



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS
FACULDADE DE FÍSICA

ANDRÉ LUIZ PEREIRA DOS SANTOS

**O POTENCIAL HIDRÁULICO E SEU APROVEITAMENTO NAS
USINAS HIDRELÉTRICAS.**

BELÉM
2015

ANDRÉ LUIZ PEREIRA DOS SANTOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Física da Universidade Federal do Pará, como requisito para obtenção do grau de Licenciatura Plena em Física.

Orientador: Prof. Dr. Rubens Silva.

BELÉM
2015

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO DA PUBLICAÇÃO (CIP)

S237p

Santos, André Luiz Pereira.

O potencial hidráulico e seu aproveitamento nas usinas hidrelétricas / André Luiz Pereira dos Santos; Orientador: Prof^o. Dr. Rubens Silva – 2015.

41 f: il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação), Faculdade de Física, Instituto de Ciências Exatas e Naturais, Universidade Federal do Pará, Belém, 2015.

1. Energia Elétrica. 2. Usinas Hidrelétricas. 3. Potencial Hidráulico

ANDRÉ LUIZ PEREIRA DOS SANTOS

**O POTENCIAL HIDRÁULICO E SEU APROVEITAMENTO NAS
USINAS HIDRELÉTRICAS.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como
requisito para obtenção do grau de Licenciatura Plena
em Física, pela Universidade Federal do Pará.

BANCA EXAMINADORA:

Profº. Dr. Rubens Silva
Orientador

Prof. Dr. Klaus Cozzolino
Examinador

Prof. Espec. Ubiracir Barbosa
Examinador

JULGADO EM: _____

CONCEITO: _____

“Mais fácil me foi encontrar as leis com que se movem os corpos celestes, que estão a milhões de quilômetros, do que definir as leis do movimento da água que escoam frente aos meus olhos.”

Galileu Galilei

AGRADECIMENTOS

A minha família, que sempre esteve ao meu lado nos momentos de extremas dificuldades.

A minha namorada, que esteve sempre comigo durante toda a etapa acadêmica.

Ao professor João Batista, pelas longas conversas a respeito dos processos educacionais que contribuíram significativamente à minha formação profissional.

Ao professor Dr. José Ciríaco Pinheiro, que me possibilitou a oportunidade de participar como professor voluntário do Projeto Oficina do Vestibulando do qual é coordenador, contribuindo sobre maneira para o meu aprimoramento como profissional.

Ao amigo Nelson Fernando, pela grande ajuda prestada durante essa caminhada acadêmica.

Aos amigos Jonas Chumber (pela ajuda dada com o processo de formatação do trabalho), Dirceu de Paula, Gil, Sady, Hélio entre outros.

E a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para a finalização desse trabalho. Mas que por algum motivo não foram citadas.

RESUMO

O estudo realizado neste trabalho teve como objetivo obter maiores esclarecimentos sobre a energia hidráulica disponível no território brasileiro, bem como, verificar os processos estruturais usados nas usinas hidrelétricas para o seu aproveitamento. Fazer uso da energia potencial gravitacional de uma massa de água para determinar o potencial hidráulico gerado nas hidrelétricas. Realizar algumas estimativas do potencial hídrico de regiões ou países com base em seus índices pluviométricos, suas áreas e altitude média. Além disso, a pesquisa teve como objetivo analisar os principais impactos ambientais causados com as construções de grandes usinas hidrelétricas de energia.

Palavras-chave: Energia Elétrica, Usinas Hidrelétricas, Potencial Hidráulico.

ABSTRACT

The study conducted this study aimed to get more insight into the hydraulic energy available in Brazil, as well as verifying the structural processes used in hydroelectric plants for your use. Make use of the gravitational potential energy of a body of water to determine the water power generated by hydroelectric plants. Perform some estimates of the water potential of regions or countries based on their levels of rainfall, their areas and average altitude. In addition, the survey aimed to analyze the main environmental impacts caused by the construction of large hydroelectric power plants.

Keywords: Electricity. Hydroelectric plants. Hydraulic potential.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: Aproveitamento da energia hidráulica para a moagem de grãos.....	16
FIGURA 2: A energia hidráulica e o ciclo hidrológico.....	17
FIGURA 3: Oferta interna de energia elétrica por fonte entre 2011/2013.....	Erro! Indicador não definido.
FIGURA 4: Modelo esquemático de uma usina hidrelétrica.....	20
FIGURA 5: Reservatório da hidrelétrica de Barra Grande.....	21
FIGURA 6: Modelo de barragem de concreto do tipo abóbada.....	22
FIGURA 7: Barragem tipo gravidade da usina hidrelétrica de Itumbiara.....	22
FIGURA 8: Modelo de barragem de terra.....	23
FIGURA 9: Barragem de enrocamento da usina hidrelétrica de Barra Grande.....	23
FIGURA 10: Modelo de tubulação adutora externa (Pressão atmosférica).....	24
FIGURA 11: Modelo de turbinas Pelton de cinco jatos	25
FIGURA 12: Relação entre queda d'água e potência gerada pela turbina Pelton....	26
FIGURA 13: Modelo de turbina Kaplan.....	26
FIGURA 14: Relação entre queda d'água e potência gerada pela turbina Kaplan..	27
FIGURA 15: Modelo de turbina Francis.....	27
FIGURA 16: Relação entre queda d'água e potência gerada pela turbina Francis..	28
FIGURA 17: Representação de queda d'água em uma usina hidrelétrica.....	29

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: Principais unidades de energia e potência e suas equivalências.....	15
TABELA 2: Novos projetos hidrelétricos a serem viabilizados de 2019 a 2023.....	18
TABELA 3: Impactos socioambientais e algumas medidas minimizadoras.....	35

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	11
CAPÍTULO 1	13
1.1 - ENERGIA E SUAS FORMAS	13
1.2 - A ENERGIA HIDRÁULICA.....	16
CAPÍTULO 2	19
2.1- USINA HIDRELÉTRICA: CLASSIFICAÇÃO E PRINCIPAIS COMPONENTES	19
2.2 - COMPONENTES ESTRUTURAIS DE UMA USINA HIDRELÉTRICA.....	20
2.2.1 – Reservatório	20
2.2.2 – Tomada d’ Água	21
2.2.3 - Barragem	21
2.2.4 – Conduto Forçado	23
2.2.5 – Casa de Força	24
2.2.6 - Turbinas	24
CAPÍTULO 3	29
3.1 – DEFINIÇÃO E ESTIMATIVA DO POTENCIAL HIDRÁULICO	29
3.2 – ESTIMANDO O POTENCIAL HIDRÁULICO DE UMA REGIÃO OU PAÍS. ..	32
CAPÍTULO 4	34
4.1 - OS IMPACTOS SOCIOAMBIENTAIS GERADOS PELOS EMPREENDIMENTOS HIDRELÉTRICOS	34
CONCLUSÃO	36
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36

INTRODUÇÃO

O grande potencial hidrelétrico apresentado pelo Brasil representa uma indiscutível vantagem comparativa em relação às matrizes elétricas adotadas por outros países, que utilizam principalmente os combustíveis fósseis e/ou centrais nucleares para geração de energia elétrica. O parque gerador de energia elétrica no território Brasileiro é constituído basicamente por usinas hidrelétricas, devido à vasta quantidade de rios ao longo do seu território. Desta forma, o conhecimento dos mecanismos estruturais de um empreendimento hidrelétrico e o aproveitamento do potencial citado, constitui um dos principais fatores que classificam este trabalho de pesquisa.

Segundo o Centro Nacional de Referência em Pequenas Centrais Elétricas (CERPCH), o Brasil ocupa hoje, terceiro maior potencial hidráulico do mundo. Posição essa conquistada devido às suas características físicas e geográficas. Baseado nessas informações e no intuito de obter um maior conhecimento a respeito do aproveitamento desse potencial, o presente trabalho teve como objetivo principal, buscar algumas formas de se avaliar o potencial hidráulico de uma dada região ou país, com base nas suas grandezas geoclimáticas.

Os dados analisados ao longo desse trabalho indicam que a matriz energética Brasileira para geração de energia elétrica continuará sendo predominantemente de origem hídrica (o que torna justificável a realização do trabalho). Segundo o Ministério de Minas e Energia, mesmo com os grandes problemas enfrentados pelo setor energético nos últimos anos haverá um aumento na capacidade de geração hidráulica de 82 GW, aproximadamente, para 117 GW em 2019. Na região Norte é onde ocorrerá a maior expansão hidrelétrica, devido à entrada em operação de grandes empreendimentos hidrelétricos que corresponderá aproximadamente 15% da capacidade instalada (BRASIL, 2010).

Para uma melhor apresentação, a pesquisa realizada está distribuída nos seguintes capítulos:

- **Capítulo 1:** aborda as principais formas de energia oferecidas pela natureza ou pelos processos de conversão de uma energia em outra, dando maior destaque para a energia mecânica.
- **Capítulo 2:** destaca os principais tipos e características das usinas hidrelétricas.

- **Capítulo 3:** realiza uma breve abordagem a respeito do potencial hidráulico aproveitável nos empreendimentos hidrelétricos, além de determinar essas potências com base nas características geoclimáticas dessas regiões ou países.
- **Capítulo 4:** mostra os principais impactos socioambientais causados pelas construções de usinas hidrelétricas, gerando com isso uma série de entraves a novos empreendimentos, fazendo com que a produção de energia do país dependa cada vez mais de fontes térmicas, caras e extremamente poluentes (ABBUD; TANCREDI, 2010).

CAPÍTULO 1

1.1 - ENERGIA E SUAS FORMAS

Em grego, a palavra energia significa “trabalho” (do grego *enérgeia* e do latim *energia*) e, inicialmente, foi usado para se referir a muitos dos fenômenos explicados através dos termos: “*vis viva*” (ou “força viva”) e “calórico”. O termo energia surgiu pela primeira vez em 1807, proposta pelo médico e físico inglês Thomas Young. A opção de Young pelo termo energia está relacionada com a concepção que ele tinha de que a energia informa a capacidade de um corpo realizar alguma forma de trabalho mecânico (BACUSSI, 2007).

A definição de energia como a “a capacidade de se realizar trabalho” está presente em grandes partes das literaturas que versam sobre o assunto. Essa definição quando empregada a sistemas termodinâmicos se torna bastante simples e de fácil compreensão. Entretanto o conceito de energia é algo bastante amplo na sua essência. Segundo Silva (2014, p. 29), a definição de energia:

Está relacionado com os estados das substâncias e dos sistemas, sendo a grandeza fundamental nas alterações desses estados. Portanto de forma mais geral e primordial, porém menos óbvia, pode-se definir a energia como causa ou resultado da variação dos estados de substâncias e sistemas.

A energia oferecida pela natureza, ou a que obtemos por meio de processos de conversões de uma forma de energia em outra, irão se apresentar em uma das seis formas listadas abaixo (STANO JÚNIOR; FILHO, 2007).

- **Térmica:** energia que está relacionada com a temperatura, isto é, a energia do movimento ou vibração das moléculas.
- **Química:** energia armazenada nas ligações de átomos e moléculas.
- **Radiante:** energia transportada pela radiação eletromagnética
- **Nuclear:** energia que é liberada durante processos de fusão e fissão atômica
- **Mecânica:** Energia associada ao estado de movimento e de repouso dos corpos, podendo ser definida pela relação abaixo:

$$E_M = E_C + E_P \quad (1)$$

Onde E_c é a energia cinética e E_p é a energia potencial. A energia cinética (E_c) está associada ao movimento do corpo, podendo ser de translação e/ou rotação, definidas por:

$$E_c = \frac{1}{2} m.v^2 \quad (2)$$

$$E_R = \frac{1}{2} .I.w^2 \quad (3)$$

Onde m é a massa do objeto em movimento, v corresponde a sua velocidade em relação a um determinado referencial, I é a distribuição de massa em torno do eixo de rotação. As energias cinéticas de translação e rotação não são tipos diferentes de energia, as duas são expressas em formas apropriadas ao movimento em questão.

A energia potencial (E_p) está associada à configuração de um sistema com relação aos demais (por exemplo, altura de um corpo no sistema corpo-Terra; ou a compressão/alongamento em um sistema bloco-mola) (HALLIDAY; RESNICK, 2009). Podendo ser definidas por:

$$E_{pg} = m.g.h \quad (4)$$

$$E_{el} = \frac{1}{2} k.x^2 \quad (5)$$

Sendo g a aceleração da gravidade, h a distância do objeto a uma determinada altura de referência, k é a constante elástica e x determina a variação do comprimento natural do corpo elástico.

O conceito de energia vem sendo abordado e estudado desde antiguidade. Desse modo, varias denominações foram sendo criadas e utilizadas, gerando diferentes unidades para quantificá-la (SILVA, 2014).

Atualmente, existem várias unidades de medidas para a energia, com forte tendência para o uso do Sistema Internacional de Unidades, que faz uso da unidade joule (J). As principais unidades de energia e potência, bem como os prefixos que

designam múltiplos mil vezes acima ou abaixo da unidade podem ser verificadas na tabela 1.

UNIDADES DE ENERGIA				
Unidades	Joule	Kwh	Btu	Cal
1 Joule	1	$2,778 \times 10^{-7}$	$9,479 \times 10^{-4}$	0,2389
1 Kwh	$3,600 \times 10^6$	1	3,413	$8,600 \times 10^5$
1 Btu [*]	1.055	$2,931 \times 10^{-4}$	1	252,0
1 Cal	4,186	$1,163 \times 10^{-6}$	$3,968 \times 10^{-3}$	1

Btu^{*}: unidade térmica britânica

UNIDADES DE POTÊNCIA				
Unidades	Watt	HP	Btu/h	Cal/s
1 Watt	1	$1,341 \times 10^{-3}$	3,413	0,2389
1 HP [*]	745,7	1	2.544	178,14
1 Btu/h	0,2931	$3,931 \times 10^{-4}$	1	$7,002 \times 10^{-2}$
1 Cal/s	4,186	$5,613 \times 10^{-3}$	14,28	1

HP^{*}: horse-power

PREFIXOS	
Quilo (k) = 10^3	Mili (m) = 10^{-3}
Mega (M) = 10^6	Micro (μ) = 10^{-6}
Giga (G) = 10^9	Nano (n) = 10^{-9}
Tera (T) = 10^{12}	Pico (p) = 10^{-12}
Quad (Q) = 10^{15}	Femto (f) = 10^{-15}

Tabela 1: - Principais unidades de energia e potência e suas equivalências.
Fonte: SILVA, 2014 (Adaptado)

1.2 - A ENERGIA HIDRÁULICA

Desde os tempos primitivos, o homem faz uso da energia hidráulica em seu benefício, quando verificou que a força natural dos cursos de água, principalmente junto a cachoeiras ou corredeiras, podia girar as pás de uma roda acoplada, por exemplo, a de um moinho (ver figura 1). Essas aplicações eram evidentemente precárias, uma vez que o uso da energia tinha que ser realizado no próprio local da queda de água e, por outro lado, suas dimensões estavam limitadas pelos processos primários de fabricação da roda e de seu acoplamento (eixos, engrenagens, correias etc.).

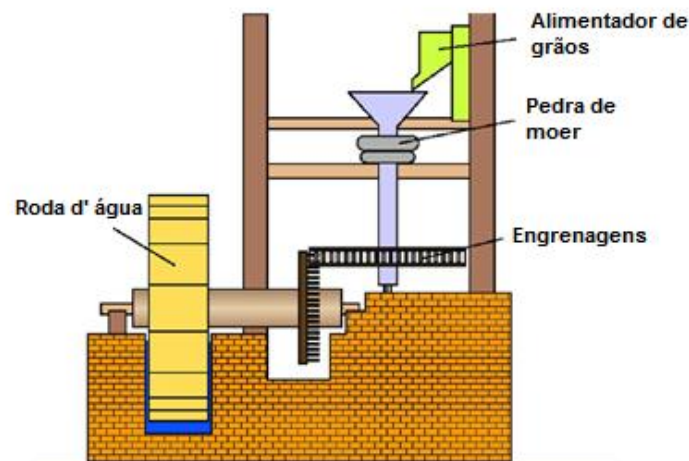


Figura 1: - Aproveitamento da energia hidráulica para a moagem de grãos (adaptado).

Fonte: EDUAMBIENTAL (adaptado)

Com o advento do uso da corrente elétrica, em fins do século XIX, foi possível transformar a energia hidráulica em uma nova forma de energia que podia ser transportada a grandes distâncias: surgiu, então, a energia hidrelétrica (MAGALHÃES, 1978).

A energia hidráulica, da mesma forma que a obtida da biomassa, não se constitui uma fonte fundamental de energia, mas, sim, resulta da irradiação solar e da energia potencial gravitacional, sendo responsável pela evaporação, condensação e precipitação da água sobre a superfície terrestre (ver figura 2) (SILVA, 2014). Diferentemente das demais fontes renováveis, representa uma parcela significativa da matriz energética global, além de possuir tecnologias de aproveitamento devidamente consolidadas. Atualmente, é uma das principais fontes geradoras de energia elétrica para diversos países e, segundo a ANEEL, é

responsável por aproximadamente 17% de toda a energia elétrica produzida no mundo. No Brasil, segundo a Empresa de Pesquisa Energética (2014), a geração hidráulica de energia elétrica responde por 64,9% da oferta interna e tem papel fundamental no desenvolvimento econômico do país, seja no ramo industrial, agrícola, comerciais, serviços ou para atendimento da própria sociedade.

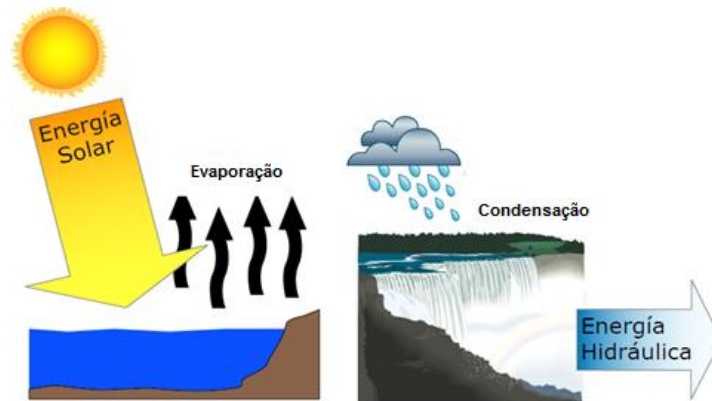


Figura 2: A energia hidráulica e o ciclo hidrológico

Fonte: EDUAMBIENTAL

Mesmo estando entre os cinco maiores potenciais hidráulico do mundo, a figura 3, mostra haver uma queda de 11,3% na oferta de energia elétrica advinda dessa fonte, fato esse que se deu em grande parte pela escassez de chuvas em algumas regiões do país e por sanções ambientais contra empreendimentos hidrelétricos.

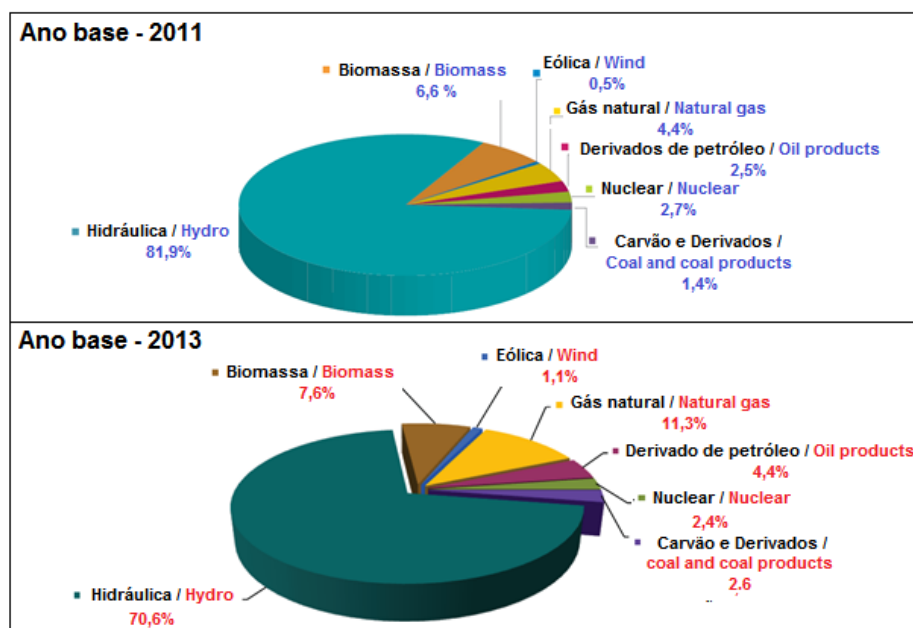


Figura 3: – Oferta interna de energia elétrica por fonte entre 2011/2013.

Fonte: Empresa de Pesquisa Energética, 2012 / 2014 (adaptado)

Com base nos dados do Plano Decenal de Expansão de Energia 2023 (BRASIL, 2014), mesmo com essas adversidades a energia de hidrelétricas continuará sendo a principal fonte geradora de energia elétrica do país (ver tabela 2). Estipula-se que, no mínimo, 50% da expansão de geração de energia nos próximos anos sejam de origem hídrica (PORTAL BRASILEIRO..., 2011).

Entrada em Operação Ano	Operação Mês	Projeto	Rio	Potência ^(a) (MW)	UF
2019	Jan	UHE Itaocara I	Paraíba do Sul	145	RJ
	Jan	UHE Davinópolis	Paranaíba	74	MG/GO
	Jul	UHE Telêmaco Borba	Tibaqui	109	PR
2020	Mar	UHE Comissário	Piquiri	140	PR
	Abr	UHE Foz Piquiri	Piquiri	96	PR
	Jul	UHE Paranhos	Chopim	63	PR
	Ago	UHE São Luiz do Tapajós	Tapajós	8.040	PA
	Ago	UHE Apertados	Piquiri	139	PR
	Ago	UHE Ercilândia	Piquiri	87	PR
2021	Jan	UHE Tabajara	Jiparaná	350	RO
	Jan	UHE Jatobá	Tapajós	2.338	PA
	Abr	UHE Castanheira	Arinos	192	MT
	Ago	UHE Itapiranga	Uruguai	725	SC/RS
2022	Fev	UHE Arraias	Palma	70	TO
	Jul	UHE Bem Querer	Branco	708	RR
	Dez	UHE Prainha	Aripuanã	796	AM
2023	Out	UHE Paredão A	Mucajá	199	RR
	Dez	UHE Tortoréu	Araguaia	408	MT/GO
TOTAL				14.679	

Tabela 2: Novos projetos hidrelétricos a serem viabilizados de 2019 a 2023

Fonte: BRASIL, 2014.

CAPÍTULO 2

2.1- USINA HIDRELÉTRICA: CLASSIFICAÇÃO E PRINCIPAIS COMPONENTES

Para melhor definir uma usina hidrelétrica, a ANEEL (2008, p. 53) afirma:

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

As usinas hidrelétricas podem ser classificadas de acordo com as características que se queira destacar:

- ✓ **Quanto à potência:** a ANEEL classifica as usinas hidrelétricas em: Usina Hidrelétrica de Energia (UHE, com uma potencia instalada de mais de 30 MW), Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGH, com potência de até 1MW) e Pequenas Centrais Elétricas (PCH, com potencia instalada variando entre 1,1 MW e 30 MW)
- ✓ **Reservatório:** Existem dois tipos de reservatórios: de acumulação; geralmente localizados em locais de grandes quedas d'água permitindo o acúmulo de grandes quantidades de água que funcionam como estoques a serem utilizados em tempos de estiagem; de fio d'água geram energia com o fluxo de água do rio, ou seja, pela vazão com mínimo ou nenhum acúmulo do recurso hídrico.
- ✓ **Queda d'água:** no geral, é definida como de alta, baixa ou média altura. O Centro Nacional de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas (CERPCH, da Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI) considera baixa queda uma altura de até 15 metros e alta queda, superior a 150 metros. Alguns autores usam valores diferentes dos citados, porém esses não fogem a essa ordem de grandeza (CERPCH, 2000).

2.2 - COMPONENTES ESTRUTURAIS DE UMA USINA HIDRELÉTRICA

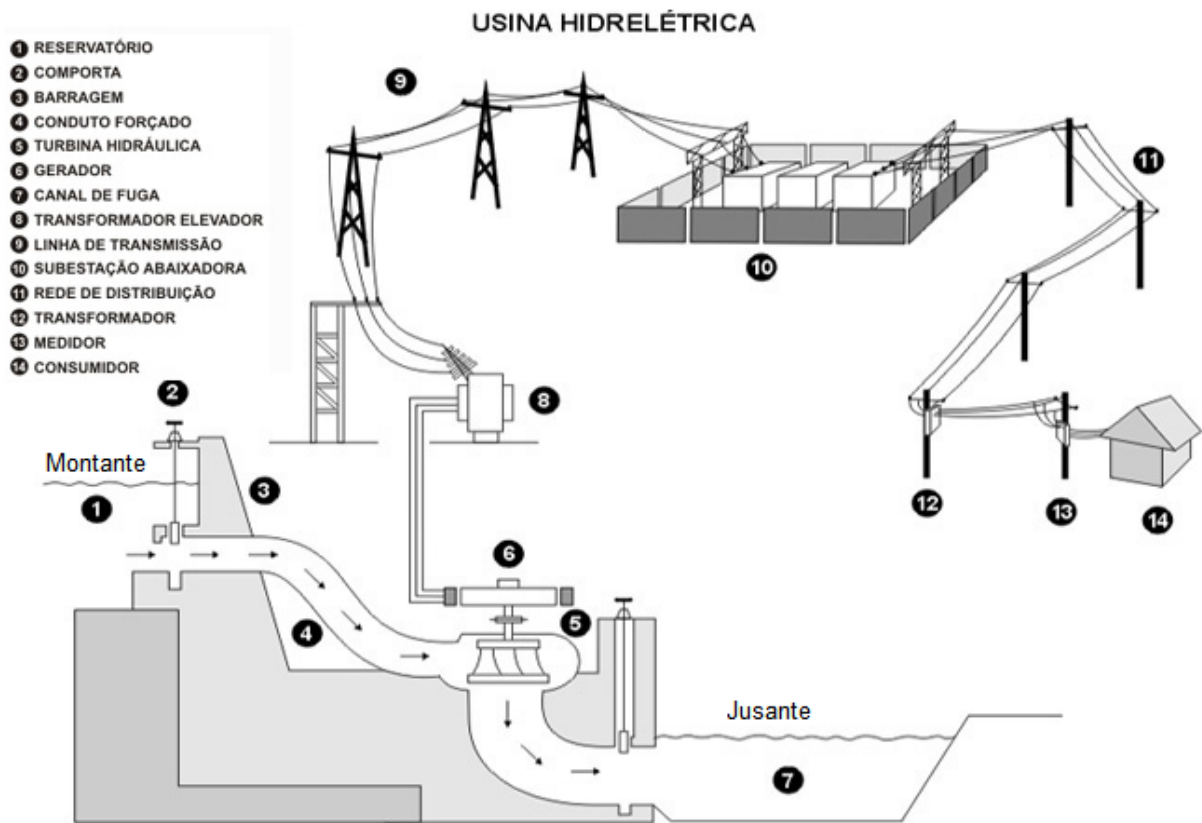


Figura 4: - Modelo esquemático de uma usina hidrelétrica.

Fonte: FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS (ADAPTADO)

A parte estrutural de uma usina hidrelétrica possui diversos componentes conforme mostrado na figura 4. Componentes esses que devem funcionar em conjuntos e de forma integrada para o melhor aproveitamento do potencial hidráulico disponível (ANEEL, 2008). São dadas, a seguir, algumas das principais características de Alguns desses componentes.

2.2.1 – Reservatório

O reservatório atua como uma bateria, armazenando a água para ser liberado conforme necessário para geração de energia.



Figura 5: - Reservatório da hidrelétrica de Barra Grande

Fonte: BAESA.

2.2.2 – Tomada d' Água

A Tomada d'água é uma estrutura que permite a condução da água do reservatório para a adução nas turbinas. É equipada com comportas de fechamento e grade de proteção que tem a finalidade de impedir a entrada de objetos que possam danificar as turbinas (SILVA, 2014).

2.2.3 - Barragem

As barragens das usinas hidrelétricas têm como objetivo a elevação do desnível do rio, aumentando com isso, a energia potencial gravitacional armazenada nas massas de água, bem como a criação de um reservatório para controle da vazão. Essas barragens Podem ser classificadas em: de concreto (de Gravidade e abóbada); de terra; de enrocamento; e mistas (combinação das formas anteriores) (SILVA, 2014). A figura 6 mostra um modelo de barragem do tipo abóbada.



Figura 6: - Modelo de barragem de concreto do tipo abóbada
Fonte: FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS.

Por apresentar custos extremamente elevados, as barragens de concreto do tipo gravidade são geralmente de pequeno porte (ver figura 7), sendo construídas em canais, vales ou em locais de altas quedas e baixas vazões.



Figura 7: - Barragem tipo gravidade da usina hidrelétrica de Itumbiara
Fonte: FLICKR

As barragens de terra são as mais elementares obras de barragens e normalmente se prestam para qualquer tipo de fundação, desde a rocha compacta, até terrenos construídos de materiais incosolidados (ver figura 8). Nas barragens de terra o custo do material é baixo, e são geralmente encontradas na foz dos rios, locais onde se encontram grandes vazões e baixas quedas.



Figura 8: - Modelo de barragem de terra

Fonte: ALVARO CAMARGO

O modelo de enrocamento constitui um tipo de barragem formado por um maciço de pedras devidamente agrupadas, representando uma estrutura intermediária entre a barragem de concreto e a de terra. Conforme mostrado na figura abaixo.



Figura 9: - Barragem de enrocamento da usina hidrelétrica de Barra Grande

Fonte: BAESA.

2.2.4 – Conduto Forçado

Quanto aos órgãos adutores (Condutores forçados), são canais que conduzem a água sobre pressão para as turbinas, podendo ser externos (pressão atmosférica) ou subterrâneos (sob pressão). Conforme mostrado na figura abaixo.

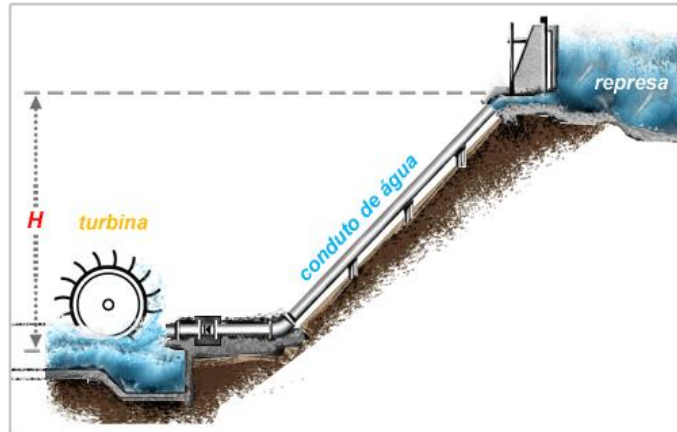


Figura 10: - Modelo de tubulação adutora externa (Pressão atmosférica)

Fonte: ALTERIMA

2.2.5 – Casa de Força

A casa de força é responsável pela transformação da energia hidráulica em elétrica e constitui o componente central de uma usina hidrelétrica, tem como função alocar os conjuntos de turbinas-gerador, transformadores elétricos e outros materiais auxiliares que irá permitir a instalação e manutenção desses equipamentos.

2.2.6 - Turbinas

As turbinas hidráulicas constituem um dos principais elementos da casa de força e possuem um princípio comum de funcionamento. O aproveitamento da energia cinética para transformação em energia elétrica se deve basicamente ao movimento das águas que passa pelas turbinas, sendo estas conectadas a geradores. Após passar pelas turbinas, a água será devolvida ao leito do rio conforme mostrado na Figura 5 (CICOGNA, 2003).

As turbinas hidráulicas são atualmente as formas mais eficientes de conversão de energia primária em secundária, sendo classificadas em dois tipos básicos:

- ✓ Ação ou Impulso: nesse tipo de modelo, a energia hidráulica é transformada em energia cinética, e logo após incidir nas pás do rotor, será convertida em energia mecânica. Esse processo ocorre em pressão atmosférica (CERPCH).

- ✓ Reação: as turbinas de reação possuem o seu rotor completamente submerso na água, com o escoamento da água ocorre à diminuição da pressão e da velocidade do líquido entre a entrada e a saída do rotor.

A utilização das turbinas hidráulicas nos grandes projetos hidrelétricos tem - se concentrado tradicionalmente nos tipos Pelton (ação), com um ou mais jatos; e nas turbinas do tipo Francis, Hélice e Kaplan (reação). Alguns fatores como: vazão, queda líquida e altitude do local determinam o tipo de turbina que serão utilizadas na construção desse tipo de empreendimento.

São dadas, a seguir, algumas das principais características dos três tipos de turbinas mais utilizados no Brasil e no mundo.

Turbinas Pelton: Idealizada em 1878 pelo americano Allan Lester Pelton, as turbinas Pelton operam com um ou mais jatos d' água dirigidas às conchas do rotor; são adequadas para operar com grandes velocidades de rotação (aproximadamente 1000 RPM). Nesses tipos de turbinas o que se vê é o rotor no centro cercado por bocais, cada um desses bocais são controlados por um servo motor possuindo uma válvula no formato de agulha para controle da vazão (HACKER, 2015), conforme figura 11.

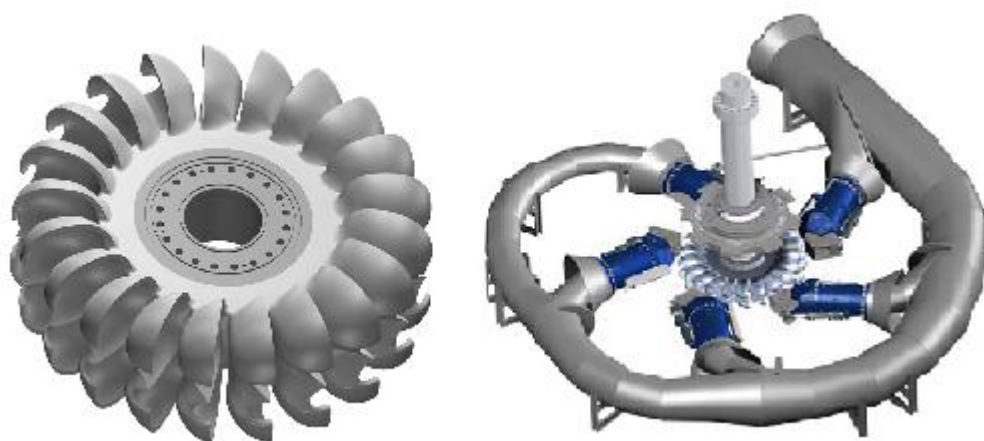


Figura 11: - Modelo de turbinas Pelton de cinco jatos

Fonte: VOITH (adaptado)

Os jatos d'água ao se chocarem com as “conchas” do rotor geram o impulso necessário para o seu funcionamento. Os bocais podem ser acionados individualmente dependendo da potência que se queira gerar. As turbinas Pelton podem ser construídas com eixos horizontais ou verticais e necessitam de quedas d'água acima de 100 metros conforme ilustrado abaixo.

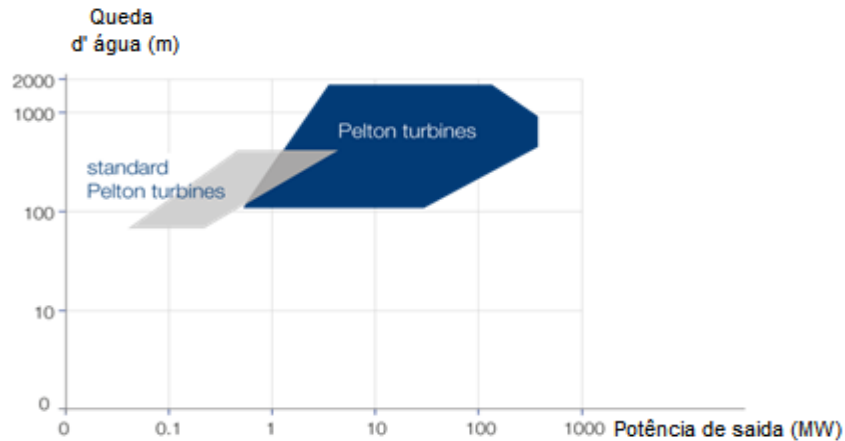


Figura 12: - Relação entre queda d'água e potencia gerada pela turbina Pelton

Fonte: VOITH (adaptado)

Turbinas Kaplan: Por volta de 1912, o austríaco Victor Kaplan (1876-1934) professor da Universidade Técnica de Brno, após incessantes pesquisas e experiências, desenvolveu um novo tipo de turbina dotada de um dispositivo de regulagem (pás móveis). O mecanismo que permite alterar o ângulo de inclinação das pás conforme a carga aplicada (velocidade e quantidade), sem variação notável do rendimento, fica alojado no próprio corpo do rotor com o formato de uma ogiva (ver figura 13). Mantendo com isso, constante o rendimento da turbina, mesmo com a variação do volume da água (HACKER, 2015).

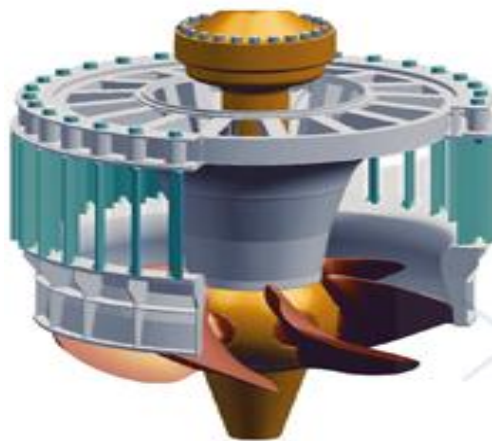


Figura 13: - Modelo de turbina Kaplan

Fonte: VOITH

As turbinas Kaplan são normalmente utilizadas em quedas que podem variar de 5 a 100 m conforme figura abaixo.

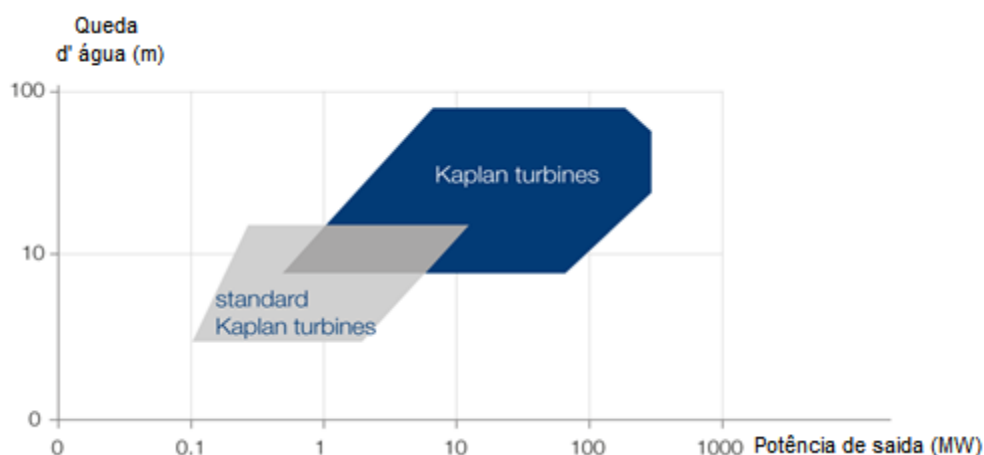


Figura 14: - Relação entre queda d'água e potencia gerada pela turbina Kaplan

Fonte: VOITH (adaptado)

Turbinas Francis: desenvolvida por James Bicheno Francis as turbinas Francis possuem características de cobrir um grande campo rotacional específico. Atualmente são construídas para grandes aproveitamentos, podendo chegar a potência unitária de aproximadamente 1000 MW.

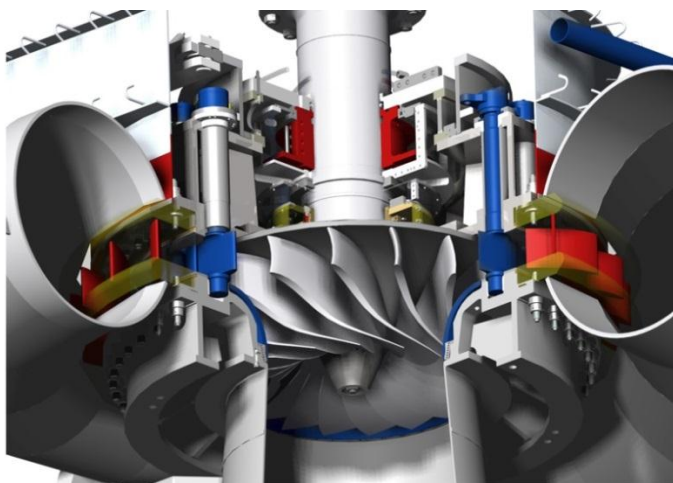


Figura 15: - Modelo de turbina Francis

Fonte: VOITH

Os modelos de turbinas Francis (ver figura 15) são atualmente os mais utilizados, uma vez que se adapta tanto a locais com baixa queda quanto a locais de alta queda, conforme mostrado na figura 16. Como trabalha totalmente submerso, seu eixo pode ser horizontal ou vertical. (RAMAGE, 1996).

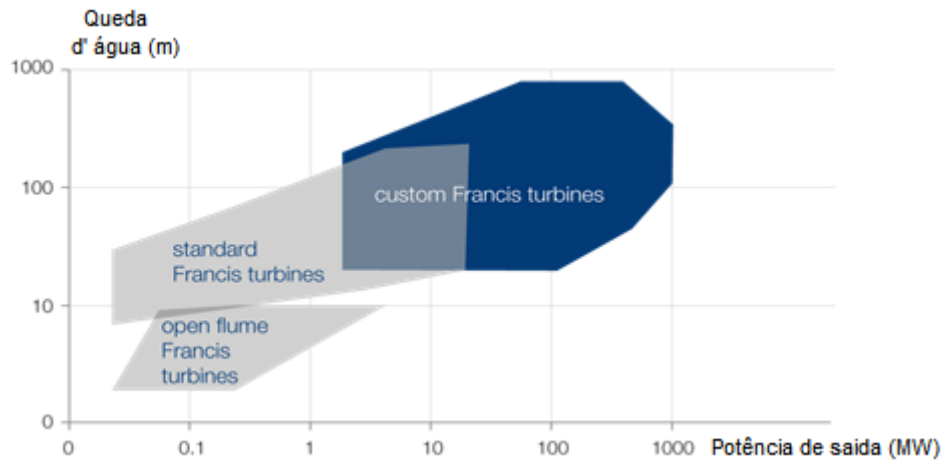


Figura 16: - Relação entre queda d'água e potencia gerada pela turbina Francis

Fonte: VOITH (adaptado)

CAPÍTULO 3

3.1 – DEFINIÇÃO E ESTIMATIVA DO POTENCIAL HIDRÁULICO

A determinação do potencial hidráulico gerado por um empreendimento hidrelétrico pode ser obtido através da equação de Daniel Bernoulli (1700-1782), que lançou os fundamentos da hidrodinâmica e estabeleceu a sua famosa equação de conservação de energia para líquidos. Dessa forma tem-se a seguinte equação, onde v é a velocidade, P é a pressão, g é a gravidade, h a altura relativa e ρ é a densidade do fluido (SILVA, 2014).

$$\frac{1}{2}\rho(v_2^2 - v_1^2) + \rho g(h_2 - h_1) = P_1 - P_2 \quad (6)$$

Quando tratamos de escoamento de um fluido, alguns pontos devem ser previamente esclarecidos para a utilização da equação de Bernoulli.

- Escoamento não viscoso (não há tensões de cisalhamento)
- Escoamento permanente ($\partial V/\partial t = 0$), onde V é o volume do fluido analisado.
- Massa específica constante ($\partial \rho / \partial s = 0$)

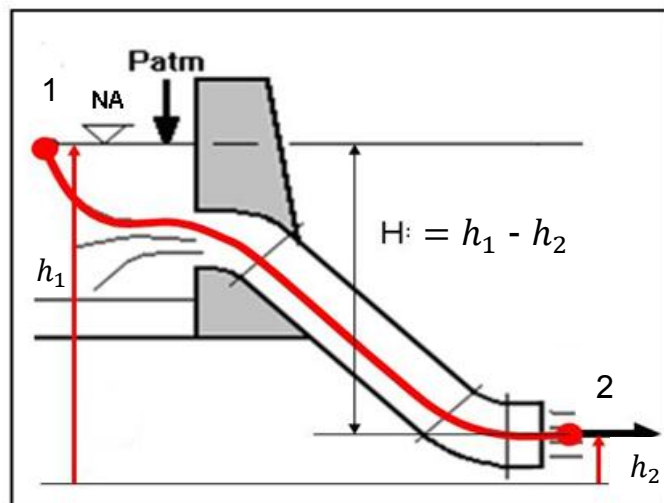


Figura 17: - Representação de queda d' água em uma usina hidrelétrica.

Fonte: klghdfkdf

Para um reservatório sujeito a uma entrada e uma saída de água com escoamento permanente (figura17), de forma que seu desnível H no ponto de montante (1) e jusante (2) da usina se mantenha constante e levando em consideração as pressões nos referidos pontos iguais à pressão atmosférica, tem-se (SILVA, 2014).

$$\frac{1}{2}\rho(v_2^2 - v_1^2) + \rho g(h_2 - h_1) = 0 \quad (7)$$

Tomando as diferenças de alturas medidas a partir do solo ($h_1 - h_2$) como o desnível H , tem-se.

$$\begin{aligned} \rho g h_1 + \frac{1}{2} \cdot \rho v_1^2 &= \rho g h_2 + \frac{1}{2} \cdot \rho v_2^2 \\ \rho g(h_1 - h_2) + &= \frac{1}{2} \cdot \rho(v_2^2 - v_1^2) \\ (v_2^2 - v_1^2) &= 2gH \end{aligned} \quad (8)$$

Sendo a energia cinética de uma massa m de água a jusante (E_{C2}) maior que a energia cinética a montante (E_{C1}), e considerando a densidade do líquido igual a $\rho = m \cdot V^{-1}$ a energia aproveitável para esse caso será dada por (SILVA, 2014):

$$\begin{aligned} \Delta E_C &= E_{C2} - E_{C1} = \frac{1}{2} m \cdot (v_2^2 - v_1^2) \\ \Delta E_C &= \rho \cdot g \cdot V \cdot H = \gamma \cdot V \cdot H \end{aligned} \quad (9)$$

Onde, γ é o peso específico do fluido considerado, dado pela relação entre o peso de um fluido e volume ocupado. O peso específico é dado em N/m^3 em unidades do (S.I).

O que se pode de fato evidenciar na definição do potencial hidráulico gerado por uma turbina, é que a energia cinética total não será usada na sua totalidade. Parte será pedida pela eficiência η do conjunto turbina-gerador e parte por atrito com as tubulações (SILVA, 2014). Desse modo a energia útil gerada será dada por:

$$E_{\text{útil}} = \eta \cdot \gamma \cdot V \cdot H \quad (10)$$

Portanto, a potência gerada por uma turbina em um empreendimento hidrelétrico será dado pela definição abaixo (SILVA, 2014):

$$P = \frac{d(E_{\text{útil}})}{dt} = \eta \cdot \gamma \cdot \varphi \cdot H \quad (11)$$

Onde,

- P = Potência da turbina (W)
- η = Eficiência total do sistema
- γ = Peso específico ($\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$)
- H = Altura da queda do fluido (m)
- φ = Vazão volumétrica ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

A eficiência η é composta pelos rendimentos da turbina (entre 0,88 e 0,94 para grandes máquinas) e do gerador (entre 0,90 e 0,97 para grandes alternadores). A condução da água nos tubos adutores possuem perdas da ordem de 4% e estão computadas na queda líquida H , resultando em valores totais que estão entre 0,71 e 0,91, correspondendo a um valor médio de 0,85 (SILVA, 2014).

Considerando os valores fornecidos para o peso específico da água (= $9786 \text{ N} \cdot \text{m}^{-3}$, a uma temperatura de 20°C e pressão de 1 atm), e utilizando o valor médio para a eficiência do sistema, a equação (11) é dada em (KW) por:

$$P = 8,32 \cdot (\varphi \times H) \quad (12)$$

Dessa forma, o potencial hidráulico que uma turbina pode extrair do fluxo de água será proporcional ao produto da vazão volumétrica (φ) e da queda d'água disponível (H), assim, para cada potência, haverá um conjunto de valores de vazão e queda d' água a serem determinados.

3.2 – ESTIMANDO O POTENCIAL HIDRÁULICO DE UMA REGIÃO OU PAÍS.

O potencial hidrelétrico de uma determinada região ou país pode ser estimado de forma bastante genérica, com base no comparativo de seu índice pluviométrico, de sua área e de sua altitude média com os de outras regiões ou países não muito diferentes, onde o potencial hidráulico já tenha sido avaliado com maior precisão (SILVA, 2014). Esse potencial pode ser dado por:

$$P = R_A \cdot R_I \cdot R_H \cdot P^* \quad (13)$$

Dessa forma, P é o potencial hidráulico a ser avaliado e P^* é o potencial conhecido de outra região ou país, R_A a razão entre as áreas, R_I a razão entre os índices pluviométricos e R_H a razão entre as altitudes médias da região ou país que esta sendo avaliado e do já estudado, nessa ordem.

O potencial hidrelétrico de uma região ou país pode ser estimado de forma mais precisa avaliando-se a potência média da água de escoamento dos rios que é resultante do balanço hídrico desses locais.

O balanço hídrico de uma área A , pode ser definido por (SILVA, 2014).

$$I_{pl} \cdot A = V_{esc} + (I_{ev} + I_{in}) \cdot A \quad (14)$$

Assim, pode-se definir o volume de escoamento, como:

$$V_{esc} = (I_{pl} - I_{ev} - I_{in}) \cdot A \quad (15)$$

Sendo:

- V_{esc} = Água de escoamento ($m^3 \cdot H_2O$)
- I_{pl} = Índice pluviométrico ($m^3 \cdot H_2O \cdot m^{-2}$)
- I_{ev} = Índice de evaporação ($m^3 \cdot H_2O \cdot m^{-2}$)
- I_{in} = Índice de infiltração da água no solo ($m^3 \cdot H_2O \cdot m^{-2}$)

Então, relacionando a equação 12 e 15, pode-se estimar de maneira mais precisa a potência média (kW), em um intervalo de tempo Δt , como:

$$P = 8,32 \cdot \left(\frac{V_{esc}}{\Delta t} \times H \right) = 8,32 \cdot \frac{A \cdot H}{\Delta t} (I_{pl} - I_{ev} - I_{in}) \quad (16)$$

Para uma média anual dos índices pluviométricos, de evaporação e de infiltração, e considerando os 85% para o aproveitamento hídrico e os 4% de perdas de condução da água para as turbinas, conforme já definido, obtém-se a expressão para o potencial médio disponível (kW) (SILVA, 2014):

$$P = 2,53 \times 10^{-7} \cdot (I_{pl} - I_{ev} - I_{in}) \cdot A \cdot H \quad (17)$$

CAPÍTULO 4

4.1 - OS IMPACTOS SOCIOAMBIENTAIS GERADOS PELOS EMPREENDIMENTOS HIDRELÉTRICOS

Mesmo fazendo uso da água como seu principal “combustível” para geração de energia, os empreendimentos hidrelétricos são responsáveis por diversos impactos ambientais e sociais nas regiões onde serão construídos. As populações residentes nessas áreas são atingidas direta e indiretamente através do alagamento de suas propriedades, casas, áreas produtivas e até cidades. Os impactos indiretos podem ser verificados na instalação dessas usinas, como perdas de laços comunitários, separação de comunidades e famílias, destruição de igrejas, capelas e inundação de locais sagrados para comunidades indígenas e tradicionais (MATERNATURA).

A instalação de usinas hidrelétricas pode gerar diversos impactos no clima provocando variações na temperatura, na umidade relativa e na evaporação (criação de microclimas favorecendo certas espécies). Pode causar erosão das margens do rio com perda do solo e árvores gerando o assoreamento que afeta a vida útil do próprio reservatório. Na hidrologia, altera o fluxo de corrente e a vazão do rio causando alargamento do leito; provoca aumento de profundidade e elevação do nível do lençol freático criando pântanos. Sem contar com a perda significativa de biodiversidade em relação à fauna e à flora, devido ao alagamento de grandes áreas (INATOMI; UDAETA, 2005).

Segundo a ANEEL foram registrados diversos problemas decorrentes de empreendimentos hidrelétricos ao longo dos anos, com destaque para Akossombo (Gana) e Assuan (Egito). Além de modificações de ordem hídrica e biológica, essas obras provocaram o aumento da prevalência da esquistossomose mansônica, que em ambos os casos ultrapassou o índice de 70% da população local e circunvizinha.

Mesmo quando os Estudos de Impacto Ambiental são realizados de forma correta, apontando as reais consequências geradas por esses empreendimentos, na maioria das vezes as ações de mitigação desses impactos não chegam a compensar de fato os efeitos negativos. A tabela 2 destaca alguns dos principais

impactos causados pela construção de usinas hidrelétricas e algumas medidas minimizadoras

TIPOS DE PROBLEMAS	MEDIDAS MINIMIZADORAS
Inundação de grandes áreas agropastoris	Pesca e piscicultura
Deslocamento populacional	Assentamentos rurais e/ou criação de cooperativas
Alteração no ecossistema dos rios	Introdução de novas espécies animais e vegetais, visando à correção de distúrbios biológicos.
Quebra do ciclo natural de algum tipo de peixe	Escadas de peixes e/ou introdução de novas espécies
Alterações climáticas	Cobertura parcial das laminas d'água com plantas aquáticas
Alterações geológicas	Estudos e acompanhamento de tremores sísmicos
Custo da terra inundada	Exploração da pesca e lazer

Tabela 3: Impactos socioambientais e algumas medidas minimizadoras

Fonte: SILVA, 2014

Nesse cenário, alguns impactos de ordem social também podem se verificados, como por exemplo:

- O vertiginoso aumento da população, proporcionada pela vinda de trabalhadores de outras localidades, gera problemas com o aumento de resíduos, tanto lixo, quanto resíduos sanitários (KOIFMAN, 2001).
- A circulação intensa de veículos pesados danificam as vias publicas e modificam o trânsito (INATOMI; UDAETA, 2005).
- Na maioria dos casos, os trabalhadores são submetidos a condições insalúbre de trabalho (PANZERA, GOMES e MOURA, 2010).

CONCLUSÃO

Os recursos hídricos têm sido utilizados não somente como fonte de abastecimento, mas também como fonte de energia, pois a maior parte da energia elétrica produzida no Brasil é proveniente das usinas hidrelétricas. A utilização racional da energia hidrelétrica exige, além dos estudos econômicos ligados à comparação do custo de energia gerada, uma cuidadosa avaliação de suas intenções como meio físico e socioeconômico, que permita avaliar seus custos e benefícios indiretos.

O estudo realizado, não identificou em nenhuma das literaturas analisadas (de órgãos do governo), uma real preocupação com os graves problemas enfrentados pelo setor elétrico nacional. O investimento em outras fontes de geração de energia, principalmente as renováveis não é considerado como uma alternativa para a solução da crise energética vivida pelo Brasil, ou seja, a matriz energética Brasileira continuará sendo hidrotérmica.

Além da questão da segurança, existe ainda o risco de esgotamento dos recursos hídricos como fonte de energia e como abastecimento. Uma vez que o potencial hidrelétrico analisado depende da abundância desses recursos, a sua escassez provoca o uso cada vez mais constante de usinas termelétricas, gerando uma série de transtorno à população, tanto na esfera econômica, como na ambiental.

O modelo estudado não considera os locais onde a energia é prioritária e não questiona o destino desta energia, somente considera que para garantir o crescimento econômico é necessário aumentar a produção e para suprir a demanda apresenta como opções: hidrelétricas, termelétricas ou usinas nucleares. E em termos de danos ao meio ambiente, entre as opções apresentadas, as hidrelétricas são consideradas como a melhor opção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBUD, O. A.; TANCREDI, M. 2010. **Transformações recentes da matriz brasileira de geração de energia elétrica** – causas e impactos principais. Disponível em: <<http://www12.senado.gov.br/publicacoes/estudos-legislativos/tipos-de-estudos/textos-para-discussao/td-69-transformacoes-recentes-da-matriz-brasileira-de-geracao-de-energia-eletrica-causas-e-impactos-principais>>. Acesso em: 02 fev. 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil). **Atlas de energia elétrica do Brasil** / Agência Nacional de Energia Elétrica. 3. ed. – Brasília: Aneel, 2008.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Energia hidráulica**. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/04-Energia_Hidraulica\(2\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/04-Energia_Hidraulica(2).pdf)>. Acesso em: 28 set. 2015.

AGORA SUSTENTABILIDADE. **Plano Hidrelétrico para o Brasil**. Disponível em: <<http://agorasustentabilidade.blogspot.com.br/2012/09/plano-hidreletrico-para-o-brasil.html>>. Acesso em: 12 mai. 2015.

ALTERIMA. **Mini usinas**: Mini Usinas Hidrelétricas Alterima Geradores. Disponível em: <<http://www.alterima.com.br/index.asp?InCdSecao=35>>. Acesso em: 27 mai. 2015.

BAESA – Energética Barra Grande S/A. **Usina de Barra Grande**. Disponível em: <<http://www.baesa.com.br/conteudo.aspx?id=2>>. Acesso em: 27 mai. 2015.

BRASIL, Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2019 / Ministério de Minas e Energia**. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2010.

_____, Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2023 / Ministério de Minas e Energia**. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2014.

BUCUSSI, A. A. **Introdução ao conceito de energia**. Porto Alegre, UFRGS, Instituto de Física, Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, 2007.

CAMARGO, A. **Usina Hidrelétrica de Tucuruí**: barragem de terra. Disponível em: <<http://www.alvarocamargo.com.br/albuns/projetos/Usina%20Hidreletrica%20de%20Tucuruí/slides/Barragem%20de%20terra%20.html>>. Acesso em : 27 mai. 2015.

CERPCHC - Centro Nacional de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas. **Fontes Renováveis**: Hidráulica. Disponível em: <<http://www.cerpch.unifei.edu.br/hidraulica.php>>. Acesso em: 30 abr. 2015.

CICOGNA, M.A. 2003. **Sistema de Suporte á Decisão para o Planejamento e Programação da Operação de Sistemas de Energia Elétrica**. Disponível em: <<http://www.cose.fee.unicamp.br/cose/it511/teses%20unicamp/tese%20Doutorado%20marcelo.pdf>>. Acesso em: 13 mai. 2015.

EDUAMBIENTAL. **Energía hidráulica**. Disponível em: <<http://comunidad.eduambiental.org/file.php/1/curso/contenidos/docpdf/capitulo17.pdf>>. Acesso em: 20 set. 2015.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balço Energético Nacional 2012**: Ano base 2011 / Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro: EPE, 2012.

_____. **Balço Energético Nacional 2014**: Ano base 2013 / Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro: EPE, 2014.

FURNAS. **Usina hidrelétrica de funil**. Disponível em: <http://www.furnas.com.br/hotsites/sistemafurnas/usina_hidr_funil.asp>. Acesso em: 12 fev. 2015.

HACKER. **Turbinas hidráulicas**. Disponível em: <http://www.hacker.ind.br/produtos_turbinas_hidraulicas.php>. Acesso 08 jul. 2015.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R. **Fundamentos de Física**: Volume 1, Mecânica. 8 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

INATOMI, T. A. H.; UDAETA, M. E. M. 2005. Disponível em: <http://www.espacosustentavel.com/pdf/INATOMI_TAHI_IMPACTOS_AMBIENTAIS.pdf>. Acesso em: 01 Out. 2015.

KOIFMAN, S. 2001. **Electric Power Generation and Transmission: The Impact on Indigenous Peoples in Brazil.** Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/csp/v17n2/4186.pdf>>. Acesso em: 12 set. 2015.

MAGALHÃES, L.C.A. **Energia hidrelétrica.** Rio de Janeiro: Fundação Getúlio Vargas, 1978.

MATERNATURA. **Os impactos ambientais e sociais.** Disponível em: < http://www.maternatura.org.br/hidreletricas/guia/LeiaMais_Osimpactosambientaisoesociais.pdf >. Acesso em 20 set. 2015.

PANZERA, A. C., GOMES, A. E. Q., MOURA, D. G. 2010. **Impactos ambientais da produção de energia elétrica,** Educação Ambiental Centro de Referência Virtual do Professor - SEE-MG / setembro 2010.

PORTAL BRASILEIRO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS. **Energia Hidrelétrica.** Disponível em: <http://www.energiarenovavel.org/index.php?option=com_content&task=view&id=50&Itemid=142>. Acesso em: 12 jun. 2015

SILVA, E. P. **Fontes renováveis de energia:** Produção de Energia para um Desenvolvimento sustentável. 1ª ed. São Paulo: Livraria da Física, 2014.

STANO JÚNIOR, A.; FILHO, G. L. T. **Série Energias renováveis:** energias renováveis. Itajubá, MG: FAPEPE, 2007.

VOITH. **Minimum gap runner.** Disponível em: <<http://www.voith.com/en/products-services/hydro-power/environmentally-friendly-hydro-products/minimum-gap-runner-876.html>>. Acesso 04 jun. 2015.

VOITH. **Pelton Turbine.** Disponível em: <<http://voith.com/en/products-services/hydro-power/turbines/pelton-turbines-563.html> >. Acesso em: 04 jun. 2015.