

2.1 Geração de Energia Elétrica

Energia é a capacidade de realizar trabalho.

O grau de desenvolvimento de um país é medido pelos indicadores:

- Produto Interno Bruto - PIB per capita (US\$/hab)
- Oferta Interna de Energia - OIE per capita (tep¹/hab)
- Intensidade energética do país expressa pela relação OIE/PIB (tep/US\$) e,
- Intensidade elétrica expressa pela relação OIEE/PIB (OIEE - oferta interna de energia elétrica) (kWh/US\$).

Por muito tempo o consumo per capita de eletricidade foi usado como indicador do grau de desenvolvimento dos países. Atualmente, à medida que aumenta a conscientização da importância do uso racional e da conservação de energia, o grau de desenvolvimento é indicado pelo crescimento no produto interno bruto do país e uma estabilização ou crescimento proporcionalmente menor nos indicadores de intensidade energética e intensidade elétrica.

A geração de energia elétrica consiste no processo de transformação de diferentes fontes de energia primárias e secundárias em energia elétrica.

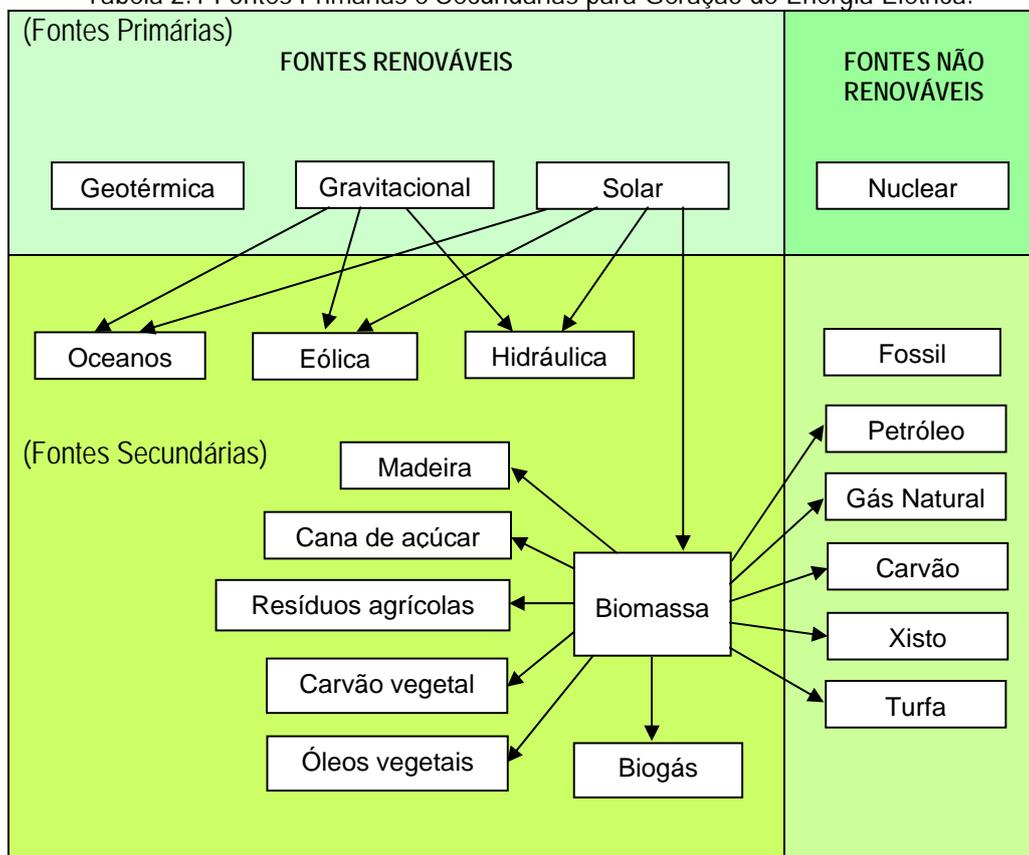


Figura 2.1 Conversão em energia elétrica.

¹ tEP – tonelada equivalente de petróleo é a unidade comum na qual se convertem as unidades de medida das diferentes formas de energia utilizadas no BEN. Os fatores de conversão são calculados com base no poder calorífico superior de cada energético em relação ao do petróleo. Adotada no Balanço Energético Nacional e em diversas outras publicações internacionais, um tep corresponde a 10.000 Mcal, (1kWh = 860 kcal). Quando se quer a contabilização da energia em toneladas equivalentes de petróleo (tep), calculam-se os fatores de conversão pela relação entre o poder calorífico de cada fonte e o poder calorífico do petróleo adotado como referência.

A Tabela 2.1 apresenta um quadro das principais fontes primárias e secundárias, exauríveis e renováveis, convencionais e alternativas, para geração de energia elétrica.

Tabela 2.1 Fontes Primárias e Secundárias para Geração de Energia Elétrica.



	CONVENCIONAL	ALTERNATIVA
EXAURÍVEL	CARVÃO MINERAL (F)	XISTO (F) URÂNIO (U ₃ O ₈) - FUSÃO NUCLEAR (F)
	ÓLEO (F)	
	GÁS NATURAL (F)	
	URÂNIO (U ₃ O ₈) - FISSÃO NUCLEAR (F)	
RENOVÁVEL	BIOENERGIA (SI) – ANIMAL E VEGETAL HIDRÁULICA (SI)	GEOTÉRMICA (G) SOLAR FOTOVOLTAICA (S) EÓLICA (SI) HIDROGÊNIO (SI) MARÉ (G) ONDAS (SI) CALOR DOS OCEANOS (SI) CORRENTE DOS OCEANOS (SI)

F:Fóssil G:Gravitacional S:Solar SI: Solar Indireta

Define-se como fonte de energia não renovável aquela cuja velocidade de reposição natural é inferior à velocidade de sua utilização pela humanidade. Apresenta, portanto, uma característica exaurível (finita), de utilização. Citam-se como exemplo o carvão mineral e seus derivados, o petróleo e derivados, o gás natural, xisto, turfa, e o urânio. As fontes não renováveis são resultados de um processo que leva milhões de anos para converter luz do sol em hidrocarbonetos.

Define-se como fonte de energia renovável aquela cuja velocidade de reposição natural é superior à velocidade de sua utilização, tendo, portanto, uma característica de utilização infinita. As fontes geotérmica, gravitacional e solar constituem a base das fontes renováveis de energia. Cita-se como exemplo de fontes renováveis a energia solar, hidráulica, eólica, dos oceanos (onda, maré e correntes marítimas), o carvão vegetal quando renovados por ações de reflorestamento, a biomassa (lenha, resíduos agrícola), biocombustível (etanol, biodiesel e óleos vegetais), biogás, energia geotérmica, etc. Tais fontes renováveis convertem radiação solar, a rotação da terra e a energia geotérmica em energia usável em um menor tempo.

O sistema global de energia atual depende principalmente de hidrocarbonetos como óleo, gás e carvão, os quais juntos compreendem aproximadamente 81% dos recursos energéticos. A tradicional biomassa – como madeira e esterco – participa com 10% e nuclear com 6%, enquanto todas as fontes renováveis contribuem com apenas 3%.

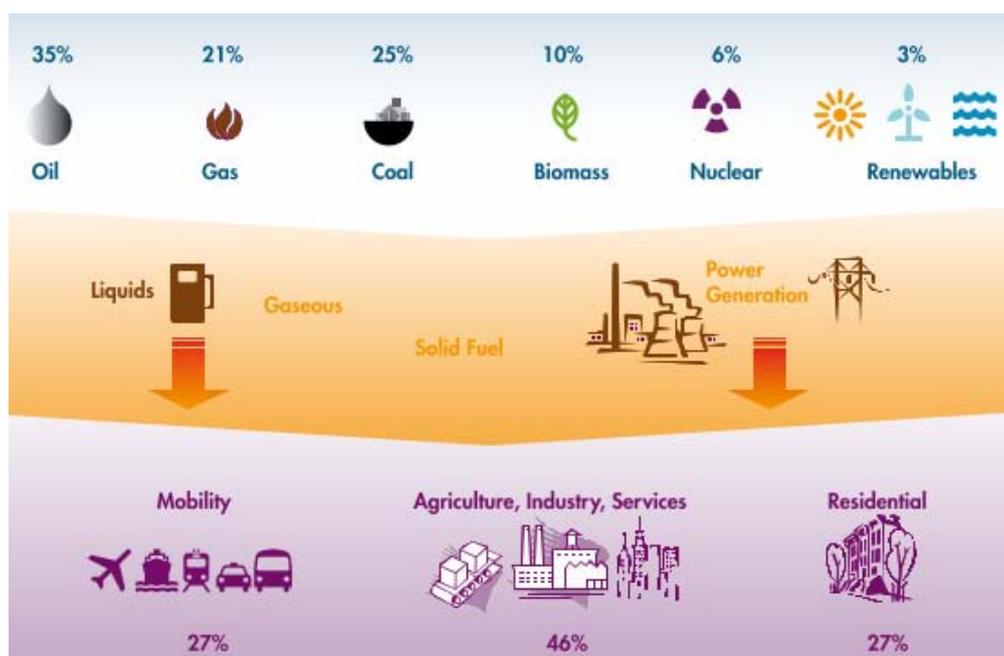


Figura 2.2 Sistema Global Atual de Energia.

A trajetória de uso dos recursos energéticos é mostrada na Figura 2.2, a qual pode ser dividida em diferentes eras, desde a predominância da madeira, passando ao carvão, aos derivados de petróleo, em direção a uma menor predominância do carbono através do gás natural e fontes não fósseis.

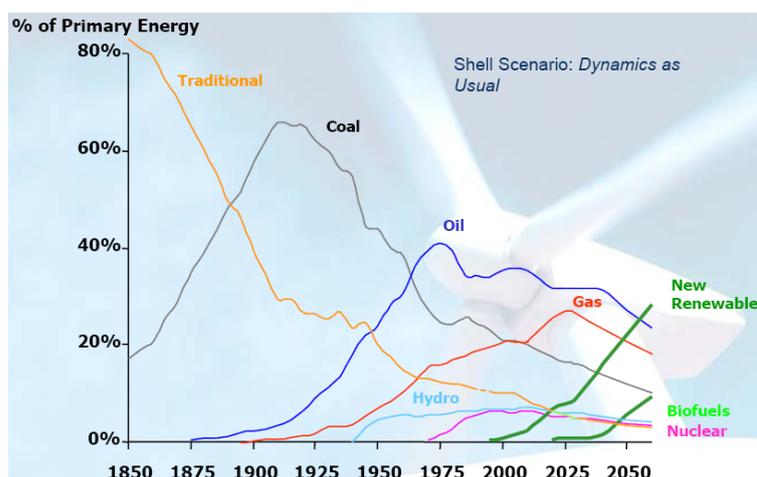


Figura 2.3 Transição do uso de fontes primárias no período 1850-2050 (Fonte: Energie Transitions Shell WindEnergie - 2003)

Estima-se que em 2050 acima de 60% da eletricidade será gerada por fontes renováveis.

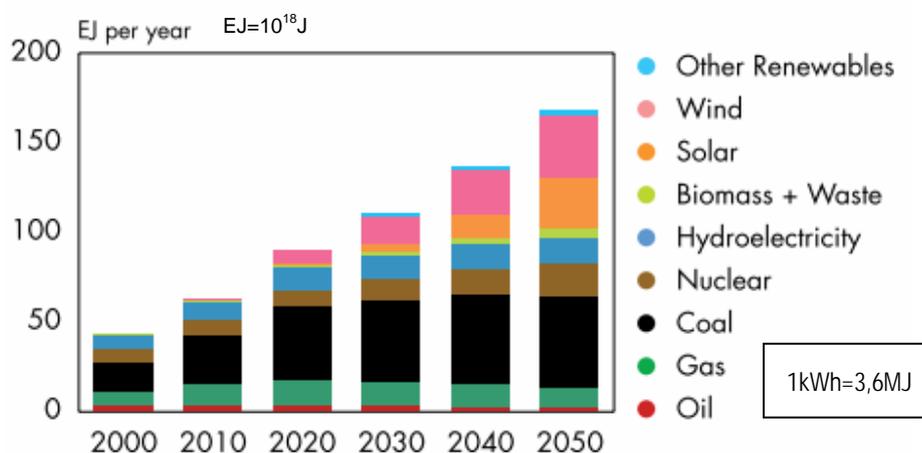


Figura 2.4 Consumo Final de Energia Elétrica [Shell Energy Blueprint Scenarios to 2050].

A energia hidráulica é praticamente destinada à produção de energia elétrica, assim como parcela expressiva dos combustíveis fósseis como carvão e urânio, e derivados agrícolas.

As fontes *fósseis*, *nuclear* e *hidráulica* são capazes de produzir grandes quantidades de energia elétrica. Muitos sistemas elétricos contêm uma combinação desses três tipos principais de geração.

Os processos de transformação para geração de energia elétrica podem usar quaisquer das fontes apresentadas na Tabela 2.1, exauríveis e renováveis, como ilustra as Figuras 2.5 e 2.6. No entanto, grande ênfase tem sido dada ao emprego de fontes renováveis por constituírem a forma de energia mais limpa, de menor impacto ambiental decorrente do processo de transformação. As fontes renováveis são aquelas que são continuamente disponíveis e sustentáveis ao meio ambiente. Em particular, os combustíveis renováveis não emitem gases de efeito estufa ou são emissores neutros ao longo do ciclo de vida.

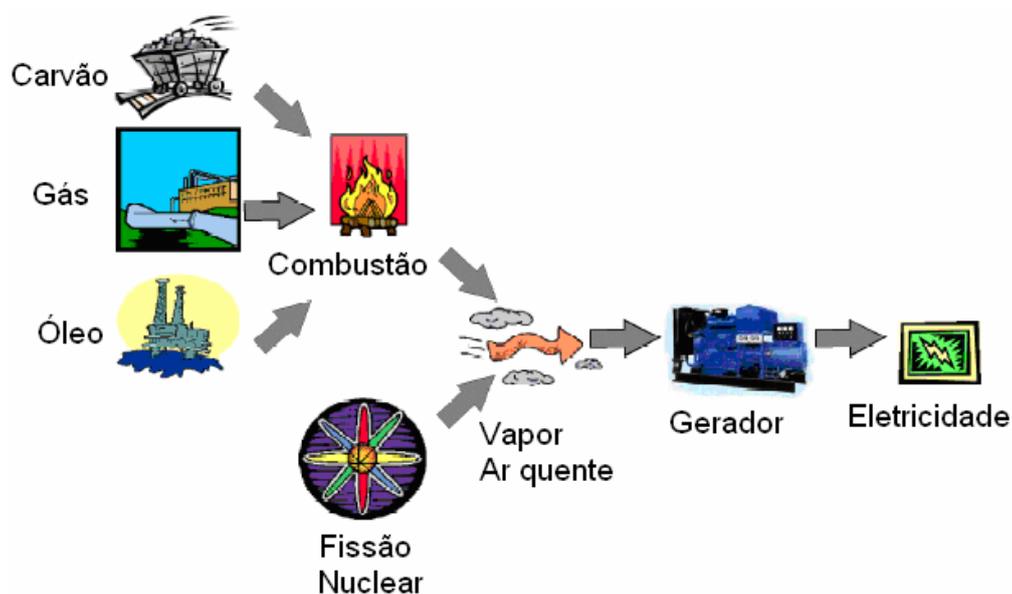


Figura 2.5 Conversão de Fontes Não-Renováveis em Energia Elétrica.

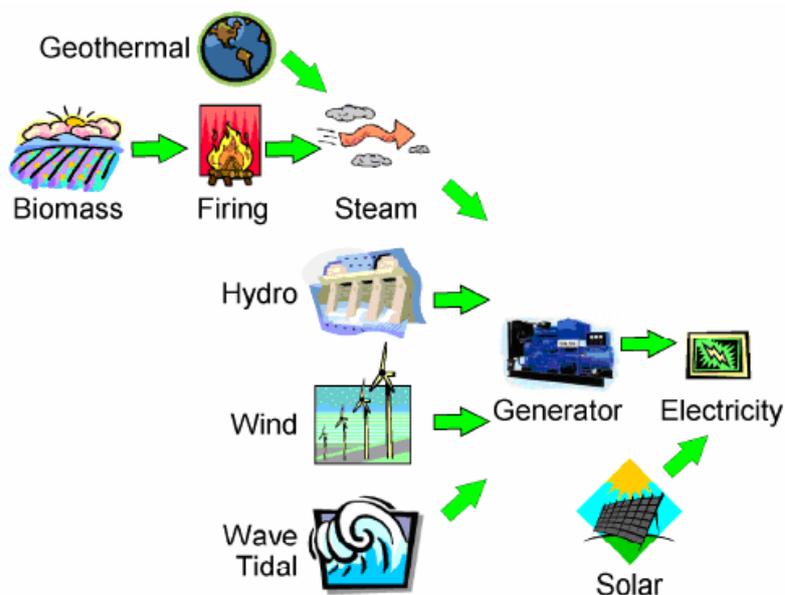


Figura 2.6 Conversão de Fontes Renováveis em Energia Elétrica.

Alguns fatores contribuem para o sucesso no desenvolvimento das fontes renováveis, tais como:

- Fator político – definição de políticas, suporte e incentivo governamental para implantação de fontes renováveis.
- Fator legislativo – criação de leis para garantia de mercado e preços para as fontes de energias renováveis.

- Fator fiscal – definição de recompensa financeira por incentivo ou isenção de taxas e impostos.
- Fator financeiro – estímulo a empréstimos com taxa de juros subsidiada, empréstimos de longo prazo, com carência longa e com baixas taxas de juros como forma de incentivar e alavancar projetos na área de energia renováveis.
- Fator administrativo – conscientização da população para informação e aceitação das novas formas de produção de energia elétrica, com planejamento de alocação das novas fontes.
- Fator de desenvolvimento de tecnologia – domínio e manufatura de indústria de equipamentos voltados à exploração da fonte renovável.

Na geração de energia limpa, a situação do Brasil é avançada. Cerca de 45,3% da oferta interna de energia no país é proveniente de fontes renováveis ante 13,3% da matriz mundial.

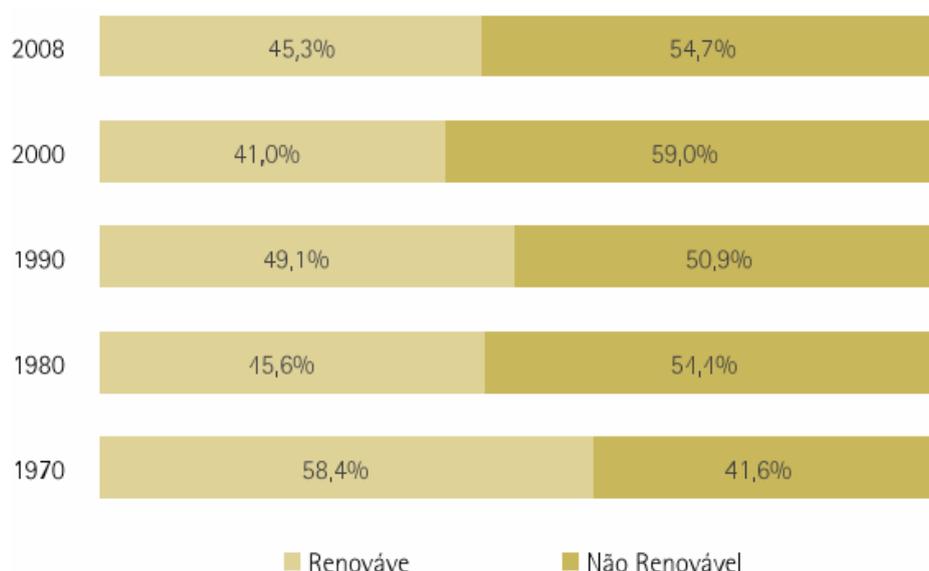


Figura 2.7 Participação de fontes renováveis na oferta interna de energia [BEN 2009]

O Brasil emite em torno de 1,48 tonelada de gás carbônico por tonelada equivalente de petróleo. A média mundial é de 2,38 toneladas de gás carbônico por tonelada equivalente de petróleo [BEN 2009].

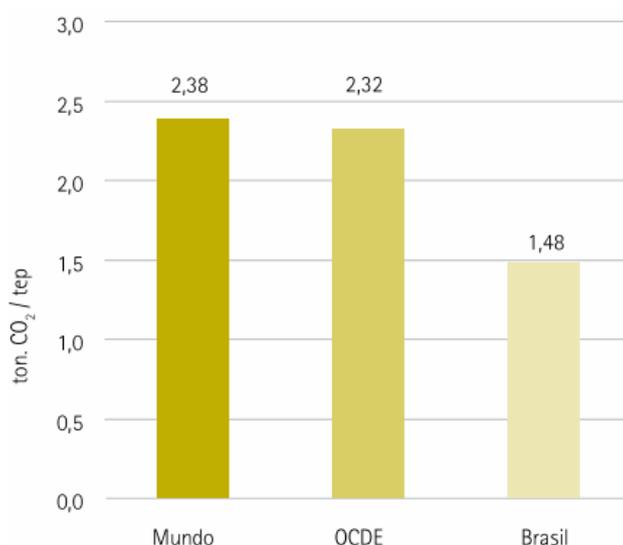


Figura 2.8 Emissões de CO₂ no Brasil e no mundo.

Devido à crescente eficiência das usinas convencionais e a permanente queda nos preços do petróleo, o argumento para promover o uso da energia renovável não deverá estar pautado na falta de petróleo no século 21, porém, no efeito agressor que a queima de combustível fóssil produzirá sobre o meio ambiente. As fontes de energias renováveis e residuais são consideradas como fontes de energia verde por apresentarem baixa emissão de poluentes no ar quando comparadas às outras fontes energéticas.

2.2 Usinas de Geração de Energia Elétrica

A produção de energia elétrica é caracterizada por processos do tipo: eletromecânico, fotovoltaico e químico.

2.2.1 Processo de Transformação Eletromecânico compreende:

- Hidráulico
- Térmico
- Eólico
- Maremotriz

2.2.1.1 Processo de Transformação Hidrelétrico

Utiliza o movimento e queda d'água de rios para geração de energia elétrica.

Conversão Hidroelétrica

Energia Cinética $\xRightarrow{\text{Turbina}}$ Energia Mecânica $\xRightarrow{\text{Gerador}}$ Energia Elétrica

A energia elétrica em uma usina hidroelétrica é gerada pela passagem da água através de uma turbina, acoplada a um gerador síncrono de pólos salientes, formando o conjunto turbogerador. O conjunto, turbina-gerador gira a velocidades relativamente baixas, de 50 a 300 rpm, quando comparadas às turbinas a vapor. O eixo da turbina está diretamente ligado ao eixo do rotor do gerador.

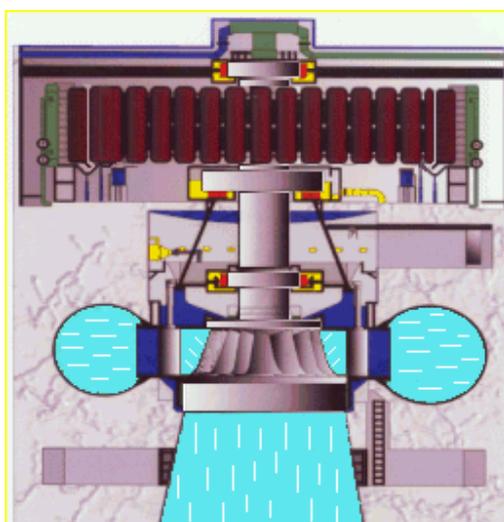


Figura 2.9 Turbina Hidráulica acoplada a Gerador.

O número de par de pólos dos geradores é relativamente grande:

$$n = \frac{120f}{p} \quad (2.1)$$

- n → velocidade angular em rpm
- f → freqüência em Hz
- p → número de pares de pólos

A quantidade de energia produzida é proporcional à:

- Vazão da água
- Altura do nível do reservatório

$$P = \rho \cdot Q \cdot H \cdot g \cdot \eta \text{ (kW)} \quad (2.2)$$

- P → potência em kW
 ρ → densidade da água em kg/m³
 Q → vazão da água em m³/s
 H → altura da coluna d'água em m
 g → aceleração da gravidade m/s²
 η → rendimento do sistema p.u.

As principais causas de perda de energia nas turbinas são:

- Perdas hidráulicas: a água tem que deixar a turbina com alguma velocidade, e esta quantidade de energia cinética não pode ser aproveitada pela turbina.
- Perdas mecânicas: são originadas por atrito nas partes móveis da turbina e calor perdido pelo aquecimento dos mancais.

Tipicamente turbinas modernas têm uma eficiência entre 85% e 95%, que varia conforme a vazão de água e a queda líquida.

A classificação de usinas quanto à capacidade de produção é apresentada na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 Classificação de Usinas Hidrelétricas Quanto à Potência

Tipo de Usina Hidrelétrica	Potência Instalada P (MW)
Micro Central	$P \leq 0,1$
Mini Central	$0,1 < P \leq 1$
Pequena Central (PCH)	$1 < P \leq 30$
Média Central	$30 < P \leq 100$
Grande Central	$P > 100$

A energia elétrica é em geral produzida por geradores síncronos movidos por uma máquina primária denominada de turbina hidráulica do tipo Pelton, Francis, Kaplan ou Bulbo. Cada um destes tipos de turbinas é adaptado para funcionar em usinas, com uma determinada faixa de altura de queda. As vazões volumétricas podem ser igualmente grandes

em qualquer uma delas, mas a potência será proporcional ao produto da queda (H) e da vazão volumétrica (Q).

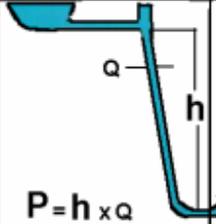
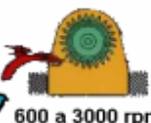
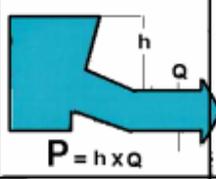
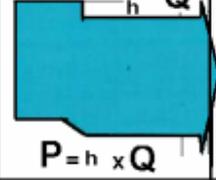
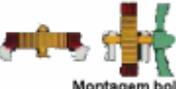
ENERGIA TÍPICA	ENERGIA POTENCIAL	ENERGIA MECÂNICA	ENERGIA ELÉCTRICA
QUEDAS ELEVADAS + 2000 m		Turbina Pelton  600 a 3000 rpm	Alternador  Eixo vertical ou horizontal
QUEDAS MÉDIAS 30 A 200 m		Turbina Francis  100 a 600 rpm	Alternador  Eixo vertical ou horizontal
QUEDAS BAIXAS - 30 m		Turbina Kaplan  75 a 120 rpm	Alternador  Montagem bolbo Eixo vertical ou horizontal

Figura 2.10 Esquema de turbinas hidráulicas: Pelton, Francis e Kaplan.

As turbinas hidráulicas podem ser montadas com o eixo no sentido vertical. Um mancal de escora suporta todo o peso das partes girantes da turbina e do gerador que é montado logo acima dela. Em PCH (Pequena Central Hidrelétrica) turbinas são fabricadas em geral com eixo na horizontal.



Figura 2.11 PCH com turbina tipo Francis eixo horizontal.

Em todos os tipos de turbo-geradores há alguns princípios de funcionamento comuns. A água entra pela tomada de água, a montante da usina hidrelétrica que está num nível mais elevado, e é levada através de um conduto forçado até a entrada da turbina. Lá a água passa por um sistema de palhetas guias móveis, que controlam a vazão volumétrica fornecida à turbina. Para se aumentar a potência as palhetas se abrem, para diminuir a potência elas se fecham. Após passar por este mecanismo a água chega ao rotor da turbina. Nas turbinas Pelton, não há um sistema de palhetas móveis, e sim um bocal com uma agulha móvel, semelhante a uma válvula. O controle da vazão é feito por este dispositivo.

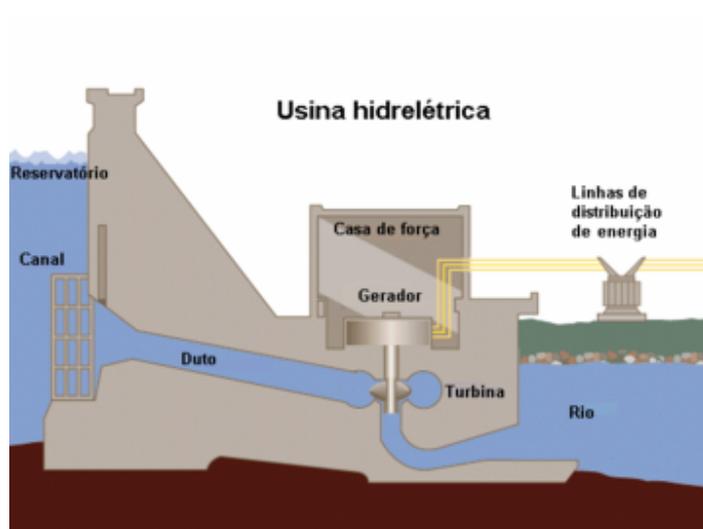


Figura 2.12 Esquema de uma usina hidrelétrica.

Por transferência de quantidade de movimento parte da energia potencial do fluido é transferido para o rotor na forma de torque e

velocidade de rotação. Devido a isto a água na saída da turbina está a uma pressão pouco menor que a atmosférica, e bem menor do que a inicial.

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

A. Turbinas Hidráulicas

A.1 Partes Principais de uma Turbina Hidráulica

Uma turbina é constituída basicamente por cinco partes: caixa espiral, pré-distribuidor, distribuidor, rotor e eixo, tubo de sucção.

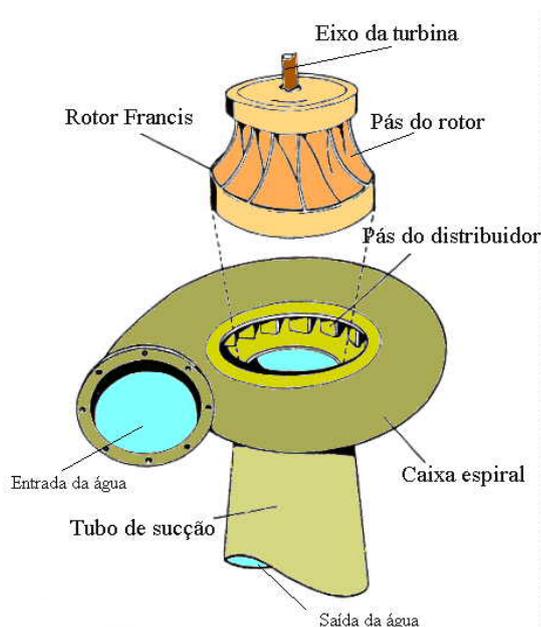


Figura 2.13 Partes de uma turbina hidráulica.

A.1.1 Caixa espiral

É uma tubulação de forma toroidal que envolve a região do rotor. Esta parte fica integrada à estrutura civil da usina, não sendo possível ser

removida ou modificada. O objetivo é distribuir a água igualmente na entrada da turbina.

É fabricada com chapas de aço carbono soldadas em segmentos. A caixa espiral conecta-se ao conduto forçado na secção de entrada, e ao pré-distribuidor na secção de saída.

A.1.2 Pré-distribuidor

A finalidade do pré-distribuidor é direcionar a água para a entrada do distribuidor. É composta de dois anéis superiores, entre os quais são montados um conjunto de 18 a 24 palhetas fixas, com perfil hidrodinâmico de baixo arrasto, para não gerar perda de carga e não provocar turbulência no escoamento. É uma parte sem movimento, soldada à caixa espiral e fabricada com chapas ou placas de aço carbono.

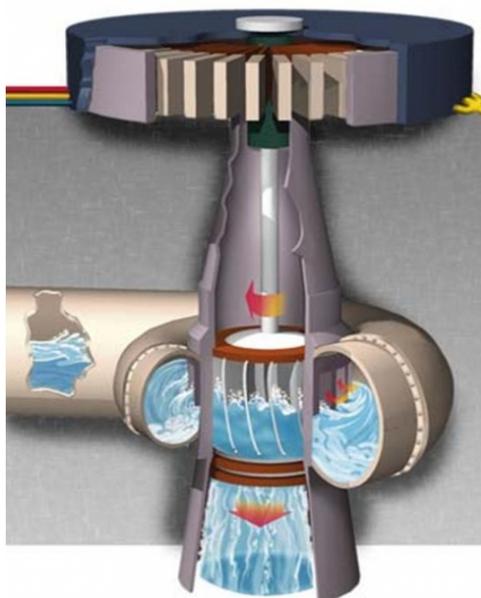


Figura 2.14 Entrada e distribuição d'água em turbina hidráulica.

A.1.3 Distribuidor

O distribuidor é composto de uma série de 18 a 24 palhetas móveis, acionadas por um mecanismo hidráulico montado na tampa da turbina (sem contato com a água). Todas as palhetas têm o seu movimento conjugado, isto é, todas se movem ao mesmo tempo e de maneira igual.

O acionamento é feito por um ou dois pistões hidráulicos que operam

numa faixa de pressão de 20 bar nas mais antigas, até 140 bar nos modelos mais novos.

O distribuidor controla a potência da turbina, pois regula vazão da água. É um sistema que pode ser operado manualmente ou em modo automático, tornando o controle da turbina praticamente isento de interferência do operador.

A.1.4 Rotor e eixo

O rotor da turbina é onde ocorre a conversão de energia hídrica em potência de eixo.

A.1.5 Tubo de sucção

Duto de saída da água, geralmente com diâmetro final maior que o inicial, desacelera o fluxo da água após esta ter passado pela turbina, devolvendo-a ao rio parte jusante da casa de força.

A.2 Tipos de Turbinas Hidráulicas

As turbinas hidráulicas podem ser classificadas como:

- Turbinas de Ação (ou impulso): aquela em que o trabalho mecânico é obtido pela obtenção da energia cinética da água em escoamento através do rotor. As turbinas de ação são as do tipo Pelton.
- Turbinas de Reação (ou propulsão): são turbinas em que o trabalho mecânico é obtido pela transformação das energias cinéticas e de pressão da água em escoamento através do rotor. As turbinas de reação são as do tipo Francis e Kaplan.

A.2.1 Turbinas Pelton

São turbinas de ação porque utilizam a velocidade do fluxo de água para provocar o movimento de rotação. A sua constituição física consiste numa roda circular que na sua periferia possui um conjunto de copos ou conchas sobre os quais incide(m), tangencialmente, um(s) jacto(s) de água dirigido(s) por um ou mais injetores distribuídos de forma uniforme na periferia da roda. A potência mecânica fornecida por estas turbinas é regulada pela atuação nas válvulas de agulha dos injetores.

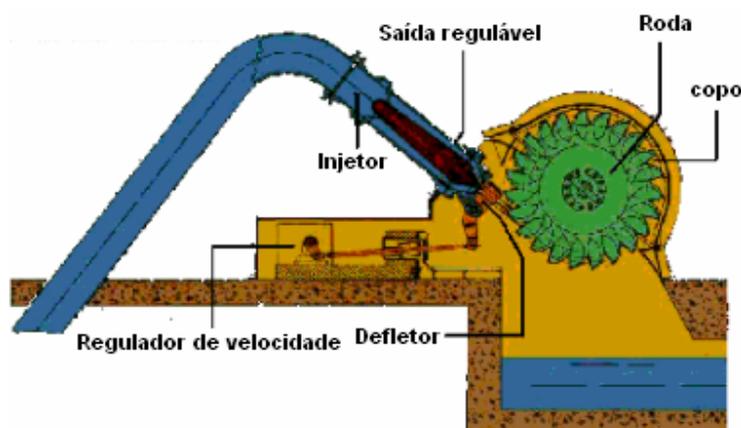


Figura 2.15 Turbina Pelton em esquema.

Dependendo da potência que se queira gerar podem ser acionados os 6 bocais simultaneamente, ou apenas cinco, quatro, etc. O número normal de bocais varia de dois a seis, igualmente espaçados angularmente para garantir um balanceamento dinâmico do rotor. Estas turbinas podem ser de eixo vertical ou horizontal e são utilizadas em aproveitamentos hidrelétricos caracterizados por pequenos caudais e elevadas quedas úteis (250 a 2500 m), sendo por isto, muito mais comuns em países montanhosos.

Um dos maiores problemas destas turbinas, devido à alta velocidade com que a água se choca com o rotor, é a erosão provocada pelo efeito abrasivo da areia misturada com a água, comum em rios de montanhas. As turbinas Pelton, devido a possibilidade de acionamento independente nos diferentes bocais, tem uma curva geral de eficiência plana, que lhe garante boa performance em diversas condições de operação, tendo um rendimento de até 93%.

A.2.2 Turbinas Francis

São turbinas de reação porque o escoamento na zona da roda se processa a uma pressão inferior à pressão atmosférica. Esta 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.

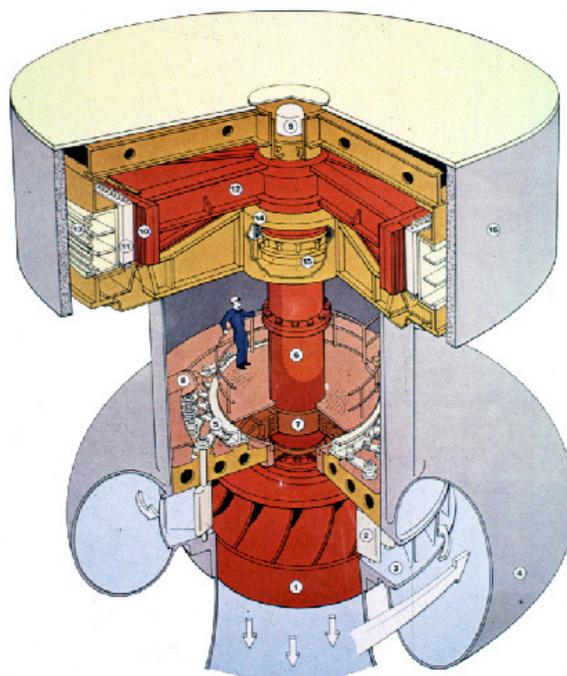


Figura 2.16 Turbina hidráulica Francis.

A entrada na turbina ocorre simultaneamente por múltiplas comportas de admissão dispostas ao redor da roda, e o trabalho exerce-se 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.

Estas turbinas se utilizam em quedas úteis superiores aos 20 metros até 400m, e possuem uma grande adaptabilidade a diferentes quedas e caudais. A usina hidrelétrica de Itaipu assim como a usina hidrelétrica de Tucuruí, a grande maioria das usinas do sistema Chesf (exceto Sobradinho e Apolônio Sales que usam Kaplan), Furnas e outras no Brasil funcionam com turbinas tipo Francis com cerca de 100 m de queda d' água.

As turbinas Francis, relativamente às Pelton, têm um rendimento máximo mais elevado, velocidades maiores e menores dimensões.

A.2.3 Turbinas Kaplan e Hélice

São turbinas de reação, adaptadas às quedas fracas e caudais elevados. São constituídas 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. Quando estas pás são fixas diz-se que a turbina é do tipo Hélice. Se as pás são móveis, o que permite variar o ângulo de ataque por meio de um mecanismo de orientação que é controlado pelo regulador da turbina, diz-se que a turbina é do tipo Kaplan.

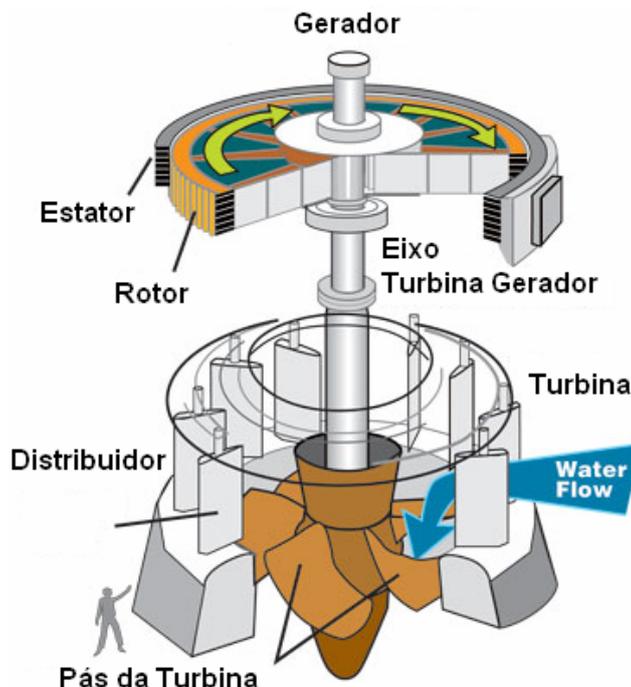


Figura 2.17 Turbina Kaplan - Palhetas Móveis

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. Um sistema de embolo e manivelas montado dentro do cubo do rotor, é responsável pela variação do ângulo de inclinação das pás. O óleo é injetado por um sistema de bombeamento localizado fora da turbina. O acionamento das pás é acoplado ao das palhetas do distribuidor, de modo que para uma determinada abertura do distribuidor, corresponde um determinado valor de inclinação das pás do rotor.

As Kaplans também apresentam uma curva de rendimento "plana" garantindo bom rendimento em uma ampla faixa de operação.

As turbinas Kaplan e Hélice têm normalmente o eixo vertical, mas podem existir turbinas deste tipo com eixo horizontal, as quais se designam por turbinas Bulbo.

A.2.4 Turbinas Bulbo

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

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



Figura 2.18 Esquema da usina Santo Antônio.

Tipicamente turbinas modernas têm uma eficiência entre 85% e 99%, que varia conforme a vazão de água e a potência gerada.

B. Esquema de uma Usina Hidrelétrica

Uma planta hidrelétrica é formada por um conjunto de elementos, dentre os quais destacamos os elementos básicos mostrados na Figura 2.19.

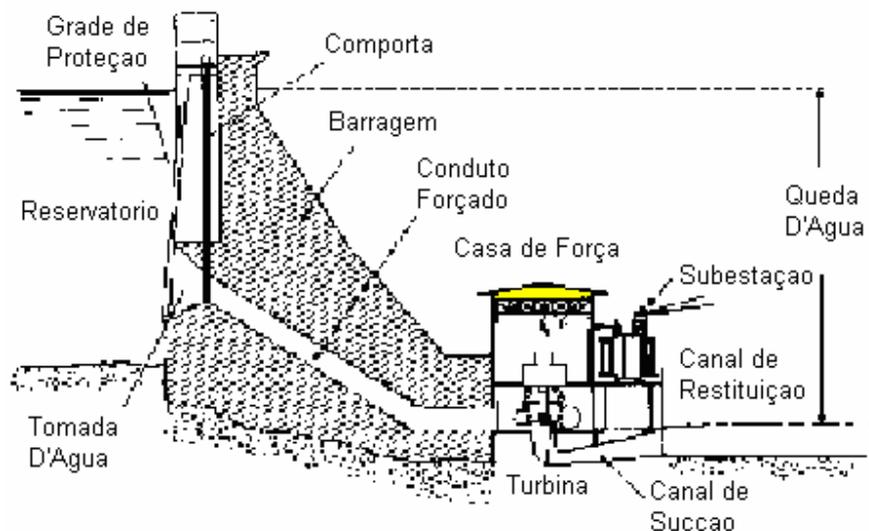


Figura 2.19 Perfil de Usina Hidrelétrica de Represamento.

- Reservatório – parte de uma usina hidroelétrica que exige especial atenção pelo aspecto energético e ambiental. Acumula água por meio de barragem garantindo uma cota de água e compensando períodos de estiagem. O reservatório é construído em um nível mais alto do que a turbina. O reservatório de uma planta hidrelétrica é responsável por até 30% do custo total de construção.
- Barragem do reservatório principal e do vertedouro – pode ser definida como sendo um elemento estrutural, construída transversalmente à direção de escoamento de um curso d'água, destinada à criação de um reservatório artificial de acumulação de água para determinados fins, criando um desnível local. A barragem possui comportas que podem ser abertas para permitir a passagem de água.



Figura 2.20 Vista aérea de barragem principal e de vertedouro.

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

- Barragem de terra – construída com terra compacta, com seções transversais trapezoidais, recoberta por revestimento protetor em pedra ou grama.
 - Barragem de enrocamento – construída com blocos de rocha de tamanho variável e uma membrana impermeável na face de montante. Ex. Barragem de Xingó.
 - Barragem em arco – sua estrutura é um arco de concreto.
 - Barragem mista – sua estrutura é composta de um núcleo de terra compactada, revestido com placas de concreto. Ex. Moxotó.
 - Barragem de gravidade - estrutura de concreto, enrocamento, ou mista, resiste aos vários esforços para a pior situação de carregamento para cada esforço considerado. Ex. PA III.
- Ensecadeira – barragem temporária destinada a desviar as águas do curso natural para permitir a construção da barragem permanente da usina, sendo destruída ou ficando submersa.
 - Sistema extravasor – projetado e construído com o objetivo de escoar o excesso d'água acumulado pelo reservatório, evitando o risco do nível d'água atingir a crista da barragem. Faz parte do sistema extravasor: barragem vertedoura, comportas de vertedouro, stop-logs e sistema de acionamento das comportas (em geral, hidráulico).
 - Tomada D'Água – destinada a captar a água necessária ao funcionamento das turbinas hidráulicas. A tomada d'água deve conter dispositivos para eliminar ou reter o material sólido transportado pela água que poderiam danificar as turbinas. As tomadas d'água podem ser de superfície ou afogadas. Faz parte da tomada d'água: adutores (condutos forçados), comportas, *stop logs* e sistema de acionamento.
 - Comportas – equipamento que permite o controle da vazão de água em reservatórios, limpeza de reservatórios, manutenção de

equipamentos, tomada d'água, etc.; podem ser de vários tipos: comporta setor (vertedouro), comporta segmento (tomadas d'água e vertedouros de grande capacidade), comporta gaveta (tomada d'água), comporta ensecadeira (*stop-log*) e comporta vagão ou plana.



Figura 2.21 Comportas segmento.

- Conduitos Forçados – dutos de alta pressão, usados no transporte de água do reservatório até as turbinas de uma usina hidrelétrica. Quanto à instalação, pode ser feita a céu aberto ou enterrados.
- Tubo de sucção – interliga a saída da turbina ao canal de restituição; utiliza comportas ao final do tubo.
- Canal de restituição – devolve a água turbinada ao leito do rio.
- Câmara de carga – estrutura que interliga o canal adutor com o conduto forçado.
- Canal de adução – empregado nas usinas de desvio, canaliza o fluxo de água desde a tomada d'água até o conduto forçado.
- Chaminé de equilíbrio – estrutura que interliga o conduto de baixa pressão com o conduto forçado de alta pressão e alivia a onda de pressão resultante de partida ou parada brusca de carga.
- Casa de Força – casa das máquinas: abrigam geradores, turbinas, transformadores elevadores, e sala de controle.

- Sistema de Supervisão e Controle – sistema digital aberto e distribuído que permite a supervisão e controle do sistema a partir de uma interface homem-máquina amigável.
- Subestação – transforma o nível de tensão de geração para o nível de tensão de transmissão.

Dois fenômenos devem ser conhecidos e controlados nas usinas hidráulicas: golpe de aríete e cavitação.

- Golpe de aríete é o transitório hidráulico máximo (onda de pressão) que ocorre sempre que a velocidade média de escoamento é modificada por atuação do dispositivo de controle de vazão.
- Cavitação fenômeno de mudança de fase da água quando bolhas de vapor e gases no interior da turbina ao alcançarem regiões de pressões elevadas retornam à fase líquida cujos efeitos são destrutivos com queda da potência fornecida e redução da vida útil da instalação.

A Tabela 2.3 lista as 10 maiores centrais hidrelétricas do Brasil.

Tabela 2.3 As dez maiores usinas hidrelétricas do Brasil.

Usina	Rio	Potência
<u>Usina Hidrelétrica de Itaipu</u>	<u>Rio Paraná</u>	14.000 MW
<u>Usina Hidrelétrica São Luiz do Tapajós</u>	<u>Rio Tapajós</u>	8.381 MW (projetada)
<u>Usina Hidrelétrica de Tucuruí</u>	<u>Rio Tocantins</u>	8.370 MW
<u>Usina Hidrelétrica de Belo Monte</u>	<u>Rio Xingu</u>	5.000 MW (aprovado)
<u>Usina Hidrelétrica de Ilha Solteira</u>	<u>Rio Paraná</u>	3.444 MW
<u>Usina Hidrelétrica de Jirau</u>	<u>Rio Madeira</u>	3.300 MW (licitada)
<u>Usina Hidrelétrica de Xingó</u>	<u>Rio São Francisco</u>	3.162 MW
<u>Usina Hidrelétrica Santo Antônio</u>	<u>Rio Madeira</u>	3.150 MW (licitada)
<u>Usina Hidrelétrica Paulo Afonso IV</u>	<u>Rio São Francisco</u>	2.462 MW
<u>Usina Hidrelétrica de Itumbiara</u>	<u>Rio Paranaíba</u>	2.082 MW

C. Usinas de Armazenamento por Bombeamento

Considere um sistema elétrico com demanda diária que varia entre 100 e 160 MW.

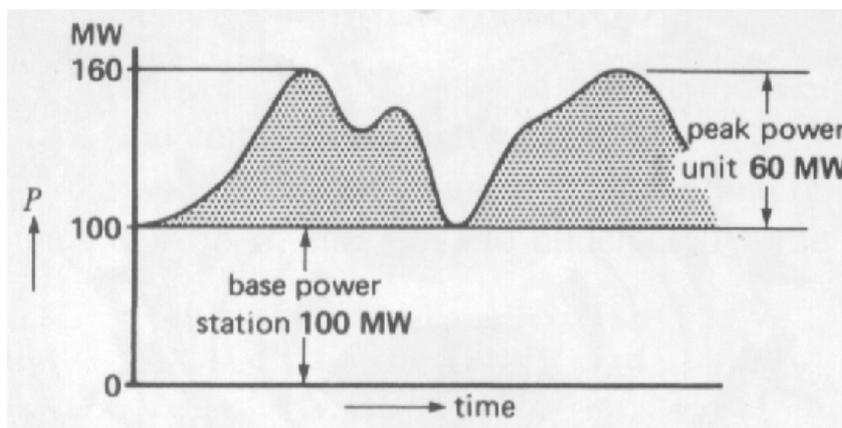


Figura 2.22 Curva de demanda de potência.

Soluções alternativas:

- 1) Instalar uma usina de base de 100 MW e uma unidade de ponta de 60 MW, acionada intermitentemente por uma turbina a gás.
- 2) Instalar uma usina de base de 130 MW e uma estação de pico de 30 MW.

A estação de pico deve ser capaz de gerar e absorver 30 MW de potência.

- Durante períodos de carga leve, a estação de pico recebe e armazena energia da usina de base.
- Durante períodos de demanda alta, a estação de ponta retorna a energia anteriormente armazenada.

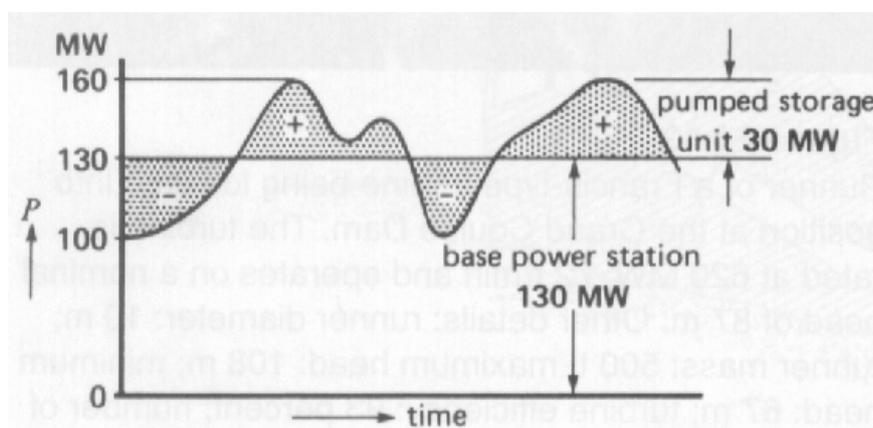


Figura 2.23 Curva de demanda de potência

Vantagens da 2ª alternativa:

- A usina de base é maior e, portanto mais eficiente.
- A usina de ponta é menor e, portanto de menor custo.

As usinas reversíveis são compostas de reservatórios de água, superior e inferior os quais são conectados por tubulação forçada, e de unidade reversível turbina-gerador/bomba-motor.

Durante o período de ponta do sistema a usina age como uma estação hidrelétrica comum. A água flui, produzindo energia, do reservatório superior para o inferior.

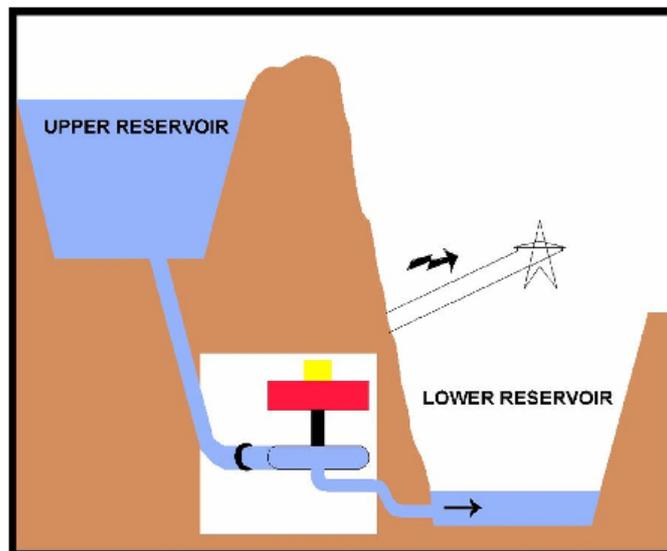


Figura 2.24 Produção de energia por usina reversível.

Durante os períodos de carga leve o processo é revertido: o gerador atua como um motor síncrono, acionando a turbina que atua como uma enorme bomba. A água flui do reservatório inferior para o superior, armazenando energia para o próximo período de ponta.

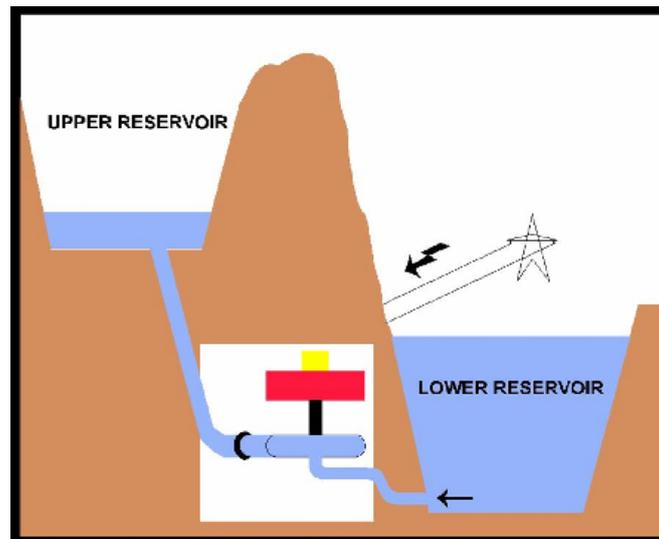


Figura 2.25 Bombeamento de energia por usina reversível.

Desta forma, a usina reversível “reduz as pontas” e “completa os valores” no perfil de carga para reduzir efetivamente o custo total de produção do sistema.

Embora a energia necessária para bombear a água de volta ao reservatório superior seja maior do que a energia produzida pela usina reversível, é econômico bombear durante períodos de custo marginal baixo, λ_{BOMBA} , e gerar durante períodos de custo marginal alto, λ_{GEN} , desde que:

$$\lambda_{\text{GEN}} > \frac{1}{\eta} \lambda_{\text{BOMBA}} \quad (2.3)$$

em que η é a relação entre os MWh gerados e a carga de bombeamento em MWh (rendimento do ciclo).

Os geradores das usinas reversíveis têm potência nominal entre 50 e 500 MW.

A entrada em operação do motor síncrono provoca grande solicitação no sistema de transmissão. Métodos especiais de partida são usados para levar o motor à velocidade síncrona como p.ex. conversores estáticos de frequência.

As usinas reversíveis operando em conjunto com plantas nucleares fazem uma atrativa combinação porque as plantas nucleares atingem sua melhor eficiência quando operam sob carga constante.

As usinas reversíveis não são consideradas como geração distribuída. Não há, no mundo, usinas reversíveis suficientemente pequenas tais que sejam localizadas no sistema de distribuição de energia elétrica.

As desvantagens das usinas reversíveis são:

- Alto custo de capital
- Alto custo de operação (perda de trajeto de ida e volta até 25%)
- É necessária uma grande diferença entre preço de energia de pico e fora de pico para justificar o armazenamento por bombeamento.

Em virtude do preço atrativo do gás natural e o avanço na tecnologia de turbinas a gás (incluindo plantas em ciclo combinado), não é fácil justificar um projeto de armazenamento de água por bombeamento no mercado de energia – competitivo ou não.

D. Preservação do Ecossistema

Uma das fases fundamentais da instalação de uma usina hidrelétrica é a formação do reservatório de água. Na construção do reservatório uma área geográfica deve ser inundada, o que causa profundas alterações no ecossistema da região.

Normalmente o local da represa é escolhido de modo a causar um mínimo de efeitos negativos. Entretanto alguns danos ambientais são inevitáveis, sobretudo pela extensão do território inundado.

A Tabela 2.4 apresenta informações a respeito de algumas usinas hidrelétricas instaladas no Brasil.

Tabela 2.4 Comparação do aproveitamento de área inundada de algumas usinas no Brasil.

Usina	Rio	Potência (kW)	Área (ha)	kW/ha
Balbina	Uatumã	250.000	112.000	2,23
Tucuruí	Tocantins	7.260.000	242.400	29,95
Itaipu	Paraná	12.600.000	135.000	93,33
Segredo	Iguaçu	1.260.000	8.250	152,73
Xingó	São Francisco	5.000.000	8.500	588,24

100ha = 1km²

O reservatório da usina Balbina equivale a aproximadamente 400 mil campos de futebol, enquanto Xingo equivale a 10 mil campos de futebol.

As usinas do rio Madeira (Sto Antônio e Jirau) têm ótima relação entre área alagada e potência instalada. Cada uma delas alaga apenas 0,08 km² para cada megawatt instalado (125 kW/ha) e, se descontada a área relativa à calha do rio, este valor cai para 0,03 km² (333 kW/ha). As usinas existentes no País alagam em média 0,52 km² para cada megawatt instalado (19,2 kW/ha).

Estudos conduzidos por especialistas relatam que a energia obtida pela fotossíntese através do sol (energia da biomassa) em florestas tropicais equivale a aproximadamente 1,09 MW/km² (192 kW/ha). Assim, a construção de uma usina hidrelétrica que inunde uma área e produza menos do que essa área possa produzir por fotossíntese deve ser considerada uma ação predatória.

A usina de Balbina na Amazônia que inundou 2360km² deveria, portanto produzir 2572,4MW, cerca de 10 vezes a potência instalada da usina, ao invés de apenas 250MW que produz. Considerando ainda que para cada quatro toneladas de lenha se pode gerar 0,5MW, com 2000ton de madeira pode-se gerar a energia produzida por Balbina. Os 2360 km² inundados naquela região afogaram 84 milhões de toneladas de madeira que faria a usina termelétrica funcionar por quase cinco anos. Porém, a queima dessa madeira seria o último recurso de utilização dessa biomassa.

D.1 Impacto Ambiental

D.1.1 Fauna

O represamento da água diminui acentuadamente a oxigenação da água, prejudicando a fauna aquática da região. Espécies acostumadas à água corrente têm dificuldades em se adaptar à água quase parada de um lago. A migração dos peixes e sua desova são muito prejudicadas, pois quase cessa o movimento das águas. A dificuldade em subir o rio para a desova, em virtude das barragens e represas, ameaça a multiplicação de algumas espécies.

A consequência é uma notável diminuição na quantidade e na qualidade dos peixes, o que causa prejuízos às populações ribeirinhas que têm na

pesca a principal fonte de alimentação e atividade econômica. A repovoação da represa é indispensável.

Antes do avanço das águas tem de ser feita uma criteriosa coleta dos animais para preservação da fauna nativa da área a ser inundada.

Os animais resgatados devem ser levados para áreas que apresentem condições semelhantes à de origem. As espécies ameaçadas de extinção merecem cuidados especiais.

Devem ser vistos problemas de super-povoamento de áreas com a chegada de novos animais, tornando dramática as condições de sobrevivência dos novos habitantes. Os animais resgatados, estressados pela captura e pelo transporte e sem conhecimento do novo território ficarão em situação de inferioridade em relação aos que já habitavam a área.

As operações de salvamento são uma das exigências para a aprovação dos projetos hidrelétricos.

D.1.2 Flora

O desaparecimento da vegetação nativa, com a inundação da região da represa, impõe que se planeje um reflorestamento criterioso para repor as espécies vegetais.

Muitas vezes, o que se faz é um reflorestamento pro forma, utilizando espécies não nativas e de rápido crescimento como o eucalipto ou o pinheiro americano.

É fundamental que antes da inundação seja feito o desmatamento da área por duas razões:

- a) Econômicas – muitas madeiras de boa qualidade serão cobertas pelas águas e deixá-las submergir sem nenhum aproveitamento é um desperdício.
- b) Ambiental – se o desmatamento não for feito, a vegetação submersa acabará por apodrecer, prejudicando extremamente a qualidade da água, que se torna ácida, portanto imprópria para o ser humano, e venenosa para a fauna aquática.

Ex.: Em Tucuruí mais de 200 mil hectares de floresta e a não remoção da massa vegetal causou enorme perda econômica e sérios danos

ambientais. A acidificação da água acelerou a corrosão das turbinas da usina.

Resoluções governamentais definem o repasse para as tarifas a Compensação Financeira pela Utilização de Recursos Hídricos (repasse a estados e municípios onde se constrói barragens e usinas hidrelétricas), e pelo uso das linhas e equipamentos de transmissão da rede básica.

D.1.3 Impacto Social - População Nativa e Reserva Indígena

As populações humanas que habitam as regiões onde a usina será implantada em geral são famílias de agricultores, pescadores ou tribos indígenas, com perda de área para caça e pesca.

Deve existir a preocupação de reassentar essas populações em outras regiões, procurando alterar muito pouco suas condições originais de vida ou melhorá-las.

Com a represa de Sobradinho 50 mil habitantes das ilhas e das margens do São Francisco tiveram de ser reassentadas.

Com a represa de Luiz Gonzaga (Itaparica) foram submersas três cidades, Petrolândia, Glória e Rodelas, e inscrições feitas por homens pré-históricos nas pedras das margens do rio. Desapareceram ruínas de missões jesuítas e franciscanas e o famoso cais de Petrolândia, construído para o desembarque de D.Pedro II em sua histórica viagem pelo S. Francisco.

A usina de Balbina-Am inundou parte da reserva dos Waimiri-Atroari. Este grupo vem sendo drasticamente reduzido, agravado pela construção da rodovia Manaus-Boa Vista (BR 174), dos 3500 indivíduos registrados em 1973, a população caiu para 374 pessoas em 1986.

Na construção da usina de Tucuruí, as empreiteiras ocuparam 60% do território dos índios gaviões da montanha.

E. Vantagens e Desvantagens das Usinas Hidrelétricas

E.1 Vantagens das usinas hidrelétricas

A instalação de uma usina gera novos empregos e fontes de renda, proporcionando desenvolvimento à região.

Normalmente ocorre um aumento da densidade populacional, pois uma grande quantidade de pessoas chega ao local para participar da construção da usina e, depois, para mantê-la em funcionamento.

Há necessidade de se criar toda uma infra-estrutura para dar à nova população condições básicas de vida. Vilas residenciais, escolas, hospitais, sistema de telefonia, luz elétrica, áreas de lazer, etc.

A partida é rápida podendo ser postas em funcionamento, sincronizadas e carregadas à capacidade nominal em questão de minutos.

Não são poluentes, nem a água, nem o ar.

A energia primária é de custo 'zero'.

Eficiência alta (turbina 90-94%; gerador 95-99%)

E.2 Desvantagens das Usinas Hidrelétricas

Custo de capital para a construção civil é alto.

Retorno do investimento relativamente longo.

Tempo de construção relativamente longo.

As usinas com grandes reservatórios provocam grandes áreas inundadas com impacto ambiental e social.

O lema a ser seguido é: "Construir o futuro sem matar o passado".

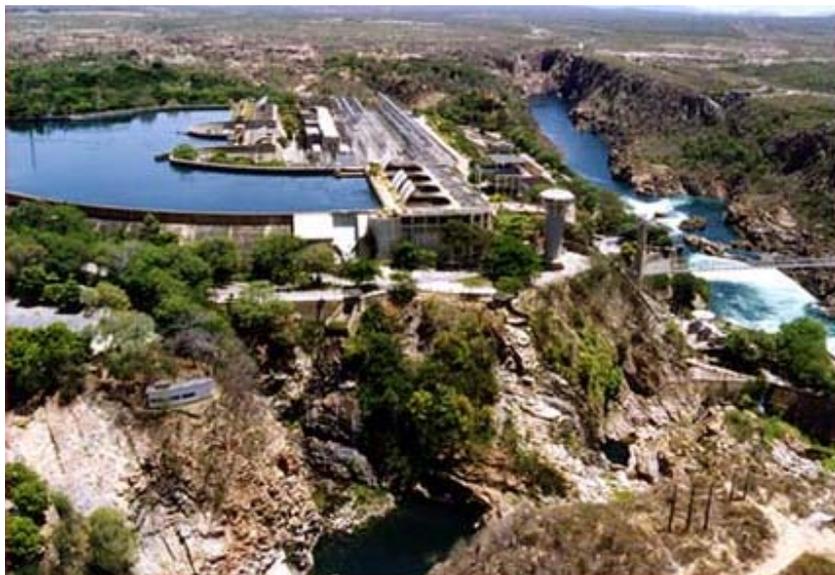


Figura 2.26 Vista aérea do reservatório das usinas de Paulo Afonso I, II e III e do rio São Francisco à direita da foto.



Figura 2.27 Vista aérea da Usina de Xingó (CHESF) SE/AL.