



**Universidade Federal de Santa Maria – UFSM
Educação a Distância da UFSM – EAD
Universidade Aberta do Brasil – UAB**

Curso de Pós-Graduação em Eficiência Energética Aplicada aos Processos Produtivos

Polo: Camargo

Energia Hidrelétrica: Eficiência na Geração

CAUS, Tuane Regina¹

MICHELS, Ademar²

RESUMO

A energia hidráulica é uma das opções de geração mais antigas e utilizadas no mundo. Essa transformação ocorre quando a água passa pela turbina hidráulica, que transforma a potência hidráulica em potência mecânica. A turbina gira, e no gerador a potência mecânica é transformada em potência elétrica. No decorrer dos anos estudos de planejamento energético foram sendo criados e elaborados para que ocorresse a minimização das perdas do processo de geração de energia. Sendo que as turbinas são de extrema importância, algumas delas foram abordados, sendo elas: Pelton, Francis, Kaplan e Sifão, que é a menos utilizada. Considerando que as três primeiras possui eficiência acima de 80%. Além do planejamento energético análises ambientais são elaboradas, para a minimização dos impactos ambientais gerados pela construção da usina. Atualmente três tipos de licenças devem ser realizados para a implantação da mesma, sendo elas: licença prévia, licença de instalação e licença de

¹ Pós Graduanda em Eficiência Energética Aplicada aos Processos Produtivos. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS

² Doutor. Eng. Mecânico. Professor Orientador. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS

operação. Os custos para a implantação de uma usina são de alto valor, onde somente de um conjunto turbina tipo Francis e gerador síncronos trifásicos tem-se o custo de R\$ 2.814.000,00 e de outro conjunto turbina tubular “S”, rotor Kaplan e gerador síncronos trifásicos com custo de R\$ 3.708.500,00.

Palavras-chave: Usina hidrelétrica, energia, equipamento, eficiência.

ABSTRACT

Hydro power generation is one of the oldest in the world and used options. This transformation occurs when water passes through the hydraulic turbine that transforms hydraulic power into mechanical power. The turbine rotates the generator and the mechanical power is converted into electrical power. Over the years, studies of energy planning were created and designed to minimize losses occurred to the power generation process. Since the turbines are extremely important some of them were addressed, such as: Pelton, Francis, Kaplan and Siphon, which is the least used. Whereas the first three have efficiency above 80%. Besides energy planning and environmental analyzes are developed to minimize the environmental impacts generated by the construction of the plant. Currently three types of licenses should be made to implement the same, as follows: initial license, installation license and operating license. The costs for the deployment of a plant are high value, where only a Francis turbine assembly and three-phase synchronous generator is the cost of R\$ 2,814,000.00 and other tubular turbine set "S" rotor and generator Kaplan three-phase synchronous with cost of R\$ 3,708,500.00.

Keywords: Hydroelectric plant, energy, equipment, efficiency.

1 INTRODUÇÃO

Os padrões atuais de produção e consumo de energia são baseados nas fontes fósseis, o que gera emissões de poluentes, gases de efeito estufa e põem em risco o suprimento no planeta. Com isso é preciso estimular as energias renováveis, e nisso o Brasil apresenta uma condição bastante favorável em relação ao resto do mundo.

Nas últimas décadas, entretanto, as pequenas centrais estão despertando o interesse principalmente dos governantes e ambientalistas, por uma série de motivos entre quais se destacam: sociais, econômicos e ambientais.

O sistema elétrico brasileiro opera de forma coordenada, para minimizar custos globais de produção de energia elétrica. O governo em conjunto com institutos de pesquisa e desenvolvimento vêm investindo na automação de usinas hidrelétricas com o objetivo de minimizar os custos, aperfeiçoar a produção, melhorar a produtividade, qualidade e segurança.

O aproveitamento adequado do potencial de geração de energia elétrica para sustentar o crescimento do país tem responsabilidade estratégica no desenvolvimento do mesmo, cada vez mais a necessidade de expansão do parque gerador nacional em atendimento à crescente demanda por energia elétrica.

Por ser um país privilegiado por seu imenso potencial hidrelétrico, a matriz de energia elétrica foi, ao longo dos anos, sendo moldada à base de grandes usinas hidrelétricas. A construção dessas usinas representa grande possibilidade de converter um potencial hidráulico em energia elétrica.

Em decorrência desta demanda alguns pontos são relevantes quando se trata de uma usina hidrelétrica. A parte ambiental que será afetada, os equipamentos utilizados para que haja maior eficiência na produção da energia são pontos fundamentais na execução do projeto, pois se trata de uma alternativa de custos reduzidos para expandir a oferta de energia e a adequada operação das usinas.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

Citar e enunciar a importância das usinas hidrelétricas, abordando as questões relacionadas ao meio ambiente, a importância do processo de transformação da energia hidráulica em elétrica com um estudo de eficiência energética do processo.

2.2 ESPECÍFICOS

- Definir usina hidrelétrica.
- Citar a transformação da energia hidráulica em elétrica.
- Verificar na literatura a influência sobre o meio ambiente.
- Referencial teórico sobre as principais turbinas.
- Análise de eficiência e custos de turbina e gerador.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 USINA HIDRELÉTRICA

A Eletrobrás define usina hidrelétrica como sendo a transformação de energia hidráulica em elétrica da seguinte maneira:

Um conjunto de obras e equipamentos cuja finalidade é a geração de energia elétrica, através de aproveitamento do potencial hidráulico existente em um rio. O potencial hidráulico é proporcionado pela vazão hidráulica e concentração dos desníveis existentes ao longo do rio.

Basicamente, uma usina hidrelétrica compõe-se das seguintes partes:

- Barragem;
- Sistemas de captação e adução de água;
- Casa de força;
- Sistema de restituição de água ao leito natural do rio.

A água captada no lago formado pela barragem é conduzida até a casa de força através de canais, túneis ou condutos metálicos. Após passar pela turbina hidráulica, a água é restituída ao leito natural do rio, através do canal de fuga.

Assim a potência hidráulica é transformada em potência mecânica, quando a água passa pela turbina, fazendo com que esta gire, no gerador que está acoplado a turbina a potência mecânica é transformada em potência elétrica.

A energia gerada é levada através de cabos ou barras condutoras dos terminais do gerador até o transformador elevador, onde tem sua tensão é corrigida e assim, através de linhas de transmissão chega até os centros de consumo. Através de transformadores abaixadores, a energia tem sua tensão levada a níveis adequados para utilização pelos consumidores (FURNAS, 20--).

A energia potencial da água está relacionada à altura de queda da usina, que é a diferença entre o nível do reservatório e o nível do rio a jusante, sendo passível de variação conforme as vazões afluyente e defluente. A produção de energia elétrica depende, principalmente, dos fatores altura de queda e vazão turbinada (COLNAGO, 2011).

Segundo Vichi e Mansor (2009) a energia hidráulica é uma das maiores fontes renováveis de energia, correspondendo, em 2006, a 17% de todas as fontes renováveis de energia no mundo, sendo explorada em mais de 160 países, mas somente Brasil, Canadá, China, Rússia e Estados Unidos, são responsáveis por mais da metade da produção mundial.

3.2 TIPOS DE CENTRAIS HIDRELÉTRICAS

No Brasil, por meio da edição da Lei n. 9.648, de 27 de maio de 1998, fica caracterizada a divisão entre pequenas centrais e grandes centrais hidrelétricas, sendo que, entre 1.000 kW (quilowatt) e 30.000 kW de potência instalada, considera-se como PCH (BRASIL, 1998).

Ramos e Grimoni (2012) citam alguns fatores importantes que classificam as usinas, que são eles:

- Quanto ao uso das vazões naturais
 - Centrais a fio d'água
 - Centrais de acumulação
 - Centrais reversíveis
- Quanto à potência
 - micro $P < 100$ kW
 - mini $100 < P < 1.000$ kW
 - pequenas $1.000 < P < 30.000$ kW
 - médias $30.000 < P < 150.000$ kW
 - grandes $P > 150.000$ kW
- Quanto à altura de queda d'água:
 - baixíssima $H < 10$ metros
 - baixa $10 < H < 50$ metros
 - média $50 < H < 250$ metros
 - alta $H < 250$ metros
- Quanto à forma de captação da água
 - leito de rio ou de barramento
 - desvio ou em derivação

3.3 USINA HIDRELÉTRICA E MEIO AMBIENTE

Barragens para geração de energia elétrica são empreendimentos altamente impactantes no meio físico e biótico, além de causarem o deslocamento involuntário de populações e a alteração das atividades econômicas e culturais das regiões onde são instaladas.

No Brasil, o Programa Nacional do Meio Ambiente (PNMA) determina que a construção de usinas hidrelétricas com potência superior a 10MW passe por processo de licenciamento ambiental que envolve a elaboração de Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e demais documentos que servem de base para a avaliação do órgão licenciador sobre a viabilidade do empreendimento e para a tomada de decisão relativa à emissão das licenças ambientais

Segundo Pereira (2011), um dos objetivos do EIA e do processo de licenciamento como um todo é prever os impactos que podem ocorrer nas fases de construção e operação, visando estabelecer medidas de controle e mitigação dos mesmos ou até mesmo alternativas tecnológicas e locacionais com menor impacto global, juntamente com a resolução CONAMA nº1/86 que estabelece que sejam realizadas medidas mitigadoras de impactos ambientais negativos decorrentes de um empreendimento.

Segundo Rezende (2007), a lei 6938/81 também criou o Sistema Nacional de Meio Ambiente (SISNAMA), que é a estruturação de órgãos governamentais competentes para normatizar as questões ambientais, tomar medidas para a gestão dos recursos naturais, bem como fiscalizar o uso desses recursos. Através dessas ações, estavam estabelecidas as regras e as instituições que disciplinariam a utilização dos recursos naturais em território nacional.

Segundo Pereira (2007), uma das características do licenciamento ambiental brasileiro que permite a continuidade na produção de informações é a divisão do processo em três fases com as suas respectivas licenças (prévia, de instalação e de operação), cujas definições são dadas pelo artigo 8º da Resolução CONAMA nº 237/97.

Segundo Comissão Mundial de Barragens (2000) as barragens possibilitam importante contribuição ao desenvolvimento, mas têm implicado em significativos impactos negativos, sociais e ambientais, sendo que, via de regra, os esforços realizados para mitigá-los têm sido insatisfatórios.

3.3.1 Licenciamento Ambiental

Licenciamento ambiental pode-se definir como um instrumento de caráter preventivo que procura o equilíbrio entre as ações de desenvolvimento econômico e social e de proteção do meio ambiente, promovendo o uso racional dos recursos ambientais e racionalizando os custos empresariais (FREITAS, 2003).

O licenciamento ambiental é feito perante os órgãos ambientais, tais como o IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais), o qual se responsabiliza

pelas licenças dos empreendimentos e atividades com impacto ambiental de âmbito nacional ou que afete diretamente o território de dois ou mais Estados.

Segundo De Martini et al. (2003 apud FACURI, 2004) o sistema de licenciamento ambiental funciona como um processo de acompanhamento sistemático das consequências ambientais de uma atividade que se pretenda desenvolver. Inclui desde as etapas iniciais de planejamento; emissão de três licenças e verificação do cumprimento das restrições determinadas em cada uma delas, que condicionam a execução do projeto, as medidas de controle e as regras de operação. Inclui também rotinas de acompanhamento de licença vinculadas à monitoração dos efeitos ambientais do empreendimento, componentes essenciais do sistema, além das normas técnicas e administrativas que o regulam; controle e correção de danos causados por atividades poluidoras instaladas antes da instituição hidrelétrica.

Baseados nas Resoluções nº 001/86, 006/87 e 237/97 e em práticas adotadas pelo IBAMA, serão apresentados os procedimentos para obtenção das licenças ambientais necessárias para implantação de uma usina hidrelétrica (FACURI, 2004).

1- Licença Prévia (LP)

A Licença Prévia é emitida na fase preliminar do planejamento do empreendimento, de modo a aprovar a localização e concepção, atestar a viabilidade ambiental e estabelecer os requisitos básicos e condicionantes a serem atendidos nas próximas fases de implementação da hidrelétrica. O processo para obtenção da LP inicia-se quando a empresa responsável pelos estudos de viabilidade apresenta o aproveitamento hidrelétrico ao órgão licenciador. Esse processo contém as características básicas e baseia-se numa primeira configuração dos arranjos de engenharia da usina e reservatório (FACURI, 2004).

2- Licença de Instalação (LI)

Segundo Facuri (2004) a empresa vencedora do leilão deverá detalhar os planos, programas e projetos ambientais, que foram objeto do processo de licenciamento prévio, e inclui o aproveitamento hidrelétrico licitado com a LP. Este detalhamento é exigido por meio do Projeto Básico Ambiental (PBA), que inclui as medidas de controle ambiental e demais

condicionantes. Após a análise e aprovação do PBA a Licença de Instalação é liberada para o empreendimento. A concessão dessa licença autoriza o início da instalação do empreendimento, sob a ótica do setor ambiental.

A LI define os parâmetros do projeto e as condições de realização das obras. Essas condições deverão ser obedecidas para garantir que a implantação da atividade não cause impactos ambientais negativos, além dos limites aceitáveis e estabelecidos na legislação ambiental (FACURI, 2004).

3- A Licença de Operação (LO)

Autoriza a operação comercial do empreendimento após vistoria, para verificar se todas as exigências e detalhes técnicos descritos no projeto aprovado foram desenvolvidos e atendidos ao longo de sua implantação e se está de acordo com o previsto nas Licenças Prévia e de Instalação (FACURI, 2004).

3.3.2 Impacto Ambiental

Segundo Vieira e Vainer (20--) a construção de hidrelétricas e conseqüentemente suas barragens e lagos causam diversos impactos sociais e ambientais negativos. As populações são atingidas direta e concretamente através do alagamento de suas propriedades, casas, áreas produtivas e até cidades. Existem também os impactos indiretos como perdas de laços comunitários, separação de comunidades e famílias, destruição de igrejas, capelas e inundação de locais sagrados para comunidades indígenas e tradicionais.

Na área ambiental o principal impacto costuma ser o alagamento de importantes áreas florestais e o desaparecimento do habitat dos animais. Muitas vezes a hidrelétrica é construída em áreas onde se concentram os últimos remanescentes florestais da região, desmatando e inundando espécies ameaçadas de extinção (VIEIRA;VAINER, 20--).

Mesmo quando os Estudos de Impacto Ambiental são realizados de forma correta, apontando os verdadeiros impactos gerados por uma hidrelétrica, na maioria das vezes as ações de mitigação desses impactos não chegam a compensar de fato os efeitos negativos.

Além disso, cada rio tem características únicas, espécies da fauna e flora próprias, vazões e ciclos particulares. Cada rio tem também diferentes populações morando em seu entorno, com realidades econômicas e sociais variadas.

Por esses motivos os efeitos variam de acordo com cada rio e cada vez mais é importante que se faça a avaliação integrada do rio e da bacia, para que se tenha a noção dos efeitos cumulativos de várias hidrelétricas, mas principalmente para que se possa planejar a quantidade e o modelo de hidrelétricas em cada rio, levando em conta a conservação ambiental e a manutenção da qualidade de vida da população

3.4 EFICIÊNCIA DOS EQUIPAMENTOS

Segundo Mello Junior (2000) os tipos de turbinas usadas mundialmente e fabricadas para pequenas centrais hidrelétricas ou mesmo para aplicação de caráter mecânico na transmissão de força em pequenos sítios são: Turbina Turgo; Turbina Pelton; Turbina de fluxo cruzado; Turbina Francis; Turbina Axial; Turbina sifão; Turbina S; Turbina Bulbo; Bomba centrífuga funcionando como turbina; Turbina de águas correntes.

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

A transformação da energia mecânica em energia elétrica pelo gerador não se verifica de maneira completa, devido a que nessa transformação também há perdas nos enrolamentos, perdas mecânicas provocadas pelo atrito nas escovas do sistema de excitação, perdas nos mancais e sistema de ventilação. Os geradores modernos apresentam rendimentos, em termos percentuais, da ordem de 90 à 99 % (ENCINA, 2009).

3.4.1 Turbinas

Segundo Encina (2006) as turbinas de impulsão usam a pressão dinâmica da água. Este tipo de turbina foi criada por Pelton, em 1889, e é semelhante a uma roda de água usada em moinhos. Uma turbina de impulsão ou de ação possui um ou mais bicos injetores de água que na forma de jato d'água transmitem energia cinética às conchas, que por sua vez transforma esta energia em trabalho mecânico para desenvolver velocidades rotativas de até 1.300 rpm. A turbina Pelton é utilizada quando a queda útil é muito elevada e não sofrem a influência da elevação do nível de canal de fuga.

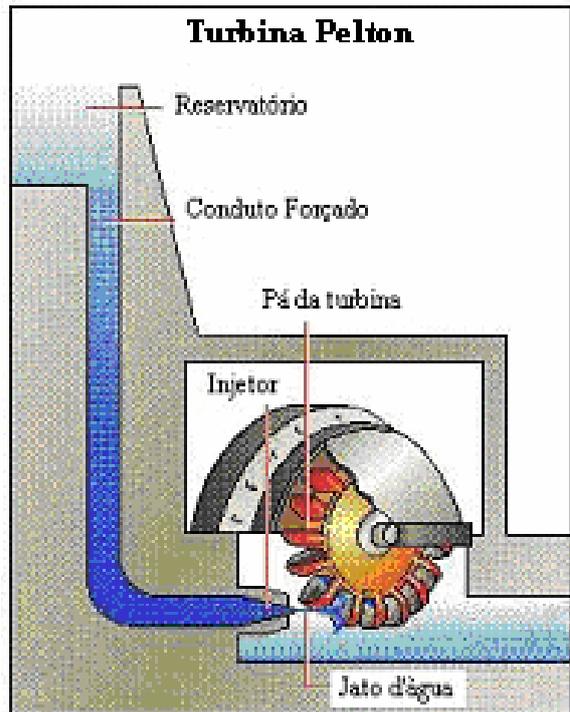


Figura 1: Turbina Pelton

Fonte: ENCINA, 2006

Um problema desta turbina é devido à alta velocidade com que a água se choca com o rotor, provocando a erosão pelo efeito abrasivo da areia misturada com a água, comum em rios de montanhas.

Para mini e micro aplicações, a turbina Pelton pode ser usada para baixas quedas em alguns casos até menos de 20 metros. As turbinas Pelton podem ser de eixo horizontal ou vertical e são caracterizadas por terem um baixo número de rotações e tendo um rendimento de até 93%.

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

A água entra na turbina com uma grande pressão e sai com uma pressão muito menor o que faz melhorar o rendimento da turbina. Essa diferença de pressão é convertida em energia cinética das pás. Para aumentar a pressão de saída, ao valor da atmosfera, existe, sob a turbina, um tubo de sucção cujo diâmetro é aumentado progressivamente.

Um tipo de turbina de reação é a Kaplan, que usa, no rotor, um sistema de pás com grau de inclinação variável ajustável à mudança de carga, para se obter maior eficiência.

As turbinas de reação são as do tipo Francis e Kaplan, ao contrário às turbinas tipo Pelton, possuem o rotor que gira dentro da corrente contínua d'água, portanto sofrem a influência da elevação do nível de canal de fuga.

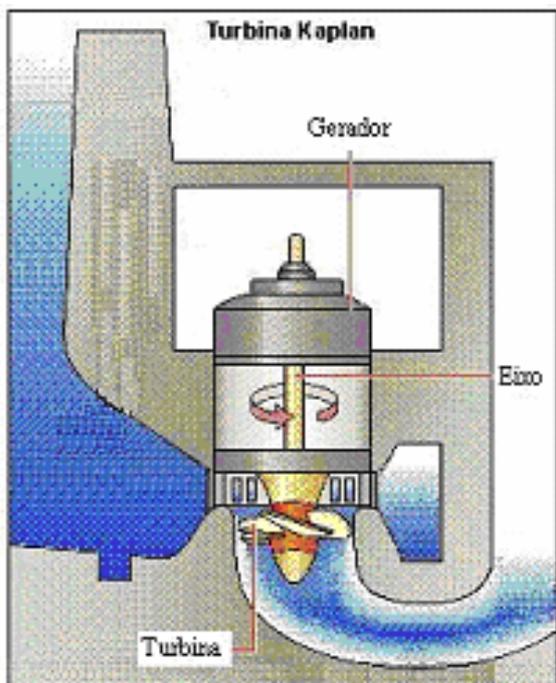


Figura 2: Turbina Kaplan
Fonte: ENCINA, 2006

A turbina Kaplan é classificada como turbina de reação, adaptadas às quedas fracas e caudais elevados, é constituída por uma câmara de entrada que pode ser aberta ou fechada por um distribuidor e por uma roda com quatro ou cinco pás em forma de hélice.

Segundo Junior (2009) as turbinas Kaplan são reguladas através da ação do distribuidor e com auxílio da variação do ângulo de ataque das pás do rotor o que lhes confere uma grande capacidade de regulação.

Em instalações de baixa queda, a casa de força é integrada às obras de tomada d'água ou localizada a uma pequena distância. As turbinas são do tipo Kaplan ou Hélice, com baixa velocidade (entre 70 e 350 rpm). As obras civis podem ser reduzidas pelo uso de grupos axiais do tipo bulbo e o custo dos geradores também pode ser reduzido, com o uso de multiplicadores de velocidade (JUNIOR, 2009).

A turbina Francis foi idealizada em 1849, é uma típica turbina de reação, pois recebe água sob pressão na direção radial e descarrega numa direção axial, havendo transformação tanto de energia cinética como de energia de pressão em trabalho e o escoamento na zona da roda se processa a uma pressão inferior á pressão atmosférica. A vazão trazida até a turbina pelo conduto forçado é dirigida em direção radial para a roda e, ao sair, ganha uma direção axial indo para o canal de fuga através do tubo de sucção. As turbinas Francis podem ser

instaladas de eixo horizontal ou vertical, sendo este último mais comum nas usinas de grande potência (JUNIOR, 2009).

Essa turbina é caracterizada por ter uma roda formada por uma coroa de aletas fixas, as quais constituem uma série de canais hidráulicos que recebem a água radialmente e a orientam para a saída do rotor numa direção axial. A entrada na turbina ocorre simultaneamente por múltiplas comportas de admissão dispostas ao redor da roda, e o trabalho é exercido sobre todas as aletas ao mesmo tempo para fazer rodar a turbina e o gerador. Os outros componentes desta turbina são a câmara de entrada, a qual pode ser aberta ou fechada com uma forma espiral, o distribuidor constituído por uma roda de aletas fixas ou móveis que regulam o caudal e o tubo de saída da água (JUNIOR, 2009).

As turbinas Francis são utilizadas em quedas superiores a 20 metros, e possuem uma grande adaptabilidade a diferentes quedas e caudais. Possuem um rendimento máximo mais elevado, velocidades maiores e menores dimensões.

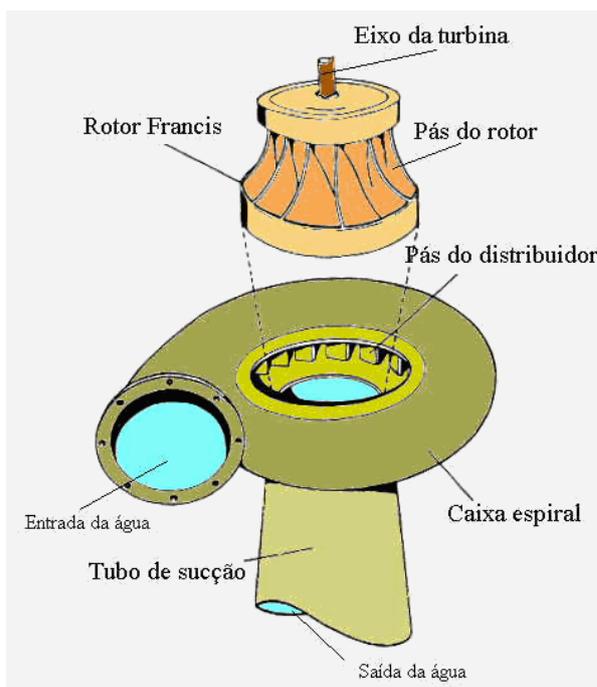


Figura 3: Turbina Francis

Fonte: JUNIOR, 2009

As lâminas do rotor da turbina Francis têm curvas especialmente desenhadas para que a água que as atinge mude gradualmente de direção radial para axial. A água é inicialmente conduzida para essas lâminas móveis através de lâminas guias fixadas às paredes do vaso da turbina.

Os tipos mais usados no Brasil são as turbinas Kaplan e principalmente as turbinas Francis, porque são mais apropriadas para os rios brasileiros, que correm em terras planas sem grandes alturas.

Na figura 4 mostra um resumo das principais características das turbinas mencionadas a cima.

| Tipo | Queda d'água | Vazão de água | Performance |
|-------------|---------------------|----------------------|--------------------|
| Pelton | Alta | Baixa | Aproxim. 90% |
| Francis | Alta e Média | Alta e Média | Até 96% |
| Kaplan | Média e Baixa | Alta e Média | Até 95% |

Figura 4: Características das turbinas
Fonte: MIRANDA, 2009

As turbinas tipo Sifão são aproveitadas onde existe baixas quedas, normalmente inferiores a 5m pode-se utilizar os grupos eletromecânicos equipados com as turbinas axiais especiais para essa finalidade são denominadas tipo “Sifão”.

Os equipamentos hidro geradores para os grupos sifão é um conduto em chapas de aço convenientemente calandradas e soldadas ou mesmo parcialmente em concreto, é instalado acima dos níveis de montante e jusante da água. A partida do grupo é realizada a partir de uma bomba de vácuo, criando assim um fluxo contínuo da água no interior do conduto. A parada da turbina é conseguida pela admissão de ar no Sifão (JUNIOR, 2009).

Os conjuntos de turbinas Sifão podem ser montados quase que completamente em fábrica, reduzindo assim os custos de instalação na obra.

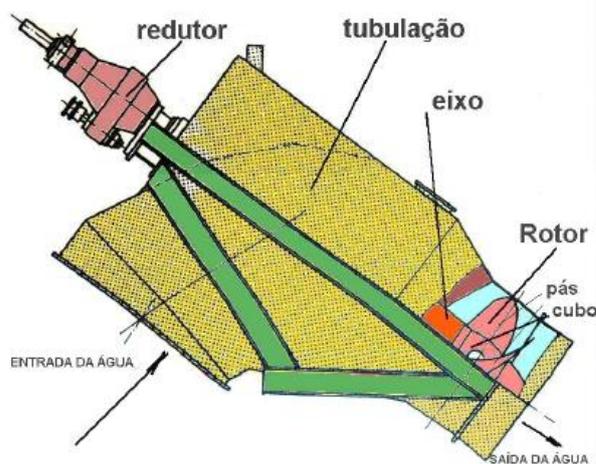


Figura 5: Turbina Sifão
Fonte: JUNIOR, 2009

Segundo Colnago (2011) para construção de uma usina hidrelétrica escolhe-se qual será o tipo de turbina ideal, em função da altura de queda e rotação específica. Para algumas quedas pode-se inclusive combinar diferentes tipos de turbinas, como Kaplan e Francis ou Francis e Pelton. Na figura 6 temos a eficiência das principais turbinas.

3.4.2 Perdas

Um sistema de geração de energia elétrica a partir de usinas hidrelétricas nunca irá ter rendimento total de 100%. Essas perdas estão em diversos fatores como queda da tomada de água, nível do reservatório e perdas mecânicas e hidráulicas nos equipamentos.

Segundo Encina (2006) em turbinas hidráulicas, o rendimento representa as perdas verificadas nas diferentes condições de operação, considerando que uma parte da potência disponível nos eixos da turbina é dissipada em perdas internas e externas na própria turbina. Valores de rendimento de grandes turbinas variam entre 88 e 96%.

A transformação da energia mecânica em energia elétrica pelo gerador não se verifica de maneira completa, devido a que nessa transformação também há perdas nos enrolamentos, perdas mecânicas provocadas pelo atrito nas escovas do sistema de excitação, perdas nos mancais e sistema de ventilação. Verificam-se também perdas provocadas pela histerese e correntes de Foucault, originadas pela variação da densidade de fluxo magnético no ferro do gerador (ENCINA, 2006).

O aumento da geração através do aumento da vazão turbinada irá ocasionar também um aumento no nível das perdas hidráulicas, que irá exigir um aumento da vazão turbinada para poder produzir a mesma potência.

4 METODOLOGIA

A contribuição da energia hidráulica ao desenvolvimento econômico do país é de extrema importância, seja na economia, nas atividades industriais, agrícolas, comerciais e de serviços e na própria sociedade, com a melhoria do conforto das habitações e da qualidade de vida das pessoas. Também desempenha papel importante na integração e no desenvolvimento de regiões distantes dos grandes centros urbanos e industriais.

Por toda essa importância e considerando que as centrais hidrelétricas são as principais responsáveis pela geração de energia elétrica no Brasil, com isso obteve-se o interesse por estudar e pesquisar qual é a melhor maneira de se produzir energia elétrica neste

segmento com menores perdas, aproveitando ao máximo de cada componente que ali se encontra, assim realizando um comparativo de custos entre dois tipos de conjunto turbina-gerador.

Para esta análise de comparação de custos, entrou-se em contato com uma empresa que produz estes equipamentos, onde foram concedidos dois orçamentos, sendo de duas PCHs.

Para análise de qual turbina é mais eficiente considerando o tipo de instalação e abordando alguns itens para garantir uma boa eficiência, utilizou-se bibliografias referente ao tema, principalmente artigos científicos, legislações aplicadas ao setor elétrico.

5 RESULTADOS

5.1 ESTUDOS PARA EFICIÊNCIA

A escolha da tecnologia aplicada e a qualidade técnica do projeto e de fabricação são fatores determinantes na durabilidade e na capacidade de geração de energia da usina.

As decisões no mercado de geração de energia são tomadas por parâmetros financeiros, definindo o potencial energético das usinas. Condições financeiras são importantes, mas sempre estarão inseridas num contexto econômico desconexo com a vida útil de uma usina hidrelétrica, estimada em 50 anos. A construção efetiva de uma usina hidrelétrica segue um cuidadoso processo de engenharia financeira, no qual se considera a Taxa Interna de Retorno (TIR) de capital do projeto (MIRANDA, 2009).

Para garantia de produção de energia da usina o estudo da vazão é muito importante, pois é ela quem vai determinar a capacidade da mesma. A figura 6 mostra a vazão de uma PCH.

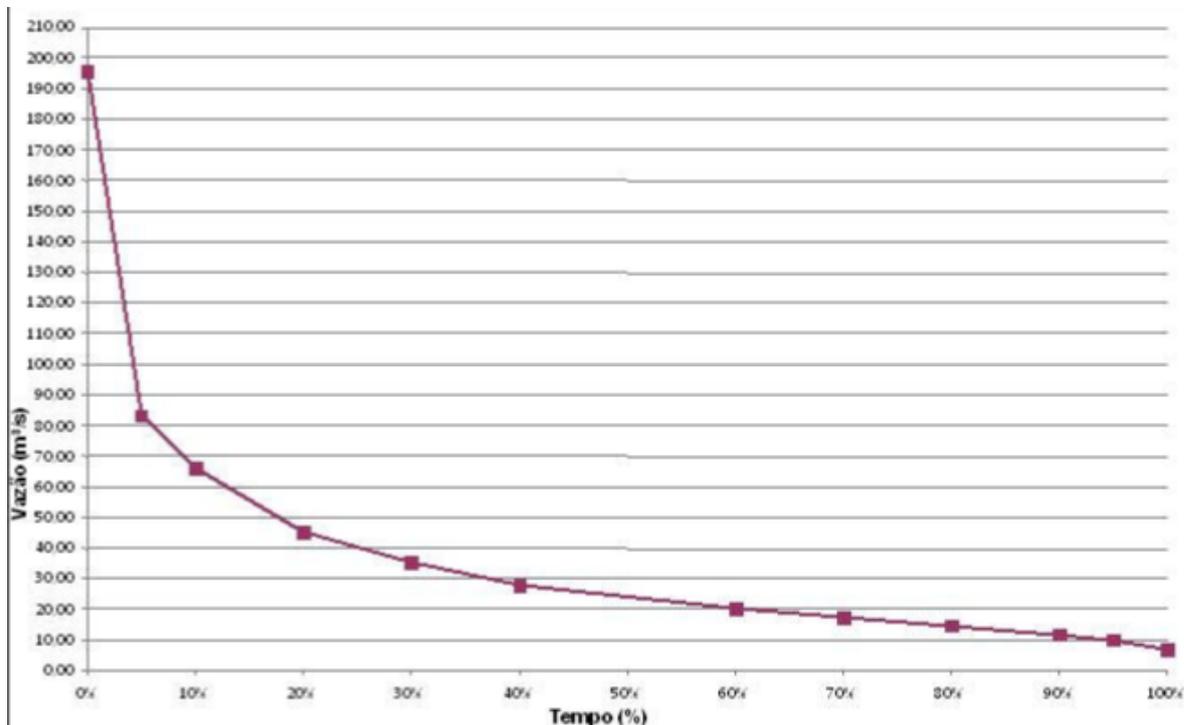


Figura 6: Vazão PCH
Fonte: MIRANDA, 2009

Observando a figura 6, em 95% do tempo, o rio é capaz de garantir uma vazão de $10\text{m}^3/\text{s}$ e esta vazão determina a energia firme da usina hidrelétrica; $40\text{m}^3/\text{s}$ é a vazão de água

selecionada no projeto para definir a potência nominal da usina hidrelétrica, correspondente a 25% do tempo, ou seja, a vazão de 40m³/s existirá durante 25% do tempo durante o ano; toda a vazão de água, acima de 40m³/s, não é aproveitada para fins de geração de energia (MIRANDA, 2009).

Além da vazão analisada Ramos e Grimoni (2012) citam alguns pontos a serem analisados em uma instalação de Central Hidrelétrica:

- Potência mecânico –hidráulica disponível
- Potência utilizável
- Possibilidade de transporte dos componentes ao parque gerador
- Custo das obras civis
- Custos dos equipamentos de ação direta e dos equipamentos auxiliares
- Custo de manutenção
- Rendimento dos equipamentos de ação direta (turbina e gerador)
- Custo das áreas inundáveis
- Valores das áreas no entorno do reservatório
- Aspectos ligados à geologia e à localização do reservatório e da barragem

5.2 ANÁLISES DOS EQUIPAMENTOS

Fabricantes de turbinas hidráulicas apresentam em seus catálogos, séries de turbinas padronizadas. É relevante revisar as bases conceituais e a metodologia subjacente aos parâmetros determinantes na seleção de turbinas hidráulicas.

Para o autor Mello Junior (2000) a potência instalada é dada pela equação 1 e 2:

Equação 1 em kW:

$$P = 9,81 \cdot Q \cdot H_u \cdot \eta_t$$

Equação 2 em CV:

$$P = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_u \cdot \eta_t}{75}$$

Onde:

P = Potência instalada (kW) ou (CV) conforme fórmula utilizada;

Q = vazão (m^3/s);

H_u = altura útil (m);

γ = peso específico da água (kgf/m^3);

η_t = rendimento total ; onde $\eta_t = \eta_{tu} \times \eta_g$

η_{tu} = rendimento da turbina

η_g = rendimento do gerador

Para uma maior explanação da comparação da eficiência e desempenho das principais turbinas hidráulicas utilizadas no Brasil para mini, micro e grande geração de eletricidade, temos o gráfico a seguir que nos mostra esses dados, onde os mesmos devem ser analisados em um projeto de execução e instalação de hidrelétricas.

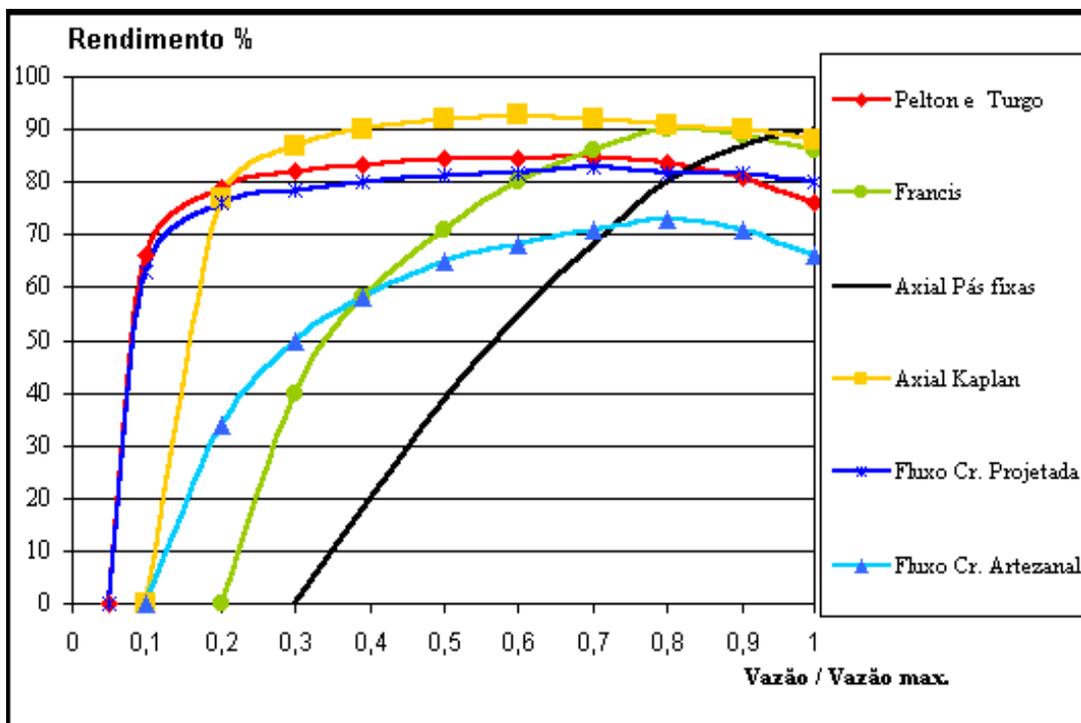


Figura 7: Rendimento de turbinas

Fonte: MIRANDA, 2009.

Uma análise do gráfico sugere algumas observações:

a) as principais máquinas hidráulicas tipo Francis, Pelton e Kaplan têm eficiência energética acima de 80%, o que confere a esta forma de geração uma elevada performance técnica;

b) considerando-se as turbinas Francis e Kaplan, nota-se que as turbinas Francis têm uma acentuada perda de rendimento à medida que ocorre a variação de vazão;

c) a variação de eficiência da turbina Kaplan é de 10%, mesmo com variação de vazão entre 20 e 100%.

Segundo Mello Junior (2000) para rendimentos de geradores, podem ser adotados os valores constantes nos manuais e catálogos de fabricantes:

- Para geradores síncronos $\eta_g = 0,75$ a $0,94$ aumentando com a potência.
- Para geradores assíncronos $\eta_g = 0,68$ a $0,9$ aumentando com a potência.

Para uma boa eficiência do projeto na produção de energia hidráulica segundo Ramos e Grimoni (2012) o rendimento deve ser obtido através da equação 3.

Equação 3:

$$\eta_{TOT} = \eta_H \cdot \eta_T \cdot \eta_g$$

onde:

η_H : Rendimento do sistema hidráulico

η_T : Rendimento da turbina

η_g : Rendimento do gerador

O autor cita que os valores típicos encontrados para este tipo de cálculo são:

$$0,76 \leq \eta_{Tot} \leq 0,87 \quad \text{com} \quad \eta_H \geq 0,96$$

$$0,94 \geq \eta_T \geq 0,88$$

$$0,97 \geq \eta_g \geq 0,90$$

5.3 CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO DO CONJUNTO TURBINA/GERADOR

Para levantamento de custos do conjunto turbina/gerador foi consultado uma empresa especializada na produção desses produtos que localiza-se na cidade de Xanxerê. Os

dados a seguir são orçamentos de duas PCH's que por questão de segurança não deve ser identificado o nome das devidas empresas e localização dos empreendimentos. Assim serão chamadas de PCH 01 e PCH 02.

PCH 01:

Duas (02) turbinas hidráulicas do tipo Francis, rotor simples, eixo horizontal, 720 rpm, potência no eixo de 1.075 kW e com seus respectivos acessórios.

Ficha Técnica:

| | Tipo de Turbina | Francis Horizontal Simples | |
|----|-----------------------------|-----------------------------------|--------|
| z | Número de Unidades | Qt | 2 |
| HI | Queda Líquida | m | 41,28 |
| Q | Vazão Unitária da Turbina | m ³ /s | 2,9 |
| N | Potencia Nominal da Turbina | kW | 1075 |
| n | Rotação Nominal da Turbina | rpm | 720 |
| Ø | Diâmetro do Rotor | mm | 709 |
| Ns | Rotação Específica | rpm | 262,97 |
| Nq | Vazão Especifica Nominal | rpm | 75,29 |
| η | Rendimento da Turbina | m ³ /s (%) | η (%) |
| | | 100 | 91,50% |

Figura 8: Ficha técnica turbina PCH 1

Fonte: o autor

Dois Geradores Síncronos Trifásico, de construção horizontal, potência unitária de 1.200 kVA, tensão 2.300 V, 720 rpm, auto ventilado, unidirecional, ligação em estrela, classe de isolamento "F" (155°C) e elevação de temperatura 80K, sistema de excitação estática.

Ficha técnica:

| | |
|-------------------------------------|--------------------|
| Tipo de Gerador | Síncrono Trifásico |
| Número de Unidades | 02 |
| Posição do Eixo - Forma construtiva | Horizontal |
| Potência Nominal do Gerador | 1.200 kVA |
| Tensão Nominal | 2.300 V |
| Frequência | 60 Hz |
| Rotação Nominal | 720 rpm |
| Fator de Potência | 0,9 |
| Tipo de Excitação | Estática |
| Classe de isolamento | F |
| ΔT | 80 K |
| Grau de Proteção | IP21 |
| Número de Fases | 3 |
| Caixa de Ligação | Direita |
| Ligação | Estrela |
| Regime de Serviços | S1 |
| Sistema de Refrigeração | Aberta |

Figura 9: Ficha técnica gerador PCH 1

Fonte: o autor

Os dois equipamentos de acordo com a empresa fabricante os custos estão na figura abaixo.

| Equipamentos | Valor Unitário | Valor Total |
|---|----------------|--------------|
| Duas (02) turbinas hidráulicas do tipo Francis, no Balanço, Rotor Simples, eixo Horizontal 720 rpm, potência unitária no eixo 1.065 kW. | 1.407.000,00 | 2.814.000,00 |
| Dois (02) Geradores Síncronos Trifásicos, de construção Horizontal, potência 1.200 kVA, tensão 2.300 V, 720 rpm. | | |

Figura 10: Orçamento turbina/gerador PCH 1

Fonte: o autor

PCH 2:

Duas (02) turbinas hidráulicas, tipo Tubular “S” (Kaplan) de 1.319 kW, rotação de 600,00 rpm com pás do rotor, pás diretrizes móveis compreendendo a turbina os seguintes equipamentos e acessórios.

Ficha técnica:

| | Tipo de Turbina | Tubular "S" de Jusante, rotor Kaplan | |
|----|-----------------------------------|--------------------------------------|----------|
| z | Número de Unidades | Qt | 2 |
| HI | Queda Líquida | m | 16,8 |
| Q | Vazão Unitária da Turbina | m ³ /s | 8,6 |
| N | Potência Nominal Unitária | kW | 1.319 |
| n | Rotação Nominal da Turbina | rpm | 600 |
| Ø | Diâmetro do Rotor | mm | 1143 |
| Ns | Rotação Específica | rpm | 746,67 |
| Nq | Vazão Específica Nominal | m ³ /s | 212,04 |
| Hs | Altura do Sucção | M | (+) 2,00 |
| η | Rendimento turbina com 100% carga | % | 93 |

Figura 11: Ficha técnica turbina PCH 2

Fonte: o autor

02 Geradores Síncronos Trifásico, potência unitária de 1.460 kVA, tensão 2.300 V, 600 rpm, de construção horizontal, auto-ventilado, unidirecional, ligação em estrela, classe de isolamento “F” (155°C) e elevação de temperatura 90K, Sistema de Excitação Estática.

Ficha técnica:

| | |
|-------------------------------------|------------------------------|
| Tipo de Gerador | Síncrono Trifásico Trifásico |
| Número de Unidades | 2 |
| Posição do Eixo - Forma construtiva | Horizontal |
| Potência Nominal do Gerador | 1.460 kVA |
| Tensão Nominal | 2.300 V |
| Frequência | 60 Hz |
| Rotação Nominal | 600 rpm |
| Tipo de Polos | Salientes |
| Fator de Potência | 0,9 |
| Tipo de Excitação | Estática |
| Classe de isolamento | F |
| ΔT | 90 K |
| Grau de Proteção | IP21 |
| Número de Fases | 3 |
| Caixa de Ligação | Direita |
| Ligação | Estrela |
| Regime de Serviços | S1 |
| Rendimento com 100% de carga | 95,50% |

Figura 12: Ficha técnica gerador PCH 2

Fonte: o autor

Os dois equipamentos de acordo com a empresa fabricante os custos estão na figura abaixo.

| Equipamentos | Valor Unitário | Valor Total |
|---|-----------------------|--------------------|
| Duas (02) turbinas hidráulicas do tipo Tubular “S” de Jusante, rotor Kaplan, eixo Horizontal 600 rpm, potência unitária no eixo 1.319 kW. | 1.854.250,00 | 3.708.500,00 |
| Dois (02) Geradores Síncronos Trifásicos, de construção Horizontal, potência 1.460 kVA, tensão 2.300 V, 600 rpm. | | |

Figura 13: Orçamento turbina/gerador PCH 2

Fonte: o autor

6 CONCLUSÃO

As usinas hidrelétricas são destaque na geração de energia elétrica no Brasil. Elas são classificadas em 3 níveis pela sua capacidade de geração, sendo CHG com até 1 MW de potência instalada, PCH de 1 MW até 30 MW e UHE acima de 30 MW.

Para a construção dessas usinas, procedimentos ambientais devem ser realizados para garantir a minimização dos impactos ambientais e sociais da região. Esses procedimentos são chamados de licença de prévia, instalação e operação.

Foram abordadas as principais turbinas hidráulicas: Pelton, Francis, Kaplan e Sifão, que é a menos utilizada. Em comparação entre Pelton, Francis e Kaplan elas mostraram eficiência energética acima de 80%, o que confere a esta forma de geração uma elevada performance técnica.

Também abordou-se as variações de queda d'água e vazão, onde considera-se fatores importantes para um dimensionamento correto e com certificação de que haverá uma boa eficiência no processo. Nesta comparação a turbina do tipo Kaplan destaca-se das turbinas do tipo Pelton e Francis, pois é capaz de permitir variações de queda d'água e de vazão de água e, ainda assim, manter alta performance de rendimento.

Para garantia de uma boa eficiência além da escolha da turbina e gerador alguns itens devem ser analisados, como o local que será instalado o empreendimento, o potencial do rio, possibilidade de transporte dos componentes ao parque gerador, custo das obras civis, custos dos equipamentos de ação direta e dos equipamentos auxiliares e custo de manutenção.

Para levantamento reais de custos do conjunto turbina e gerador analisou-se dois casos. No primeiro caso PCH 1 com duas turbinas hidráulicas do tipo Francis, e dois geradores síncronos trifásicos com um custo de R\$ 2.814.000,00. No segundo caso PCH 2 com duas turbinas hidráulicas do tipo Tubular "S" de Jusante, rotor Kaplan, e dois geradores síncronos trifásicos com custo de R\$ 3.708.500,00.

A construção de uma usina abrange diversos fatores ambientais, sociais, culturais e econômico como visto neste trabalho. A escolha dos equipamentos adequados é de extrema importância, só assim garantirá lucro ao empreendimento, pois como podemos perceber pelos respectivos orçamentos é um empreendimento de alto valor econômico.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

COLNAGO, Glauber Renato. **Contribuição para a Otimização de Turbinas em Usinas Hidrelétricas: Especificação e Operação.** 2011. 163f. Tese de Doutorado (Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 2011.

ELETROBRAS. **Centrais Elétricas Brasileiras S.A.** 20---. Disponível em: http://www.furnas.com.br/hotsites/sistemafurnas/usina_hidr_funciona.asp. Acesso em: 15/10/2014.

ENCINA, Anastacio Sebastián Arce. **Despacho Ótimo de Unidades Geradoras em Sistemas Hidrelétricos Vía Heurística Baseada em Relaxação Lagrangeana e Programação Dinâmica.** Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP. Campinas, 2006.

FACURI, Micheline Ferreira. **A Implantação De Usinas Hidrelétricas e o Processo De Licenciamento Ambiental: A Importância Da Articulação Entre Os Setores Elétrico e De Meio Ambiente No Brasil.** 2004. 88f. Tese de Mestrado (Engenharia da Energia, Área de Concentração Planejamento Energético). Universidade Federal de Itajubá. Minas Gerais, 2004.

FREITAS, Lúcia Helena. **Implicações do licenciamento ambiental na expansão da capacidade de geração de energia elétrica.** Mestrado em Gestão Econômica do Meio Ambiente. Departamento de economia da Universidade de Brasília. Brasília. 2003.

MIRANDA, Roberto Lobo. **Regulação Técnica Para Se Obter Melhor Eficiência Na Motorização De Pequenas Centrais Hidrelétricas No Brasil.** 2009. 119f. Tese de Mestrado (Regulação da Indústria de Energia) - Universidade de Salvador. Salvador, 2009.

MELLO JÚNIOR. **Antonio Gonçalves de.** A Turbina de Fluxo Cruzado (Michell - Banki) Como Opção Para Centrais Hidráulicas de Pequeno Porte. Universidade de São Paulo, USP. São Paulo. 2000

PEREIRA, Pedro Jorge Campello Rodrigues. **Desafios do Licenciamento Ambiental de Usinas Hidrelétricas: Um estudo de caso da UHE Itapebi**. 2011. 125f. Tese de Mestrado (Ciências, em Políticas Públicas, Estratégias e Desenvolvimento) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2011.

RAMOS, Dorel Soares; GRIMONI, José Aquiles Baesso. **Produção de Energia Elétrica**. Ed. 2012. São Paulo, 2012.

REZENDE, L.P. **Avanços e contradições do licenciamento ambiental de barragens hidrelétricas**. Belo Horizonte. 2007.

VICHI, Flavio Maron; MANSOR, Maria Teresa Castilho. **Energia, meio ambiente e economia: o Brasil no contexto mundial**. Instituto de Química. Universidade de São Paulo. Química Nova, Vol. 32. São Paulo. 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-40422009000300019>>. Acesso em: 13/10/14.

VIEIRA; Flavia. VAINER; Carlos. **Manual do Atingido: Impactos Sociais e Ambientais de Barragens**. Movimento dos Atingidos por Barragens – MAB. 20--.

WCD. Comissão Mundial de Barragem. **Barragens e Desenvolvimento de um novo quadro para a tomada de decisão**. O relatório da Comissão Mundial de Barragens. Novembro. 2000.