



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Thiago da Silva Vieira Brito

Campina Grande – Paraíba
Julho de 2010

Thiago da Silva Vieira Brito

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

FUNCIONAMENTO DE UMA PEQUENA CENTRAL HIDRELÉTRICA

Trabalho apresentado junto à Coordenação do curso de Engenharia Elétrica da UFCG, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Eletrotécnico.

Orientador: **Prof. Leimar de Oliveira**

Campina Grande – Paraíba
Julho de 2010

Thiago da Silva Vieira Brito

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

FUNCIONAMENTO DE UMA PEQUENA CENTRAL HIDRELÉTRICA

Trabalho apresentado junto à Coordenação do curso de Engenharia Elétrica da UFCG, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Eletrotécnico.

COMISSÃO EXAMINADORA

Orientador: Prof. Leimar de Oliveira

CONVIDADO

Campina Grande – Paraíba
Julho de 2010

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus por ter me iluminado com a sabedoria necessária para entender e superar os desafios da vida, dando-me força para não desistir diante de todas as adversidades.

A meus pais, que não mediram esforços para que eu conseguisse concluir meu curso, me dando apoio em todos os momentos.

A todos os meus colegas de curso que dividiram comigo tantos momentos, durante toda a trajetória da minha vida acadêmica.

Aos professores Leimar de Oliveira e Edgar Roosevelt pela grande contribuição no desenvolvimento deste trabalho e pela participação valiosa em minha formação acadêmica e profissional.

A todos os outros professores do Departamento de Engenharia Elétrica da UFCG que participaram da minha vida acadêmica, apresentando-me todos os conhecimentos necessários para uma formação sólida em engenharia elétrica.

A todos os funcionários da coordenação de engenharia elétrica, em especial a Adail que sempre me ajudou a superar os obstáculos encontrados na vida acadêmica.

Agradeço também a todos aqueles que não foram citados, mas que de forma direta ou indireta, contribuíram significativamente para a minha formação.

DEDICATÓRIA

A meu pai, *Valmir Vieira de Brito* e à
minha mãe, *Terezinha da Silva Vieira*.

*“Todo o bem que praticares será teu
advogado por toda a eternidade.”*

APRESENTAÇÃO

O Principal objetivo deste trabalho é apresentar a importância da hidroeletricidade para o setor energético brasileiro, pelo potencial que nosso país possui de geração através dessa fonte e pelo fato de ser uma fonte de energia limpa e renovável. Serão apresentados alguns dados do sistema elétrico brasileiro, e a contribuição das Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH'S), que são responsáveis por uma grande parcela da geração de energia elétrica no Brasil. É apresentada a forma de geração nesse tipo de usina, mostrando cada etapa do processo. São dadas as classificações das Hidrelétricas quanto a vários aspectos como : tipo de reservatório, potência gerada, altura da queda d'água e tipo de turbina, Assim como são apresentadas as principais turbinas em uso atualmente nessas unidades geradoras. São mostrados ainda os principais aspectos construtivos de PCH's. Também é feita uma abordagem da casa de força dessas usinas, mostrando os principais auxiliares mecânicos e os principais equipamentos, dando-se importância ao gerador e mostrando os principais sistemas de excitação aplicados na atualidade. Mostra-se com esse trabalho a importância cada vez mais crescente do investimento em PCH's, devido ao aumento cada vez mais significativo do consumo energético no país e essa fonte ser notadamente uma das soluções mais viáveis e pouco degradante ao ecossistema.

Lista de Figuras

Figura 1 – Matriz Energética Brasileira	2
Figura 2 - Etapas do Processo de utilização de Energia Elétrica	5
Figura 3 – Usina a Fio d’água e com Reservatório Acumulador	6
Figura 4 – Turbina Pelton	9
Figura 5 – Turbina Francis	9
Figura 6 – Turbina Kaplan	10
Figura 7 – Turbina Bulbo	10
Figura 8 – Reservatório da Usina Paranatinga-MT	11
Figura 9 – Barragem da PCH Queluz-SP	12
Figura 10 – Abertura da Ensecadeira da PCH Lavrinhas-SP	13
Figura 11 – Vertedouro da PCH Lavrinhas-SP	13
Figura 12 – Tomada d’água PCH Lavrinhas-SP.....	14
Figura 13 – Ponte Rolante da PCH Queluz-SP	14
Figura 14 – Monovia	15
Figura 15 – Pórtico Rolante da PCH Queluz-SP	15
Figura 16 – Transformador auxiliar e Gerador Diesel	17
Figura 17 – Banco de Baterias e retificadores da PCH Queluz-SP	17
Figura 18 – Sistema de Excitação sem escovas com bobina auxiliar	18
Figura 19 – Sistema de Excitação sem escovas com imã permanente	19
Figura 20 – Rotor e Estator	19
Figura 21 – Painéis de Proteção e Controle	20
Figura 22 – Transformador Elevador da PCH Queluz-SP	21

Lista de tabelas

Tabela 1 – Classificação das Hidrelétricas quanto a Potência instalada	7
--	---

Sumário

Capítulo 1	Introdução	1
Capítulo 2	Sistema Elétrico Brasileiro	2
Capítulo 3	Centrais Hidrelétricas	4
3.1	Forma de Geração	4
3.2	Classificação de Hidrelétricas	5
3.2.1	Tipos de Reservatórios	5
3.2.2	Potência Instalada	6
3.2.3	Altura da Queda d'água	7
3.2.4	Tipo da Turbina	7
3.2.4.1	Turbinas Pelton	8
3.2.4.2	Turbinas Francis	9
3.2.4.3	Turbinas Kaplan	9
3.2.4.4	Turbinas Bulbo	10
3.3	Aspectos Construtivos	11
3.3.1	Reservatório	11
3.3.2	Barragem	11
3.3.3	Ensecadeira	12
3.3.4	Vertedouro	13
3.3.5	Tomada d'água	13
3.3.6	Ponte Rolante, monovia e Pórtico Rolante	14
3.4	Casa de Força	15
3.4.1	Auxiliares Mecânicos	16
3.4.2	Equipamentos Elétricos Auxiliares	16
3.4.3	Gerador	17
3.4.4	Proteção e Controle	20
3.4.5	Transformador Elevador	20
4	Conclusões	22
	Bibliografia	23

Capítulo 1

Introdução

A motivação deste trabalho surgiu quando do início do meu estágio integrado, realizado em uma Pequena Central Hidrelétrica na cidade de Queluz, no estado de São Paulo. A partir daí passei a ter mais contato com esse tipo de unidade geradora e pude ver a importância estratégica desse tipo de usina no desenvolvimento econômico do país, principalmente nas regiões sul e sudeste, onde a aplicação dessas usinas é mais aplicável.

É recente a preocupação com estudos de unidades de geração de energia elétrica que possam gerar energia de forma que cause pouco impacto ambiental, e as Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH's) são menos danosas ao meio ambiente que a maioria dos outros tipos de usinas, pois utilizam-se de uma fonte de energia limpa e renovável, e por não precisarem de grandes áreas de alagamento para seus reservatórios, não se faz necessária a devastação de grande áreas.

No Brasil, já temos mais 320 PCH's em funcionamento, contribuindo com algo em torno de 2400 MW, esse número vem crescendo a cada dia com mais licitações sendo concedidas, isso se dá devido ao aumento do consumo energético no país, devido a expansão econômica que o país vem sofrendo nos últimos anos. Por ser o setor energético muito lucrativo, é de interesse dos investidores a aplicação na construção dessas usinas, pois o retorno econômico é obtido de forma rápida.

No capítulo 2, destaca-se a importância da hidroeletricidade para o setor energético brasileiro, destacando sua importância frente as demais fontes de geração e ressaltando o papel de destaque do Brasil frente os outros países do mundo.

No capítulo 3, é mostrado como se dá a conversão da energia potencial de um rio em energia elétrica, desde da captação da água até a distribuição da energia elétrica. Em seguida faz-se uma classificação das Hidrelétricas quanto ao tipo de reservatório, altura da queda d'água, e tipo de turbina instalada. E em seguida os tipos de turbinas são apresentadas de forma detalhada. São mostrados os principais aspectos construtivos de uma PCH, como barragens, vertedouro, ensecadeira, tomada d'água e outros. A seguir são detalhados os principais auxiliares mecânicos, os equipamentos elétricos auxiliares e faz-se uma abordagem sobre os geradores e transformadores elevadores.

O Capítulo 4 é conclusivo e reflete os principais pontos abordados nesse estudo. Busca-se abranger de forma geral tudo que foi apresentado no trabalho.

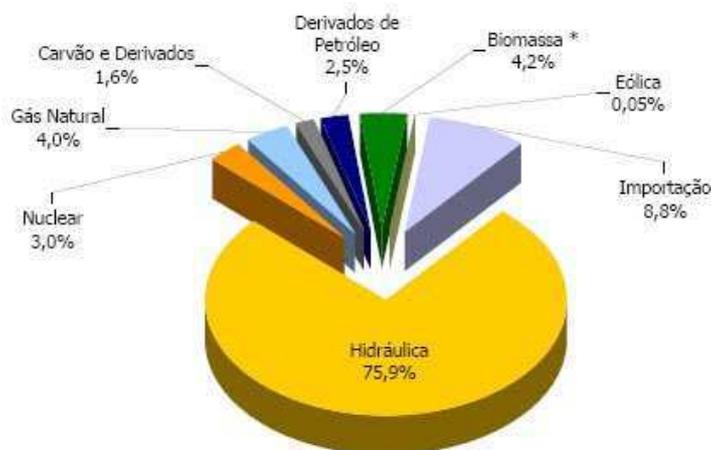
Capítulo 2

O Sistema Elétrico Brasileiro

O sistema elétrico brasileiro apresenta como particularidade grandes extensões de linhas de transmissão que interligam todas as regiões (mais de 90 mil km e operado por 64 concessionárias), o chamado Sistema Interligado Nacional (SIN), e um parque produtor de geração predominantemente hidráulico. O mercado consumidor (61 milhões de unidades) concentra-se nas regiões Sul e Sudeste, mais industrializadas, regiões essas também mais propícias a instalação de novas Pequenas Centrais Hidrelétricas, devido a grande possibilidade de aproveitamento de seus rios. A região Norte é atendida de forma intensiva por pequenas centrais geradoras, onde a maioria são termelétricas a óleo diesel.

De acordo com os resultados preliminares do Balanço Energético Nacional – BEN 2009, produzido pela Empresa de Pesquisa Energética – EPE, com exceção da energia hidráulica, houve expansão do consumo de todas as principais formas de energia primária. Com o lançamento do lançamento do Plano de Aceleração do Crescimento (PAC), houve um acréscimo nos subsídios do governo para a implantação de novas unidades geradoras, esse projeto também contempla a criação de novas hidrelétricas de pequeno porte, assim como a construção de novas termelétricas.

Apesar da redução do consumo de energia hidráulica, a hidroeletricidade possui papel fundamental na matriz energética brasileira. Os dados apresentados pelo Banco de Informações da Geração (BIG) mostram que, em novembro de 2008, existiam em operação 227 Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGH), com potência total de 120 megawatt (MW), 320 Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH) com capacidade total de 2,4 mil MW e 159 Usinas Hidrelétricas de Energia (UHE) com potência total de 74,632 mil MW. Portanto em 12 novembro de 2008, as usinas hidrelétricas, independentemente de seu porte, respondiam por 75,9% da potência instalada do país [1].



Nota: * Inclui lenha, bagaço de cana-de-açúcar, lixívia e outras recuperações.

Figura 1- Matriz Energética Brasileira.

O Brasil é o país com maior potencial hidrelétrico em todo o mundo. Com um potencial de 260 mil MW, pouco mais de 30% se transformaram em usinas construídas ou outorgadas. A bacia do rio Amazonas é a maior do país, com um potencial de 106 mil MW, superior à potência já instalada no Brasil, em 2008, de 102 mil MW. É na bacia do Amazonas, no rio Madeira, que estão sendo construídas as Usinas de Santo Antônio, licitada em 2007 com capacidade de 3.150 MW e a Usina de Jirau, licitada em 2008, com capacidade instalada de 3.300 MW.

Capítulo 3

Centrais Hidrelétricas

Uma usina hidrelétrica pode ser definida como um conjunto de obras e equipamentos cuja finalidade é a geração de energia elétrica, através de aproveitamento do potencial hidráulico existente em um rio. A geração hidrelétrica está associada à vazão do rio, isto é, à quantidade de água disponível em um determinado período de tempo e à altura de sua queda.

Quanto maiores são os volumes de sua queda, maior é seu potencial de aproveitamento na geração de eletricidade. A vazão de um rio depende de suas condições geológicas, como largura, inclinação, tipo de solo, obstáculos e quedas e é determinada ainda pela quantidade de chuvas que o alimentam, o que faz com que sua capacidade de produção de energia varie bastante ao longo do ano [4].

O potencial hidráulico é proporcionado pela vazão hidráulica e pela concentração dos desníveis existentes ao longo do curso de um rio. Isto pode se dar de uma forma natural, quando o desnível está concentrado numa cachoeira; através de uma barragem, quando pequenos desníveis são concentrados na altura da barragem ou através de desvio do rio de seu leito natural, concentrando-se os pequenos desníveis nesses desvios.

Basicamente, uma usina hidrelétrica compõe-se das seguintes partes: barragem, tomada d'água, vertedouro, casa de força e subestação. Cada parte se constitui em um conjunto de obras e instalações projetadas harmoniosamente para operar eficientemente em conjunto.

3.1 Forma de Geração

Para aproveitar o potencial hidrelétrico de um determinado rio, geralmente interrompe-se seu curso normal através de uma barragem que provoca a formação de um lago artificial chamado reservatório. A água captada no lago formado pela barragem é conduzida até a casa de força através de canais, túneis e/ou condutos metálicos. Após passar pela turbina hidráulica, na casa de força, a água é restituída ao leito natural do rio, através do canal de fuga.

Dessa forma, a potência hidráulica é transformada em potência mecânica quando a água passa pela turbina, fazendo com que esta gire, provocando a rotação do rotor do gerador que está acoplado à mesma através de um eixo, sendo assim a potência mecânica é transformada em potência elétrica nos terminais do gerador.

A energia assim gerada é levada através de cabos ou barras condutoras, dos terminais do gerador até o transformador elevador, que eleva essa tensão para valores adequados a condução, através de linhas de transmissão, até os centros de consumo. Daí, através de transformadores abaixadores, a energia em sua tensão levada a níveis

adequados para utilização pelos consumidores. A figura 2 mostra, de maneira simplificada, as etapas do processo de geração apresentadas acima.

As principais variáveis utilizadas na classificação de uma usina hidrelétrica são: altura da queda d'água, vazão, capacidade ou potência instalada, tipo de turbina empregada, localização, tipo de barragem e reservatório. Todos são fatores

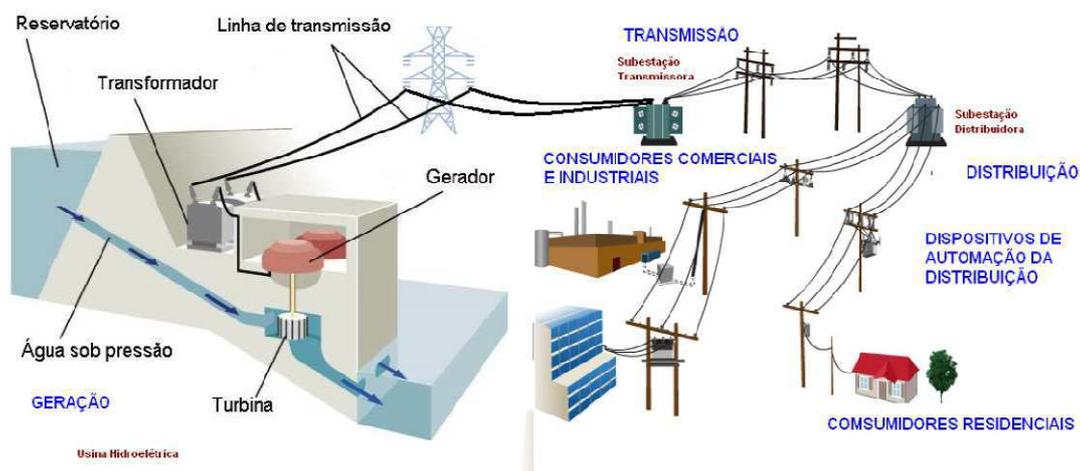


Figura 2– Etapas do processo de utilização de energia elétrica.

3.2 Classificações das Hidrelétricas

As principais variáveis utilizadas na classificação de uma usina hidrelétrica são: altura da queda d'água, vazão, capacidade ou potência instalada, tipo de turbina empregada, localização, tipo de barragem e reservatório. Todos são fatores interdependentes. Assim, a altura da queda d'água e a vazão dependem do local de construção e determinarão qual será a capacidade instalada - que, por sua vez, determina o tipo de turbina, barragem e reservatório.

3.2.1 Tipos de reservatórios

Com relação ao reservatório as usinas podem ser classificadas de dois tipos: com reservatório de acumulação e a fio d'água.

Os primeiros, geralmente localizados na cabeceira dos rios, em locais de altas quedas d'água, dado o seu grande porte permitem o acúmulo de grande quantidade de água e funcionam como estoques a serem utilizados em períodos de estiagem. Além disso, como estão localizados a montante das demais hidrelétricas, regulam a vazão da

água que irá fluir para elas, de forma a permitir a operação integrada do conjunto de usinas.

PCH a fio d'água é empregada quando as vazões de estiagem do rio são iguais ou maiores que a descarga necessária à potência a ser instalada para atender à demanda máxima prevista. Nesse caso, despreza-se o volume do reservatório criado pela barragem. O sistema de adução deverá ser projetado para conduzir a descarga necessária para fornecer a potência que atenda à demanda máxima. O aproveitamento energético local será parcial e o vertedouro funcionará na quase totalidade do tempo, extravasando o excesso de água.

Na figura 3, podemos visualizar os dois tipos de usinas hidrelétricas no que diz respeito ao reservatório.



Figura 3 – Usina a fio d'água e com reservatório de acumulação.

3.2.2 Potência instalada

A potência instalada determina se a usina é de grande ou médio porte ou uma Pequena Central Hidrelétrica (PCH). A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) adota três classificações: Centrais Geradoras Hidrelétricas (com até 1 MW de potência instalada), Pequenas Centrais Hidrelétricas (entre 1,1 MW e 30 MW de potência instalada e área inferior a 3 km²) e Usina Hidrelétrica de Energia (UHE, com mais de 30 MW). No entanto, costumasse classificar as usinas hidrelétricas, no que se refere à potência instalada, de acordo com a tabela abaixo.

Tabela 1 – Classificação das hidrelétricas quanto à potência gerada.

TIPO DE USINA HIDRELÉTRICA	POTÊNCIA INSTALADA P (MW)
<i>Micro Central</i>	$P \leq 0,1$
<i>Mini Central</i>	$0,1 < P \leq 1$
<i>Pequena Central</i>	$1 < P \leq 30$
<i>Média Central</i>	$30 < P \leq 100$
<i>Grande Central</i>	$P > 100$

3.2.3 Altura da queda d'água

A queda d'água, no geral, é definida como de alta, baixa ou média altura. O Centro Nacional de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas (Cerpch, da Universidade Federal de Itajubá – Unifei) considera baixa queda uma altura de até 15 metros e alta queda, superior a 150 metros. Mas não há consenso com relação a essas medidas [1].

3.2.4 Tipo de turbina

As turbinas hidráulicas dividem-se diversos tipos, sendo quatro tipos principais: Pelton, Francis, Kaplan, Bulbo. Cada um destes tipos é adaptado para funcionar em usinas com uma determinada faixa de altura de queda e vazão. As vazões volumétricas podem ser igualmente grandes em qualquer uma delas, mas a potência será proporcional ao produto da queda (H) e da vazão volumétrica (Q).

Em todos os tipos há alguns princípios de funcionamento comuns. A água entra pela tomada de água a montante da usina hidrelétrica que está num nível mais elevado, e é levada através de um conduto forçado até a entrada da turbina. Lá a água passa por um sistema de palhetas guias móveis, que controlam a vazão volumétrica fornecida à turbina. Para se aumentar a potência as palhetas se abrem, para diminuir a potência elas se fecham. Estas palhetas são conhecidas como distribuidor.

Após passar pelo rotor, um duto chamado tubo de sucção, conduz a água até a parte de jusante da casa de força, no nível mais baixo. As turbinas Pelton, têm um princípio um pouco diferente, pois inicialmente a pressão é transformada em energia cinética, em um bocal, onde o fluxo de água é acelerado até uma alta velocidade, e em seguida choca-se com as pás da turbina imprimindo-lhe rotação e torque.

As turbinas hidráulicas podem ser montadas com o eixo no sentido vertical ou horizontal. Os esforços oriundos do peso próprio e da operação da máquina são

suportados por mancais, sendo que o arranjo e quantidade de mancais podem variar em cada projeto.

A potência em (W) de uma turbina pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$P = \rho Q H g \eta$$

Onde:

ρ – densidade da água em (kg/m³) .

Q – vazão de água que atravessa a turbina em (m³/s).

H – queda d'água em (m).

η – eficiência total da turbina em (p.u.).

A eficiência é a fração da energia total da fonte de energia primária (no caso a água) que é convertida em energia útil (no caso potência de eixo).

3.2.4.1 Turbinas Pelton

São adequadas para operar entre quedas de 350 m até 1100 m, sendo por isso, muito mais comuns em países montanhosos.

Este modelo de turbina opera com velocidades de rotação maiores que os outros, e tem o rotor com características bastante distintas. Os jatos de água ao se chocarem com as "conchas" do rotor geram o impulso. Dependendo da potência que se queira gerar podem ser acionados os seis bocais simultaneamente, ou apenas cinco, quatro, etc. O número normal de bocais varia de dois a seis, igualmente espaçados angularmente para garantir um balanceamento dinâmico do rotor. O controle da vazão turbinada e, conseqüentemente, da potência desenvolvida, é feito por meio de uma agulha móvel disposta no interior de cada injetor e acionada por mecanismo hidráulico

Um dos maiores problemas destas turbinas, devido à alta velocidade com que a água se choca com o rotor, é a erosão provocada pelo efeito abrasivo da areia misturada com a água, comum em rios de montanhas. As turbinas pelton, devido a possibilidade de acionamento independente nos diferentes bocais, têm uma curva geral de eficiência plana, que lhe garante bom desempenho em diversas condições de operação. A figura 3 apresenta um tipo de turbina Pelton.

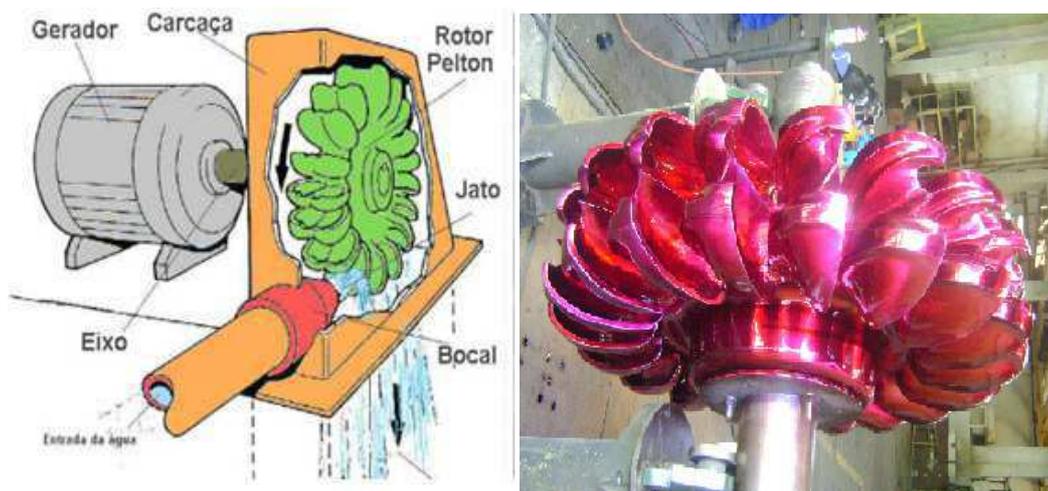


Figura 4 - Turbina Pelton

3.2.4.2 Turbinas Francis

A faixa de aplicação da turbina Francis é bem mais abrangente, são adequadas para operar entre quedas de 40 m até 400 m. Possui uma caixa espiral em aço ligada em seu lado montante a um conduto forçado. Na periferia interna da caixa espiral, um anel rígido suporta as pás fixas do pré-distribuidor. A variação da potência fornecida pela turbina é obtida com a abertura ou fechamento das palhetas diretrizes situadas na periferia interna do pré-distribuidor em um conjunto chamado distribuidor. A Usina hidrelétrica de Itaipu assim como a Usina hidrelétrica de Tucuruí, Furnas e outras no Brasil funcionam com turbinas tipo Francis com cerca de 100 m de queda d' água. A figura abaixo mostra as partes constituintes de uma turbina Francis.



Figura 5 - Turbinas Francis

3.2.4.3 Turbinas Kaplan

São adequadas para operar entre quedas até 60 m. A única diferença entre as turbinas Kaplan e a Francis é o rotor. Este assemelha-se a um propulsor de navio (similar a uma hélice). O óleo, é injetado por um sistema de bombeamento localizado fora da turbina, e conduzido até o rotor por um conjunto de tubulações rotativas que passam por dentro do eixo.

O acionamento das pás é conjugado ao das palhetas do distribuidor, de modo que para uma determinada abertura do distribuidor, corresponde um determinado valor de inclinação das pás do rotor.



Figura 6 - Turbina Kaplan à esquerda e distribuidor à direita.

3.2.4.4 Turbinas Bulbo

Turbinas Bulbo operam em quedas abaixo de 20 m. Foram inventadas na década de 30 e aplicadas na década de 1960, na França, para a usina maremotriz de La Rance e depois desenvolvidas para outras finalidades. Possui a turbina similar a uma turbina Kaplan horizontal, porém devido à baixa queda, o gerador hidráulico encontra-se em um bulbo por onde a água flui ao seu redor antes de chegar às pás da turbina, como podemos observar na figura abaixo.

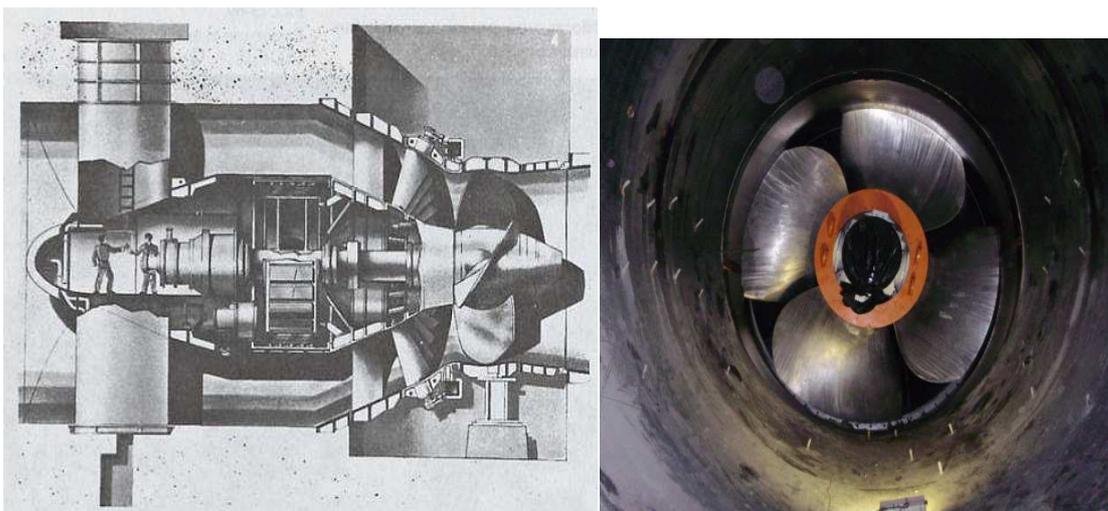


Figura 7 – Turbinas Bulbo.

No Brasil as Usinas de Santo Antônio e Jirau, a fio d'água, em construção no rio Madeira (Rondônia), constam no projeto de cada usina a instalação de 44 turbinas do tipo Bulbo com potência unitária igual a 73 MW e 75 MW, respectivamente.

3.3 Aspectos construtivos

Será apresentado a seguir um detalhamento de todas as partes integrantes ou envolvidas na construção de uma usina hidrelétrica: reservatório, barragem, ensecadeira, tomada d'água, vertedouro, casa de força e canal de fuga.

3.3.1 Reservatório

O reservatório é a parte de uma usina hidrelétrica que exige especial atenção pelo aspecto energético e ambiental. Acumula água por meio de barragem garantindo uma cota de água e compensando períodos de estiagem. O reservatório de uma planta hidrelétrica é responsável por até 30% do custo total de construção. A figura 8 mostra o reservatório da Usina Paranatinga, em Mato Grosso (MT).



Figura 8 – Reservatório da Usina Paranatinga – MT.

3.3.2 Barragem

Pode ser definida como sendo um elemento estrutural, construído transversalmente à direção de escoamento de um curso d'água, destinado à criação de um reservatório artificial de acumulação de água para determinados fins, criando um desnível local.

As barragens podem ser classificadas em diferentes tipos, de acordo com o seu objetivo, seu projeto hidráulico e os tipos de materiais empregados na sua construção:

– **Barragem de terra:** construída com terra compacta, com seções transversais trapezoidais, recoberta por revestimento protetor em pedra ou grama. Esse tipo de barragem é apropriado para locais onde a topografia se apresente suavemente ondulada, nos vales pouco encaixados, e onde existam áreas de empréstimo de materiais argilosos/arenosos suficientes para a construção do maciço compactado.

– **Barragem de enrocamento:** Esse tipo de barragem, com espaldares de rocha e núcleo impermeável, é apropriado para os vales medianamente encaixados em regiões rochosas, nas quais o capeamento de solo muitas vezes não existe ou é pouco espesso, onde existam condições adequadas de fundações e pedreiras facilmente exploráveis a custo competitivo e/ou excesso de escavações obrigatórias em rocha. A inexistência de áreas de empréstimo de solos argilosos torna antieconômica a adoção de barragem de terra nesses locais.

.– **Barragem em arco:** sua estrutura é um arco de concreto.

– **Barragem mista:** sua estrutura é composta de um núcleo de terra compactada, revestido com placas de concreto.

– **Barragem de gravidade :** estrutura de concreto, enrocamento, ou mista, resiste aos vários esforços para a pior situação de carregamento para cada esforço considerado.

A figura abaixo mostra a barragem da PCH Queluz, do tipo terra. O aterro da barragem foi compactado em camadas com graus de compactação e umidades controladas, utilizando-se solos das áreas de empréstimo.



Figura 9 – Barragem da PCH Queluz-SP.

3.3.3 Ensecadeira

A ensecadeira consiste de uma barragem temporária destinada a desviar as águas do curso natural para permitir a construção da barragem permanente da usina, sendo destruída ou ficando submersa. A seguir é mostrada uma ensecadeira para reconstrução da barragem destruída da PCH Lavrinhas - SP.



Figura 10 – Abertura da ensecadeira da PCH Lavrinhas – SP.

3.3.4 Vertedouro

É uma estrutura hidráulica projetada e construída com o objetivo de escoar o excesso d'água acumulado pelo reservatório, evitando o risco do nível d'água atingir a crista da barragem. Geralmente os vertedouros são projetados para suportarem uma vazão com tempo de recorrência de 10.000 anos, sem sobrelevação do reservatório. Será mostrado a seguir o vertedouro da PCH Lavrinhas, formado por duas comportas segmentos.



Figura 11 – Vertedouro da PCH Lavrinhas - SP.

3.3.5 Tomada D'água

Destinada a captar a água necessária ao funcionamento das turbinas hidráulicas. A tomada d'água contém uma grade para eliminar ou reter o material sólido transportado pela água que poderiam danificar as turbinas. A conexão com a casa de força é feita geralmente através de condutos forçado de aço, porém, nas PCH's Queluz e Lavrinhas, essa conexão não usa conduto forçado de aço, pois são usadas turbinas tipo Bulbo. Na figura 12 é mostrada a tomada d'água da PCH Queluz, composta de 4 (quatro) comportas vagão ou planas e de 4 (quatro) comportas de ensecadeira.



Figura 12 – Tomada D'água PCH Lavrinhas- SP

3.3.6 Ponte Rolante, Monovia e Pórtico Rolante.

Ponte rolante é um equipamento de uso industrial, constituído de uma ou duas vigas transversais que se deslocam sobre trilhos, montadas a uma altura elevada dentro de um edifício (galpão). Uma ponte rolante desloca-se horizontalmente ao longo do caminho de rolamento, no sentido da profundidade do galpão (longitudinal). O carro, por sua vez, desloca-se horizontalmente ao longo da(s) viga(s) da ponte rolante, da esquerda para direita ou da direita para a esquerda (sentido transversal). Os dois movimentos combinados permitem a cobertura quase total da área interna do edifício onde se instala a ponte rolante, possibilitando o deslocamento de cargas entre quaisquer pontos dentro da área útil de alcance do equipamento, como mostra a figura 13.



Figura 13 – Ponte Rolante da PCH Queluz- SP

A monovia se localiza na jusante da UHE, e também tem a função de levantar cargas com pesos elevados. Ela tem como função principal levantar comportas da

USINA, e é utilizada em conjunto com uma peça denominada de viga pescadeira, que se fixa na comporta para o levantamento da mesma.



Figura 14: Monovia

O pórtico rolante também tem a função de levantar equipamento de pesos elevados como comportas, no entanto esta se localiza na montante da usina, ou seja, na tomada d'água.



Figura 15 – Pórtico Rolante PCH Queluz-SP

3.4 Casa de Força

Corresponde à casa das máquinas, onde abrigam o gerador, equipamentos elétricos auxiliares, equipamentos auxiliares mecânicos e a sala de controle. A casa de força deve possuir uma ponte rolante destinada à montagem das unidades geradoras e eventuais movimentações dos equipamentos durante a construção da usina.

3.4.1 Auxiliares Mecânicos

Os auxiliares mecânicos são equipamentos que dão suporte para que o funcionamento das unidades de geração se dê de forma adequada e segura. Serão apresentados a seguir os principais sistemas de serviços auxiliares.

- ✓ **Sistema de Esvaziamento:** o sistema de esvaziamento tem por finalidade, permitir o esvaziamento total do circuito hidráulico, desde a comporta vagão da tomada d'água até a comporta ensecadeira do canal de fuga compreendendo o conduto forçado e turbinas. O esvaziamento dos condutos forçados e do tubo de sucção é feito por motores acoplados a bombas de esvaziamento, após o fechamento da comporta ensecadeira de jusante.
- ✓ **Sistema de Drenagem:** o sistema de drenagem tem por finalidade coletar e bombear para jusante da comporta ensecadeira da sucção todas as águas provenientes de água de selo, vazamentos internos e possíveis infiltrações na casa de força.
- ✓ **Sistema de Água de Resfriamento e de Serviço:** o sistema de água de resfriamento tem a função de fornecer água filtrada para os trocadores de calor das unidades hidráulicas de lubrificação (UHL) e regulação (UHR).
- ✓ **Sistema de Ar Comprimido de Serviço:** o sistema de ar comprimido de serviço terá por função fornecer ar sob pressão para o sistema de frenagem dos geradores, para operação de equipamentos, para limpeza de tubulações, superfícies, etc.
- ✓ **Sistemas de Medições Hidráulicas:** o sistema de medições hidráulicas será constituído de diversos instrumentos destinados à indicação dos níveis de montante e jusante e pressão efetiva em pontos selecionados do circuito hidráulico.
- ✓ **Sistema de Combate a Incêndio:** o sistema de proteção contra incêndio tem por finalidade proteger, detectar e combater incêndios em equipamentos e ambientes da usina. O abastecimento é feito por motores acoplados a bombas que recalcarão a água captada no canal de fuga alimentando a rede de hidrantes, garantindo a pressão necessária para o sistema de incêndio.

3.4.2 Equipamentos Elétricos Auxiliares

Os equipamentos elétricos auxiliares são divididos em dois grupos: Serviços Auxiliares de Corrente Alternada (CA) e Serviços Auxiliares de Corrente Contínua (CC).

- ✓ **Serviços Auxiliares de CA:** as fontes de CA correspondem ao Transformador Auxiliar e ao Gerador de Emergência (Gerador Diesel). Estas duas fontes são ligadas ao Quadro Geral de Distribuição de Serviços Auxiliares CA. Quando faltar a tensão VCA do transformador auxiliar, o gerador de emergência é acionado para alimentar as cargas essenciais, até que a fonte principal (transformador) seja restabelecida.



Figura 16- Transformador Auxiliar e Gerador Diesel PCH Queluz-SP

- ✓ **Serviços Auxiliares de CC:** o sistema de corrente contínua é constituído por retificadores e por bancos de baterias, operando em regime de flutuação, com capacidade de suprir as cargas essenciais ligadas ao Quadro de Distribuição de Corrente Contínua.



Figura 17 – Banco de Baterias e Retificadores da PCH Queluz- SP.

3.4.3 Gerador

O gerador é o equipamento responsável pela conversão da energia mecânica estabelecida no eixo de conexão com a turbina, em energia elétrica. O gerador é constituído de uma parte girante (rotor) acoplada à turbina por meio de um eixo apoiado sobre mancais, e de uma parte estática (estator) onde estão os terminais que serão interligados os cabos de Média Tensão (MT) que vão para o Transformador Elevador da subestação.

Os geradores usados em hidrelétricas são geradores síncronos, ou seja, operam com velocidade constante e sincronizada com a frequência da tensão em seus terminais. Para geração da tensão CA nos terminais do gerador, deve-se excitar o rotor do mesmo com corrente contínua CC. A função do sistema de excitação é estabelecer a tensão interna do gerador síncrono. Em consequência, o sistema de excitação é responsável não somente pela tensão de saída da máquina, mas também pelo fator de potência e pela

magnitude da corrente gerada. Os sistemas de excitação mais comuns atualmente são: o de excitação rotativa, sem escovas, e o de excitação estática [3].

No sistema de excitação sem escovas, ou “brushless”, a corrente contínua para alimentação do campo é obtida sem a utilização de escovas e anéis coletores, utilizando somente indução magnética. Para isso o gerador possui um componente chamado excitatriz principal, com armadura girante e campo fixo. A armadura dessa excitatriz é montada no próprio eixo do gerador. Possui também um conjunto de diodos girantes (circuito retificador), também montado no eixo do gerador, para alimentação do campo principal em corrente contínua. Este conjunto de diodos recebe tensão alternada do rotor da excitatriz principal (armadura da excitatriz), tensão esta induzida pelo estator da excitatriz principal (campo da excitatriz), que é alimentado em corrente contínua proveniente do regulador de tensão. O regulador de tensão monitora constantemente a tensão de saída do gerador e atua no estator da excitatriz. Com isso mantém a tensão de saída do gerador constante.

Nos geradores brushless, a potência para a excitação (alimentação do regulador de tensão) pode ser obtida de diferentes maneiras, as quais definem o tipo de excitação da máquina. Esses tipos de excitação são:

- **Alimentação através de bobina auxiliar:** um conjunto auxiliar de bobinas, independente, alojado em algumas ranhuras do estator principal da máquina (armadura principal). Funciona como uma fonte de potência independente para o regulador de tensão, não sujeita aos efeitos que acontecem no estator principal da máquina. O regulador recebe tensão alternada dessa fonte e alimenta o campo da excitatriz principal com tensão retificada e regulada, como pode ser visualizado na figura 18.

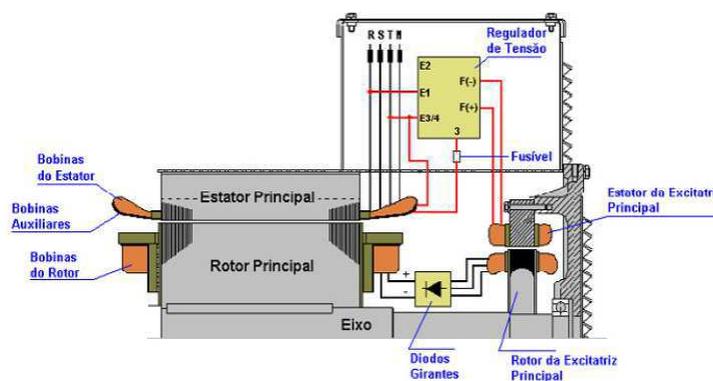


Figura 18 – Sistema de excitação sem escovas, com bobina auxiliar.

- **Alimentação através de excitatriz auxiliar a ímãs permanentes:** a alimentação através de excitação auxiliar a ímãs permanentes possui campo no rotor, a ímãs, montado no próprio eixo do gerador, e estator (armadura) fixado na tampa traseira do gerador ou na base, em compartimento separado do estator principal da máquina. A excitatriz auxiliar também funciona como uma fonte de potência independente para o regulador de tensão. O regulador recebe a tensão trifásica alternada gerada no estator da excitatriz auxiliar (armadura da excitatriz auxiliar), retifica, regula e aplica-a no estator da excitatriz principal do gerador (campo da excitatriz principal), como mostra a figura 19 [6].

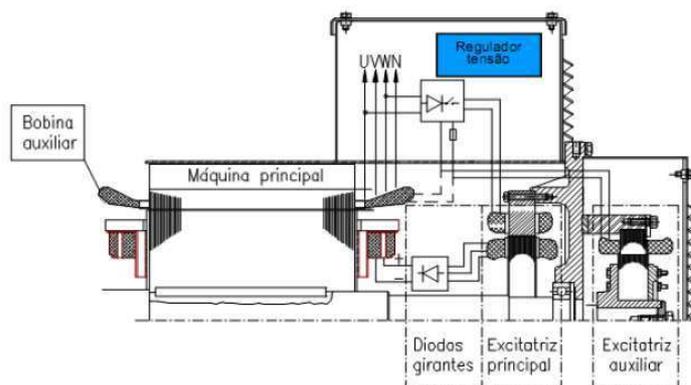


Figura 19 – Sistema de excitação sem escovas, com ímã permanente.

. O sistema de excitação estática consiste em um transformador de excitação normalmente ligado aos terminais do próprio gerador, cujo secundário alimenta um conversor tiristorizado que retifica a corrente alternada. A corrente retificada alimenta o enrolamento de campo do gerador principal através de escovas e anéis coletores

Durante a partida da máquina, para os casos em que o magnetismo residual da máquina não é suficiente para o auto escovamento, torna-se necessária a utilização de uma fonte externa para a excitação inicial. Para as máquinas de menor porte, utiliza-se, para esta finalidade, o sistema auxiliar de corrente contínua da usina e, para as máquinas maiores, quando o tamanho requerido para a bateria tornar-se exageradamente grande e houver disponível uma fonte externa de alimentação em corrente alternada, utiliza-se uma fonte retificada incorporada no equipamento de excitação.



Figura 20 – Rotor e estator PCH Queluz – SP.

3.4.4 Proteção e Controle

Para o funcionamento correto e seguro das unidades geradoras e dos auxiliares mecânicos, faz-se necessário a instalações de painéis de proteção e controle.

Os Painéis de proteção atuam para defender os equipamentos dos mais variados defeitos que possam ocorrer durante a operação da usina, eles agem para que estes equipamentos não sofram danos e a usina precise sair do sistema por longos períodos. A escolha de um sistema de proteção para os equipamentos elétricos constituintes de uma PCH envolve aspectos operacionais, econômicos, de segurança física e pessoal, que devem ser analisados caso a caso. Os defeitos de origem elétrica devem atuar sobre relés, que atuam na abertura e fechamento dos disjuntores geral e de campo.

Os painéis de controle monitoram e automatizam todas as operações, nas usinas mais modernas praticamente não existem operações manuais e esses painéis possuem CLP's que se comunicam com a sala de comando onde os operadores monitoram e fazem as manobras necessárias através do supervisório.

Na automação, tanto a parada quanto a partida e sincronização das máquinas são realizadas automaticamente pelo sistema de controle, independente da presença de operadores. Usinas mais modernas podem ser totalmente supervisionadas e controladas remotamente, ou possuir um mínimo essencial de supervisão remota e controle local.



Figura 21 – Painéis de Proteção e Controle.

3.4.5 Transformador Elevador

Responsável por elevar o nível da tensão de saída do gerador para um nível que torna mais eficaz a transmissão da energia elétrica, pois com o acréscimo no valor da tensão, temos uma diminuição no valor da corrente elétrica, o que resulta em uma transmissão com menos perdas. O transformador elevador deverá ter potência nominal igual ou superior à potência máxima do gerador.

Esse transformador geralmente fica instalado dentro da subestação, mas em alguns casos pode ficar fora da mesma, recomenda-se a instalação dos transformadores

elevadores o mais próximo possível da casa de força, de modo a utilizar um comprimento mínimo de cabos de interligação, o que possibilita obter uma redução nos custos de aquisição e instalação dos cabos e menores perdas, como no caso da PCH Queluz. Nessa usina a tensão é elevada de 6,9 kV para 138kV.

A subestação possui equipamentos de manobra e proteção do transformador, dos quais podem ser citados: Pára-raios, disjuntores, Transformadores de corrente (TC), chaves seccionadoras.



Figura 22 – Transformador elevador PCH Queluz –SP.

Capítulo 4

Conclusões

Ficou evidenciado que a importância da utilização do potencial hidrelétrico do Brasil está sendo cada vez mais aproveitado, e deve-se sempre levar em conta o fator ambiental nos estudos de implantação dessas usinas. As PCH's mostram-se como uma alternativa muito válida, devido seu baixo impacto ambiental e por serem obras de pequeno porte, tendo um tempo de execução de obras menor que grandes centrais.

Esse trabalho abordou aspectos técnicos de construção e funcionamento das PCH's, contribuindo para um melhor entendimento da utilização dos variados tipos de turbinas, diferença de tipos de excitação dos geradores, e apresentação de aspectos básicos para o funcionamento desse tipo de usina, o sistema de proteção deve sempre buscar a segurança tanto dos equipamentos, quanto do pessoal envolvido com a operação da usina.

A escolha dos equipamentos adequados para cada aplicação de uma PCH é muito importante, tanto do ponto de vista econômico quanto operacional, ter conhecimento das variadas opções desses equipamentos é de suma importância para um engenheiro electricista.

Sendo assim, constatamos que o Brasil pode continuar a investir em hidrelétricas e buscar sempre a melhoria do aproveitamento de nossa bacia hidrográfica que é bastante extensa e propícia em muitos casos a construção dessas usinas.

Bibliografia

[1] ATLAS

[2] SITE DA EPE – BEN 2009 -

www.epe.gov.br/Estudos/Documents/Estudos_13/20090415_1.pdf

[3] DIRETRIZES PARA PROJETOS DE PCH - ELETROBRAS

SITES

[4] SITE DO ONS – www.ons.org.br > Início > Educativo

[5] SITE DA ELETROBRAS -

http://www.eletronbras.gov.br/EM_Programas_PCHCOM/capitulos.asp

[6] SITE DA WEG - <http://www.weg.net/files/products/2-705.pdf>

[7] SITE DA ALSTOM- http://www.power.alstom.com/home/new_plants/hydro