

GTD

PEN 5004 – Fundamentos Físicos dos Processos Energéticos

Prof. Hédio Tatizawa

Geração -Transmissão - Distribuição

- Geração hidrelétrica
- Usinas hidrelétricas: hidrologia, princípio de funcionamento, tipos de aproveitamento, principais componentes, classificação de usinas
- Transmissão de energia elétrica: funções, características, transmissão CA/CC, linhas de transmissão, tecnologias de transmissão.
- Sistemas interligados: descrição e funções
- Distribuição de energia elétrica: descrição e funções

Constituição dos sistemas de potência

Componentes básicos

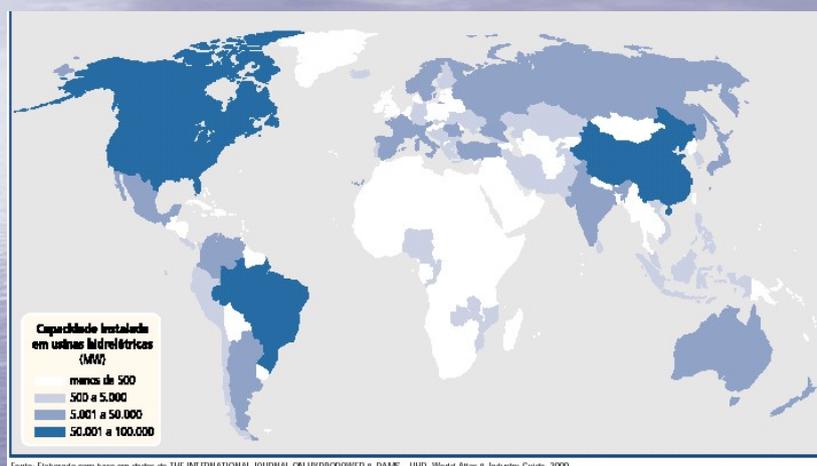
- **Geração** - Transformar alguma forma de energia (mecânica, hidráulica, etc...) em energia elétrica
- **Transmissão** - Transportar a energia dos centros de produção aos de consumo
- **Distribuição** - Entrega aos consumidores da energia vinda do sistema de transmissão

PEN-5004 - Fundamentos Físicos dos Processos Energéticos

3

Geração hidráulica

- Canadá, Estados Unidos, Brasil, China, Rússia

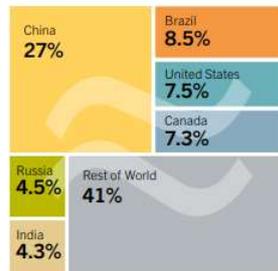


Capacidade instalada em usinas hidrelétricas - 1999
PEN-5004 - Fundamentos Físicos dos Processos Energéticos

4

HYDROPOWER

Figure 14. Hydropower Global Capacity, Shares of Top Six Countries and Rest of World, 2014



Source: International Hydropower Association

Global capacity reached
1,055 GW



RENEWABLES 2015 GLOBAL STATUS REPORT, REN21
PEN-5004 - Fundamentos Físicos dos Processos Energéticos

5

Geração hidrelétrica

- grandes recursos de capital.
- grandes recursos de mão de obra (principalmente pouco qualificada).
- grandes recursos em terras.
- obras civis e montagem de equipamentos (70% do custo total) são realizados no País.
- Conhecimentos de engenharia, projeto e fabricação de equipamentos transferidos às empresas locais.
- desenvolvimento de seguimento constituído por empresas de eletricidade, firmas de consultorias, engenharia e projeto, empresas de construção civil, fabricantes, etc...

Fonte: La Rovere et al, Economia e Tecnologia da Energia, 1985

PEN-5004 - Fundamentos Físicos dos Processos Energéticos

14

Geração hidrelétrica

- Substitui ou posterga a necessidade de geração, a partir de combustíveis fósseis, com efeitos benéficos para a qualidade do ar.
- Provê um serviço de alta confiabilidade, a partir de uma tecnologia conhecida por mais de um século,
- com baixos custos operacionais, alta eficiência energética e extensa vida útil.
- É uma fonte renovável, e, nessa categoria, a única capaz de produção em grande escala.
- Emite baixas quantidades de gases de efeito estufa, em comparação aos combustíveis fósseis.
- Seus impactos, quando negativos, estão limitados à sua área de influência.

Fonte: MME, CEPEL, Manual de inventário hidroelétrico e bacias hidrográficas, 2007

Geração hidrelétrica

- A construção de uma hidroelétrica, dado seu porte, pode representar oportunidades para atender outras carências regionais, tais como, controle de cheias, transporte fluvial, irrigação e outras atividades.
- Os investimentos, apesar de intensos durante um tempo limitado, podem ser realizados com conhecimento e materiais nacionais, sendo um fator de independência estratégica para o País.
- Parte dos investimentos são "alavancadores" para outros setores gerando empregos diretos e indiretos.
- Sendo uma fonte de energia operacionalmente maleável, sustenta eletricamente extensas redes de transporte de energia.
- É especialmente apta a prover serviços ancilares à rede elétrica, tais como reserva girante e não girante, regulação e resposta de frequência, controle de tensão e estabilidade, dando suporte à operação de fontes renováveis intermitentes, como a eólica e fotovoltaica.

Fonte: MME, CEPEL, Manual de inventário hidroelétrico e bacias hidrográficas, 2007

capacidade instalada - principais bacias hidrográficas

Bacia hidrográfica	%
Rio Paraná	64%
Rio São Francisco	17%
Rio Tocantins	8,9%
outras	10%

Sub bacias: Paranaíba, Grande, Iguazu

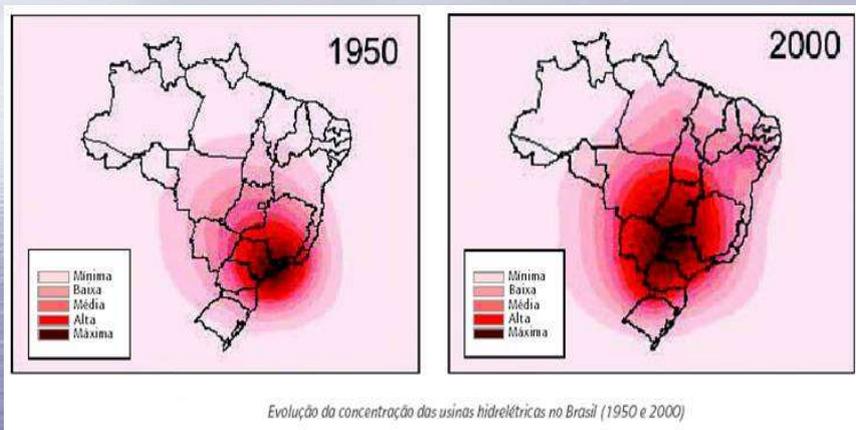
Usinas: Paulo Afonso, Xingó, Sobradinho

Usina de Tucuruí

Fonte: Atlas de energia ANEEL 2001
PEN-5004 - Fundamentos Físicos dos Processos Energéticos

17

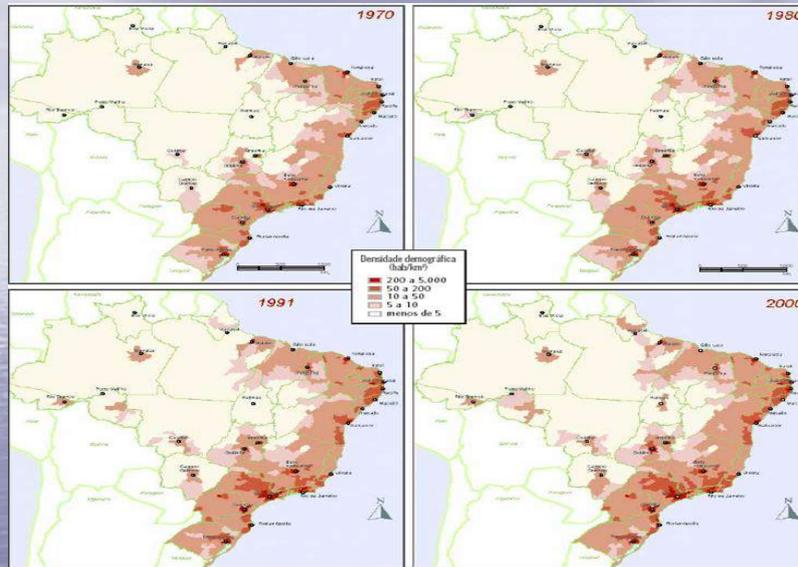
Usinas hidrelétricas



PEN-5004 - Fundamentos Físicos dos Processos Energéticos

18

Distribuição demográfica



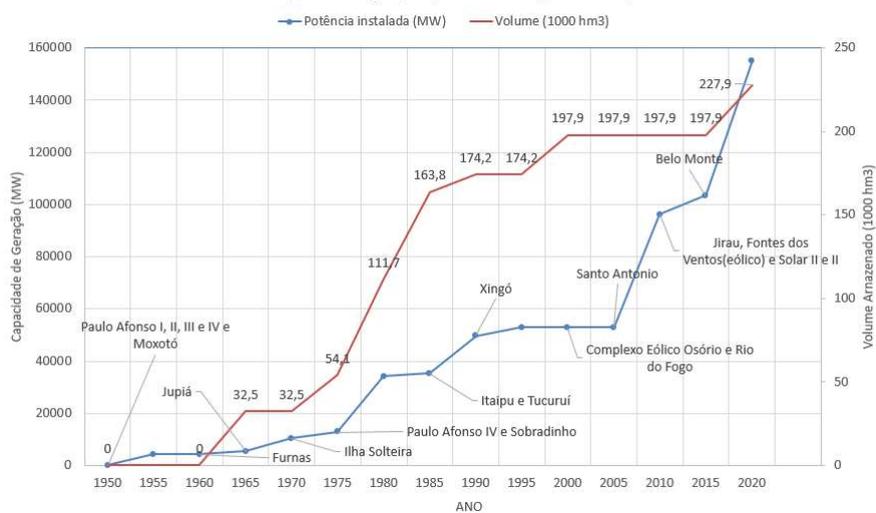
Fonte: Elaborado com base nos dados dos censos demográficos de 1970, 1980, 1991 e 2000.

Distribuição espacial da população brasileira (densidade demográfica – hab./km²)

dos Processos Energéticos

9

Evolução da Geração (MW) e Volume Útil (1000 x hm³)

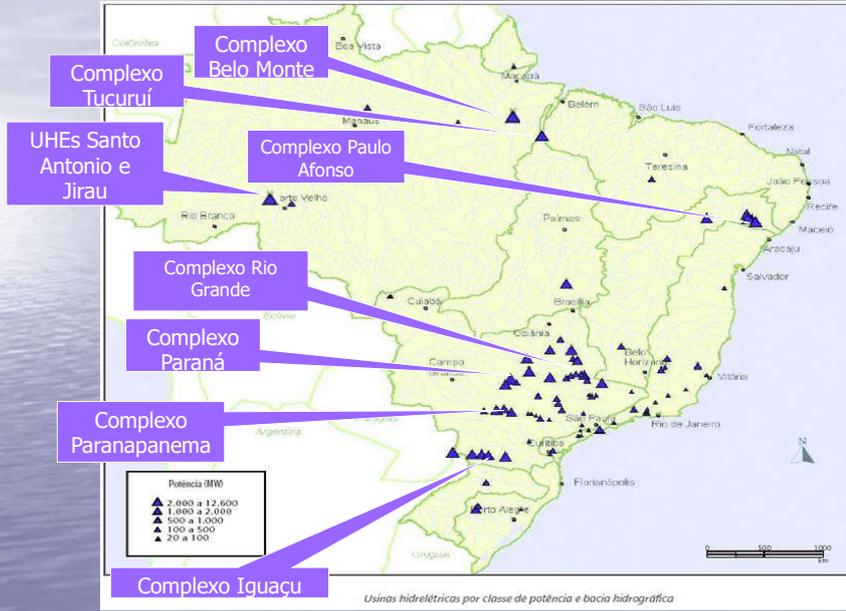


www.ons.org.br/biblioteca_virtual/

PEN-5004 - Fundamentos Físicos dos Processos Energéticos

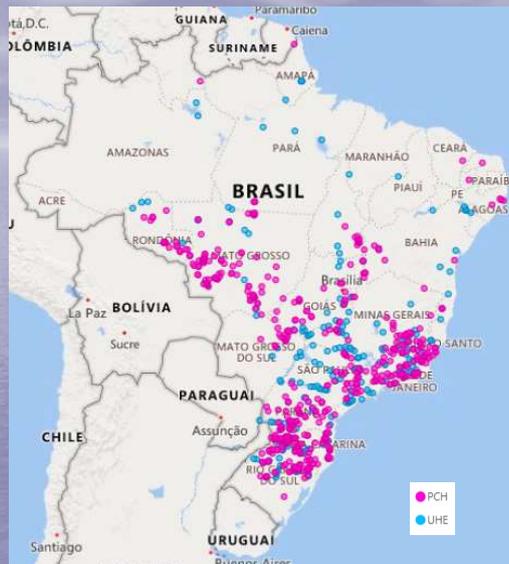
Obs: 1hm³=100mX100mX100m

Localização das usinas por classe de potência



26

Distribuição UHEs (>30 MW) e PCHs (1 a 30 MW)- 2020



SIGA – Sistema de Informações da Geração da ANEEL - 2020
 PEN-5004 - Fundamentos Físicos
 dos Processos Energéticos

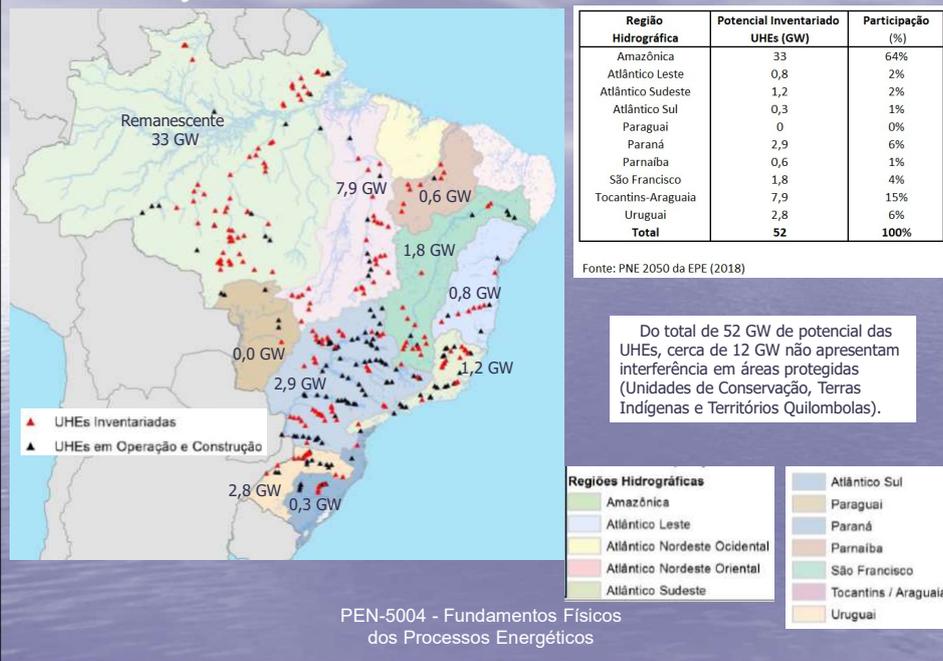
27

Usinas hidrelétricas

Evolução da capacidade instalada em Hidrelétricas – tendências

- Dificuldades para licenciamento ambiental – escassez de novos projetos
- Novas usinas com pequenos reservatórios – redução gradativa da regularização plurianual
- Maior dependência dos períodos chuvosos e necessidade de uso mais intenso de geração térmica

Geração hidrelétrica – Potencial Remanescente



Potencial remanescente - PCHs

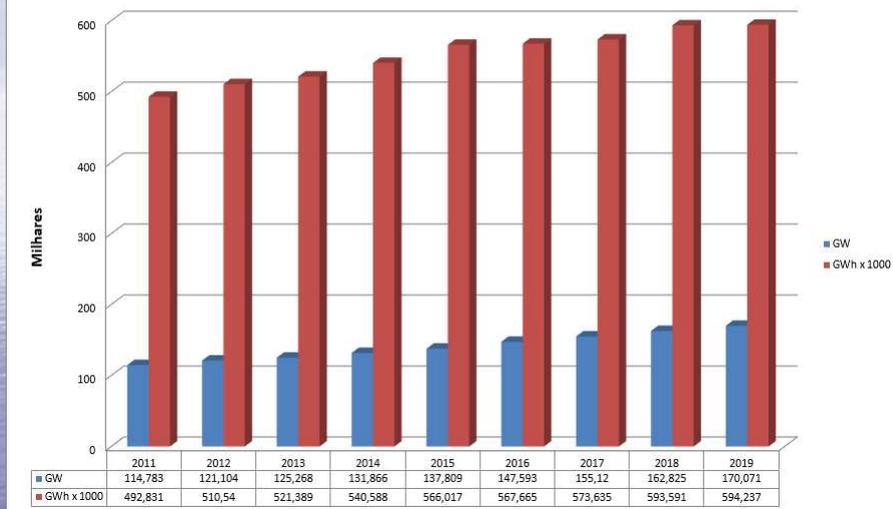
Região Geográfica	Potencial Inventariado - Projetos < 30 MW (GW)	Participação (%)
Centro-Oeste	5,5	34%
Sul	4,7	29%
Sudeste	4,1	26%
Norte	0,9	6%
Nordeste	0,8	5%
Total	16	100%

PNE 2050 da EPE

PEN-5004 - Fundamentos Físicos dos Processos Energéticos

30

Capacidade instalada (GW) e produção (GWh)

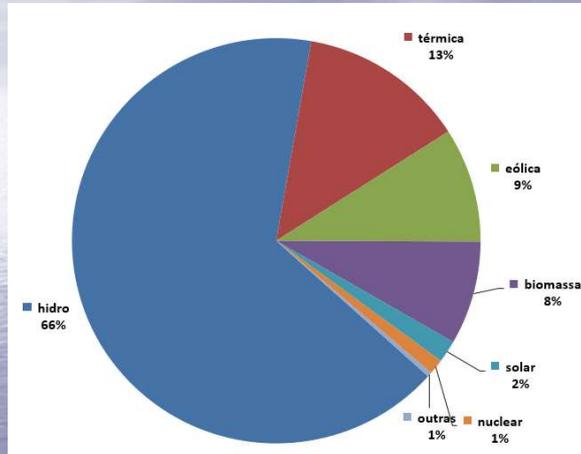


Fonte: ONS 2018

PEN-5004 - Fundamentos Físicos dos Processos Energéticos

31

Sistema Interligado Nacional capacidade instalada - ano 2020 (MW)



	MW	%
hidro	108362	66,08
térmica	21629	13,19
eólica	14975	9,13
biomassa	13549	8,26
solar	2887	1,76
nuclear	1990	1,21
outras	590	0,36
total	163982	100

Fonte: ONS, 2020

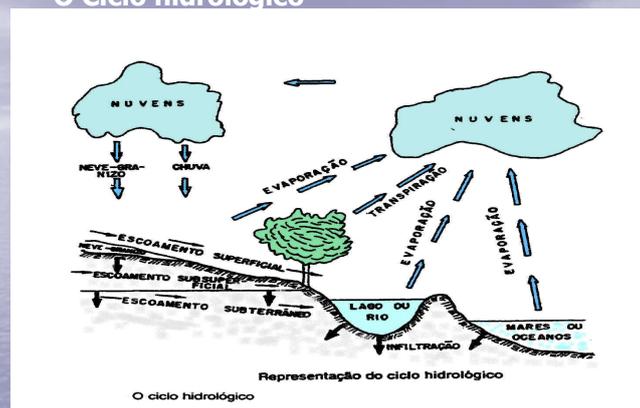
Geração Hidrelétrica

Geração Hidrelétrica

Conceitos básicos de hidrologia

- Ciclo hidrológico
- Conceito de bacia hidrográfica: área de coleta das precipitações + curso d'água
- Vazão em um curso d'água: m^3/s - fluviograma
- usina hidrelétrica

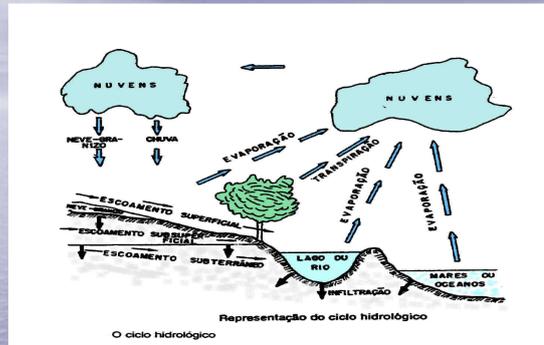
O Ciclo hidrológico



Água

Evaporação (mares, lagos e rios) → transferência para os
continente → volta para os mares, lagos e rios

O Ciclo hidrológico

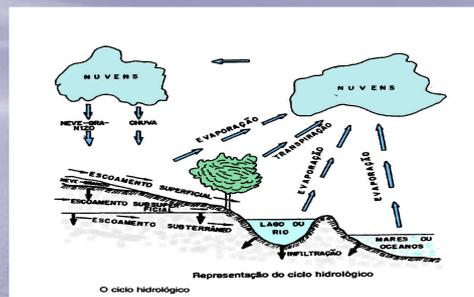


- Bacia hidrográfica: área da superfície do solo, coleta água das precipitações e conduz aos cursos d'água
- cartas topográficas com curvas de nível e identificação dos espigões/divisores de águas

PEN-5004 - Fundamentos Físicos dos Processos Energéticos

37

O Ciclo hidrológico



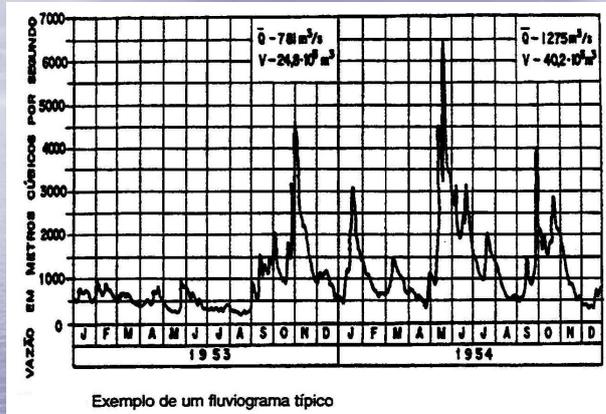
Condicionantes:

- superfície do solo e condições geológicas: vegetação, cultivos, geologia (rochas, camadas geológicas)
- obras de controle e uso d'água a montante: irrigação, retificação do curso d'água, barragens
- área da bacia hidrográfica
- topologia da bacia: declividade, depressões

PEN-5004 - Fundamentos Físicos dos Processos Energéticos

38

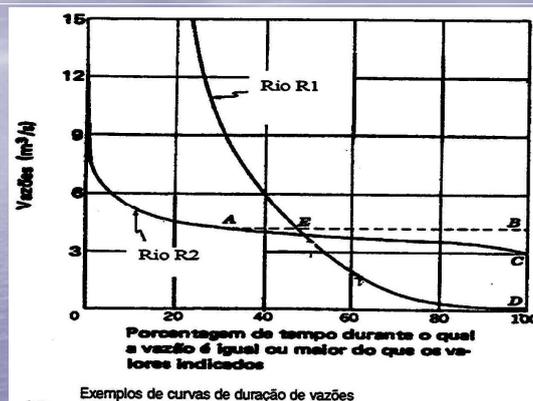
Exemplo de um fluviograma típico



Comportamento da vazão em uma seção reta (local) do rio ao longo do tempo

Exemplo de uma curva de duração (ou persistência) de vazões

Porcentagem de tempo durante o qual a vazão é igual, inferior ou superior a certos valores durante o período de estudos



Obs: Não representam as vazões em sua seqüência natural (no tempo)

Rio 2 fornece pelo menos 3m³/s para aproveitamento direto.
Rio 1 não mantém vazão significativa por longo tempo → necessita da reservatório para regularização.

Hidrelétrica - Princípio básico de funcionamento

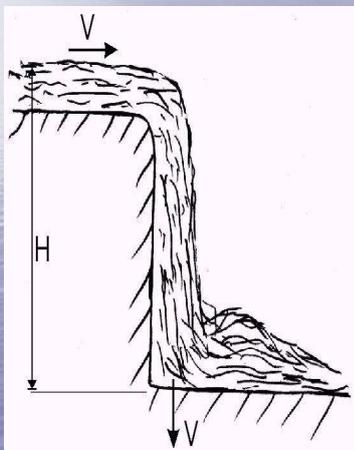
PEN-5004 - Fundamentos Físicos
dos Processos Energéticos

41

Hidrelétrica - Princípio básico de funcionamento

Potência elétrica disponível no aproveitamento:

- Vazão do curso d'água: volume d'água que passa numa seção reta do mesmo, na unidade de tempo (m^3/s)
- queda d'água disponível



Potência = mgH
 m = massa que cai / seg
 g = aceleração da gravidade
 H = queda bruta

Se a água que cai vem de um rio
com velocidade V

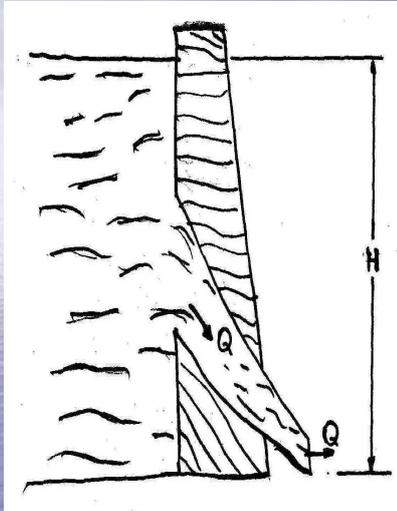
$$P = mgH + \frac{1}{2} mV^2$$

obs: $\frac{1}{2} mV^2$ em geral pode ser
desprezada pois V é geralmente
pequena

PEN-5004 - Fundamentos Físicos
dos Processos Energéticos

42

Hidrelétrica - Princípio básico de funcionamento



Sendo: m - massa de água/seg.

ρ - densidade massa/volume

Q - volume de água que escoou / seg

$$\rho = m/Q$$

P = potência

$$P = \rho g H Q$$

g = aceleração da gravidade -
9,81m/s²

$$\rho = 1000\text{kg/m}^3$$

Potência = 9,81 HQ (kW)

sendo H - metros e Q - m³/s

Hidrelétrica - Características

□ Rendimento ou eficiência: $\eta_{TOT} = \eta_H \cdot \eta_T \cdot \eta_g$ onde

η_H - Rendimento do sistema hidráulico

η_T - Rendimento da turbina

η_g - Rendimento do gerador

Valores típicos são:

$$0,76 \leq \eta_{TOT} \leq 0,87$$

com: $\eta_H \geq 0,96$

$$0,88 \leq \eta_T \leq 0,94$$

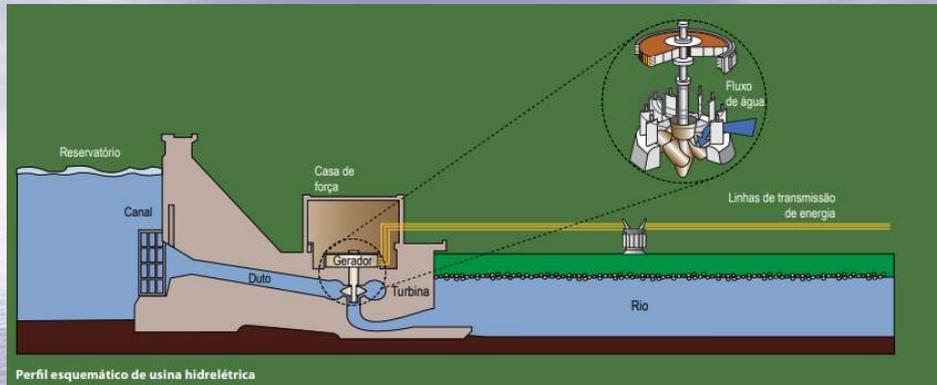
$$0,90 \leq \eta_g \leq 0,97$$

$$P = \eta_{TOT} \cdot g \cdot QH$$

$$E = P \cdot 8760 \text{ horas}$$

onde E - Energia produzida no ano

Hidrelétrica - Princípio de funcionamento



Controle da potência elétrica, utilização de reguladores:

- de tensão, controlando a tensão nos terminais do gerador, por atuação na tensão do enrolamento do rotor (enrol. de excitação)
- de velocidade, controlando a frequência, através da variação da potência mecânica, por atuação na válvula de entrada de água da turbina.

PEN-5004 - Fundamentos Físicos dos Processos Energéticos

45

Hidrelétrica - Princípio de funcionamento

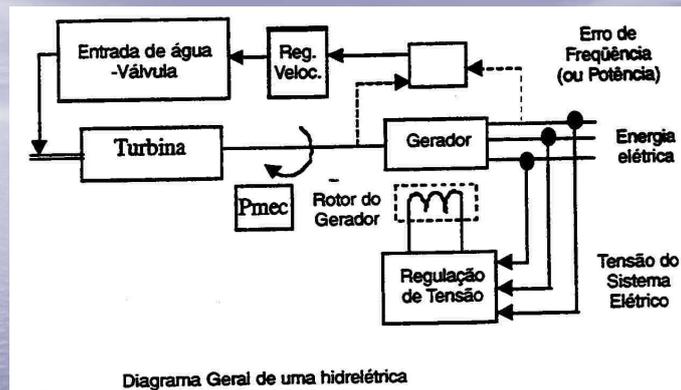


Diagrama Geral de uma hidrelétrica

Controle da potência elétrica, utilização de reguladores:

- de tensão, controlando a tensão nos terminais do gerador, por atuação na tensão do enrolamento do rotor (enrol. de excitação)
- de velocidade, controlando a frequência, através da variação da potência mecânica, por atuação na válvula de entrada de água da turbina.

PEN-5004 - Fundamentos Físicos dos Processos Energéticos

46

Classificação das usinas

- Altura efetiva da queda d'água

Baixíssima $H < 10\text{m}$

baixa $10 < H < 50\text{m}$

média $50 < H < 250\text{m}$

alta $H > 250\text{m}$

Classificação das usinas

Capacidade ou potência instalada

- **Grandes UHEs**

- reserva girante para atender sit. emergenciais no sistema e atender o pico de demanda
- alta economia de escala-em grandes reservatórios custo marginal de capacidade adicional de geração irrisório
- grande energia firme
- maiores problemas ambientais

médias UHEs: características intermediárias

- CGH $P < 1\text{MW}$

- pequenas $1\text{MW} < P < 30\text{MW}$

- médias $30\text{MW} < P < 100\text{MW}$

- grandes $P > 100\text{MW}$

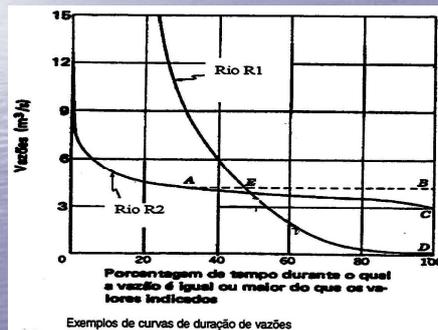
- **Pequenas UHEs (PCHs)**

- rápida entrada no sistema, útil para aumentar rendimento e melhorar o desempenho de sistemas interligados
- baixos custos de operação, manutenção e de produção de energia
- características mais suaves de inserção ambiental
- deve apresentar potência adequada à curva de carga de seu mercado consumidor
- deve apresentar energia firme ou garantida que permita ao produtor ter um contrato para fornecer energia com segurança.

Tipos de aproveitamento

• Aproveitamento a fio d'água: sem reservatório (ou pequeno reservatório), **usando a vazão disponível**, sem regularização, entre 90 e 100% do tempo. A energia associada a essa vazão recebe o nome de energia primária.

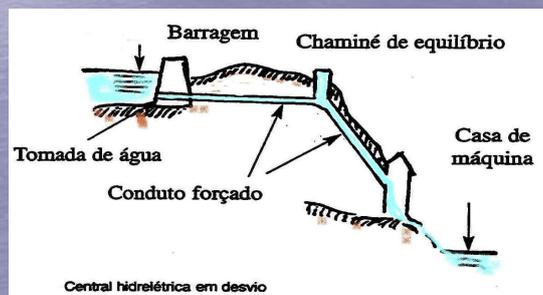
• Aproveitamento com regularização de vazão (com reservatório): associa-se o nome de **energia firme** àquela que pode ser garantida durante “quase” todo o tempo.



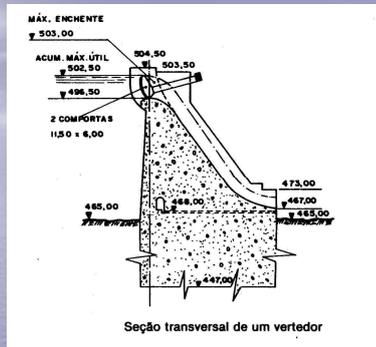
Reservatório e barragem de acumulação:
garantir uma vazão média superior a do comportamento natural do rio

principais componentes das usinas hidrelétricas

- Barragem:
 - - reservatório e barragem de acumulação -garantir uma vazão média superior a do comportamento natural do rio
 - - viabilização da irrigação, navegação e aproveitamento elétrico
 - - regularização dos fluxos fluviais e amortecimento de ondas de enchentes
 - - estocar água dos períodos chuvosos para utilizar nos períodos secos



principais componentes das usinas hidrelétricas



•Vertedores:
permitem a passagem direta da água para jusante, descarregar cheias e evitar danos à barragem

•Comportas:
permitem isolar a água do sistema final de produção de energia elétrica, permitindo trabalhos de manutenção

PEN-5004 - Fundamentos Físicos
dos Processos Energéticos

55

principais componentes das usinas hidrelétricas

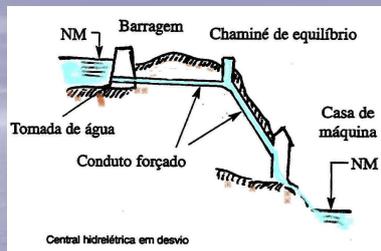
- Tomada d'água
 - permite a retirada d'água do reservatório
 - protege a entrada do conduto de danos e obstruções provenientes de corpos estranhos, ondas e correntes.



PEN-5004 - Fundamentos Físicos
dos Processos Energéticos

56

principais componentes das usinas hidrelétricas



- Condutos, classificados como:
 - condutos livres, a céu aberto ou aquedutos
 - condutos forçados de baixa pressão e de alta pressão

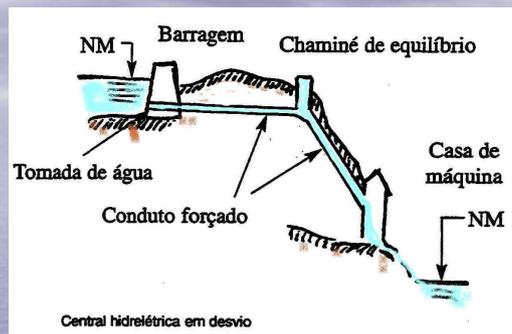
- Chaminés de equilíbrio ou câmaras de descarga
 - eliminar excesso de pressão causada por golpe de aríete.
 - proporcionar suprimentos de água capazes de reduzir depressões em caso de operações abruptas

Golpe de aríete: ocorre quando o escoamento em tubulações é bruscamente interrompido, gerando ondas de (alta) pressão positivas e negativas, prejudiciais às tubulações

PEN-5004 - Fundamentos Físicos dos Processos Energéticos

57

principais componentes das usinas hidrelétricas



- Casa de força/de máquinas
 - local de instalação das turbinas hidráulicas, geradores elétricos, reguladores, painéis e outros equipamento do sistema elétrico de geração.

PEN-5004 - Fundamentos Físicos dos Processos Energéticos

58

Tipos de centrais hidrelétricas

- usina a fio d'água: baixa capacidade de armazenamento, geralmente dispõe somente da **vazão natural do curso d'água**, sem regularização, entre 90% e 100%. A energia associada a essa vazão recebe o nome de energia primária

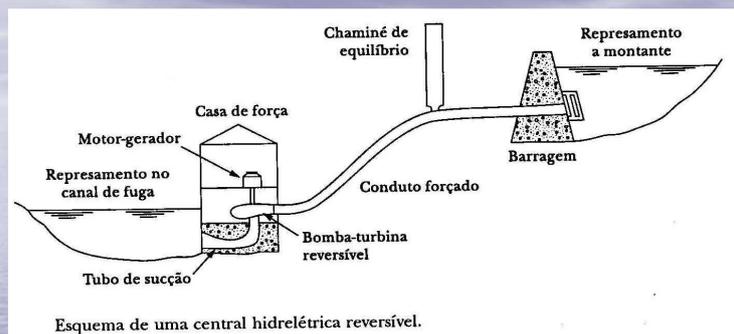
- usina com reservatório de acumulação: dispõe de um reservatório de tamanho suficiente para acumular água nas cheias, para uso na estiagem. Dispõe de **vazão firme maior que a vazão mínima natural**. Associa-se o nome de **energia firme** àquela que pode ser garantida durante “quase” todo o tempo.

- usina reversível: usada para gerar energia durante a carga máxima (pico) do sistema. Durante as horas de demanda reduzida a água é bombeada de um represamento no canal de fuga para um reservatório a montante, utilizando energia extra de outra usina do sistema

PEN-5004 - Fundamentos Físicos
dos Processos Energéticos

59

usina reversível



- fornece energia durante a carga máxima (pico) do sistema.
- na demanda reduzida, a água é bombeada utilizando energia extra de outra usina do sistema

Usina de Pedreira do EMAE: geração de 68MW ou bombeamento de 400m³/s

PEN-5004 - Fundamentos Físicos
dos Processos Energéticos

60

Turbinas hidráulicas

Transformar a maior parte da energia de escoamento contínuo da água que a atravessa em trabalho mecânico

Turbinas hidráulicas:

- de reação: trabalho mecânico obtido pela transformação da energia cinética e de pressão da água em escoamento, através do rotor (tipo Francis e tipo Kaplan)
- de ação: trabalho mecânico obtido pela transformação da energia cinética da água em escoamento, através do rotor (tipo Pelton)

Francis – média queda
Kaplan - baixa queda
Pelton - grande queda
Bulbo - baixa queda

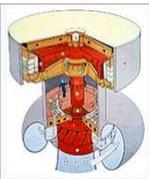
PEN-5004 - Fundamentos Físicos dos Processos Energéticos

61

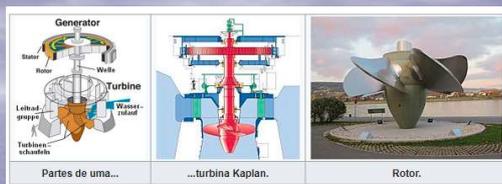
Turbinas hidráulicas



Turbina Francis de 100 hp (azul).



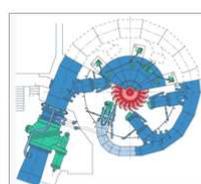
Turbina Francis, do tipo de fluxo radial de fora para dentro.



Partes de uma...

...turbina Kaplan.

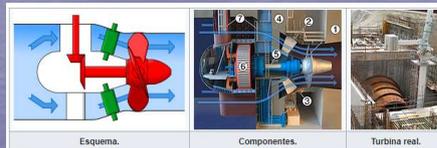
Rotor.



Desenho.



Turbina Pelton real.



Esquema.

Componentes.

Turbina real.

Bulbo

Francis – média queda
Kaplan - baixa queda
Pelton - grande queda
Bulbo – baixa queda

https://pt.wikipedia.org/wiki/Turbina_hidr%C3%A1ulica#Bulbo

PEN-5004 - Fundamentos Físicos dos Processos Energéticos

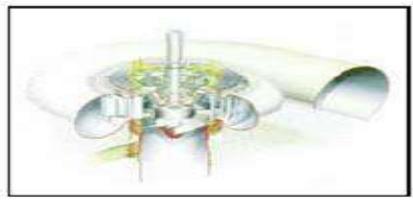
63

geração



Foto: ANEEL, 2001.

Usina Hidrelétrica de Jupiá - Rio Parandá
(Três Lagoas - SP)



- Turbina Kaplan
- baixa queda
- Jupiá
 - 1551 MW (14 turbinas)

PEN-5004 - Fundamentos Físicos
dos Processos Energéticos

67

geração



Foto: Itaipu, 2001.

Vista panorâmica da Usina Hidrelétrica de Itaipu



- Turbina Francis
- Média queda
- Maioria das usinas
brasileiras
- Itaipu
 - 14000MW

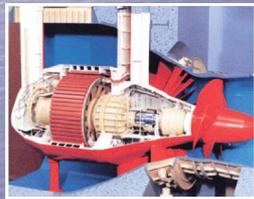
PEN-5004 - Fundamentos Físicos
dos Processos Energéticos

68

geração



- Turbina Bulbo
- Baixa queda
- Fio d'água
- UHE Jirau (3750 MW), Rio Madeira



PEN-5004 - Fundamentos Físicos dos Processos Energéticos

69

geração



Fonte: ENEC, 2001.
Figura 3.4 – Usina Hidroelétrica de Henry Borden (Cubatão – SP)

- Turbina Pelton
- Grande queda
- Usina Henry Borden
 - 890MW
 - 720m de desnível



Fonte: GE, 2000.

PEN-5004 - Fundamentos Físicos dos Processos Energéticos

70

Transmissão de energia elétrica

PEN-5004 - Fundamentos Físicos
dos Processos Energéticos

71

Funções da Transmissão

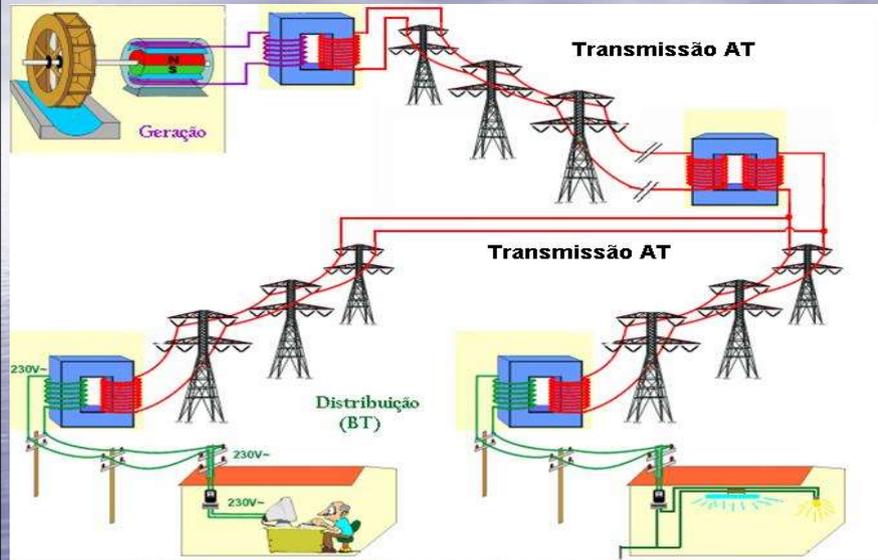
Assegurar a otimização dos recursos eletro-energéticos existentes em operação no País e os a serem construídos;

Permitir a transferência de blocos de energia elétrica produzido por usinas geradoras para os grandes centros consumidores;

PEN-5004 - Fundamentos Físicos
dos Processos Energéticos

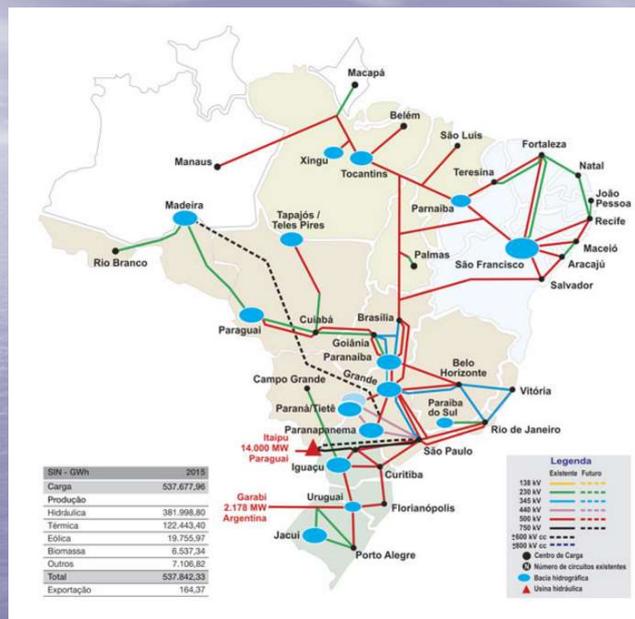
72

Sistema de transmissão



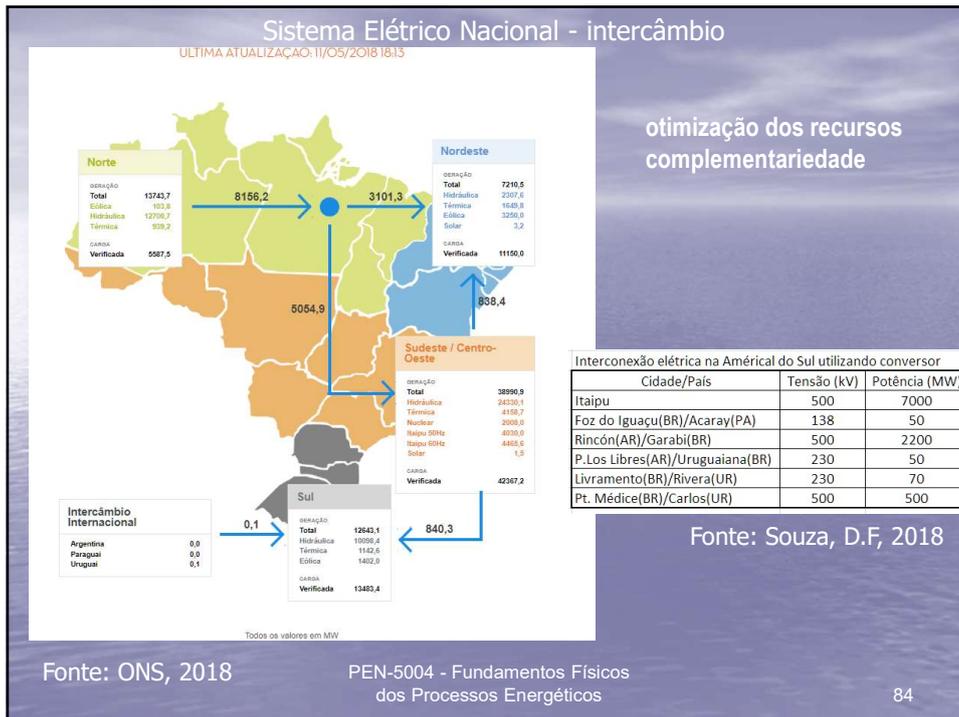
LE 004 Fundamentos Físicos dos Processos Energéticos

73



dos Processos Energéticos

74



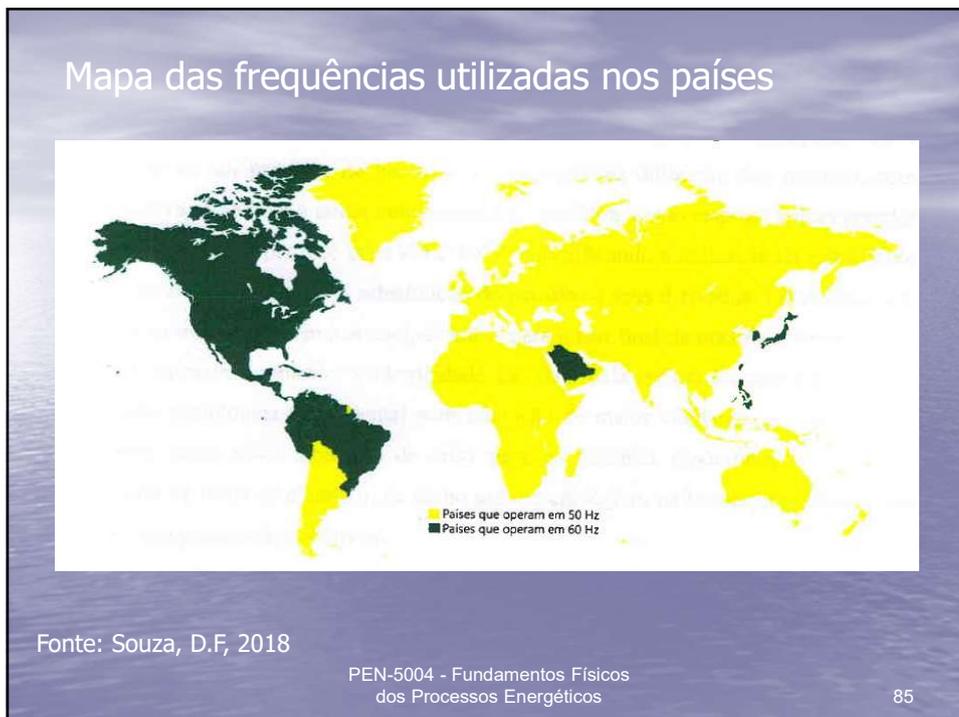
otimização dos recursos complementariedade

Interconexão elétrica na América do Sul utilizando conversor

Cidade/País	Tensão (kV)	Potência (MW)
Itaipu	500	7000
Foz do Iguaçu(BR)/Acaray(PA)	138	50
Rincón(AR)/Garabi(BR)	500	2200
P.Los Libres(AR)/Uruguaiana(BR)	230	50
Livramento(BR)/Rivera(UR)	230	70
Pt. Médice(BR)/Carlos(UR)	500	500

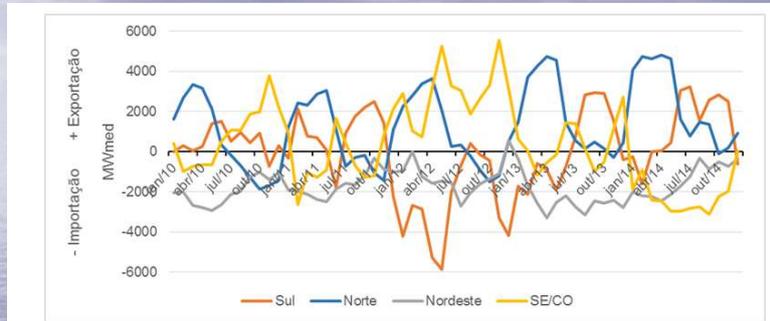
Fonte: Souza, D.F, 2018

Fonte: ONS, 2018 PEN-5004 - Fundamentos Físicos dos Processos Energéticos



Funções da Transmissão
otimização dos recursos

complementaridade

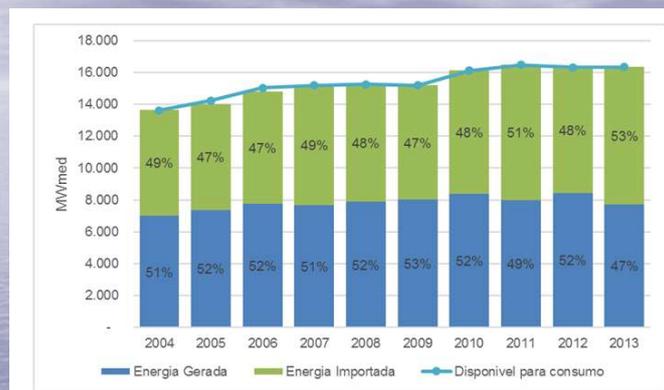


Balço de intercâmbio de energia nos subsistemas

Fonte: Vindel H., TK 2015.

Intercâmbios

PEN-5004 - Fundamentos Físicos
dos Processos Energéticos



Energia elétrica disponível para consumo no estado de São Paulo.

Fonte: Vindel H, T.K., 2015.

PEN-5004 - Fundamentos Físicos
dos Processos Energéticos

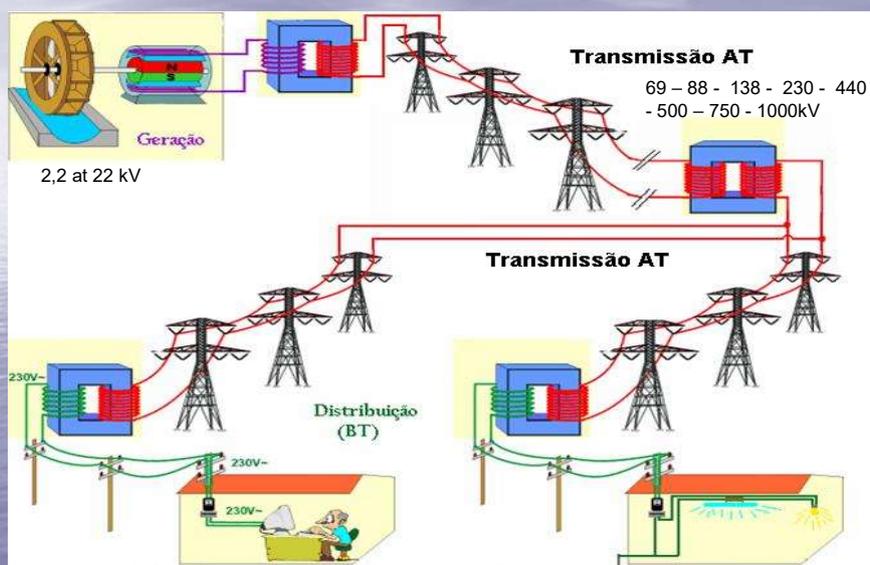
Características da Transmissão

- Altos níveis de tensão (acima de 69kV)
- Manejo de grandes blocos de energia
- Distância de transporte razoável (normalmente acima de 100km no Brasil)
- Sistemas com várias malhas, interligando blocos de geração (usinas) a regiões de consumo de grande porte.

PEN-5004 - Fundamentos Físicos
dos Processos Energéticos

93

Geração - Transmissão - Distribuição Faixas de tensão



dos Processos Energéticos

94

Sistemas Elétricos de Potência



PEN-5004 - Fundamentos Físicos

Fonte: Saber eletrônico, nº 343, agosto/2001

95

Tensões de Geração, Transmissão e Distribuição

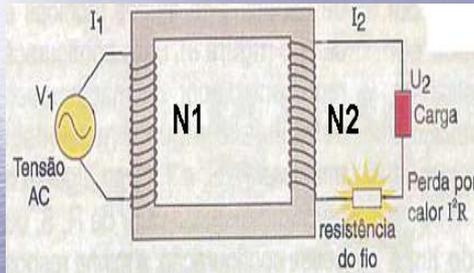
- Geração:
 - Até 22 kV
- Transmissão
 - 69 - 88 - 138 - 230 - 440 - 500 - 750 - 1000kV
- Distribuição:
 - Níveis de Tensão Primária:
 - 3,8 - 6,6 - 11,9 - 13,8 - 23 - 34,5 kV
 - Níveis de Tensão Secundária:
 - 127/220 - estrela aterrada
 - 115/230 - 110/220 - delta aberto/fechado
 - 220 - estrela isolada
 - 220/380 - estrela aterrada
 - 120/208 V - estrela aterrada - subterrâneo - ELETROPAULO

PEN-5004 - Fundamentos Físicos
dos Processos Energéticos

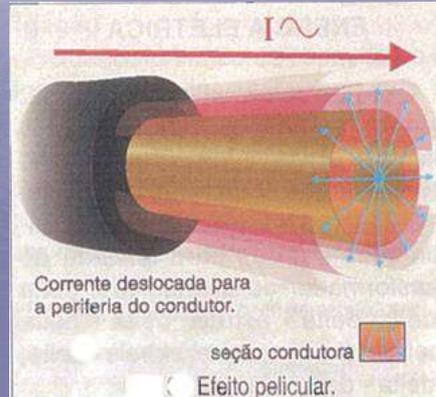
96

Transmissão em alta tensão

- Redução de custos (seções dos condutores menores, peso, material,...)



$$I_2 = I_1 \cdot \frac{N1}{N2}$$



PEN-5004 - Fundamentos Físicos

Fonte: Saber eletrônica, nº 343, agosto 2001

Efeito pelicular

97

Transmissão da potência ativa e reativa

$$P = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos \phi$$

P = potência ativa em MW

V = tensão de transmissão entre fases em kV (valor eficaz)

I = corrente em cada uma das três fases em kA (valor eficaz)

$\cos \phi$ = fator de potência, ligado ao conteúdo reativo da transmissão

•Potência reativa

- manter em valor mínimo, para maximizar a potência ativa transferida.
- Ligada às “trocas de energia”entre elementos do sistema (capacitores, reatores linhas de transmissão, geradores, etc..), devidas à natureza dos componentes
- Implica em aumento da corrente (e perdas) para o transporte de uma mesma quantidade de potência

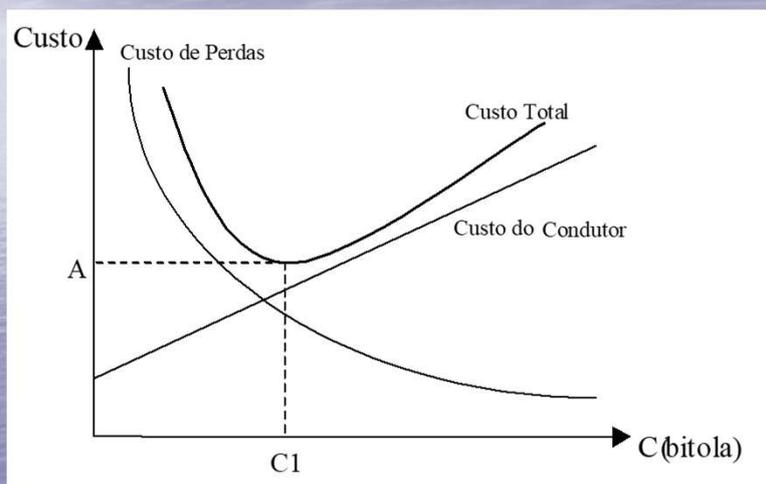
PEN-5004 - Fundamentos Físicos
dos Processos Energéticos

98

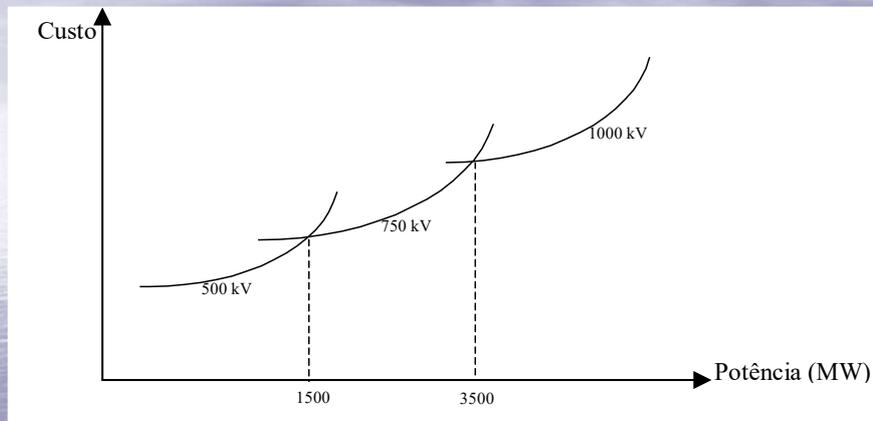
Transmissão - Custos

- Torres
- Condutores
- Compensação Reativa: Fixa
Chaveável
Controlável - FACTS
- Perdas: Joules, Corona
- Terreno: Faixa de Passagem - questões ambientais

Transmissão - Custos



Transmissão - Níveis de Tensão



- limites térmicos dos condutores (linhas curtas carregadas, distrib. e subtrasm.)
- queda de tensão (linhas longas, interligações)
- problemas de estabilidade (interligações longas)

PEN-5004 - Fundamentos Físicos
dos Processos Energéticos

101

Linhas de transmissão

PEN-5004 - Fundamentos Físicos
dos Processos Energéticos

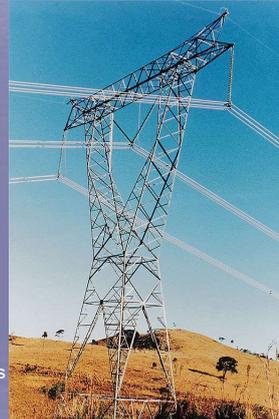
103

dimensionamento do isolamento da LTs:

- tensão de serviço à frequência industrial (60Hz)
- sobretensões de origem externas (atmosféricas)
- sobretensões de origem interna, abertura e fechamento de disjuntores (manobra)
- poluição natural ou industrial sobre os isoladores

Dimensionamento do condutor:

- efeito térmico das correntes
- efeito corona
- rádio interferência
- queda de tensão e limite de estabilidade



PEN-5004 - Fundamentos Físicos
dos Processos Energéticos

LTs - interações com o ambiente

- Vento (velocidade excessiva, vibração eólica-rompimento)
- temperatura ambiente (comportamento termomecânico do condutor)
- pressão atmosférica (corona)
- descargas atmosféricas
- poluição (poluição industrial, salina, queimadas)

- Impacto visual - "formas agradáveis à vista"
- uso da terra- cidades: tensões + altas, diminuição dos circuitos, circuitos múltiplos numa torre, estruturas compactas
- interferência- rádio, TV, telefone, ruído audível (dimensão do condutor)
- efeitos biológicos - falta consenso

PEN-5004 - Fundamentos Físicos
dos Processos Energéticos

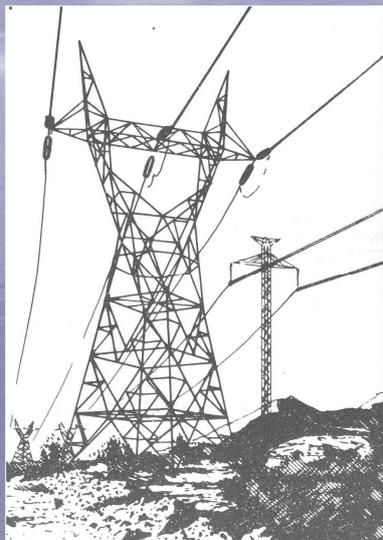
105

Tecnologias de transmissão

PEN-5004 - Fundamentos Físicos
dos Processos Energéticos

106

Transmissão em C.C. x C.A.



dos Processos Energéticos

109

Transmissão em C.C.

- Vantagens:

- LTs mais simples (dois pólos, "mais barato")
- não há variações de tensões excessivas com a flutuação de cargas
- as perturbações não se propagam de um sistema a outro
- possibilidade de interligar sistemas de frequências diferentes
- não há limite de estabilidade (comprimento não limitado)
- controle do fluxo de potência na interligação facilitado
- Maior potência transportada por condutor
- Não há efeito pelicular
- Menor perdas por Corona
- Não há rádio interferência

Transmissão em C.C.

Desvantagens:

- alto custo dos conversores
- aumento da complexidade com possível diminuição da confiabilidade (conversores estáticos, filtros harmônicos, compensadores síncronos ou estáticos e reatores)
- alto consumo de potência reativa no processo de retificação ou inversão
- menor flexibilidade de interligação

Transmissão em C.C.

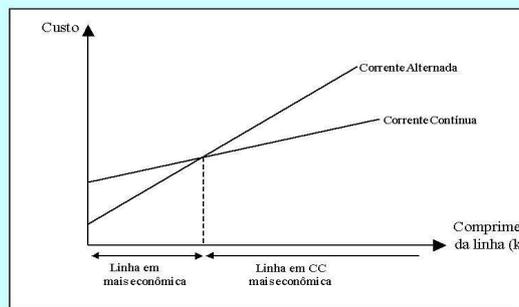
Os aspectos acima, positivos ou negativos de ambos os tipos de transmissão, direcionam as aplicações da corrente contínua principalmente para:

- interconectar sistemas que têm frequências diferentes entre si ou interligar redes com mesma frequência para as quais se deseje ou necessite de operação assíncrona;
- transmissão de potência a distâncias longas ou muito longas por meio de linhas aéreas;
- transmissão por cabos subterrâneos ou subaquáticos;
- controle do fluxo de potência (intercâmbio) em interligações regionais (entre sistemas distintos, entre concessionárias, etc.), com o conseqüente controle das frequências correspondentes;
- combinações das aplicações anteriores num mesmo projeto.

Transmissão em corrente contínua / transmissão em corrente alternada

Transmissão de energia elétrica

Comparação do custo econômico entre CC e CA.



Sistemas interligados - descrição e funções

Sistemas interligados - descrição e funções

- Operação do sistema interligado:
- Conjunto de usinas e cargas ligadas por linhas de transmissão
- Todas as unidades geradoras operam em paralelo, a uma mesma frequência, em sincronismo.
- existência de equilíbrio entre:

$$\begin{aligned} \sum \text{Geração} &= \sum \text{Cargas} + \sum \text{perdas} \\ \text{frequência} &= \text{constante} \end{aligned}$$

Sistemas interligados - descrição e funções

Operação do sistema:

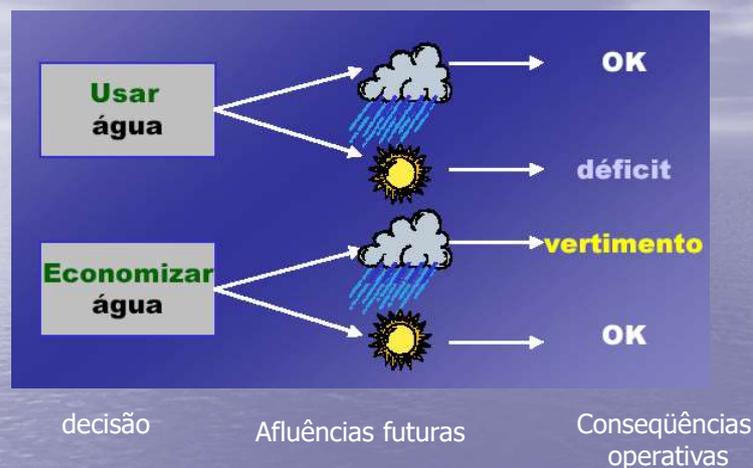
- Maior complexidade na operação
- Economicamente vantajosa
- Aumento da confiabilidade no suprimento da carga
- Caminhos alternativos para o suprimento
- Aproveitamento da diversidade hidrológica
- Menos unidades geradoras de reserva para atendimento da carga
- Menos máquinas trabalhando em vazio para atendimento dos requisitos dinâmicos do sistema . Ex: perdas na linha

Sistema elétrico brasileiro

- Operação do sistema
 - Interligado, visando a otimização temporal e econômica da geração. Deficit de geração de uma região pode compensar o excesso de capacidade de geração de outra.

Características da operação hídrica

- água dos reservatórios destina-se à produção futura de energia
- afluências futuras dependem de chuvas futuras, não podem ser previstas precisamente
- variação sazonal de ano para ano
- reservatórios limitados + incertezas de afluências futuras
- ligação entre uma decisão de operação em um dado estágio e a consequência futura desta decisão
- despacho de uma usina afeta a disponibilidade de energia de outras



Interdependência da operação hidroenergética

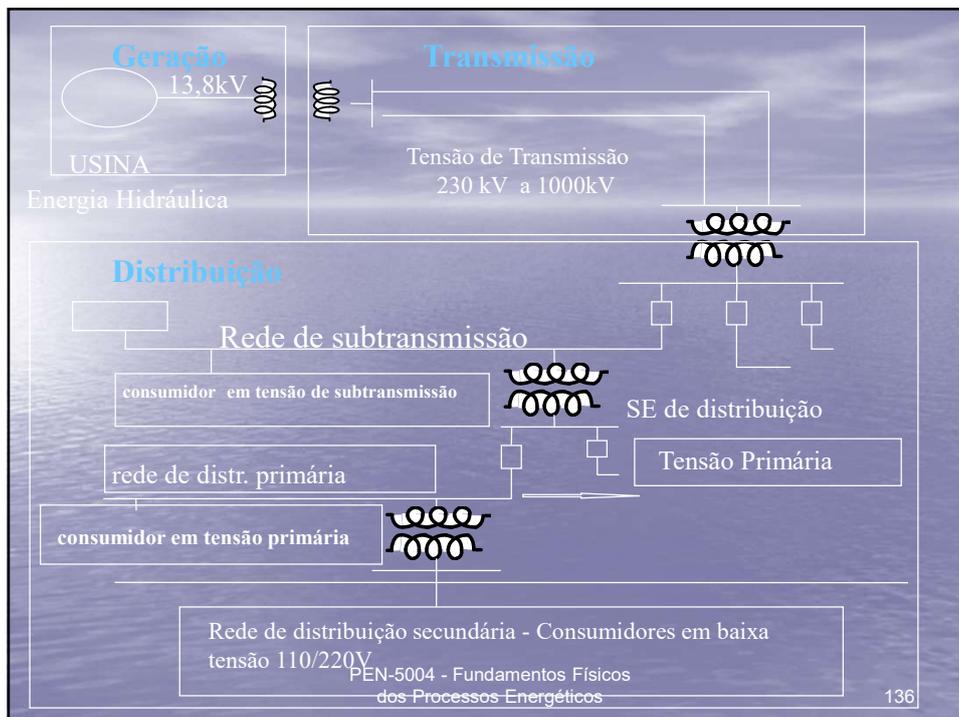
Sistemas interligados

- uso otimizado dos reservatórios: ganho de 30% no volume de energia garantida (com probabilidade de 95%)
- Melhoria do sistema frente a distúrbios do tipo harmônicas, variações de tensões a manobras de cargas (sags e swells)
- Necessidade de operação segura quanto a estabilidade entre geradores
- Distúrbio em um local pode provocar desligamento de geradores em outro ponto (efeito dominó)
- dimensionamento adequado do sistema para defeitos freqüentes e melhoria da proteção, para isolar área defeituosa
- Aumento dos níveis de correntes de curto circuito (equiptos + caros)

Distribuição de energia elétrica

Distribuição de energia elétrica

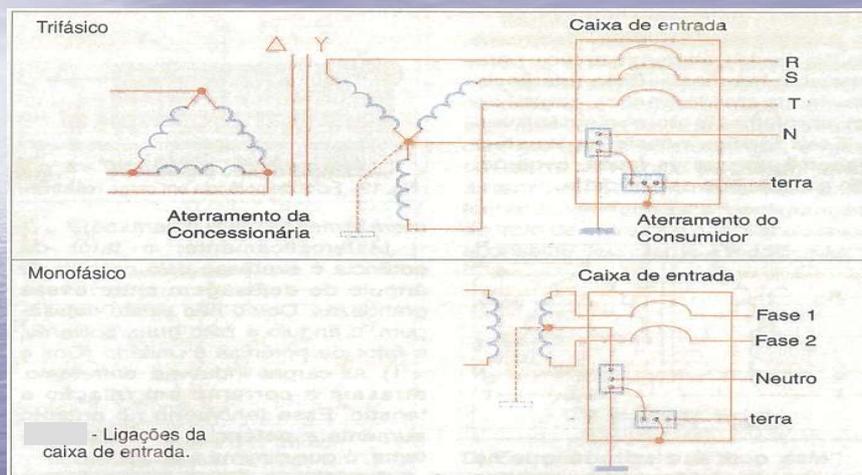
- baixos níveis de tensão (abaixo de 34,5/69/88 kV)
- manejo de menores blocos de energia
- menores distâncias de transporte
- sistema predominantemente radial



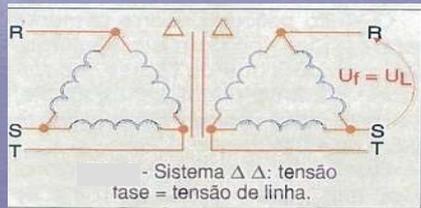
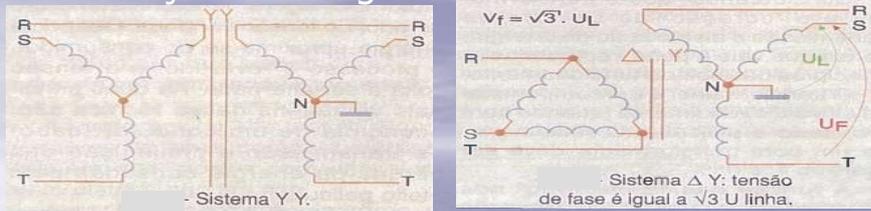
Tensões de Geração, Transmissão e Distribuição

- Geração:
 - Até 22 kV
- Transmissão
 - 69 - 88 - 138 - 230 - 440 - 500 - 750 - 1000kV
- Distribuição:
 - Níveis de Tensão Primária:
 - 3,8 - 6,6 - 11,9 - 13,8 - 23 - 34,5 kV
 - Níveis de Tensão Secundária:
 - 127/220 - estrela aterrada
 - 115/230 - 110/220 - delta aberto/fechado
 - 220 - estrela isolada
 - 220/380 - estrela aterrada
 - 120/208 V - estrela aterrada - subterrâneo - ELETROPAULO

Distribuição de energia elétrica



Distribuição de energia elétrica

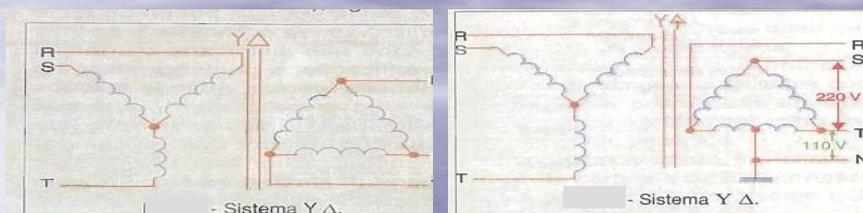


- Níveis de Tensão Secundária:
 - 127/220 – estrela aterrada
 - 220/380 – estrela aterrada
 - 115/230 - 110/220 – delta aberto/fechado
 - 220 – estrela isolada
 - 120/208 V – estrela aterrada - subterrâneo - Eletropaulo

PEN-5004 - Fundamentos Físicos dos Processos Energéticos

140

Distribuição de energia elétrica



- Níveis de Tensão Secundária:
 - 127/220 – estrela aterrada
 - 115/230 - 110/220 – delta aberto/fechado
 - 220 – estrela isolada
 - 220/380 – estrela aterrada
 - 120/208 V – estrela aterrada - subterrâneo -Eletropaulo

PEN-5004 - Fundamentos Físicos dos Processos Energéticos

141

Bibliografia

- ANEEL, www.aneel.gov.br
- ANEEL, Atlas da Energia Elétrica, 2ª Ed. 2005, 3ª Ed.2008
- ONS, www.ons.org
- Reis, L.B., Geração de Energia Elétrica, Te^aC ART Ed. Ltda, 1998.
- Souza, S., Fuchs, R.D., Santos, A.H. M., Centrais Hidro e Termelétricas, Ed. Edgard Blucher, 1983.
- Reis, L.B., Energia Elétrica para o desenvolvimento sustentável, EDUSP, 2001.
- La Rovere, E.L., Pinguelli Rosa, L.,Rodrigues, A.P., Economia & Tecnologia da Energia, Ed. Marco Zero, 1985.
- Eaton, J.R., Electric Power Transmission Systems, Prentice-Hall, 1972.
- Watanabe, E.H., Barbosa, P.G. et. al., Tecnologia Facts - Tutorial, SBA Controle & Automação, vol. 9 n. 1, jan/fev/mar/abr 1998.
- VindeI Hernandez, T.K., Uma proposta de integração da geração distribuída, por meio das usinas virtuais, ao sistema elétrico do estado de São Paulo, PPGE (dissertação), 2015
- Kalair A., Abas N., Khan N., Comparative study of HVAC and HVDC transmission systems, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 59 (2016)
- Souza, D.F., /uma avaliação do desempenho de motores elétricos de indução trifásicos comercializados no Brasil entre 1945-2016 e o impacto da legislação brasileira, PPGE (dissertação), 2018
- RENEWABLES 2015 GLOBAL STATUS REPORT, REN21
- SIGA – Sistema de Informações de Geração da ANEEL www.aneel.gov.br/siga
- MME, CEPEL, Manual de inventário hidroelétrico e bacias hidrográficas, 2007

PEN-5004 - Fundamentos Físicos
dos Processos Energéticos

147