



Universidade Federal de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática

Departamento de Engenharia Elétrica

MANOEL RAMOS DE SIQUEIRA NETO

**EFICIENTIZAÇÃO DE PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS
POR MEIO DO ESTUDO DE ACIONADORES PRIMÁRIOS**

Campina Grande, Paraíba
Julho de 2013

MANOEL RAMOS DE SIQUEIRA NETO

EFICIENTIZAÇÃO DE PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS
POR MEIO DO ESTUDO DE ACIONADORES PRIMÁRIOS

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
coordenação do curso de graduação em
Engenharia Elétrica da Universidade Federal
de Campina Grande como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do grau de
Bacharel em Ciências no Domínio da
Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Geração de Energia

Orientador:

Professor Leimar de Oliveira, M. Sc. Campina Grande, Paraíba

Julho de 2013

MANOEL RAMOS DE SIQUEIRA NETO

EFICIENTIZAÇÃO DE PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS
POR MEIO DO ESTUDO DE ACIONADORES PRIMÁRIOS

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
coordenação do curso de graduação em
Engenharia Elétrica da Universidade Federal de
Campina Grande como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do grau de Bacharel
em Ciências no Domínio da Engenharia
Elétrica.

Área de Concentração: Geração de Energia

Aprovado em / /

Roberto Silva de Siqueira, M. Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador, UFCG

Professor Leimar de Oliveira, M. Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho à minha família, e em especial aos meus pais Kênia Carvalho e Eroaldo Ramos, e à minha namorada Diene Lucy.

AGRADECIMENTOS

Nesse trabalho agradeço ao apoio da minha família, meus pais, Kênia Carvalho e Eroaldo Ramos, aos meus irmãos Thiago e Patrícia, aos amigos conquistados durante a vida acadêmica, Marconni, Pablo, Elias, Bruno, Dayanne, Camila dentre outros e aos amigos conquistados na vida, como Marinete, André, Allyson dentre outros, sou grato pelo apoio. Em especial à minha namorada Diene Lucy pelo apoio compreensão e auxílio, com palavras de incentivo, nos momentos difíceis, tornando viável a realização deste projeto de vida e ao meu orientador professor Leimar de Oliveira pela disponibilidade e boa vontade de repassar seus conhecimentos para realização deste trabalho.

*“O dia está na minha frente esperando para ser o que eu quiser.
E aqui estou eu, o escutar que pode dar forma
a este dia..”*

Albert Einstein.

RESUMO

Esse trabalho apresenta, compara e questiona a aplicação de diferentes tipos de turbinas nos projetos de usinas hidrelétricas, sua finalidade é analisar e difundir uma unidade geradora eficiente, ecologicamente responsável e economicamente viável. Sugere-se um novo arranjo para tais instalações no entanto ao final do trabalho deve-se ser capazes de avaliar se a construção de usinas hidrelétricas sem considerar a adequada escolha do tipo de turbina pode causar perdas substanciais ao projeto e; sabendo-se que a vida útil da mesma é de aproximadamente 50 anos. A escolha de tecnologias “defasadas” para a implantação de uma usina devido à limitações orçamentais no momento da implantação do projeto é viável.

Palavras-chave: Pequenas centrais hidrelétricas, acionadores primários, Kaplan, Bulbo.

ABSTRACT

This paper presents, compares and questions the application of different types of turbines in hydroelectric power generation, its purpose is to analyze and disseminate a unit generating efficient, environmentally responsible and economically viable, suggesting a new arrangement for such facilities however the end of the work should be able to evaluate the construction of hydroelectric plants without considering the proper choice of the type of turbine can cause substantial losses to the project and, in order that the service life is 50 years on average, the choice of technologies "lagged "for the deployment of a plant due to budgetary constraints at the moment of implementation of the project is viable.

Keywords: Small hydropower plants, triggers primary, Kaplan, bulb.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Esquema de uma hidrelétrica	5
Figura 2 - PCH de Angiquinho, atualmente desativada.....	9
Figura 3 – localização das gch’s do brasil	10
Figura 4 – potência instalada no país.....	11
Figura 5 – Esquema de uma turbina tipo Pelton.....	15
Figura 6 - Imagem de uma turbina Pelton em manutenção	16
Figura 7 - Turbina Francis da GCH Itaipu.....	17
Figura 8 - Esquema de uma turbina tipo Francis	18
Figura 9 – Rotor de turbina Francis de eixo vertical	19
Figura 10 - Formação de bolhas Figura 11 - Fenômeno da cavitação.....	20
Figura 12 - Turbina Kaplan	21
Figura 13 - Esquema da Turbina Kaplan	22
Figura 14 - Turbina tipo Bulbo.....	25
Figura 15 – Hidrelétrica de Jirau no Rio Madeira	26
Figura 16– Localização geográfica da PCH Canoa Quebrada.....	28
Figura 17 Vista aérea PCH Canoa Quebrada	29
Figura 18 – Gráfico do desempenho da PCH Canoa Quebrada.....	30
Figura 19 - Gráfico das faixas de aplicação das turbinas.....	30
Figura 20 – Gráfico do rendimento das turbinas Pelton, Kaplan e Francis	31
Figura 21– Gráficos de custos de implantação de PCH’s.....	32
Figura 22 - Gráfico Custo de produção de energia no Brasil	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais PCH's do Brasil.....	12
Tabela 2 - Componentes da turbina bulbo	25
Tabela 3 – Diferentes características das turbinas	30

SUMÁRIO

1	Introdução.....	1
1.1	Justificativa.....	3
1.2	Objetivos.....	4
2	Histórico e evolução das PCH's.....	5
3	PCH's no Brasil e no mundo.....	8
3.1	O avanço tecnológico.....	12
4	Acionadores primários.....	14
4.1	Turbinas Pelton.....	15
4.2	Turbinas Francis.....	17
4.3	Turbinas Kaplan.....	21
4.4	Turbinas bulbo.....	23
4.4.1	Características dos componentes de uma turbina bulbo.....	24
5	PCH'S e o meio ambiente.....	27
6	Viés econômico para implantação de pch's.....	32
7	Conclusão.....	36
8	Referências.....	37

1 INTRODUÇÃO

Esse estudo abordará no capítulo 2 o histórico e a evolução do sistema energético do país, buscando focar as pequenas centrais hidrelétricas visto que a demanda de energia elétrica mundial vem crescendo cotidianamente, e o Brasil vem acompanhando esta tendência, que segundo dados do Ministério das Minas e Energia (MME) o nosso consumo deverá duplicar até o ano de 2030.

No mundo contemporâneo a necessidade de energia cresce abruptamente a fim de atender as necessidades do homem e apontar um nível de vida compatível com a sua própria dignidade, sendo assim, a energia é o fator essencial para o desenvolvimento sócio-econômico de uma nação.

Em virtude do novo modelo de mercado energético brasileiro, observa-se uma crescente procura dos investidores privados em empreendimentos no setor de energia, em especial a elétrica, com considerável opção por investimentos em Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH's) como a matriz elétrica brasileira é majoritariamente hidrelétrica, o que deve manter-se mesmo com o crescimento de outras fontes novas de tecnologias de geração.

Em função do avanço das tecnologias de geração hidrelétrica disponíveis, atualmente atinge-se rendimento em torno de 95% para máquinas elétricas, o que não ocorre com máquinas térmicas, que registra rendimento abaixo de 35%. Em função do potencial hidrelétrico brasileiro, do avanço tecnológico e outras vantagens como a utilização de recursos renováveis, a escolha por utilização das hidrelétricas ainda é predominante.

O capítulo 3 aborda sobre o surgimento das primeiras PCH's no Brasil e no mundo, que se deu com a revolução industrial e a crescente demanda energética. Até a década de 50 as pequenas e médias centrais hidrelétricas eram da iniciativa privada e dos municípios, o que ao longo do tempo vem perdendo força, principalmente devido às medidas de incentivo a investimentos, e das vantagens devido ao sistema interligado.

O capítulo 4 discorre sobre os diferentes tipos de acionadores primários que surgiram ao longo dos tempos, com enfoque às turbinas Pelton, Francis e da família Kaplan, pois observou-se que embora haja um avanço na tecnologia, a escolha do tipo de acionador primário é de primordial importância para melhor aproveitamento do recurso natural, o que influencia diretamente na área alagada, e conseqüentemente, menor impacto ambiental. Esses impactos enfocam nas relações com unidades físicas, biológicas e sócio-econômicas, associadas principalmente à área em estudo.

Há diferentes tipos de acionadores primários, tais como Francis, Pelton e Kaplan, podendo ser turbinas de ação ou reação. As turbinas de ação transformam a energia cinética em energia mecânica a uma pressão constante, já as turbinas de reação a pressão é variável desde a entrada até a saída, ocorrendo à conversão de energia cinética em energia mecânica. A turbina tipo Pelton caracteriza-se por uma turbina de ação, já as turbinas tipo Francis e Kaplan caracterizam-se por turbinas de reação.

A escolha do tipo ideal de acionador primário, deve considerar além das tecnologias e orçamento disponível para a implantação, a vida útil de uma usina hidrelétrica, que é da ordem de 50 anos, a fim de otimizar e não causar perdas substanciais ao projeto.

O capítulo 5 absorve a questão ambiental, identifica-se que dificuldade de instalação de hidrelétricas próximas aos grandes centros de consumo devido escassez de recursos naturais, torna-se elevado o investimento para as regiões propícias, em virtude de o impacto gerado ser de maiores proporções nessas localidades, visto que há maior diversidade de fauna e flora, além de impasses com povos nativos. Além disso apresenta os fatores a serem considerados para implantação das PCH's.

O capítulo 6 aborda a questão econômica para implantação das PCH's com o modelo de turbina Kaplan. O fato dela apresentar um bom comportamento mesmo diante de grandes variações de vazões, e representar um avanço tecnológico que influencia na preservação do meio ambiente, perde mercado em função do custo de implantação, essa questão será aprofundada no decorrer desse capítulo.

Nessa fase será abordado ainda o aspecto econômico destacando os incentivos para investimento em implantação de PCH's, suas vantagens e os custos de produção da energia no país por diferentes tipos de fontes.

1.1 JUSTIFICATIVA

Em 2001 o país presenciou uma forte crise energética, devido principalmente a falta de água e baixo nível dos reservatórios das hidrelétricas. O chamado apagão obrigou os consumidores reduzirem o consumo em cerca de 20%, e colocou em pauta um problema que até então não havia sido discutido, a escassez de água, que norteia questões voltadas à exploração, má distribuição e ao meio ambiente. No período em questão, inúmeros debates ocorriam entorno da preservação do meio ambiente e desse recurso natural.

O apagão alertou o MME, a Petrobrás e a Eletrobrás, que em conjunto lançaram um programa emergencial para aumento da oferta de energia no país. O programa contou com ampliação e construção de novas hidrelétricas, 5.707 Km de linhas de transmissão, investimentos em energia eólica e programas de co-geração, no intuito de aumentar a oferta em cerca de 7000 MW. O programa investiu ainda nas PCH's, com financiamento do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) e contrato de garantia de compra da energia por parte da Petróleo do Brasil S/A (Petrobrás).

De acordo a dados levantados pela ANEEL,2009 as PCH's representam pouco mais de 2% da energia produzida no Brasil, de um montante de 68% que é produzido por usinas hidrelétricas; e segundo o JORNAL ESTADO DE SÃO PAULO,2009 esse número pode chegar a 8% da matriz energética do país.

Baseando nesses e outros levantamentos, propõe-se esse estudo, que no intuito de avaliar, considerar e difundir a instalação de PCH's discute questões como:

- Evoluções tecnológicas nos projetos de PCH's;
- Tipos de acionadores primários, suas características e especificidades;
- Projetos e instalações ecologicamente responsáveis;
- Incentivos para investimentos em PCH's;

O intuito de difundir a implantação de PCH's enfocando a questão ambiental se dá principalmente pela dificuldade de instalação de hidrelétricas próximas aos grandes

centros de consumo, tais como a região Sudeste do país. Isso se deve à falta de recursos naturais, o que torna elevado o investimento para outras regiões, pois o impacto gerado é proporcionalmente maior, visto que há maior diversidade de fauna e flora, além de impasses com povos nativos, e outro fator é a distância que contribui com altos custos de distribuição.

1.2 OBJETIVOS

Apresentar e comparar a aplicação das turbinas do tipo Francis, Pelton e Kaplan nos projetos de PCH's, enfocando e difundindo a utilização das turbinas da família Kaplan em função de suas particularidades, com a finalidade de demonstrar uma unidade geradora eficiente, ecologicamente responsável e economicamente viável.

Possibilitar ao fim desse estudo, a capacidade de avaliação da viabilidade da construção de usinas hidrelétricas, considerando:

- Escolha adequada do tipo de turbina;
- Vida útil do projeto;
- Aplicação de tecnologias defasadas;
- Limitações orçamentárias para implantação do projeto.
- Impacto ambiental;

2 HISTÓRICO E EVOLUÇÃO DAS PCH'S

Desde os primórdios o uso da força das águas para gerar energia é bastante utilizado, começou com as rodas d'água do tipo horizontal, que através da ação direta da queda d'água produz energia mecânica e são usadas desde o século I a.C. No século XVIII com o surgimento de tecnologias como o motor, o dínamo, a lâmpada e a turbina hidráulica, foi possível converter a energia mecânica em eletricidade.

A energia oriunda da força da água – hidráulica, se baseia em dois fatores básicos: a altura da queda da água e o volume de água disponível, que é convertida em energia mecânica por meio da turbina que, através do eixo, transmite a energia mecânica ao gerador elétrico e por sua vez converte esta energia mecânica em energia elétrica. A partir desses dois fatores, foram construídos os reservatórios de água para fins energéticos, dando origem às centrais hidrelétricas, conforme Figura 1.

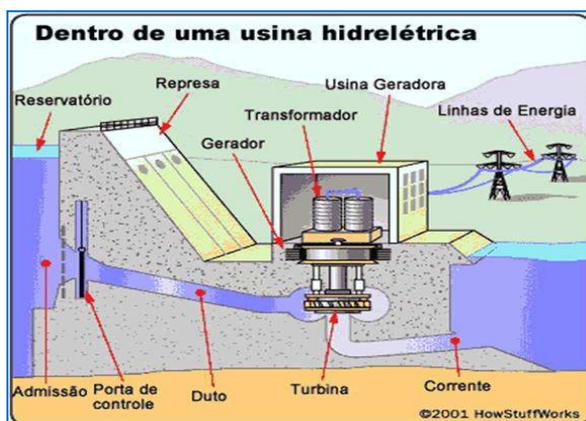


FIGURA 1 ESQUEMA DE UMA HIDRELÉTRICA

Fonte: Bonsor, 2008.

A concepção básica de uma usina hidrelétrica é uma barragem de armazenamento de água, um conduto para condução da água até a casa de máquinas, onde estão as turbinas / geradores. De acordo à essa concepção, e partindo da Resolução ANEEL N.º 394/98 no Brasil as usinas hidrelétricas podem ser classificadas de acordo com a potência de geração de energia em dois tipos principais:

- PCH's – pequenas centrais hidrelétricas – produz de 1MW a 30 MW;
- GCH's – grandes centrais hidrelétricas – produzem acima de 30 MW.

As PCH são usinas de produção de energia a partir da fonte hidráulica, seu lago é inferior a três quilômetros quadrados. Desde que preservadas as características de PCH, o lago poderá ser ampliado até o limite de 13 Km², desde que haja a análise e aprovação específicas da ANEEL.

Desde a segmentação do mercado em pequenas e grandes centrais, e a caracterização de incentivos próprios para o segmento de PCH, ocorreu uma grande procura do mercado por tais projetos, como discutiram Sugai e Santos Júnior (2006), devido a algumas características importantes no mercado brasileiro, tais quais:

- a) oportunidade de negócio a investidores privados, uma vez que o investimento teto de uma PCH de 30.000kW seria em torno de R\$ 150 milhões, o que pode ser considerado um valor acessível ao médio investidor privado;
- b) redução no custo da tarifa de acesso à transmissão da rede básica em 50%, o que desonera o custo de transporte da energia;
- c) possibilidades múltiplas de geração distribuída, ou seja, construir unidades de PCH próximas a centros de consumo, encurtando o prazo de construção e reduzindo necessidades de grandes linhas de transmissão;
- d) construção no conceito de usinas a fio d'água, proporcionando reduzidos impactos ambientais oriundos da formação de lagos de armazenamento;
- e) a definição de PCH gerou uma lacuna de interesse nas usinas de potências próximas às PCH, em especial aquelas com potências de instalação entre 30.000 e 50.000 kW. Essas usinas, por não contarem com os mesmos incentivos, tornam-se, muitas vezes, sem viabilidade econômica. Estas usinas precisam ser analisadas e resolvidas como uma espécie de legislação transitória entre as pequenas e grandes centrais.

As usinas hidrelétricas são construídas harmonizando construção civil, equipamentos mecânicos e equipamentos elétricos. Sendo:

- Barragem – consiste na contenção da água, por meio de concreto ou terra para represamento do volume especificado em projeto. Neste barramento, haverá uma

local onde a água será conduzida para a casa de máquinas, chamada de tomada d'água.

- Casa de força – obra de construção civil em que se localizam as unidades geradoras da usina. Nesta unidade, encontram-se as turbinas mecânicas, os geradores elétricos e todos os equipamentos elétricos e auxiliares de operação da usina.
- Subestação – local onde se localizam o transformador elétrico de energia e os equipamentos de conexão e de segurança, protegendo a usina de eventuais problemas técnicos que possam ocorrer na linha de transmissão.



3 PCH'S NO BRASIL E NO MUNDO

Historicamente o desenvolvimento das turbinas hidráulicas está relacionado com a revolução industrial. Enquanto na Inglaterra o processo de industrialização era desenvolvido a partir da utilização de suas reservas de carvão mineral, na França, a energia hidráulica começava a ser explorada para acionamento mecânico de diversas máquinas, visto que lá não existia esta abundância de do recurso mineral. Curiosamente, em virtude da sua substituição ao carvão, a energia hidráulica ficou conhecida como "*hulha branca*" ou carvão branco. Existem autores que atribuem às máquinas hidráulicas um papel preponderante na revolução industrial, visto que precederam as máquinas à vapor.

No Brasil registra-se que as primeiras PCH's estavam vinculadas à industrialização no interior do país. Delmiro Gouveia, montou a primeira hidrelétrica de Paulo Afonso, a de Angiquinho(Figura 2), hoje desativada, funcionando como um sítio histórico marco do desenvolvimento na região, que foi construída no início do século, oriunda da necessidade da indústria têxtil.

A Companhia paulista de força e luz de São Paulo reafirma a demanda advinda da expansão industrial à construção da estrada de ferro, daí a necessidade de escoar o café. O vínculo entre as PCH's e a agricultura se mostra presente na realidade brasileira, e demonstra a eficiência energética das PCH's na Amazônia e Centro oeste.

Porém no final da década de 50, o Brasil construiria a hidrelétrica de Furnas, que foi a primeira central brasileira a ter uma potência superior a 1000 MW, logo mudava-se então toda a filosofia de suprimento de energia no país, ao invés de pequenos sistemas, com características regionais e pertencentes a iniciativa privada ou municipal, surgiram os grandes sistemas elétricos de natureza estatal, que eram supridos por centrais de grande porte, o que foi fundamental para o desenvolvimento econômico e tecnológico do país.

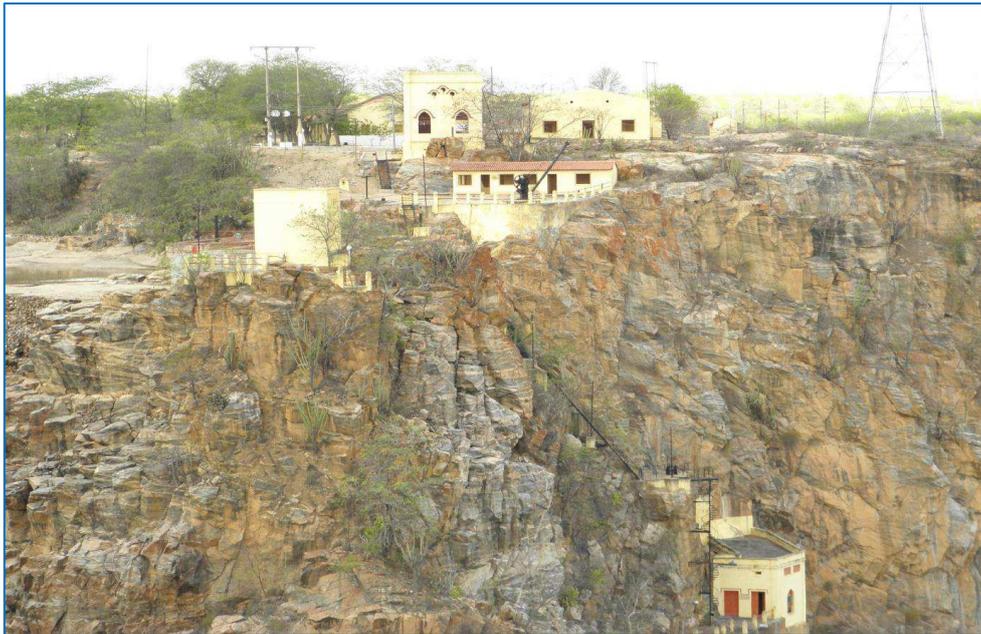


FIGURA 2 - PCH DE ANGIQUINHO, ATUALMENTE DESATIVADA.
Fonte: Autoria própria, 2012.

Até a década de 50 o país contava fortemente com as pequenas e médias centrais da iniciativa privada e municipais. Malhas interligando os sistemas municipais foram feitas no intuito de aumentar a confiabilidade e melhorar a operação, sem perder a especificidade que era a utilização de mão-de-obra e recursos locais, sempre que possível.

A evolução dos preços do petróleo fez reverter muitas conclusões econômicas a respeito de fontes energéticas. Assim, o suprimento elétrico às regiões remotas do Brasil era feito, salvo raras exceções, por meio de grupos a Diesel. Ao longo do tempo as análises levaram a conclusão de que uma PCH é mais econômica que o Diesel, mesmo onde o custo da central e da linha de transmissão tenham valores altos. Aliado a esse fato uma PCH interligada pode apresentar as seguintes vantagens:

- Operação com um fator de capacidade elevado, uma vez que é projetado para um fio d'água, e interligada não precisará acompanhar a curva de carga.
- Redução dos investimentos em transmissão, pois geralmente estará ligada diretamente aos sistemas de distribuição.
- Diminuição das perdas no sistema, pois parte da carga é suprida diretamente pela PCH, e não há fluxo de energia pelo sistemas mais elevados.
- Melhor regulação dos sistemas de distribuição, pois gera o reativo próximo à carga, reduzindo sua circulação pelo sistema de transmissão.

As PCH's ganharam força diante dessas vantagens oriundas do sistema interligado, de fatores econômicos e sociais, e começaram a ressurgir em regiões afastadas, de forma complementar em sistemas interligados. Surge daí o interesse dos municípios, e do setor privado em investimentos na construção das PCH's, para comercialização às concessionárias.

Em janeiro de 2002, havia registro de 433 centrais hidrelétricas em operação no Brasil, das quais 304 eram empreendimentos de pequeno porte – micro e pequenas centrais hidrelétricas, gerando uma capacidade instalada de 62.020 MW [ANEEL, 2002]. A geração hidrelétrica no Brasil é constituída essencialmente de grandes empreendimentos. As 23 centrais hidrelétricas com capacidade de geração superior a 1.000 MW correspondem a 71,4% da capacidade instalada no país. Os 337 empreendimentos com potência igual ou inferior a 30 MW representam apenas 2,4% da capacidade instalada. A maioria das grandes centrais hidrelétricas brasileiras está localizada, como pode ser observado na figura 3, abaixo na Bacia do Paraná, notadamente nas sub-bacias do rio Paranaíba, rio Grande e rio Iguazu. Entre as demais, destacam-se Tucuruí, no rio Tocantins, e Sobradinho, Paulo Afonso e Xingó, no rio São Francisco.



FIGURA 3 – LOCALIZAÇÃO DAS GCH'S DO BRASIL
FONTE: Atlas ANEEL, 2010.

Quanto aos novos empreendimentos, havia 67 centrais em construção e 166 outorgadas que deverão adicionar ao sistema elétrico brasileiro mais que 3.5 MW de potência instalada. A distribuição geográfica desses novos aproveitamentos é bastante semelhante à dos já existentes. A maioria se localiza nas regiões Sul e Sudeste. Nas demais regiões, destaca-se o Estado de Mato Grosso.

Historicamente as PCH's vem ocupando espaço na potência instalada do país, o quadro a seguir (Figura 4) demonstra essa realidade, com os empreendimentos em operação, em construção e outorgados.

Tabela 1.5 - Empreendimentos em operação, construção e outorgados			
Empreendimentos em Operação			
Tipo	Quantidade	Potência Outorgada (kW)	%
Central Geradora Hidrelétrica	227	120.009	0,11
Central Geradora Eolielétrica	17	272.650	0,26
Pequena Central Hidrelétrica	320	2.399.598	2,29
Central Geradora Solar Fotovoltaica	1	20	0
Usina Hidrelétrica de Energia	159	74.632.627	71,20
Usina Termelétrica de Energia	1.042	25.383.920	24,22
Usina Termonuclear	2	2.007.000	1,92
Total	1.768	104.815.824	100
Empreendimentos em Construção			
Tipo	Quantidade	Potência Outorgada (kW)	%
Central Geradora Hidrelétrica	1	848	0,01
Central Geradora Eolielétrica	22	463.330	6,26
Pequena Central Hidrelétrica	67	1.090.070	14,73
Usina Hidrelétrica de Energia	21	4.317.500	58,34
Usina Termelétrica de Energia	19	1.528.898	20,66
Total	130	7.400.646	100
Empreendimentos Outorgados entre 1998 e 2008 (não iniciaram sua construção)			
Tipo	Quantidade	Potência Outorgada (kW)	%
Central Geradora Hidrelétrica	74	50.189	0,19
Central Geradora Undi-Elétrica	1	50	0
Central Geradora Eolielétrica	50	2.401.523	9,08
Pequena Central Hidrelétrica	166	2.432.568	9,19
Usina Hidrelétrica de Energia	15	9.053.900	34,21
Usina Termelétrica de Energia	163	12.526.201	47,33
Total	469	26.464.431	100

FIGURA 4 – POTÊNCIA INSTALADA NO PAÍS

FONTE: Atlas ANEEL, 2010.

Contudo a energia hidráulica é a segunda maior fonte de geração de energia elétrica no mundo, com uma participação de aproximadamente 18%. Em vários países, entre os quais o Brasil, sua participação é superior a 65%. Em termos absolutos, os cinco maiores produtores de energia hidrelétrica no mundo são Brasil, Canadá, Estados Unidos, China e Rússia. Esses países foram responsáveis por mais de 50% de toda a produção mundial de energia hidrelétrica [IEA, 2000; MME, 2000a].

As principais PCH's do Brasil são:

TABELA 1 - PRINCIPAIS PCH'S DO BRASIL

Rio	Estado	Rio	Capacidade
01	Usina Hidrelétrica de Itumbiara	Rio Paranaíba	2.082 MW
02	Usina Hidrelétrica Teles Pires	Rio Teles Pires	1.820 MW
03	Usina Hidrelétrica de São Simão	Rio Paranaíba	1.710 MW
04	Usina Hidrelétrica de Foz do Areia	Rio Iguaçu	1.676 MW
05	Usina Hidrelétrica de Jupia	Rio Paraná	1.551 MW
06	Usina Hidrelétrica de Itá	Rio Uruguai	1.450 MW
07	Usina Hidrelétrica de Marimbondo	Rio Grande	1.440 MW
08	Usina Hidrelétrica de Porto Primavera	Rio Paraná	1.430 MW
09	Usina Hidrelétrica de Salto Santiago	Rio Iguaçu	1.420 MW

FONTE, WIKIPÉDIA, 2013

3.1 O AVANÇO TECNOLÓGICO

Projetos de repotenciação e modernização (R&M), recapacitação e reativação de PCHs antigas pode levar a 0,68 GW adicionais.

No que se refere às tecnologias, o mercado pode ser inteiramente suprido por fabricantes no Brasil (nacionais e estrangeiros). Nas instalações acima de 5 MW há grandes empresas (com alguma tecnologia licenciada) e os mercados para instalações menores que 5 MW em geral tem sido atendidos por inúmeras pequenas empresas totalmente nacionais. De fato, nota-se que há atraso tecnológico em alguns casos; nas pequenas potências as tecnologias mais eficientes não podem competir, economicamente, com equipamentos tradicionais.

Em turbinas hidráulicas, apenas alguns casos (alta rotação específica) não são supridos pelos fabricantes no Brasil; é um setor importante e precisa ser considerado. Todos os tipos de geradores são disponíveis. Na área de automação, a tendência em todos os novos projetos é para automação total; muitos equipamentos são importados.

A engenharia/projetos na área conta com profissionais e recursos modernos, embora em grande parte não sejam nacionais; no entanto há necessidade de desenvolvimento (P&D) em áreas como turbinas para baixas quedas e hidrocinéticas, grupos geradores operando com rotação variável, e automação na operação de reservatórios. Alguns aspectos legais (meio ambiente e procedimentos para interligação à rede) mostram a necessidade de melhores análises do uso múltiplo das águas, da otimização de controles de carga/frequência, e impactos ambientais em geral das PCHs. Há suficiente informação hidrológica (mais de 10 mil estações flúvio e pluviométricas), mas é

necessário avançar nos estudos de inventário, especialmente nas bacias de médio e pequeno portes.

4 ACIONADORES PRIMÁRIOS

De acordo a Ossberger Turbinenfabrik, 1998, muitos esquemas hidráulicos foram encontrados na Mesopotâmia e no Império Egípcio da época dos Faraós, por volta de 3.000 a 2.000 anos A. C. No século XVII foi construído um dispositivo aquático nos jardins do rei francês Luís XIV, em Versailles, acionado por uma máquina movida pela água, com um custo enorme, que tinha algo em torno de 100 HP, era um triunfo tecnológico na época, porém com um rendimento muito baixo.

Ao longo dos anos as turbinas foram sendo aprimoradas, e esse capítulo demonstrará alguns tipos e as características de cada um dos modelos aqui expostos.

A escolha do tipo ideal de acionador primário, deve considerar as tecnologias, o orçamento disponível para a implantação e a vida útil de uma usina hidrelétrica, no intuito de otimizar e não causar perdas substanciais ao projeto.

A seleção do tipo de turbina é, normalmente, definida por empresas de engenharia ou consultores técnicos que, muitas vezes, seguem indicações clássicas sem a devida atualização técnica ou avaliam os projetos com critérios exclusivamente econômicos e financeiros. Frequentemente, os fabricantes tomam conhecimento do projeto da usina quando as máquinas já estão definidas(MIRANDA, 2009, p.44). Evoluções tecnológicas, neste caso, podem ser agregadas com maior esforço e custo, uma vez que implicará em revisões de um projeto já pronto.

Apesar de haver equipamentos elétricos, auxiliares, transformadores e etc. que demandam elevados graus de desenvolvimento técnicos e, portanto, são indispensáveis à operação e à qualidade da usina hidrelétrica, cabe às turbinas hidráulicas o papel de peça chave na determinação da concepção técnica de uma usina hidrelétrica. Os principais tipos de turbinas hidráulicas são Pelton, Francis e Kaplan.

4.1 TURBINAS PELTON

A turbina Pelton foi inventada por Lester Allan Pelton em 1880, e a primeira unidade em operação foi instalada na cidade de Nevada nos Estados Unidos.

As turbinas tipo Pelton são turbinas de ação, ou seja, transformam a energia cinética em energia mecânica a uma pressão constante. São constituídas por um rotor com pás igualmente espaçadas por sua periferia, que defletem um jato d'água de 180°, com injetores cuja função é transformar a energia de pressão do escoamento em energia cinética, os jatos provenientes desses injetores ao se chocarem com as pás do rotor geram impulso, levando ao movimento da pá. Os injetores podem ser de um jato, dois jatos, quatro jatos, cinco jatos e seis jatos, o controle da vazão é realizado na agulha do injetor, conforme demonstrado na figura 2.

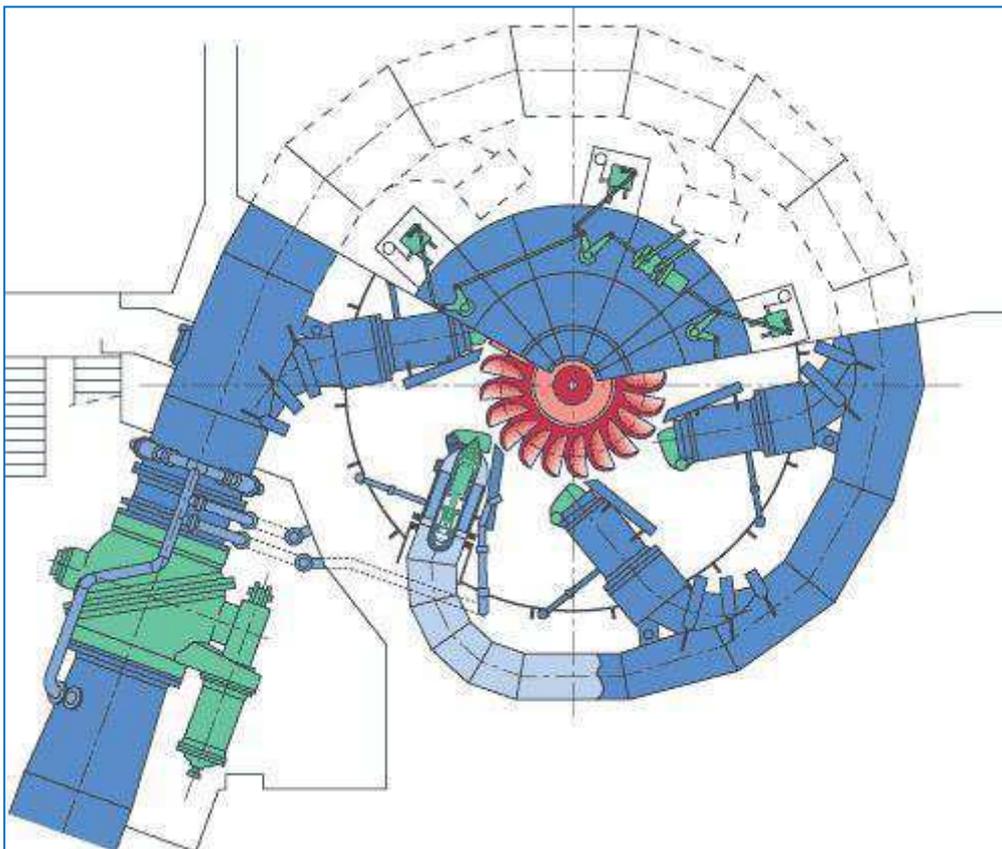


FIGURA 5 – ESQUEMA DE UMA TURBINA TIPO PELTON
FONTE: UNIFEI, 1998.

Elas são utilizadas onde há grandes quedas, entre 350 m e 1110m, e pouca vazão.

A variação de potência nesse modelo é regulada pelo controle de entrada de água através dos bicos injetores que se posicionam diretamente em frente à roda da turbina, e esta tem a concepção de monobloco, não oferecendo flexibilidade operacional própria.

As turbinas Pelton tem acionamento independente devido ao torque gerado pela ação de um jato livre sobre a dupla concha do rotor.

Uma das desvantagens desse modelo de turbina se deve a alta velocidade do choque do jato d'água com as pás do rotor, causando um desgaste dessas peças devido à abrasão da areia com a água, comuns em rios e montanhas.

Para o caso de optar-se pelo uso das turbinas Pelton em locais onde há muita vazão e pouca queda, admite-se:

- Aumentar o número de jatos, com intuito de reduzir as dimensões dos rotores;
- Utilizar dois rotores iguais, montados sobre o mesmo eixo ou nos extremos dos geradores sobre o mesmo eixo, conforme figura 3.
- Bifurcar uma única tubulação principal, o mais próximo da turbina e instalar duas turbinas independentes, com geração independente.

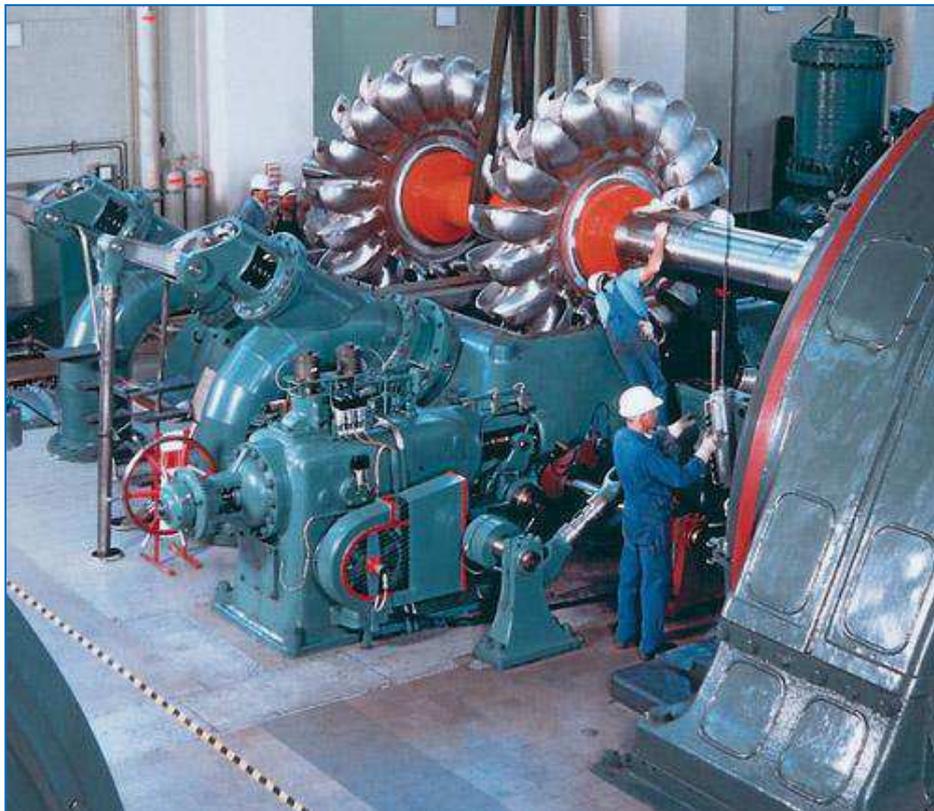


FIGURA 6 - IMAGEM DE UMA TURBINA PELTON EM MANUTENÇÃO
FONTE: UNIFEI, 1998.

4.2 TURBINAS FRANCIS

A turbina tipo Francis foi criada por Jean Victor Poncelet em 1920, e adaptada por James Bicheno Francis em 1849, trata-se de uma tecnologia revolucionária no conceito de geração hidráulica até os tempos atuais. É aplicada de forma ampla e equipada as maiores usinas hidrelétricas do mundo, tais como Três Gargantas na China, Itaipu e Xingó no Brasil, conforme figura 7.



FIGURA 7 - TURBINA FRANCIS DA GCH ITAIPU
FONTE: Itaipu, 2007.

A turbina Francis foi a primeira turbina de reação, ou seja, o fluxo d'água chega à roda da turbina fora das condições atmosféricas e recebe de um componente chamado tubo de sucção (conduto), uma contra-pressão que maximiza o aproveitamento energético do fluxo de água, conforme figura 8.

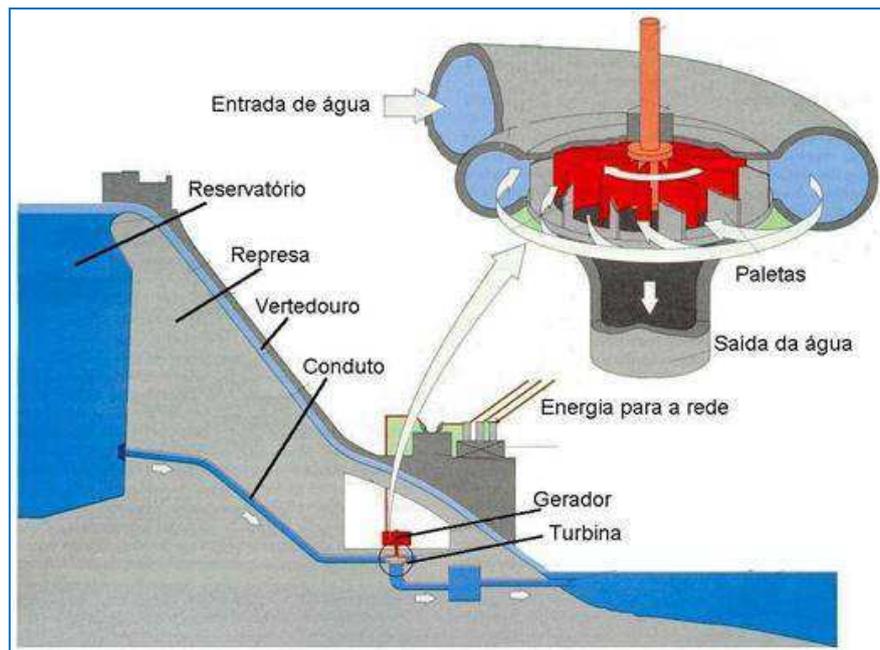


FIGURA 8 - ESQUEMA DE UMA TURBINA TIPO FRANCIS

FONTE: Alterima, 2011.

As turbinas de reação podem ser de dois tipos:

- Axial onde o fluxo da água é paralelo ao eixo do rotor.
- Mista onde o fluxo na entrada do rotor é radial e após interagir com ele sofre um desvio e passa a ser axial na saída.

As turbinas Francis devem ser aplicadas para um volume de água determinado, embora possua componentes de controle de passagem de vazão de água, este tipo de turbina tem uma acentuada perda de performance quando há variações de vazão. Um dos inconvenientes deste tipo de turbina é a falta de flexibilidade a variações de quedas, ou seja, a queda d'água deve obedecer a variações pequenas, pois não há qualquer mecanismo na turbina que possibilite seu ajuste a variações de quedas.

A turbina Francis é uma das mais difundidas e utilizadas no Brasil tanto para grandes quanto para pequenas, mini e microcentrais hidrelétricas. Ainda assim, são turbinas que apresentam uma significativa gama de aplicação para grandes e pequenas vazões de água, podendo ser especificadas para até 600 metros de queda d'água, mas não são recomendáveis para quedas muito baixas.

O rotor da turbina Francis de tamanhos pequenos e médios pode ser construído em uma só peça totalmente fundida, em aço fundido com 12 a 15% de cromo, ou em aço

inoxidável, conforme figura 6, demonstrada adiante. Dependendo do tamanho esperado para o rotor, motivado por uma grande vazão de projeto, pode-se dimensionar uma única turbina utilizando-se de um rotor duplo (dupla sucção). Tal construção, porém, só é viável para a turbina funcionando com eixo na horizontal.

A caixa espiral para as turbinas de pequeno porte normalmente é fundida em aço ou ferro fundido e bi-partida para facilitar a montagem e desmontagem do conjunto.



FIGURA 9 – ROTOR DE TURBINA FRANCIS DE EIXO VERTICAL
FONTE: Usiminas, 2012.

A curvatura das pás é relativamente complexa seguindo perfis pré-estabelecidos conforme a admissão da água no rotor. As pás diretrizes são construídas para as pequenas turbinas em uma só peça fundida solidárias ao eixo de acionamento das mesmas.

Um fenômeno que se destaca nas turbinas tipo Francis, é conhecido como cavitação que origina-se em quedas repentinas de pressão do fluído, em geral é observado em sistemas hidráulicos no qual ocorre a combinação entre pressão, temperatura e velocidade, resultando na liberação de ondas de choque e micro jatos altamente energéticos, causando o aparecimento de altas tensões mecânicas e elevação da temperatura, o que provoca danos na superfície atingida.

A cavitação deve ser sempre evitada, pois causa erosão nas pás do rotor das turbinas, conforme as figuras 10 e 11. Se a região de colapso das bolhas for próxima a uma

superfície sólida, as ondas de choque geradas pelas implosões sucessivas podem provocar trincas microscópicas no material, que ao longo do tempo irão crescer e provocar o deslocamento do material da superfície, originando uma cavidade de erosão localizada.

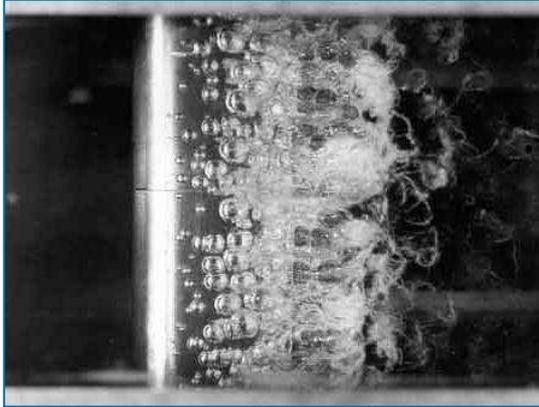


FIGURA 10 - FORMAÇÃO DE BOLHAS
FONTE: ENGENHARIACIVIL.COM, 2012.



FIGURA 11 - FENÔMENO DA CAVITAÇÃO
FONTE: ENGENHARIACIVIL.COM, 2012.

A cavitação pode ocorrer em duas fases:

- I. Formação de bolhas (figura 7) ou cavidades de forma e grandeza muito variáveis no tempo e no espaço, cheias de vapor ou de gases em dissolução na água ou da mistura vapor e gases.
- II. Destruição ou redução das bolhas formadas. Este fenômeno é extremamente complexo e as hipóteses emitidas para a sua explicação diferem consideravelmente nas suas conclusões. Constituem aproximações da realidade, que tem sido possível confirmar em parte pela experiência.

4.3 TURBINAS KAPLAN

A turbina tipo Kaplan foi inventada pelo engenheiro austríaco Viktor Grotav Franz Kaplan em 1912, mas a consolidação desta tecnologia se deu em 1925 com a instalação de uma turbina de 8 MW na UHE - Usina Hidrelétrica Lilla Edet, na Suécia. Esta usina é considerada como o marco definitivo de qualificação da turbina Kaplan como a solução técnica ideal para usinas hidrelétricas com baixas quedas e altas vazões de água, conforme figura 12.



FIGURA 12 - TURBINA KAPLAN
FONTE: TECNOLOGIA.ORG, 2011

Estas turbinas são rigorosamente centrípetas, e permitem o uso de um tubo proposto em 1843 por Jonval, para conduzir a água após a saída do rotor até o poço, que por sua semelhança com os vistos nas bombas, foi chamado de tubo de sucção. Ele mantém a continuidade da massa líquida em escoamento, desde a saída do rotor até o nível da água do poço, impedindo que a água caia livremente. Resultando no ganho de não apenas da maior parte da energia cinética da água, mas também do desnível topográfico entre a saída do rotor e o nível da água do poço.

A distribuição da água sobre as pás do rotor é feita por uma série de pás distribuidoras ou pás diretrizes, as quais distribuem a água de forma simétrica e simultânea em todas as pás do rotor, conforme demonstrado na figura 13. A turbina Kaplan é responsável pela grande evolução na técnica de construção e aproveitamento de geração hidráulica, especialmente por apresentar excelente eficiência para aplicação em baixa queda e, em especial, variação da vazão turbinada, o que a difere tecnicamente das demais turbinas e, particularmente, em relação às turbinas tipo Francis.

O grande diferencial técnico percebido por Kaplan foi fornecer à turbina a capacidade de se regular por meio da movimentação das pás das rodas da turbina, gerando um equipamento com uma significativa flexibilidade operacional obtida nas variações de vazões e quedas.

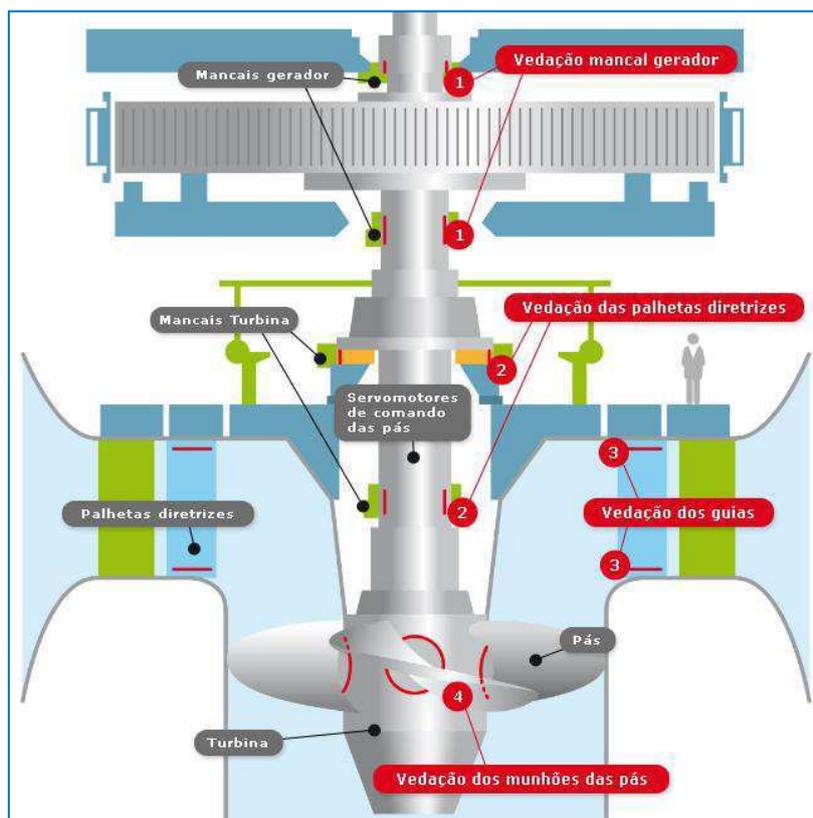


FIGURA 13 - ESQUEMA DA TURBINA KAPLAN
 FONTE: PXLSEALS.COM, 2008.

Diante da exposição dos diferentes tipos de acionadores primários, é perceptível que cada qual possui suas características e especificidades. Portanto é de fundamental importância uma análise durante a fase do projeto, no intuito de garantir a eficiência da PCH e reduzir os danos causados ao meio ambiente, e com isso aproveitar ao máximo

os recursos naturais disponíveis. O capítulo 5 se desenvolve em torno dessa perspectiva, e busca focar o uso das turbinas da família Kaplan.

4.4 TURBINAS BULBO

Preocupada com a preservação do meio ambiente, a engenharia moderna tem buscado novas alternativas para a produção de hidreletricidade. Uma delas é a utilização de turbinas do tipo bulbo, que podem ser instaladas em baixíssimas quedas, a fio d'água, não sendo necessária a formação de grandes reservatórios, reduzindo assim os impactos ambientais.

Atualmente, o foco de pesquisas e investimentos nos hidrogeradores voltados para empreendimentos de baixa queda tem se voltado para estes tipos de turbina, que são na verdade, uma variação das Kaplan, e o Brasil vem acompanhando esta tendência de difusão dessa tecnologia que alia geração com alto rendimento e baixos impactos, porém o que pode ser observado na prática, é que não se tem ainda uma vasta aplicação deste tipo de turbina para as PCH's, portanto existe uma lacuna a ser explorada.

As primeiras unidades Bulbo construídas datam da década de 30, entretanto o desenvolvimento desta tecnologia só se deu a partir da década de 50 com o estudo das unidades reversíveis maremotrizes, na França.

Ao longo do tempo, diversas unidades Bulbo foram sendo construídas, com potências e dimensões cada vez maiores, culminando, em 1989, com a entrada em operação da unidade de Tadami, no Japão, com 65,8 MW de potência, queda de 19,8 m e diâmetro do rotor igual a 6,70 m.

Mas pouco se conhece, nacional e internacionalmente, dos modelos dinâmicos para estudos de estabilidade angular deste tipo de turbina, bem como os impactos eletrodinâmicos da utilização destas turbinas para a geração de energia elétrica.

Porém dentre suas vantagens, podemos citar ainda:

- Como o fluxo é axial, ou seja, paralelo ao eixo, as passagens hidráulicas das unidades Bulbo são mais simples e tem seu comprimento mais curto do que as das unidades de eixo vertical, logo tais características são importantes em usinas de baixa queda, pois minimizam as perdas de energia.
- Outra vantagem das unidades Bulbo é a sua capacidade de operar como descarregador de vazão (vertedouro de fundo), operando sem carga e permitindo um escoamento de até 70% da vazão nominal, obtendo-se maior segurança à passagem da cheia de projeto, bem como possibilitando o escoamento de sedimentos depositados próximos à tomada d'água.
- Ainda podemos citar que apesar de requerer dispositivos especiais na montagem das unidades Bulbo, é possível obter maior rapidez de montagem em relação às unidades de eixo vertical pois ela se desenvolve de modo independente entre turbina e gerador, podendo seguir em paralelo durante grande parte do tempo, devido ao acesso independente para o recinto do gerador e o recinto da turbina.

4.4.1 CARACTERÍSTICAS DOS COMPONENTES DE UMA TURBINA BULBO

Um grupo bulbo é caracterizado por possuir o conjunto turbina - gerador de eixo horizontal instalado no interior de uma cápsula denominada bulbo que, geralmente, opera submersa. Os principais componentes de uma turbina bulbo com suas principais funções e características são apresentados nos sub-itens a seguir.

A figura 14 apresenta a localização dos principais componentes em um grupo bulbo e a Tabela 2 relaciona os números da figura 14 com os nomes dos respectivos componentes.

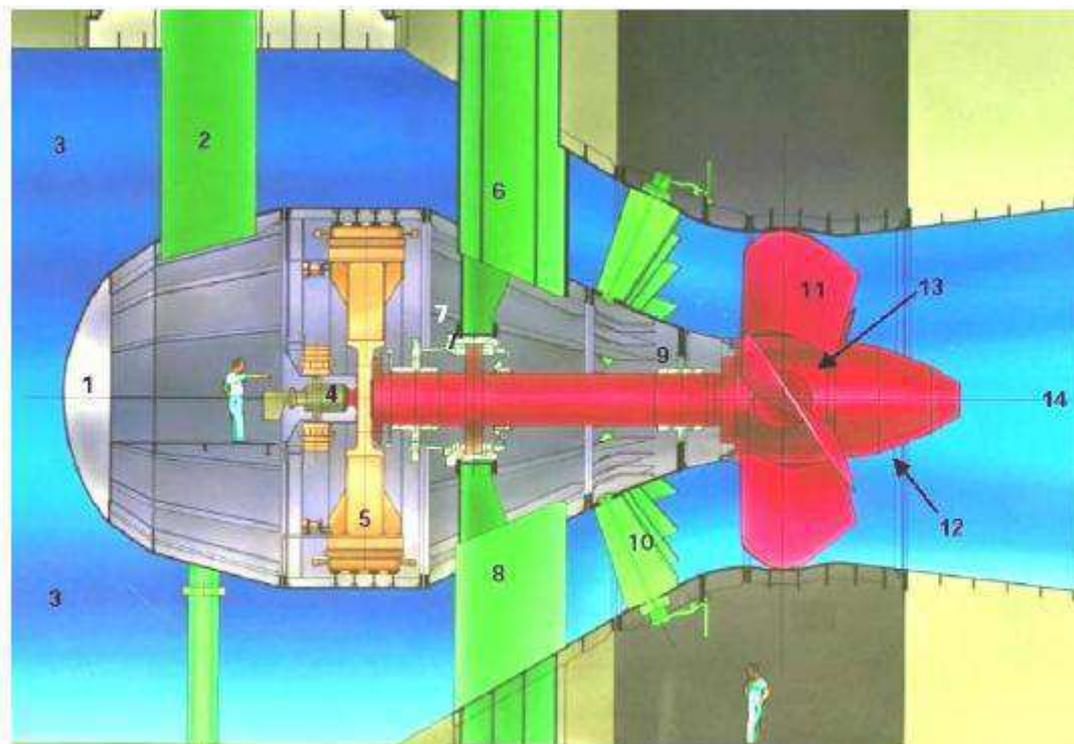


FIGURA 14 - TURBINA TIPO BULBO
 FONTE: MORAIS, MENDES E FERREIRA, 2009

TABELA 2 - COMPONENTES DA TURBINA BULBO

Número	Componentes	Número	Componentes
1	Cápsula ou bulbo	6	Tubo de acesso à turbina
2	Tubo de acesso ao gerador	7 e 9	Mancais
3	Câmara de adução	10	Distribuidor
4	Sistema de óleo do rotor	11	Pás do rotor
5	Geração síncrono	12	Cone ou ogiva
6 e 8	Estruturas de sustentação e pré-distribuidor	13	Cubo
		14	Tubo de descarga

FONTE: MORAIS, MENDES E FERREIRA, 2009

➤ Rotor Kaplan

O Rotor Kaplan é o elemento rotativo da turbina onde se transforma a energia do escoamento da água em trabalho mecânico. Com relação às pás do rotor, a maioria das turbinas bulbo possui pás móveis, como as Kaplan. Entretanto, há também construções com pás fixas, do tipo hélice. Este tipo de construção, com rotor do tipo hélice, é rara porque exige uma mínima variação do fluxo hidráulico e conseqüentemente, da altura da lâmina d'água. O rotor pode ser subdividido em três partes: cubo, ogiva ou cone e pás.

➤ Sistema de Controle das Pás do Rotor

A movimentação das pás do rotor da turbina é efetuada por meio de servomotores. O servomotor de controle das pás do rotor geralmente é instalado dentro da ogiva, próximo às pás. Em máquinas de grande porte, dependendo do projeto, pode ser instalado no meio ou no final do grupo turbina - gerador (ponta do eixo).

➤ Sistema de Controle do Distribuidor

Para a movimentação das pás do distribuidor, é possível a utilização de dois sistemas. O primeiro consiste em um sistema onde cada aleta ou pá do distribuidor tem seu próprio servomotor. No segundo tipo de construção, as pás se movem por meio de um anel de ligação, ou seja, tem-se um movimento simultâneo das pás por meio de um, dois ou três servomotores que movimentam todas as pás simultaneamente. Este sistema, regulado por anel, com ligações e alavancas, é similar ao controle do acionamento do distribuidor de uma turbina Francis. O anel é movimentado por servomotores principais que movimentam todas as pás simultaneamente.

Como destacado no início deste tópico, podemos exemplificar o uso das turbinas bulbo no Brasil citando projetos considerados de extrema importância como por exemplo o da hidrelétrica de Jirau no rio Madeira localizada a 120 km de Porto Velho – Rondônia que tem capacidade de gerar 3750 MW através de suas 44 turbinas bulbo, outro empreendimento, também no rio Madeira, é a usina de Santo Antônio com uma capacidade de geração de 3580 MW, através de suas 50 turbinas bulbo instaladas.



FIGURA 15 – HIDRELÉTRICA DE JIRAU NO RIO MADEIRA
FONTE: WILLIAN HEBERT MOTA, 2013

5 PCH'S E O MEIO AMBIENTE

De acordo a resolução 001/86 do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA, Impacto Ambiental é:

"qualquer alteração das propriedades físicas, químicas, biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que afetam diretamente ou indiretamente: A saúde, a segurança, e o bem estar da população; As atividades sociais e econômicas; A biota; As condições estéticas e sanitárias ambientais; A qualidade dos recursos ambientais".

A implantação de um projeto de uma PCH depende de uma análise detalhada e do conhecimento da área onde será instalada. O mesmo deve apresentar alta confiabilidade, e apontar o potencial inventariado e os pontos sujeitos a danos incitantes que vão afetar o meio ambiente ou a população da região. Vários fatores devem ser considerados, tais como, culturas agrícolas, pastagens, biótipos florestais, vegetação arbórea não nativa, pequenas propriedades rurais, brejos, nascentes e rios, devendo atender à legislação vigente conforme Resolução 393/2007 do CONAMA.

O conhecimento aprofundado relativo aos impactos ambientais é fato considerado como instrumento técnico-científico, de caráter multidisciplinar, capaz de definir, mensurar, monitorar, mitigar e corrigir as possíveis causas e efeitos. A implantação de qualquer instrumento de caráter multidisciplinar depende de um bom estudo e esse estudo, quando relacionado a impactos na implantação de uma PCH gera um documento de conhecimento público denominado Relatório de Impacto ao Meio Ambiente – RIMA.

Para a implantação de uma PCH os dados devem estar avaliados e concluídos para a obtenção do licenciamento. As atribuições das três esferas federal, estadual e municipal no que se refere à competência administrativa, a proteção do meio ambiente, o combate à poluição e a preservação da fauna e flora são pré-requisitos para obtenção desse licenciamento.

Há casos em que o empreendimento envolve mais de um município, é o caso da PCH Canoa Quebrada (Figura 16), que se localiza no rio verde, divisa entre os municípios Lucas do Rio Verde e Sorriso a 380 km da capital Cuiabá – MT. Sendo assim o órgão

ambiental responsável para conceder o licenciamento é o CONAMA, pois esses municípios pertencerem a unidades de domínio estadual.



FIGURA 16– LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DA PCH CANOA QUEBRADA
 FONTE: ATIAIAENERGIA.COM.BR, 2013.

A PCH Canoa quebrada possui potência instalada de 28 MW e contribui para o desenvolvimento econômico da região, gerando energia suficiente para abastecer uma cidade com população de 100 mil habitantes. Ela segue rígidos princípios de sustentabilidade ambiental, e se destaca pelos programas de preservação, como por exemplo, o STP - Sistema de Transposição de Peixe, conhecido também como escada de peixes, que assegura a migração dos cardumes durante a piracema, sendo a primeira PCH a adotar este sistema na região Centro Oeste e a segunda no Brasil.

A seguir são elencadas algumas de suas principais características:

- Localização geográfica: Lucas do Rio Verde e Sorriso – MT
- Região beneficiada: Centro do Estado do Mato Grosso
- Bacia hidrográfica: Rio Verde, sub-bacia 17 do Rio Amazonas
- Potência instalada: 28 MW
- Geração media anual: 200.000 MWh
- Unidades geradoras: três turbinas tipo Kaplan S montante
- Início de operação: Dezembro de 2006



FIGURA 17 VISTA AÉREA PCH CANOA QUEBRADA
FONTE: ATIAIAENERGIA.COM.BR, 2013.

Diversos estudos foram realizados no rio Verde, assim como na fauna e na flora da região, gerando conhecimento sobre um ecossistema até então pouco pesquisado, conforme determinação do CONAMA.

A PCH Canoa Quebrada é considerada um projeto modelo devido ao compromisso técnico e do baixo impacto causado ao meio ambiente, com área inundada equivalente a 1.171 ha, característica explícita da adoção da tecnologia da turbina tipo Kaplan, que requer pequenas áreas alagadas.

Vejamos a seguir (Figura 18) a curva de rendimento da PCH Canoa Quebrada, onde a eficiência da turbina chega a 93,5% quando a vazão é de 50m³/s. Porém, uma redução da vazão para 25 m³/s ainda garante um rendimento de 89%, o que comprova a versatilidade da turbina Kaplan quando há grandes variações de vazões.

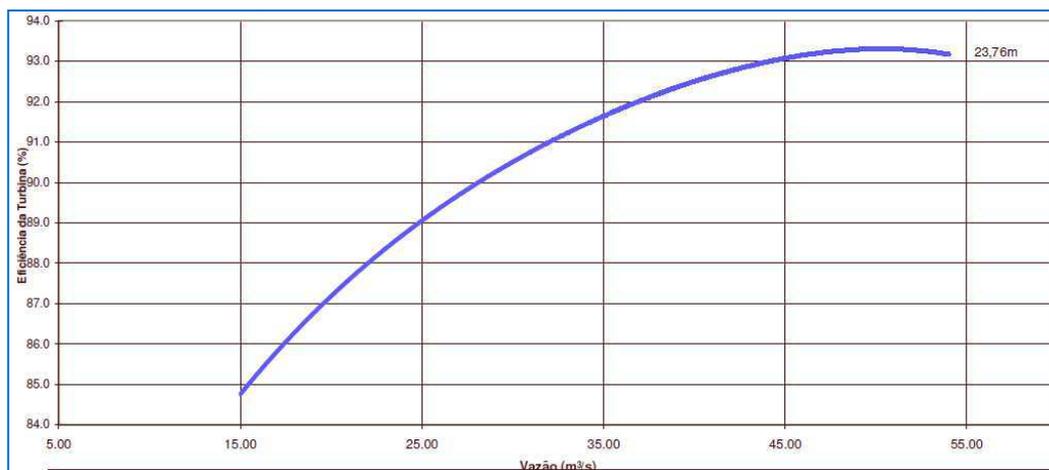


FIGURA 18 – GRÁFICO DO DESEMPENHO DA PCH CANOA QUEBRADA
 FONTE LOBO, 2009.

A seguir é demonstrado as principais características de cada modelo das turbinas levantadas nesse estudo.

TABELA 3 – DIFERENTES CARACTERÍSTICAS DAS TURBINAS

Tipo	Queda d'água	Vazão de água	Performance
Pelton	Alta	Baixa	Aproximadamente 90%
Francis	Alta e média	Alta e média	Até 96%
Kaplan	Média e baixa	Alta e média	Até 95%

O gráfico a seguir, sugere um arranjo de utilização adequado de cada tipo de turbina, levando em consideração a altura de queda em função da vazão disponível para os projetos. Pode-se observar a larga faixa de aplicação da turbina Kaplan, isso se deve às condições geográficas brasileiras que agregam rios em regiões de planícies com grandes vazões.

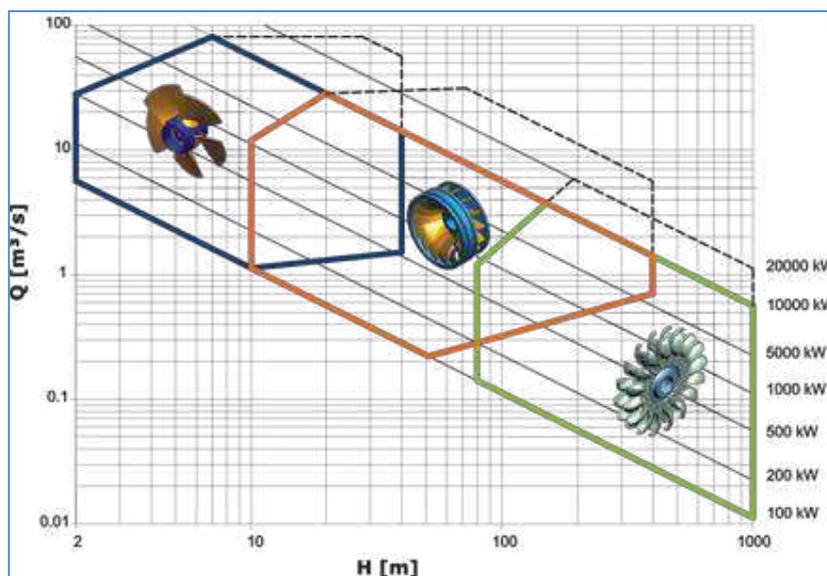


FIGURA 19 - GRÁFICO DAS FAIXAS DE APLICAÇÃO DAS TURBINAS
 FONTE: hidroenergia.com.br, 2013.

A seguir observa-se a performance de rendimento de cada tipo das turbinas aqui estudadas.

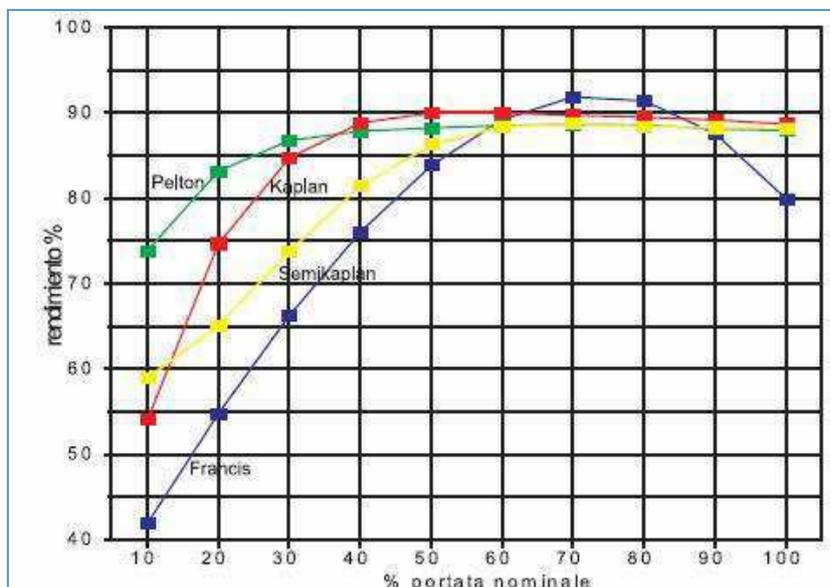


FIGURA 20 – GRÁFICO DO RENDIMENTO DAS TURBINAS PELTON, KAPLAN E FRANCIS
 FONTE: omtom.it, 2013

Podemos concluir que:

- Todas as turbinas têm eficiência energética superior a 80%.
- As eficiências máximas das turbinas são próximas, quando analisadas em um único ponto – 60 m³/s, porém à medida que se afasta desse ponto, percebe-se um descolamento acentuado em relação ao tipo de turbina.
- Considerando-se as famílias de turbinas Francis e Kaplan, cuja eficiência máxima, nota-se que as turbinas Francis têm uma acentuada perda de rendimento à medida que ocorre a variação de vazão, e a variação de eficiência da turbina Kaplan é de 10%, mesmo com variação de vazão entre 20 e 100%.

Contudo, “o tipo de turbina, definido no projeto básico, muitas vezes não recebe a orientação técnica de fabricantes especializados, o que causa a perda de otimização de projetos e afasta a possibilidade de ganhos de energia”. (MIRANDA, 2009, p.44). No capítulo adiante será aprofundado questões acerca de investimentos e fatores econômicos ligados à instalação de PCH's.

6 VIÉS ECONÔMICO PARA IMPLANTAÇÃO DE PCH'S

De acordo (MIRANDA, 2009, p.38), a questão da regulação técnica precisa ser discutida e implantada. O agente regulador atribui, à usina hidrelétrica, um certificado de energia. Esta energia garantida torna-se a base de comercialização da energia produzida pela respectiva usina. A partir deste momento, o investidor perde o interesse por qualquer energia suplementar que, eventualmente, a usina possa oferecer. Como consequência, a tecnologia de geração deixa de ser incentivada. O agente regulador deveria levar em consideração qual a melhor tecnologia para equipar a usina hidrelétrica, levando em conta a maximização na produção de energia. Não há existência de mecanismo regulatório que avalie as técnicas de geração de energia, o que é ruim para a evolução da base tecnológica. O fator econômico poderia ser um instrumento de incentivo ao avanço tecnológico.

A turbina tipo Kaplan embora apresente um bom comportamento mesmo diante de grandes variações de vazões, e representar um avanço tecnológico que influencia diretamente na preservação do meio ambiente, perde mercado em função do custo de implantação, conforme observa-se nos gráficos adiante, Figura 21.

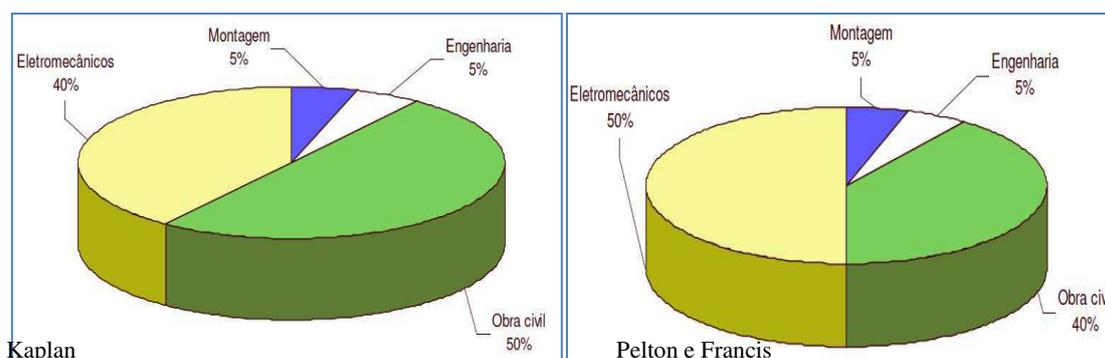


FIGURA 21- GRÁFICOS DE CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO DE PCH'S
FONTE: LOBO, 2009.

O custo de implantação de uma PCH utilizando a tecnologia Kaplan pode chegar à 10% a mais com investimentos em equipamentos, se comparado com as turbinas Pelton e Francis, conforme observa-se nos gráficos acima.

A composição de custos para implantação apresenta variações em função de características locais para a construção de cada usina, como por exemplo: geologia,

logísticas de materiais, mão-de-obra, etc. Apenas para ordem de grandeza, vale citar que o valor médio instalado por kW adotado para implantação de uma PCH é de R\$ 4.600/kW¹, média entre os valores fornecidos pela PETROBRÁS – Petróleo Brasileiro S.A. que é de R\$ 4.200/kW e APMPE - Associação Brasileira dos Pequenos e Médios Produtores de Energia Elétrica.

De posse dos custos aproximados de implantação de PCH's, faz-se um estudo econômico, comparando a implantação da PCH com outras alternativas de atendimento ao mercado. Nessa fase, não se avalia o benefício econômico gerado pela PCH, pois a comparação se dá especificadamente entre o custo de implantação da PCH e o custo de atendimento por outra alternativa.

Para determinar a rentabilidade de um projeto toma-se como base a TIR - Taxa Interna de Retorno (sem financiamento) que mede a rentabilidade dos capitais próprios investidos, e é dada a partir do cálculo sobre o fluxo de caixa do projeto, formado pelos seus saldos anuais de caixa.

Os valores adequados para a TIR devem ser, aproximadamente, igual ao retorno esperado para outros investimentos no país da mesma classe de riscos, considerando os prazos da concessão das PCH's de trinta anos. Ocorre que não estão disponíveis séries históricas de rentabilidade real de empreendimentos segmentados por classe de risco, e a tentativa de obtê-las, a partir da diferença entre os ganhos nominais de projetos já implantados e deflatores diversos, resultam em taxas extremamente elevadas e com grande dispersão em torno da média, face à instabilidade do ambiente macroeconômico do país, nas últimas décadas.

No fluxo de caixa, o custo associado à implantação da PCH é composto pelo investimento inicial e as despesas de O&M - operação e manutenção, durante a vida útil da usina. O benefício econômico da PCH, a ser considerado neste fluxo de caixa, é representado pelo custo de implantação e respectivas despesas de O&M da outra alternativa de atendimento com a qual a PCH está sendo comparada, durante o mesmo período de análise. O fluxo de caixa descontado deve fornecer um valor presente líquido positivo, indicando que o valor presente da implantação da PCH é menor que o da alternativa de comparação.

¹ Dados levantados em 2007 de acordo Cláudio Wilson Nobrega e Ricardo Pigatto durante a 3ª Conferência de PCH, Mercado e Meio-ambiente

Atualmente as PCH's representam uma fatia da ordem de 2% da energia hidráulica do país de acordo à (ANEEL, 2009). Diante desse fato, foram criados incentivos para novos investimentos para esses empreendimentos, tais como:

- Autorização não-onerosa para explorar o potencial hidráulico;
- Descontos não inferiores a 50% nos encargos de uso dos sistemas de transmissão e distribuição;
- Isenção de aplicação anual de no mínimo 1% da receita operacional líquida em pesquisa e desenvolvimento do setor elétrico;
- Livre comercialização de energia com consumidores ou conjunto de consumidores;
- Programa de incentivo de fontes alternativas de energia elétrica instituído com o objetivo de aumentar a participação de energia elétrica produzida por empreendimento de produtores independentes autônomos, concebidos com base em PCH, e fontes eólica e biomassa;
- Dispensa de licitação para obtenção da concessão, bastando ao empreendedor obter autorização da ANEEL;
- Isenção do pagamento de UBP - uso de bem público;
- Isenção relativa à compensação financeira, paga aos Estados e Municípios, pela utilização de recursos hídricos;
- Possibilidade de comercializar de imediato a energia elétrica produzida com consumidores cuja carga seja maior a 500 kW.

No Brasil os períodos de estiagem de uma região podem corresponder ao período chuvoso de outra, a integração permite que a localidade em que os reservatórios estão mais cheios envie energia elétrica para a outra, em que os lagos estão mais vazios – permitindo, com isso, a preservação do “estoque de energia elétrica” represado sob a forma de água.

Esta troca ocorre entre todas as regiões conectadas entre si.

Uma possibilidade aberta pela integração é a operação de usinas hidrelétricas e termelétricas em regime de complementaridade. Como os custos da produção têm reflexo nas tarifas pagas pelo consumidor e variam de acordo com a fonte utilizada, transformam-se em variáveis avaliadas pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico -

ONS para determinar o despacho – definição de quais usinas devem operar e quais devem ficar de reserva de modo a manter, permanentemente, a produção igual ao de consumo. A energia hidrelétrica, mais barata e mais abundante no Brasil, é prioritária no abastecimento do mercado. As termelétricas, de uma maneira geral, são acionadas para dar reforço em momentos chamados como picos de demanda (em que o consumo sobe abruptamente) ou em períodos em que é necessário preservar o nível dos reservatórios – ou o “estoque de energia”. Isto ocorreu no início de 2008, quando o aumento do consumo aliado ao atraso no início do período chuvoso da região Sudeste apontou para a necessidade de uma ação preventiva para preservação dos reservatórios.

A Figura 22 mostra claramente que as PCHs são a fonte de maior viabilidade, não por ter o segundo menor custo de produção, o que já justificaria a opção, mas por ser renovável e ambientalmente de baixo impacto.

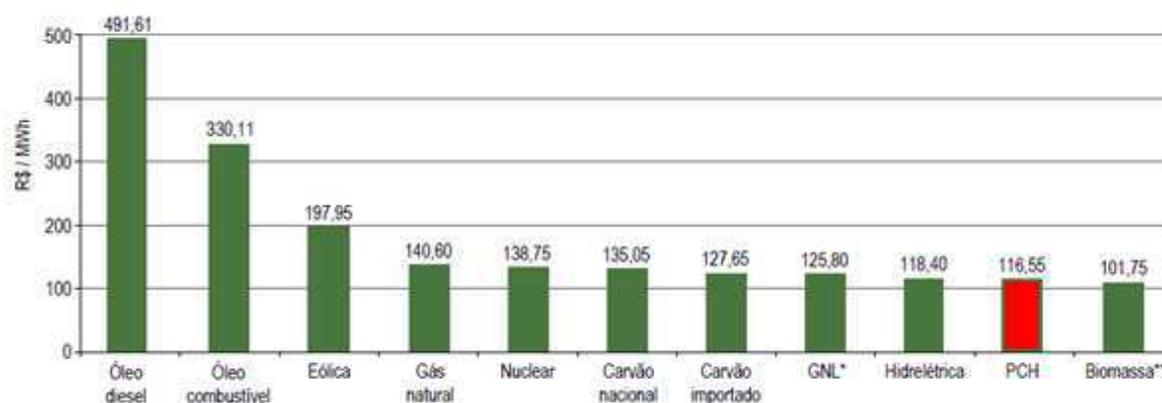


FIGURA 22 - GRÁFICO CUSTO DE PRODUÇÃO DE ENERGIA NO BRASIL
 FONTE: Atlas ANEEL, 2010.

7 CONCLUSÃO

Afirma – se que após análise dos dados apresentados nesse estudo, observa-se que existe a real necessidade de investimentos no setor de geração de energia. Porém no contexto atual, os impactos socioambientais de tais empreendimentos são as primeiras barreiras impostas para a implantação desses projetos, que não contemplam apenas com a criação de uma unidade geradora e sim com todo um sistema capaz de gerar e escoar essa energia.

Portanto fatores econômicos são os principais estudados para a aquisição das tecnologias a serem implantadas, gerando muitas vezes um rendimento baixo, no que se refere ao aproveitamento do recurso natural, portanto é necessário ter-se atenção e aproveitar ao máximo a capacidade de exploração dos recursos hídricos, adotando projetos que mitiguem o impacto socioambiental, dando oportunidade para a difusão do uso das turbinas da família Kaplan e observando que cada kilowatt que deixa de ser gerado em uma hidrelétrica por má utilização do recurso natural, pode num futuro próximo, ser produzido a partir de uma fonte não renovável.

8 REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 14724: informação e documentação: trabalhos acadêmicos, apresentação. Rio de Janeiro, 2005.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. Guia do empreendedor de Pequenas Centrais Hidrelétricas. 1ª edição, Brasília, 2003.

BRASIL. Eletrobrás. Diretrizes para Estudos e Projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas. Cáp. 4 Avaliação expedita da viabilidade da usina no local selecionado. Disponível em <http://www.eletronbras.com>, acesso em 19 dez. 2011.

CINTRA, Luiz Antonio, e FILGUEIRAS, Sônia. Sem luz no fim do túnel: Nem falta de chuvas nem administrações passadas. Revista Isto é. São Paulo, editora três, edição n° 1650, 16/05/2001.

INTRODUÇÃO às máquinas hidráulicas.

JUNQUEIRA, Artur de Andrade; BERCHT, Mário; BREMER, Odilon Arthur; SILVA, Paulo Renato Ferreira da. Informe sobre as PCH's. Porto Alegre, 2002.

MIRANDA, Roberto Lobo. Regulação técnica para se obter melhor eficiência na motorização de pequenas centrais hidrelétricas no Brasil. 2009. Dissertação (mestrado) – UNIFACS Universidade de Salvador.

MORAIS, Bruno Zanuz. Análise econômico-financeira de uma Pequena Central Hidrelétrica – PCH. 2010. Dissertação (Graduação) UFRS Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MORAIS, E.J.P, MENDES P.P.C, e . C. FERREIRA. Modelo de turbinas do tipo bulbo para estudos estabilidade eletromecânica de sistemas elétricos de potência - análise e Comparações. XIII ERIAC – 13° Encontro regional iberoamericano de cigré, Argentina. 2009

NILTON, Cássio Luiz. O Impacto das Pequenas Centrais Hidrelétricas – PCH'S no Meio Ambiente. 2009. Dissertação (Pós-Graduação) – UFLA Universidade Federal de Lavras-MG.

SILVA Cid Sampaio da, e FARIA, Mayko Fernandes. Turbina Pelton - Turbinas Convencionais. Disponível em <http://www.cerpch.unifei.edu.br>, acesso em 19 dez. 2011.

VIALLI, Andrea. PCHs podem gerar até duas Itaipus. O Estado de São Paulo. Disponível em: <http://www.estadao.com.br>, acesso em 17 dez.2011.