCH PARACAMBI, 2019)

A composição básica de uma usina hidrelétrica, independentemente de sua capacidade instalada, é (PEREIRA, 2015):

- Barragem: é responsável pelo acúmulo de água, recebendo a energia natural afluente e armazenando energia potencial. É um elemento estrutural, construído de forma transversal à direção de escoamento do curso d'água. Tem como principais objetivos armazenar energia potencial para o aproveitamento hidrelétrico, regularizar as vazões, além do controle de inundações, abastecimento doméstico e irrigação. É o ponto inicial da produção de energia

elétrica. Os tipos mais comuns de barragem são as barragens de terra, de enrocamento, de concreto e as barragens mistas.

A figura 3 mostra uma barragem de concreto e uma barragem de enrocamento:

Figura 3 - Barragens de Concreto e de Enrocamento



Fonte: (ITAIPÚ BINACIONAL, 2019 E CORUMBÁ NEOENERGIA, 2019)

- Vertedouro: atua como dispositivo de segurança operativo, controlando o nível do reservatório. Conduz as vazões de cheia restituindo-as a jusante em condições de segurança para a barragem e sem perturbações de nível prejudiciais à operação da usina. Auxiliam na regulação do volume do reservatório. Comumente podem ser de três tipos: de canal lateral; com comportas ou em forma de tulipa (ELETROBRÁS, 2003).

A figura 4 ilustra um vertedouro com comportas e um vertedouro em forma de tulipa:

Figura 4 - Vertedouro com Comportas e em Tulipa

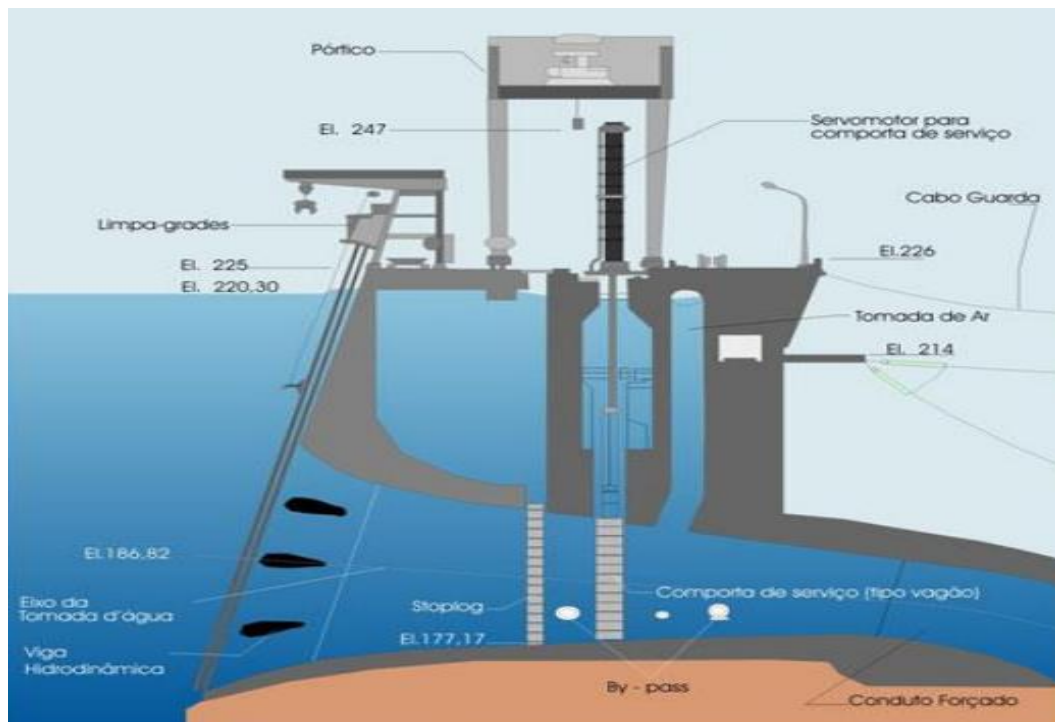


Fonte: (UHE TAKATO DAN, 2019 E MONTICELLO,2019)

- Tomada d'água: capta o fluido de trabalho, água, para iniciar o processo de produção de energia. Tem as funções de conduzir a água até os órgãos adutores e daí até a turbina, impedir a entrada de corpos que podem danificar as turbinas e ainda fechar a entrada quando necessário. É composta basicamente por: rede de proteção; limpa-grades; comporta de serviço; comportas de emergência (*stop-logs*); tubos de ventilação; máquinas hidráulicas e sistemas de monitoramento.

A figura 5 mostra um esquema de uma tomada d'água, contendo as grades de proteção, limpa-grades, comportas de serviço e de emergência:

Figura 5 - Esquemático de Tomada D'água

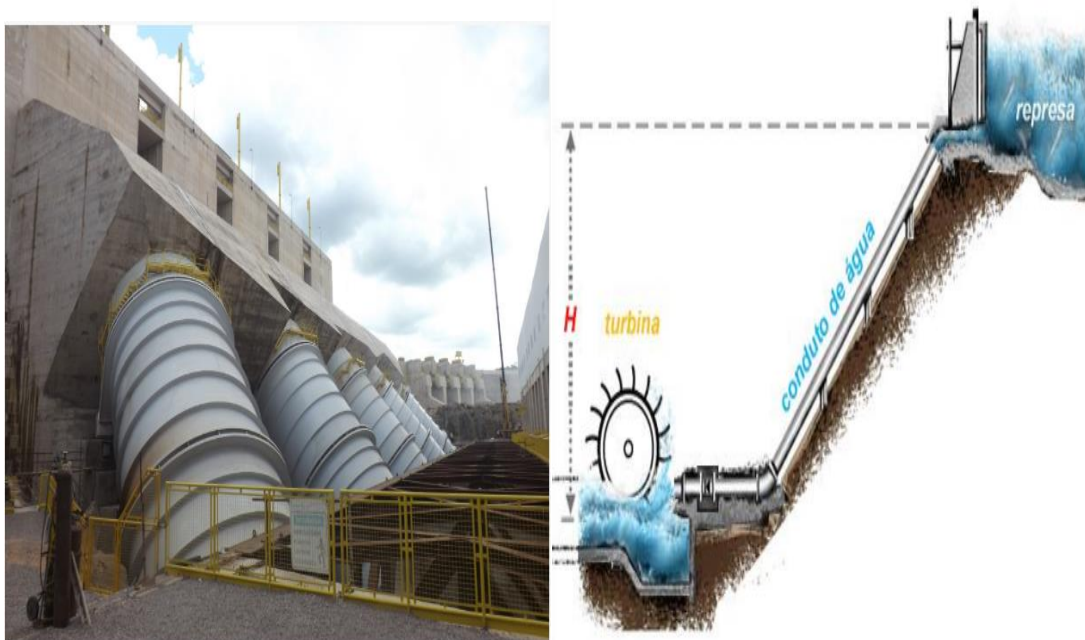


Fonte: (ITAIPÚ BINACIONAL, 2019)

- **Conduto forçado:** recebe o fluido de trabalho e o direciona para turbinamento. Denominam-se condutos forçados ou condutos sob pressão as tubulações onde o líquido escoar sob uma pressão diferente da atmosférica. As seções desses condutos são sempre fechadas. Podem ser expostos ou construídos no interior da barragem, devem ter estabilidade estrutural, vazamento mínimo e máximo e desempenho hidráulico. Esse trecho em alta pressão é o que leva a água da tomada d'água até a casa de força.

Na figura 6, além dos condutos forçados, tem-se o esquema da tomada d'água até a turbina, passando pelo conduto forçado:

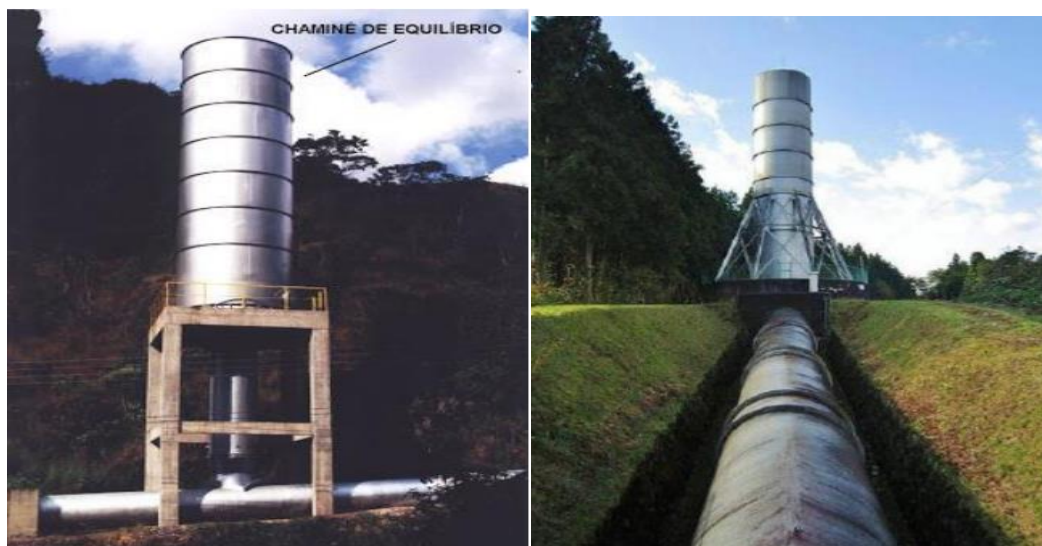
Figura 6 - Imagem e Esquema de Conduto Forçado



Fonte: (UHE TELES PIRES, 2019 E EFISICA, 2019)

- Chaminé de equilíbrio: a chaminé de equilíbrio é geralmente posicionada entre o trecho da tomada d'água e o conduto forçado. Sua função é atenuar as variações bruscas de pressões resultantes de transitórios hidráulicos, ou seja, restringir o Golpe de Aríete, que ocorre quando há uma brusca interrupção do movimento da água e a sua subsequente elevação, podendo levar a seríssimos danos nos equipamentos e até a desastres catastróficos. Os momentos mais propícios a ocorrer a variação de pressão são durante a partida (tomada de carga) ou parada das turbinas, fechamento ou abertura de válvulas (comportas) e em variações bruscas na tomada d'água (entrada de ar na tubulação ou objetos impedindo a passagem de água) (PEREIRA, 2015).

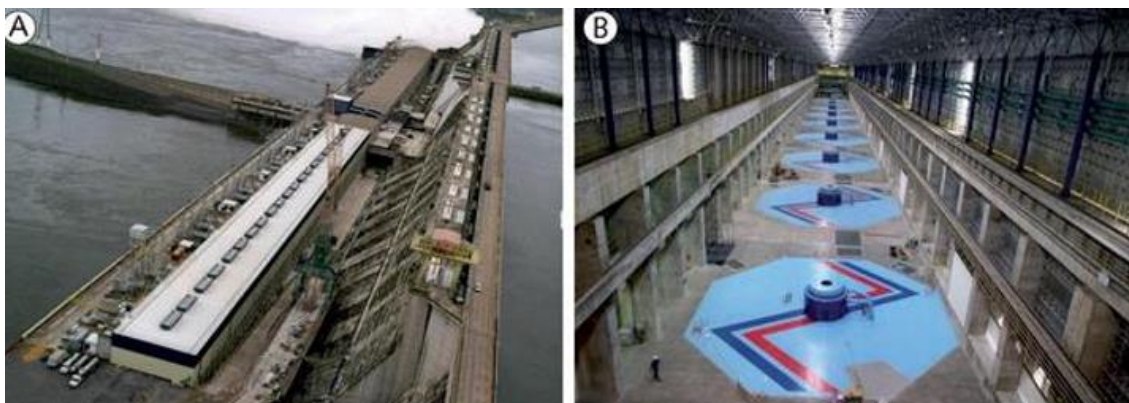
A figura 7 ilustra chaminés de equilíbrio:

Figura 7 - Chaminés de Equilíbrio

Fonte: (USP, 2019 E WIKIPEDIA, 2019)

- Casa de força: abriga o sistema produtivo da usina, ou seja, o conjunto turbina-gerador. A energia elétrica gerada nesse ponto será transportada para os consumidores através do sistema de transmissão. Tem como principais finalidades abrigar as máquinas e equipamentos, possibilitar a montagem e desmontagem dos mesmos e a operação e manutenção da usina. Podem ser de dois tipos: exterior (abrigada, semiabrigada ou desabrigada) ou subterrânea. Seu dimensionamento depende do tipo, quantidade e dimensões da turbina e do gerador utilizados. Ela deve ainda comportar equipamentos mecânicos e elétricos auxiliares e possuir áreas para montagem dos equipamentos.

Na figura 8 é observada a casa de força da UHE Tucuruí:

Figura 8 - Casa de Força UHE Tucuruí

Fonte: (UHE TUCURUÍ, 2019)

- Canal de fuga: ponto de retorno do fluido de trabalho ao curso d'água. É através dele que se restitui a água turbinada ao leito natural do rio. É o ponto final do processo produtivo.

De forma resumida, o processo de produção de energia ocorre da seguinte forma:

A água é captada no lago formado pela barragem através da tomada d'água e conduzida até a casa de força por canais, túneis ou condutos metálicos, que formam o conduto forçado. O conduto forçado leva a água até a turbina, o que faz com que esta gire. No gerador que está acoplado a turbina, a potência mecânica gerada pelo movimento da turbina é transformada em potência elétrica.

A energia gerada é levada através de cabos ou barras condutoras dos terminais do gerador até o transformador elevador, onde tem sua tensão elevada para níveis mais altos, mais adequados a transmitir energia, de forma a evitar perdas e assim, através de linhas de transmissão, chega até os centros de consumo. Através de transformadores abaixadores, a energia tem sua tensão levada a níveis adequados para utilização dos consumidores.

3.1 TIPOS DE APROVEITAMENTO HIDRELÉTRICO

Mais recentemente, através da Resolução Normativa Nº 673, a ANEEL modificou o limite inferior da potência de uma PCH, passando de 1.000 kW para 3.000kW, como descrito abaixo, (ANEEL, 2015):

Serão considerados empreendimentos com características de PCH aqueles destinados a autoprodução ou produção independente de energia elétrica, cuja potência seja superior a 3.000 kW e igual ou inferior a 30.000 kW e com área de reservatório de até 13 km², excluindo a calha do leito regular do rio.

Alguns fatores importantes classificam as usinas, são eles:

- Quanto ao uso das vazões naturais (PEREIRA, 2015):
 - Centrais a fio d'água: são usinas sem reservatórios de regularização, cujo nível de água operativo não varia ou varia muito pouco.
 - Centrais de acumulação: são usinas com reservatório de acumulação e regularização, cujos níveis de água operativos variam bastante em função dos períodos de seca e de estiagem.

- Centrais reversíveis: são usinas com mais de um reservatório, onde a água é bombeada para o reservatório mais elevado nas horas de menor demanda para utilização nas horas de pico.

- Quanto à potência (ANEEL, 2008):

- Centrais Geradoras Hidrelétricas: aproveitamentos com até 3 MW de potência instalada.

- Pequenas Centrais Hidrelétricas: aproveitamentos com potência instalada entre 3,1 MW e 30 MW.

- Usina Hidrelétrica de Energia: aproveitamentos com mais de 30 MW de potência instalada.

- Quanto à altura de queda d'água (COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS, 2016):

- Baixa altura de queda: alturas de queda inferiores a 15 metros.

- Média altura de queda: alturas de quedas entre 15 metros e 150 metros.

- Alta altura de queda: alturas de queda superiores a 150 metros.

3.2 SISTEMA TURBINA-GERADOR

O sistema turbina-gerador é uma turbina com seu eixo diretamente conectado a um gerador. De acordo com o tipo e a capacidade do sistema, ele pode ser construído na horizontal ou vertical. Entretanto, sabendo que o sistema elétrico brasileiro é composto, em sua maioria, por máquinas síncronas e a frequência operativa é de 60 Hz, deve-se haver correspondência entre velocidade rotacional do arranjo com a velocidade síncrona (PEREIRA, 2015).

Para turbinas hidráulicas, o rendimento representa as perdas verificadas nas diferentes condições de operação, considerando que uma parte da potência disponível nos eixos da turbina é dissipada em perdas internas e externas na própria turbina. Valores característicos do rendimento máximo para grandes turbinas estão na faixa de 88 a 96% (ENCINA, 2006).

No gerador, a transformação da energia mecânica em energia elétrica não se verifica de maneira completa, já que nesta transformação ocorrem perdas nos enrolamentos, perdas mecânicas provocadas pelo atrito nas escovas do sistema de excitação, perdas nos mancais e no sistema de ventilação. Os geradores modernos apresentam rendimentos da ordem de 90 a 99% (ENCINA, 2006).

Dessa forma, deve-se ponderar as eficiências dos processos de conversão de energia na turbina e no gerador. Logo, a potência gerada por um aproveitamento pode ser estimada por (PEREIRA, 2015):

$$P = \eta_T \cdot \eta_G \cdot \gamma \cdot Q \cdot H \quad (3.1)$$

Em que:

P: Potência do aproveitamento, em W;

η_T : eficiência da turbina, adimensional;

η_G : eficiência do gerador, adimensional;

γ : peso específico do fluido, em N/m³;

Q: vazão do aproveitamento, em m³/s;

H: altura de queda disponível, em m.

É importante lembrar também que a potência entregue ao consumidor é passível ainda de perdas na transmissão e na distribuição de energia, que podem ser mostradas através de um fluxo de potência, porém esse desenvolvimento foge do escopo desse trabalho.

3.3 GERADOR

Os geradores são basicamente máquinas elétricas que recebem a energia mecânica de algum sistema primário, que no caso de aproveitamentos hidráulicos ocorre através da turbina e converte essa energia em energia elétrica. Essa geração pode ocorrer em corrente contínua ou corrente alternada.

No Brasil a grande maioria dos geradores opera em corrente alternada e são máquinas síncronas. Para garantir o sincronismo, é necessário que (SIMONE, 2010):

$$n = \frac{7200}{Z} \quad (3.2)$$

Em que:

n: velocidade nominal, em rpm;

Z: número de polos.

Para aproveitamentos hidrelétricos, o número de polos do gerador é inversamente proporcional à altura do aproveitamento. Para alturas maiores, o gerador realiza um número de rotações maiores, logo, o gerador possui um número de polos menor.

Baseando nessa premissa, é desejável que o sistema turbina-gerador tenha a maior velocidade possível, pois isso representa um sistema de dimensões menores, conseqüentemente, mais barato de ser implementado (PEREIRA, 2015).

3.4 TURBINAS

A turbina hidráulica é basicamente um conversor de energia. Ela recebe a energia hidráulica do fluido de trabalho, sendo esta constituída por energia cinética devido a sua vazão e energia potencial devido a sua pressão, e a converte em energia mecânica (PEREIRA, 2015).

As turbinas são compostas por duas partes principais: o rotor e o distribuidor. O rotor é composto por pás ou conchas sobre as quais o fluido de trabalho, direcionado pelo distribuidor, incide, produzindo um torque e movimentando o eixo. Já o distribuidor controla a vazão a ser turbinada e direciona o fluido de trabalho para o rotor, convertendo a energia de pressão deste em energia cinética (CARVALHO, 1982).

Os detalhes construtivos das turbinas variam de acordo com o tipo de aproveitamento, com a altura e vazão de projeto, sendo a turbina especificada de forma a se obter a melhor performance de cada um dos tipos de turbina (PEREIRA, 2015).

As turbinas são classificadas de acordo com o seu princípio de funcionamento, podendo ser de ação ou reação (SIMONE, 2010).

- Turbinas de ação: a conversão da energia de pressão em cinética ocorre antes de chegar ao rotor, que funciona em pressão próxima a atmosférica, pois não opera mergulhado na água;

- Turbinas de reação: a conversão das parcelas de energia cinética e de pressão que são recebidas em energia motriz ocorre em duas parcelas: a primeira, devido à ação de impulso, decorrente da passagem da água pelo rotor, e a segunda, devido a reação que, por o mesmo operar mergulhado na água, tem uma queda de pressão.

O modelo de turbina de ação mais utilizado é a turbina Pelton, enquanto nos modelos de turbina de reação, as turbinas Kaplan e Francis são as mais utilizadas.

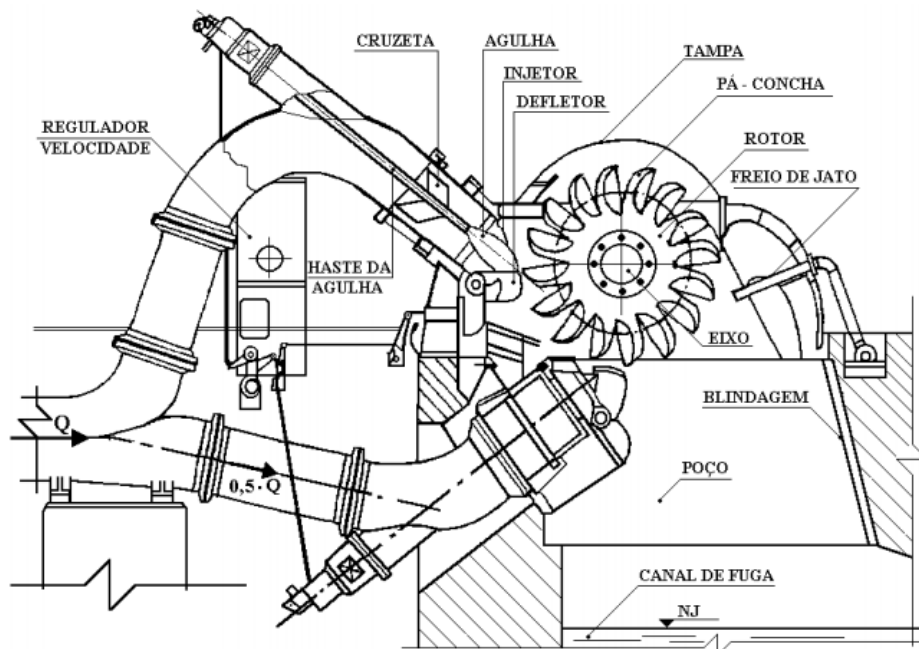
3.4.1 TURBINAS DE AÇÃO

Turbinas Pelton:

Segundo Encina, 2006 as turbinas de ação ou de impulsão usam a pressão dinâmica da água. Esse tipo de turbina foi criado por Pelton, em 1889, e é semelhante a uma roda de água usada em moinhos.

A figura 9 ilustra um esquema de turbina Pelton:

Figura 9 - Esquema de Turbina Pelton



Fonte: Adaptado de (SIMONE, 2010)

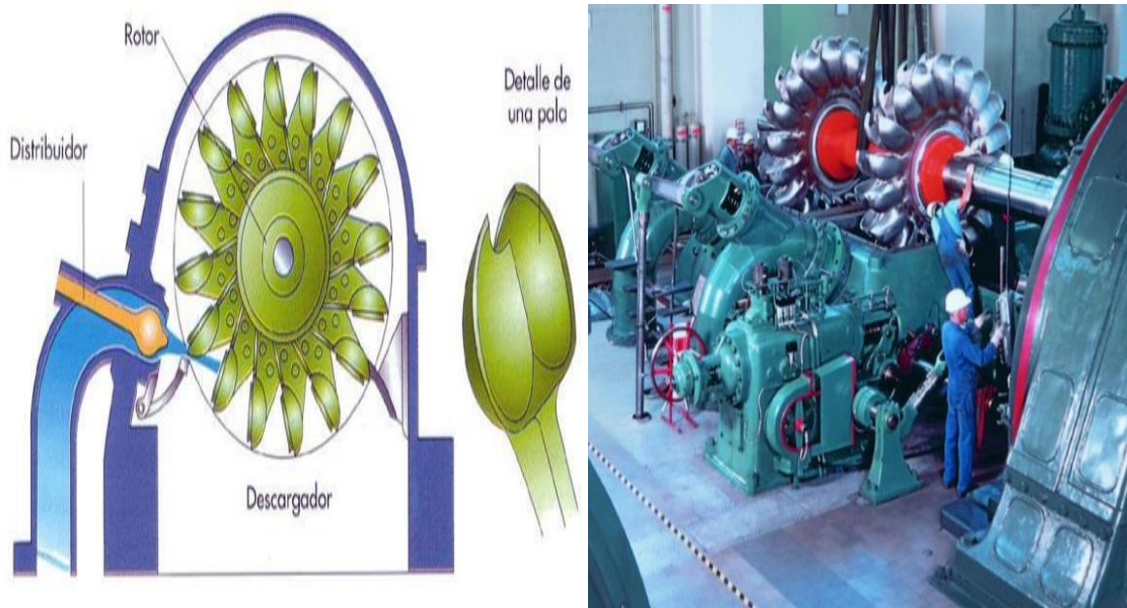
Ela possui um ou mais bicos injetores de água, que na forma de jato d'água transmitem energia cinética às conchas, que por sua vez transforma essa energia em trabalho mecânico para desenvolver velocidades rotativas de até 1300 rpm. A turbina Pelton é utilizada quando a queda útil é muito elevada e não sofre a influência da elevação do nível do canal de fuga.

Um dos problemas da turbina Pelton ocorre por conta da alta velocidade com que a água se choca com o rotor, podendo provocar erosão no mesmo, causado pelo efeito abrasivo da areia misturada com a água, muito comum em rios de montanhas.

As turbinas Pelton podem ser de eixo horizontal ou vertical e são caracterizadas por terem baixo número de rotações e rendimento de até 93%.

Na figura 10, além de um esquema de turbina Pelton, observa-se turbinas Pelton em instalação:

Figura 10 - Turbina Pelton



Fonte: (TRIPOD, 2019 E PEREIRA, 2015)

3.4.2 TURBINAS DE REAÇÃO

Segundo Encina (2006) as turbinas de reação são movidas pela pressão estática associada a efeitos de reação. Nesta turbina, a coluna d'água exerce uma pressão sobre as pás, em forma ou não de hélices, colocadas em um eixo, fazendo-as girar com grande velocidade.

A água entra na turbina com pressão muito grande e sai com uma pressão muito menor, o que faz com que o rendimento da turbina aumente. Essa diferença de pressão é convertida em energia cinética das pás. Para aumentar a pressão de saída existe sob a turbina um tubo de sucção cujo diâmetro é aumentado progressivamente. Aumentando-se a pressão, a velocidade da água diminui, fazendo com que as perdas hidráulicas diminuam, aumentando a eficiência do processo.

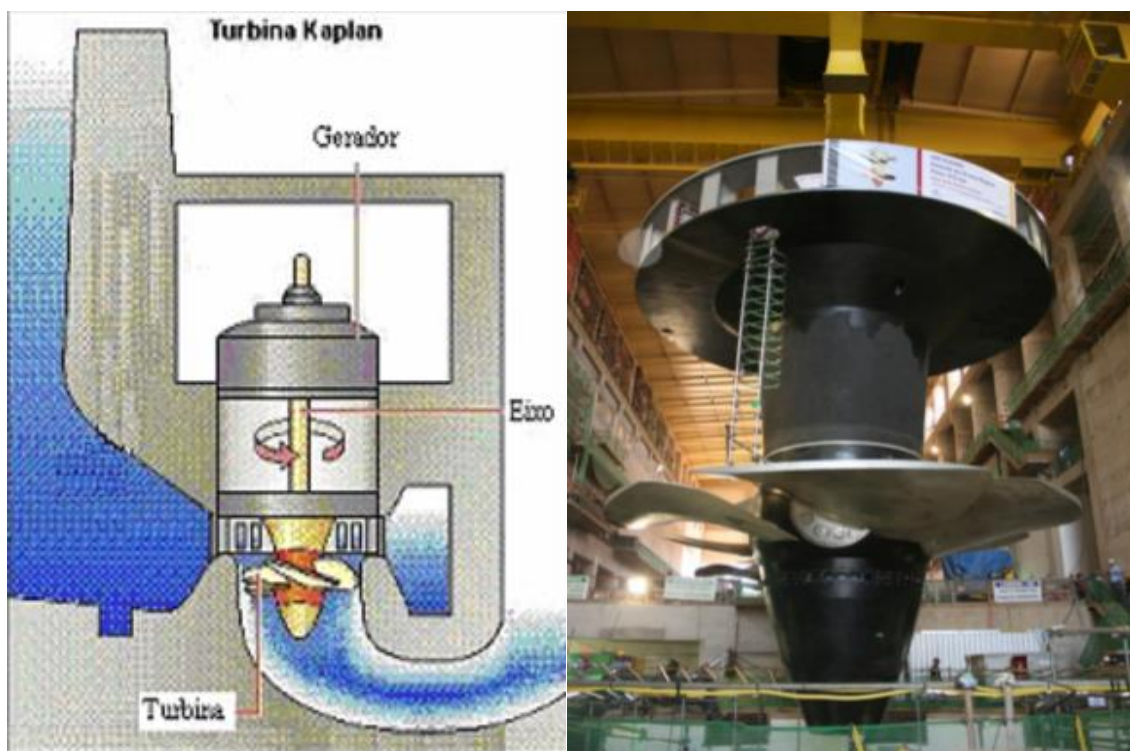
Como as turbinas de reação, ao contrário das turbinas Pelton, possuem o rotor que gira dentro da corrente contínua de água, elas sofrem a influência da elevação do nível do canal de fuga.

Turbinas Kaplan

Um tipo muito comum de turbina de reação é a turbina Kaplan, que usa no rotor um sistema de pás com grau variável, que é ajustável à mudança de carga, de modo a se obter maior eficiência. É um tipo de turbina adaptado a quedas fracas e vazões elevadas.

A figura 11 traz um esquema de funcionamento da turbina Kaplan assim como uma turbina física instalada:

Figura 11 - Turbina Kaplan



Fonte: (UHE SÃO MANOEL, 2019 E ENCINA, 2006)

As turbinas Kaplan são constituídas basicamente por uma câmara de entrada, que pode ser aberta ou fechada por um distribuidor e por uma roda com pás em forma de hélices. Essas pás são reguladas através da ação do distribuidor e com a variação do ângulo de ataque das pás do rotor, o que permite grande variabilidade.

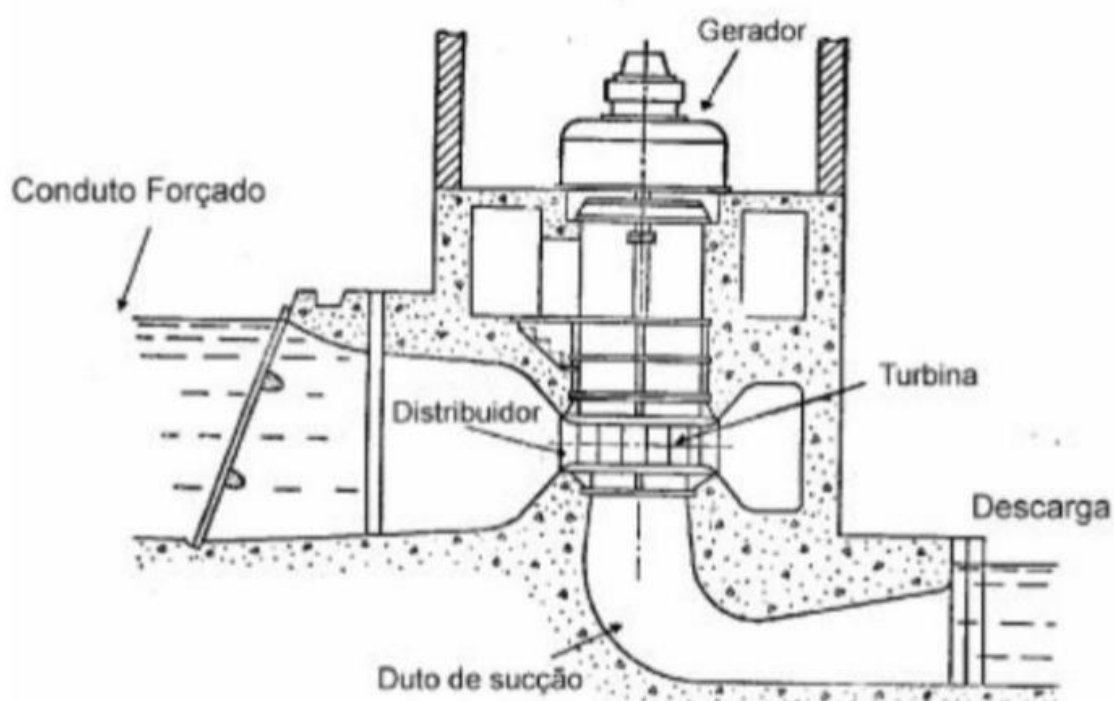
Dentre as turbinas Kaplan, existem ainda alguns tipos de turbinas, como o Grupo Turbina-Gerador Bulbo, que se destaca por ser mais compacto e específico para quedas baixas e grandes vazões. Neste caso, o gerador fica dentro do bulbo, o que causa uma dificuldade maior na refrigeração do mesmo.

Turbinas Francis

A turbina do tipo Francis também é uma típica turbina de reação, que recebe água sob pressão, trazida pelo conduto forçado para a roda na direção radial e descarrega na direção axial, indo para o canal de fuga através do tubo de sucção, transformando tanto energia cinética como energia de pressão em trabalho. Podem ser instaladas com eixo horizontal ou vertical, sendo este último mais comum em usinas de grande potência.

A figura 12 mostra o esquemático de uma turbina do tipo Francis:

Figura 12 - Esquemático de Turbina Francis



Fonte: Adaptado de (SIMONE, 2010)

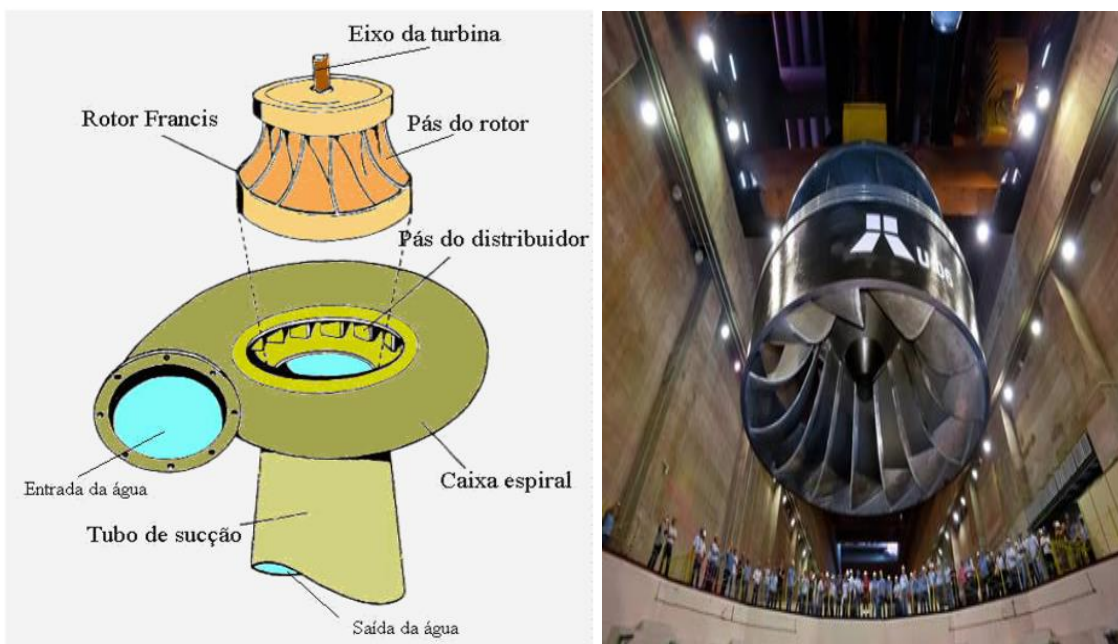
Esse tipo de turbina é caracterizado por possuir uma roda formada por uma coroa de aletas fixas, que recebem a água radialmente e a orientam para a saída do rotor numa direção axial. A entrada na turbina ocorre de forma simultânea por múltiplas comportas de admissão dispostas ao redor da roda e o trabalho é exercido ao mesmo tempo sobre todas as aletas, fazendo girar a turbina e o gerador. Outros itens que compõem a turbina são a câmara de entrada, que pode ser aberta ou fechada com uma forma espiral, o distribuidor

constituído por uma roda de aletas fixas ou móveis que regulam a vazão e o tubo de saída da água (CAUES e MICHELS, 2016).

Nas turbinas Francis, as lâminas do rotor possuem curvas desenhadas para que a água que as atinge mude gradualmente da direção radial para a axial. A água é inicialmente conduzida para essas lâminas móveis através das lâminas guias, que são fixadas às paredes do vaso da turbina. Esse tipo de turbina é ideal para quedas superiores a 20 metros e possuem uma grande adaptabilidade a quedas e vazões. Possuem rendimento elevado, maiores velocidades e dimensões menores.

A figura 13 ilustra uma turbina Francis com o eixo da turbina, o rotor, as pás do rotor, distribuidor, assim como a caixa espiral e o tubo de sucção. Ao lado, uma turbina física do tipo Francis:

Figura 13 - Turbina Francis



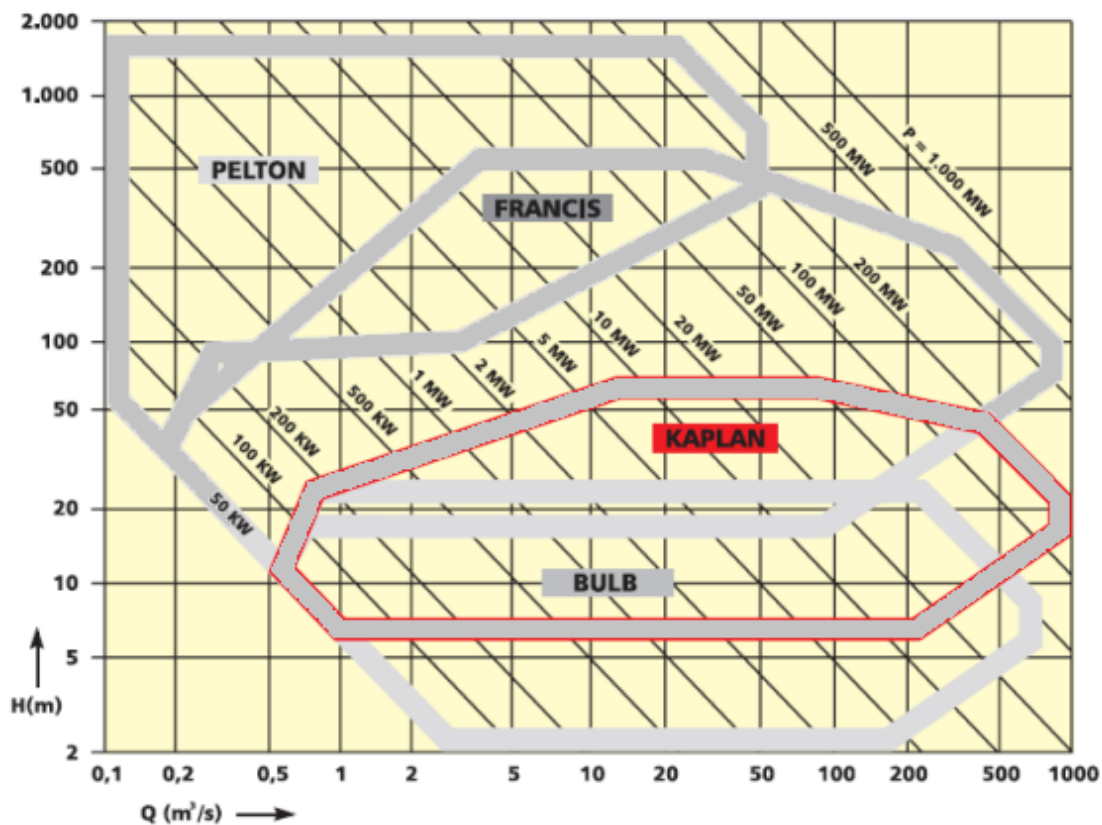
Fonte: (MIRANDA, 2009 E ITAIPÚ, 2019)

3.4.3 ESCOLHA DA TURBINA

Esta é uma das mais importantes etapas do projeto de qualquer usina hidrelétrica, onde se define a melhor turbina a ser utilizada e a partir disso, define-se parâmetros como a rotação do conjunto turbina-gerador, número de polos do gerador e outros parâmetros do projeto da usina.

A escolha da turbina está associada, principalmente a altura da queda e a vazão do aproveitamento, assim como a potência instalada da usina. Com base nesses três fatores, a escolha da turbina é feita de acordo com um arranjo típico de turbinas dos fabricantes. A figura 14 mostra um desses arranjos típicos de turbinas:

Figura 14 - Arranjo Típico de Atuação das Turbinas



Fonte: (VA TECH, 2019)

Outro parâmetro importante a ser definido é a rotação específica, que está associada ao que é chamado de turbina unidade, que é uma turbina submetida a uma vazão de 1 m^3/s e a altura de 1 m, mantendo o mesmo ângulo de incidência sobre as pás, ou seja, geometricamente semelhante a turbina original. Essa turbina unidade irá girar com uma velocidade N_s , que corresponde à velocidade específica da família de turbinas geometricamente semelhante a ela (COLNAGO, 2011).

Existem várias equações empíricas para definir a rotação específica e cada fabricante pode escolher uma dessas equações para classificar sua turbina quanto a velocidade específica. Neste trabalho, serão adotadas as equações (PEREIRA, 2015):

Para turbinas Pelton:

$$Ns = \sqrt{Ro} \times \frac{Ape}{\sqrt{Htop}} \quad (3.3)$$

Em que:

Ns: rotação específica da turbina;

Ro: número de rotores que a turbina possui;

Ape: constante que varia entre 485 e 535, conforme Pereira (2015), será adotado o valor de 510;

Htop: altura topográfica, em m.

Para turbinas Francis:

$$Ns = \frac{Afra}{\sqrt{Htop}} \quad (3.4)$$

Em que:

Ns: rotação específica da turbina;

Afra: constante que varia entre 1530 e 2330, conforme Pereira (2015) será adotado o valor de 2300;

Htop: altura topográfica, em m.

Para turbinas Kaplan:

$$Ns = \frac{3100}{\sqrt{Htop}} \quad (3.5)$$

Em que:

Ns: rotação específica da turbina;

Htop: altura topográfica, em m.

As equações acima são relacionadas a uma outra equação para se definir a rotação física da turbina associada ao gerador, da seguinte forma (PEREIRA, 2015):

$$Ns = Nt \times \frac{P^{0,5}}{H^{1,25}} \quad (3.6)$$

Em que:

Ns: rotação específica da turbina;

Nt: rotação física da turbina, em rpm;

P: potência hidráulica disponível, em cv;

H: altura disponível, em m.

Por fim, para estimar o número de polos do gerador, usamos a equação:

$$Nt = Ng = \frac{120f}{p} \quad (3.7)$$

Em que:

Nt: rotação física da turbina, em rpm;

Ng: rotação física do gerador, em rpm;

f: frequência, em Hz;

p: número de polos do gerador.

Definido o número de polos do gerador, é feito o ajuste da rotação do conjunto turbina gerador adequada ao número de polos do gerador.

3.5 DIÂMETRO DA TUBULAÇÃO

A escolha do diâmetro da tubulação, principalmente do conduto forçado, leva em consideração, basicamente, a vazão e a queda do aproveitamento. O diâmetro reduz a perda de carga, porém aumenta o custo da tubulação. Por isso, calcula-se o diâmetro econômico (SIMONE, 2010):

$$De = 127 * \sqrt[7]{\frac{Q^3}{H_{top}}} \quad (3.8)$$

Em que:

De: diâmetro econômico, em cm;

Q: vazão do aproveitamento, em m³/s;

H_{top}: altura topográfica, em m.

4 ESTUDOS DE CASO

Alguns estudos de caso foram elaborados com a finalidade de comparar valores calculados através dos métodos apresentados neste trabalho com os valores registrados em usinas reais em funcionamento.

Para tanto, será estimada a potência hidráulica entregue a turbina, serão calculadas a velocidade de escoamento, as perdas de carga nos condutos forçados, a rotação específica da turbina, o número de polos de cada gerador e o diâmetro econômico.

4.1 ITAIPU BINACIONAL

A Usina Hidrelétrica de Itaipu é uma usina binacional localizada no Rio Paraná, na fronteira entre o Brasil e o Paraguai. Os dados nominais por turbina da usina estão presentes na tabela 1:

Tabela 1 - Dados da Usina de Itaipu

Potência Nominal (MW)	715
Vazão Nominal (m ³ /s)	690
Queda Bruta Nominal (m)	118,4
Tipo de Turbina	Francis
Rotação do Grupo Turbina-Gerador (rpm)	92,3
Número de Polos do Gerador	78
Comprimento do Conduto Forçado (m)	142,2
Diâmetro do Conduto Forçado	10,5
Material do Conduto Forçado	Concreto Armado
Unidades Geradoras	20

Fonte: Autor, 2019

Para realização dos cálculos, utiliza-se as fórmulas mencionadas anteriormente. Utilizando a equação 2.1, calcula-se a potência hidráulica do aproveitamento:

$$P = 801.437.760W \quad (4.1)$$

Através da equação 2.3, é calculada a velocidade de escoamento:

$$V = 7,969m/s \quad (4.2)$$

A perda de carga é obtida pela equação 2.4:

$$J = 3,818m/km \quad (4.3)$$

Finalmente, obtém-se a perda de carga em metros, pela equação 2.5:

$$\Delta H = 0,543m \quad (4.4)$$

Essa perda de carga representa, em termos de potência, uma perda de 3.675.513W em cada conduto forçado. Como a usina possui 20 condutos, a perda de carga total nos condutos forçados gira em torno de 73.510.254W.

A rotação específica da turbina pode ser estimada pela equação 3.4:

$$N_s = 211,374 \quad (4.5)$$

Para o cálculo da rotação física da turbina, é utilizada a equação 3.6:

$$N_t = 83,757rpm \quad (4.6)$$

O número de polos de cada gerador é estimado pela equação 3.7:

$$p = 85,963 \quad (4.7)$$

Como o número de polos do gerador deve ser um número inteiro par, podemos adotar $p=84$ ou $p=86$. Novamente pela equação 3.7, a rotação física do conjunto turbina-gerador fica:

$$N_t = N_g = 85,714rpm \text{ ou } 83,721rpm \quad (4.8)$$

Por fim, calcula-se o diâmetro econômico através da equação 3.8:

$$D_e = 10,575m \quad (4.9)$$

Para melhor visualização dos dados calculados, foram colocados na forma da tabela 2:

Tabela 2 - Dados Calculados de Itaipu

Potência Hidráulica (W)	801.437.760
Velocidade de Escoamento (m/s)	7,969
Perda de Carga no Conduto Forçado (m/km)	3,818
Perda de Carga no Conduto Forçado (m)	0,543
Perda de Potência no Conduto Forçado (W)	3.675.513
Perda de Potência Total no Conduto Forçado (W)	73.510.254
Rotação Específica da Turbina	211,374
Número de Polos do Gerador	84 ou 86
Rotação do Conjunto Turbina-Gerador (rpm)	85,714 ou 83,721
Diâmetro Econômico (m)	10,575

Fonte: Autor, 2019

Com os valores calculados, pode-se finalmente comparar os resultados dos cálculos com os dados nominais da usina real. Primeiramente, nota-se uma

diferença de cerca de 86MW entre a potência hidráulica e a potência nominal da turbina, ou seja, cerca de 11% da potência hidráulica é perdida. Isso se dá tanto em perdas no conduto forçado, cerca de 0,5%, como em perdas localizadas, rendimentos, entre outros fatores.

É notório que os valores do número de polos de gerador e da velocidade de rotação do conjunto motor-gerador se aproximaram dos valores reais e o diâmetro econômico foi praticamente o mesmo. A tabela 3 mostra um comparativo entre valores reais e valores calculados:

Tabela 3 - Comparativo Entre Valores Reais e Calculados

	Valores Reais	Valores Calculados
Potência Disponível (MW)	715	801,438
Número de Polos do Gerador	78	84 ou 86
Rotação do Conjunto Turbina-Gerador (rpm)	92,3	85,714 ou 83,721
Diâmetro Econômico (m)	10,5	10,575

Fonte: Autor, 2019

4.2 USINA HIDRELÉTRICA A

A Usina A não terá seu nome real revelado por questões de confidencialidade dos dados, mas é uma usina real, em pleno funcionamento. Os dados nominais por turbina da usina estão presentes na tabela 4:

Tabela 4 - Dados Nominais da Usina A

Potência Nominal (MW)	40,5
Vazão Nominal (m ³ /s)	66
Queda Bruta Nominal (m)	106,7
Tipo de Turbina	Francis
Rotação do Grupo Turbina-Gerador (rpm)	400
Número de Polos do Gerador	18
Comprimento do Conduto Forçado (m)	340
Diâmetro do Conduto Forçado	2,5
Material do Conduto Forçado	Concreto Armado
Unidades Geradoras	3

Fonte: Autor, 2019

Para realização dos cálculos, utiliza-se as fórmulas mencionadas anteriormente. Utilizando a equação 2.1, calcula-se a potência hidráulica do aproveitamento:

$$P = 69.083.982W \quad (4.10)$$

Através da equação 2.3, é calculada a velocidade de escoamento:

$$V = 13,445m/s \quad (4.11)$$

A perda de carga é obtida pela equação 2.4:

$$J = 50,015m/km \quad (4.12)$$

Finalmente, obtém-se a perda de carga em metros, pela equação 2.5:

$$\Delta H = 17,005m \quad (4.13)$$

Essa perda de carga representa, em termos de potência, uma perda de 11.010.089W em cada conduto forçado. Como a usina possui 3 condutos, a perda de carga total nos condutos forçados gira em torno de 33.030.268W.

A rotação específica da turbina pode ser estimada pela equação 3.4:

$$N_s = 222,662 \quad (4.14)$$

Para o cálculo da rotação física da turbina, é utilizada a equação 3.6:

$$N_t = 325,509rpm \quad (4.15)$$

O número de polos de cada gerador é estimado pela equação 3.7:

$$p = 22,119 \quad (4.16)$$

Como o número de polos do gerador deve ser um número inteiro par, podemos adotar $p=22$ ou $p=24$. Novamente pela equação 3.7, a rotação física do conjunto turbina-gerador fica:

$$N_t = N_g = 327,272rpm \text{ ou } 300rpm \quad (4.17)$$

Por fim, calcula-se o diâmetro econômico através da equação 3.8:

$$D_e = 3,925m \quad (4.18)$$

Para melhor visualização dos dados calculados, foram colocados na forma da tabela 5:

Tabela 5 - Dados Calculados da Usina A

Potência Hidráulica (W)	69.083.982
Velocidade de Escoamento (m/s)	13,445
Perda de Carga no Conduto Forçado (m/km)	50,015
Perda de Carga no Conduto Forçado (m)	17,005
Perda de Potência no Conduto Forçado (W)	11.010.089
Perda de Potência Total no Conduto Forçado (W)	33.030.268
Rotação Específica da Turbina	222,662
Número de Polos do Gerador	22 ou 24
Rotação do Conjunto Turbina-Gerador (rpm)	327,272 ou 300
Diâmetro Econômico (m)	3,925

Fonte: Autor, 2019

Tendo os valores calculados, pode-se finalmente comparar os resultados dos cálculos com os dados nominais da usina real. Primeiramente, nota-se uma diferença muito grande entre a potência hidráulica e a potência nominal da turbina, o que indica que grande parte da potência hidráulica é perdida. Isso se dá tanto em perdas no conduto forçado, com uma perda de aproximadamente 11MW, como em perdas localizadas, rendimentos, entre outros fatores.

É notório que os valores do número de polos de gerador e da velocidade de rotação do conjunto motor-gerador se aproximaram dos valores reais. A tabela 6 mostra um comparativo entre valores reais e valores calculados:

Tabela 6 - Comparativo Entre Valores Reais e Calculados

	Valores Reais	Valores Calculados
Potência Disponível (MW)	40,5	69,084
Número de Polos do Gerador	18	22 ou 24
Rotação do Conjunto Turbina-Gerador (rpm)	400	327,272 ou 300
Diâmetro Econômico (m)	2,5	3,925

Fonte: Autor, 2019

4.3 USINA HIDRELÉTRICA B

A Usina B não terá seu nome real revelado por questões de confidencialidade dos dados, mas é uma usina real, em pleno funcionamento. Os dados nominais por turbina da usina estão presentes na tabela 7:

Tabela 7 - Dados Nominais da Usina B

Potência Nominal (MW)	20,6
Vazão Nominal (m ³ /s)	98
Queda Bruta Nominal (m)	53

Tipo de Turbina	Francis
Rotação do Grupo Turbina-Gerador (rpm)	257,14
Número de Polos do Gerador	28
Comprimento do Conduto Forçado (m)	53,84
Diâmetro do Conduto Forçado	5
Material do Conduto Forçado	Concreto Armado
Unidades Geradoras	3

Fonte: Autor, 2019

Para realização dos cálculos, utiliza-se as fórmulas mencionadas anteriormente. Utilizando a equação 2.1, calcula-se a potência hidráulica do aproveitamento:

$$P = 50.953.140W \quad (4.19)$$

Através da equação 2.3, é calculada a velocidade de escoamento:

$$V = 4,991m/s \quad (4.20)$$

A perda de carga é obtida pela equação 2.4:

$$J = 3,55m/km \quad (4.21)$$

Finalmente, obtém-se a perda de carga em metros, pela equação 2.5:

$$\Delta H = 0,191m \quad (4.22)$$

Essa perda de carga representa, em termos de potência, uma perda de 183.763W em cada conduto forçado. Como a usina possui 3 condutos, a perda de carga total nos condutos forçados gira em torno de 551.288W.

A rotação específica da turbina pode ser estimada pela equação 3.4:

$$N_s = 315,929 \quad (4.23)$$

Para o cálculo da rotação física da turbina, é utilizada a equação 3.6:

$$N_t = 270,0474rpm \quad (4.24)$$

O número de polos de cada gerador é estimado pela equação 3.7:

$$p = 26,66198 \quad (4.25)$$

Como o número de polos do gerador deve ser um número inteiro par, podemos adotar $p=26$ ou $p=28$. Novamente pela equação 3.7, a rotação física do conjunto turbina-gerador fica:

$$N_t = N_g = 276,923rpm \text{ ou } 257,143rpm \quad (4.26)$$

Por fim, calcula-se o diâmetro econômico através da equação 3.8:

$$D_e = 5,139m \quad (4.27)$$

Para melhor visualização dos dados calculados, foram colocados na forma da tabela 8:

Tabela 8 - Dados Calculados da Usina B

Potência Hidráulica (W)	50.953.140
Velocidade de Escoamento (m/s)	4,991
Perda de Carga no Conduto Forçado (m/km)	3,55
Perda de Carga no Conduto Forçado (m)	0,191
Perda de Potência no Conduto Forçado (W)	183.763
Perda de Potência Total no Conduto Forçado (W)	551.288
Rotação Específica da Turbina	315,929
Número de Polos do Gerador	26 ou 28
Rotação do Conjunto Turbina-Gerador (rpm)	276,923 ou 257,143
Diâmetro Econômico (m)	5,139

Fonte: Autor, 2019

Com os valores calculados, pode-se finalmente comparar os resultados dos cálculos com os dados nominais da usina real. Primeiramente, nota-se uma diferença entre a potência hidráulica e a potência nominal da turbina, o que indica que grande parte da potência hidráulica é perdida. Isso se dá tanto em perdas no conduto forçado, que neste caso não são relativamente grandes, como em perdas localizadas, rendimentos, entre outros fatores.

É interessante notar que os valores do número de polos de gerador e da velocidade de rotação do conjunto motor-gerador foram idênticos aos valores reais e o diâmetro econômico também se aproximou muito da realidade. A tabela 9 mostra um comparativo entre valores reais e valores calculados:

Tabela 9 - Comparativo Entre Valores Reais e Calculados

	Valores Reais	Valores Calculados
Potência Disponível (MW)	20,6	50,95
Número de Polos do Gerador	28	26 ou 28

Rotação do Conjunto Turbina-Gerador (rpm)	257,14	276,923 ou 257,143
Diâmetro Econômico (m)	5	5,139

Fonte: Autor, 2019

4.4 USINA HIDRELÉTRICA C

A Usina C também não terá seu nome real revelado por questões de confidencialidade dos dados, mas é uma usina real, em pleno funcionamento. Os dados nominais por turbina da usina estão presentes na tabela 10:

Tabela 10 - Dados Nominais da Usina C

Potência Nominal (MW)	40,5
Vazão Nominal (m ³ /s)	75
Queda Bruta Nominal (m)	117,3
Tipo de Turbina	Francis
Rotação do Grupo Turbina-Gerador (rpm)	400
Número de Polos do Gerador	18
Comprimento do Conduto Forçado (m)	376,05
Diâmetro do Conduto Forçado	2,5
Material do Conduto Forçado	Concreto Armado
Unidades Geradoras	3

Fonte: Autor, 2019

Para realização dos cálculos, utiliza-se as fórmulas mencionadas anteriormente. Utilizando a equação 2.1, calcula-se a potência hidráulica do aproveitamento:

$$P = 86.303.475W \quad (4.28)$$

Através da equação 2.3, é calculada a velocidade de escoamento:

$$V = 15,279m/s \quad (4.29)$$

A perda de carga é obtida pela equação 2.4:

$$J = 63,77m/km \quad (4.30)$$

Finalmente, obtém-se a perda de carga em metros, pela equação 2.5:

$$\Delta H = 23,981m \quad (4.31)$$

Essa perda de carga representa, em termos de potência, uma perda de 17.643.700W em cada conduto forçado. Como a usina possui 3 condutos, a perda de carga total nos condutos forçados gira em torno de 52.931.101W.

A rotação específica da turbina pode ser estimada pela equação 3.4:

$$N_s = 212,36 \quad (4.32)$$

Para o cálculo da rotação física da turbina, é utilizada a equação 3.6:

$$N_t = 349,47 \text{rpm} \quad (4.33)$$

O número de polos de cada gerador é estimado pela equação 3.7:

$$p = 20,602 \quad (4.34)$$

Como o número de polos do gerador deve ser um número inteiro par, podemos adotar $p=26$ ou $p=28$. Novamente pela equação 3.7, a rotação física do conjunto turbina-gerador fica:

$$N_t = N_g = 327,272 \text{rpm ou } 300 \text{rpm} \quad (4.35)$$

Por fim, calcula-se o diâmetro econômico através da equação 3.8:

$$D_e = 4,09 \text{m} \quad (4.36)$$

Para melhor visualização dos dados calculados, foram colocados na forma da tabela 11:

Tabela 11 - Dados Calculados da Usina C

Potência Hidráulica (W)	86.303.475
Velocidade de Escoamento (m/s)	15,279
Perda de Carga no Conduto Forçado (m/km)	63,77
Perda de Carga no Conduto Forçado (m)	23,981
Perda de Potência no Conduto Forçado (W)	17.643.700
Perda de Potência Total no Conduto Forçado (W)	52.931.101
Rotação Específica da Turbina	212,36
Número de Polos do Gerador	22 ou 24
Rotação do Conjunto Turbina-Gerador (rpm)	327,272 ou 300
Diâmetro Econômico (m)	4,09

Fonte: Autor, 2019

A partir dos valores calculados, pode-se finalmente comparar os resultados dos cálculos com os dados nominais da usina real. Primeiramente,

nota-se uma diferença entre a potência hidráulica e a potência nominal da turbina, o que indica que grande parte da potência hidráulica é perdida. Isso se dá tanto em perdas no conduto forçado, que neste caso são perdas bastante consideráveis, já que equivalem a aproximadamente 20% do potencial hidráulico, como em perdas localizadas, rendimentos, entre outros fatores.

É interessante notar que os valores do número de polos de gerador e da velocidade de rotação do conjunto motor-gerador foram parecidos com os valores reais e o diâmetro econômico também se aproximou da realidade. A tabela 12 mostra um comparativo entre valores reais e valores calculados:

Tabela 12 - Comparativo Entre Valores Reais e Calculados

	Valores Reais	Valores Calculados
Potência Disponível (MW)	40,5	86,3
Número de Polos do Gerador	18	22 ou 24
Rotação do Conjunto Turbina-Gerador (rpm)	400	327,272 ou 300
Diâmetro Econômico (m)	2,5	4,09

Fonte: Autor, 2019

4.5 USINA HIDRELÉTRICA HENRY BORDEN

A Usina Hidrelétrica Henry Borden é um complexo localizado na Serra do Mar em Cubatão, composto por duas usinas de alta queda (720 m) denominadas de Externa e Subterrânea, com 14 grupos de geradores acionados por turbinas Pelton. Neste trabalho, será considerada apenas a usina externa, com 8 grupos de geradores. Como os grupos turbina-gerador são ligeiramente diferentes, será escolhido o gerador número 4, por conta de ser um gerador intermediário. Os dados nominais por turbina da usina estão presentes na tabela 13 (UHE HENRY BORDEN, 2019):

Tabela 13 - Dados Nominais da Usina de Henry Borden

Potência Nominal (MW)	31,332
Vazão Nominal (m ³ /s)	5,685
Queda Bruta Nominal (m)	718,5
Tipo de Turbina	Pelton
Rotação do Grupo Turbina-Gerador (rpm)	360
Número de Polos do Gerador	20
Comprimento do Conduto Forçado (m)	1500
Diâmetro do Conduto Forçado	4,6
Material do Conduto Forçado	Concreto Armado

Unidades Geradoras	8
--------------------	---

Fonte: Autor, 2019

Para realização dos cálculos, utiliza-se as fórmulas mencionadas anteriormente. Utilizando a equação 2.1, calcula-se a potência hidráulica do aproveitamento:

$$P = 40.070.637W \quad (4.37)$$

Através da equação 2.3, é calculada a velocidade de escoamento:

$$V = 0,342m/s \quad (4.38)$$

A perda de carga é obtida pela equação 2.4:

$$J = 0,024m/km \quad (4.39)$$

Finalmente, obtém-se a perda de carga em metros, pela equação 2.5:

$$\Delta H = 0,036m \quad (4.40)$$

Essa perda de carga representa, em termos de potência, uma perda de 1.998W em cada conduto forçado. Como a usina possui 8 condutos, a perda de carga total nos condutos forçados gira em torno de 15.987W.

A rotação específica da turbina pode ser estimada pela equação 3.3:

$$N_s = 20,907 \quad (4.41)$$

Para o cálculo da rotação física da turbina, é utilizada a equação 3.6:

$$N_t = 376,94rpm \quad (4.42)$$

O número de polos de cada gerador é estimado pela equação 3.7:

$$p = 19,101 \quad (4.43)$$

Como o número de polos do gerador deve ser um número inteiro par, podemos adotar $p=18$ ou $p=20$. Novamente pela equação 3.7, a rotação física do conjunto turbina-gerador fica:

$$N_t = N_g = 400rpm \text{ ou } 360rpm \quad (4.44)$$

Por fim, calcula-se o diâmetro econômico através da equação 3.8:

$$D_e = 4,336m \quad (4.45)$$

Para melhor visualização dos dados calculados, foram colocados na forma da tabela 14:

Tabela 14 - Dados Calculados da Usina Henry Borden

Potência Hidráulica (W)	40.070.637
Velocidade de Escoamento (m/s)	0,342
Perda de Carga no Conduto Forçado (m/km)	0,024
Perda de Carga no Conduto Forçado (m)	0,036
Perda de Potência no Conduto Forçado (W)	1.998
Perda de Potência Total no Conduto Forçado (W)	15.987
Rotação Específica da Turbina	20,907
Número de Polos do Gerador	18 ou 20
Rotação do Conjunto Turbina-Gerador (rpm)	400 ou 360
Diâmetro Econômico (m)	4,336

Fonte: Autor, 2019

A partir dos valores calculados, pode-se finalmente comparar os resultados dos cálculos com os dados nominais da usina real. Primeiramente, destaca-se o uso da turbina Pelton por conta da grande altura de queda. Nota-se também que a diferença entre a potência hidráulica e a potência nominal da turbina não é muito grande, o que indica que grande parte da potência hidráulica é aproveitada, o que fica claro também pelo fato de as perdas no conduto forçado serem pequenas, devido, principalmente, a baixa velocidade de escoamento. As outras perdas ocorrem como perdas localizadas, rendimentos, entre outros fatores.

É interessante notar que os valores do número de polos de gerador e da velocidade de rotação do conjunto turbina-gerador foram idênticos aos valores reais e o diâmetro econômico também se aproximou muito da realidade. A tabela 15 mostra um comparativo entre valores reais e valores calculados:

Tabela 15 - Comparativo Entre Dados Reais e Calculados

	Valores Reais	Valores Calculados
Potência Disponível (MW)	31,332	40,071
Número de Polos do Gerador	20	18 ou 20
Rotação do Conjunto Turbina-Gerador (rpm)	360	400 ou 360
Diâmetro Econômico (m)	4,6	4,336

Fonte: Autor, 2019

4.6 USINA HIDRELÉTRICA DE PICADA

A Usina Hidrelétrica de Picada é uma usina situada na cidade de Juiz de Fora - MG. Possui potência capacidade instalada de 50 MW, com duas turbinas Francis. Os dados nominais por turbina da usina estão presentes na tabela 16:

Tabela 16 - Dados Nominais Usina de Picada

Potência Nominal (MW)	25
Vazão Nominal (m ³ /s)	22,2
Queda Bruta Nominal (m)	127,93
Tipo de Turbina	Francis
Rotação do Grupo Turbina-Gerador (rpm)	450
Número de Polos do Gerador	16
Comprimento do Conduto Forçado (m)	406
Diâmetro do Conduto Forçado	3,5
Material do Conduto Forçado	Concreto Armado
Unidades Geradoras	2

Fonte: Autor, 2019

Para realização dos cálculos, utiliza-se as fórmulas mencionadas anteriormente. Utilizando a equação 2.1, calcula-se a potência hidráulica do aproveitamento:

$$P = 27.860.851W \quad (4.46)$$

Através da equação 2.3, é calculada a velocidade de escoamento:

$$V = 2,307m/s \quad (4.47)$$

A perda de carga é obtida pela equação 2.4:

$$J = 1,213m/km \quad (4.48)$$

Finalmente, obtém-se a perda de carga em metros, pela equação 2.5:

$$\Delta H = 0,493m \quad (4.49)$$

Essa perda de carga representa, em termos de potência, uma perda de 107.258W em cada conduto forçado. Como a usina possui 2 condutos, a perda de carga total nos condutos forçados gira em torno de 214.517W.

A rotação específica da turbina pode ser estimada pela equação 3.4:

$$N_s = 203,35 \quad (4.50)$$

Para o cálculo da rotação física da turbina, é utilizada a equação 3.6:

$$N_t = 474,71 \text{rpm} \quad (4.51)$$

O número de polos de cada gerador é estimado pela equação 3.7:

$$p = 15,167 \quad (4.52)$$

Como o número de polos do gerador deve ser um número inteiro par, podemos adotar $p=14$ ou $p=16$. Novamente pela equação 3.7, a rotação física do conjunto turbina-gerador fica:

$$N_t = N_g = 514,286 \text{rpm ou } 450 \text{rpm} \quad (4.53)$$

Por fim, calcula-se o diâmetro econômico através da equação 3.8:

$$D_e = 3,227 \text{m} \quad (4.54)$$

Para melhor visualização dos dados calculados, foram colocados na forma da tabela 17:

Tabela 17 - Dados Calculados da Usina de Picada

Potência Hidráulica (W)	27.860.851
Velocidade de Escoamento (m/s)	4,615
Perda de Carga no Conduto Forçado (m/km)	3,814
Perda de Carga no Conduto Forçado (m)	1,548
Perda de Potência no Conduto Forçado (W)	674.250
Rotação Específica da Turbina	203,35
Número de Polos do Gerador	14 ou 16
Rotação do Conjunto Turbina-Gerador (rpm)	514,286 ou 450
Diâmetro Econômico (m)	3,227

Fonte: Autor, 2019

Feitos os cálculos, pode-se finalmente comparar os resultados calculados com os dados nominais da usina real. Primeiramente, nota-se uma diferença relativamente pequena entre a potência hidráulica e a potência nominal da turbina, o que indica que grande parte da potência hidráulica está sendo aproveitada. Isso se dá por conta de poucas perdas no conduto forçado, assim como em perdas localizadas, rendimentos, e outros fatores.

É interessante notar que os valores do número de polos de gerador e a velocidade de rotação do conjunto motor-gerador foram idênticos aos valores reais. A tabela 18 mostra um comparativo entre valores reais e valores calculados:

Tabela 18 - Comparativos Entre Dados Reais e Calculados

	Valores Reais	Valores Calculados
Potência Disponível (MW)	25	27,86
Número de Polos do Gerador	16	14 ou 16
Rotação do Conjunto Turbina-Gerador (rpm)	450	514,286 ou 450
Diâmetro Econômico (m)	3,5	3,227

Fonte: Autor, 2019

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise de instalações tão complexas e tão importantes como as usinas hidrelétricas não são simples de serem feitas, pois envolvem inúmeros fatores. Para um estudo aprofundado, são necessários vários aspectos, tanto técnicos, quanto econômicos. Na parte técnica, necessita-se de estudos ambientais, estruturais, mecânicos, elétricos, entre outros. Na parte econômica devem ser analisados um grande investimento inicial, porém com longos períodos de vida útil.

O trabalho buscou focar na parte elétrica de uma usina, trazendo os conceitos, fundamentos teóricos, funcionamento e otimização dos principais equipamentos necessários em um empreendimento desse porte.

Os cálculos dos dados das usinas analisadas foram feitos através de equações muitas vezes empíricas, mas que são muito utilizadas na prática e a comparação entre os dados nominais e calculados permitiu averiguar a validade, com aproximação muito boa e até com valores idênticos aos vistos em campo.

A análise das perdas nos condutos forçados mostrou valores, na maioria dos casos, muito grandes, constatando que boa parte da energia hidráulica de um aproveitamento é perdida. O método de cálculo do diâmetro econômico mostrou ser um método bastante eficaz para projeto do diâmetro do conduto forçado e certamente muito utilizado, já que muitas vezes se aproximou muito dos dados nominais das usinas.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

O estudo de hidrelétricas é algo muito amplo e muito complexo, portanto, uma sugestão bastante válida seria a elaboração de trabalhos conjuntos entre engenheiros civis, mecânicos, eletricitas e ambientais, em busca de métodos mais amplos e eficazes de projetos destes empreendimentos.

Outra sugestão é a confecção de trabalhos que mostrem os dados nominais de usinas, visto que essa foi uma das maiores dificuldades para elaboração dos estudos de caso.

Destaca-se também a possibilidade de uma análise mais aprofundada de usinas específicas, elaborando, além dos cálculos acima apresentados, cálculos de perdas específicas, espessura dos condutos forçados, velocidade da água no tubo de sucção, entre outros.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil). Atlas da Energia Elétrica do Brasil. Brasília: ed. 3, 2008.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil). Resolução Normativa Nº673, de 4 de Agosto de 2015. Brasília: ANEEL, 2015.
- CARVALHO, D.F. Usinas Hidroelétricas: Turbinas. Belo Horizonte: FUMARC/PUCMG, ed. 1, 1982.
- CAUES, Tuane Regia e MICHELS, Aemar. Energia Hidrelétrica: Eficiência na Geração. Universidade Federal de Santa Maria, UFSM. Camargo, 2016.
- COLNAGO, Glauber Renato. Contribuição para a Otimização de Turbinas em Usinas Hidrelétricas: Especificação e Operação. 2011. 163f. Tese de Doutorado (Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 2011.
- COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS. Revista Brasileira de Engenharia de Barragens. Ed. 3, 2016.
- CORUMBÁ NEOENERGIA. Disponível em: <https://www.neoenergia.com/pt-br/sobre-nos/linhas-de-negocios/renovaveis/renovaveis-hidrica/Paginas/corumba.aspx>. Acesso em 25 set. 2019.
- EFISICA. Disponível em: http://efisica.if.usp.br/eletricidade/basico/ac/usinas_eletricas/. Acesso em 10 out. 2019.
- ELETROBRÁS. Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas. Centrais Elétricas Brasileiras - ELETROBRÁS. Rio de Janeiro, 2003.
- ELETROBRÁS. Dicionário da Energia Elétrica <https://eletrobras.com/pt/Paginas/Dicionario-da-Energia-Eletrica.aspx>. Acesso em: 25 SET. 2019
- ELETROBRÁS. Diretrizes para Estudos e Projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas. Rio de Janeiro: ELETROBRÁS, 1999.
- ENCINA, Anastácio Sebastián Arce. Despacho Ótimo de Unidades Geradoras em Sistemas Hidrelétricos Via Heurística Baseada em Relaxação Lagrangeana e Programação Dinâmica. Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP. Campinas, 2006.
- ITAIPÚ BINACIONAL. Disponível em: <https://www.itaipu.gov.br/>. Acesso em 25 set. 2019.
- ITAIPÚ BINACIONAL. Disponível em: <https://www.itaipu.gov.br/energia/tomada-d%E2%80%99agua>. Acesso em 02 out. 2019.
- MIRANDA, Roberto Lobo. Regulação Técnica Para Se Obter Melhor Eficiência Na Motorização De Pequenas Centrais Hidrelétricas No Brasil. 2009. 119f. Tese de Mestrado (Regulação da Indústria de Energia) – Universidade de Salvador. Salvador, 2009.

MONTICELLO, California. Disponível em: <http://www.fogonazos.es/2007/02/el-mayor-desage-del-mundo.html>. Acesso em: 29 set. 2019.

PCH PARACAMBI. Desenho. Disponível em: <http://www.pchparacambi.com.br/o-empendedor/o-que-e-uma-pch/>. Acesso em: 20 set. 2019.

PEREIRA, G. M. Projeto de usinas hidrelétricas passo a passo. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

SIMONE, G. A. Centrais e Aproveitamentos Hidrelétricos: Uma Introdução ao Estudo. São Paulo: Érica, ed. 1, 2010.

TRIPOD, members. Disponível em: http://members.tripod.com/mqhd_ita.mx/u3.htm. Acesso em 29 out. 2019.

UHE HENRY BORDEN. Disponível em: <http://www.emaec.com.br/conteudo.asp?id=Usina-Hidroeletrica-Henry-Borden>. Acesso em: 20 nov. 2019.

UHE HENRY BORDEN. Disponível em: http://www.consultaesic.cgu.gov.br/busca/dados/Lists/Pedido/Attachments/413189/RESPOSTA_RECORSO_1_48500.004494%202006-74%20vol%201.pdf. Acesso em 24 nov. 2019.

UHE SÃO MANOEL. Disponível em: <https://saomanoelenergia.com.br/pt-br/a-usina-1>. Acesso em 11 nov. 2019.

UHE TAKATO DAN, Japão. Disponível em: <https://www.pinterest.com/carolinewheritt/rework-ideas/>. Acesso em 26 set. 2019.

UHE TELES PIRES. Disponível em: http://www.uhetelespires.com.br/site/?attachment_id=3832#body. Acesso em 10 out. 2019.

UHE TUCURUÍ. Disponível em: <http://jornaldetucurui.blogspot.com/2012/11/usina-hidroeletrica-de-tucurui-comemorou.html>. Acesso em 22 out. 2019.

USP. Disponível em: http://www.leb.esalq.usp.br/leb/disciplinas/Fernando/leb472/Aula_11/. Acesso em 15 out. 2019.

VA TECH, hydro. Disponível em: <https://www.andritz.com/hydro-en/about-andritz-hydro/locations/india>. Acesso em 12 nov. 2019.

WIKIPEDIA. Disponível em: https://commons.wikipedia.org/wiki/category:surge_tanks . Acesso em 15 out. 2019.