
Máquinas de Fluxo

Prof. Dr. Emílio Carlos Nelli Silva

Escola Politécnica da USP
Departamento de Engenharia Mecatrônica e Sistemas
Mecânicos

Introdução: Máquinas de Transformação de Energia ²

Máquinas de transformação de energia, como o próprio nome sugere, modificam o tipo de energia disponível para uma forma utilizável (tendo em vista uma aplicação), o que implica em perdas

Classificação (forma como se realiza trabalho)

- Máquinas de Fluxo
- Máquinas volumétricas
- Máquinas especiais

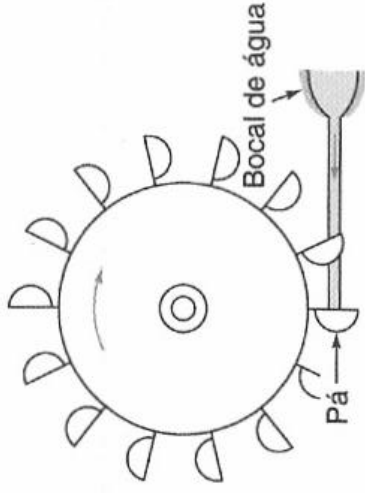
Introdução: Máquinas de Transformação de Energia

3

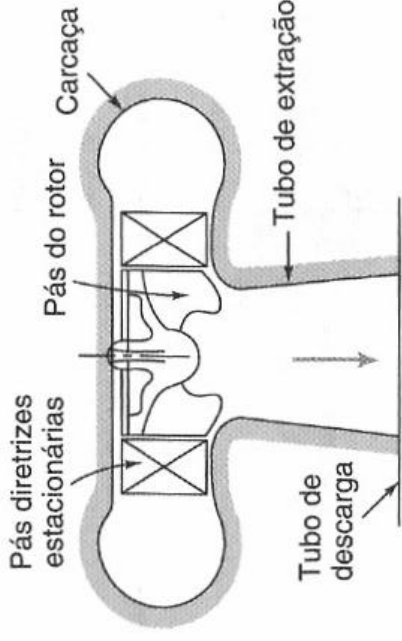
- **Máquinas volumétricas:**
 - A transferência de energia é feita por variações de volume que ocorrem devido ao movimento da fronteira na qual o fluido está confinado.
 - Estas podem ser rotativas como a bomba de engrenagens ou alternativas como o compressor de pistão.
- **Máquinas de Fluxo:**
 - Dispositivos fluidomecânicos que direcionam o fluxo com lâminas ou pás fixadas num elemento rotativo.
 - Em contraste com as máquinas de deslocamento positivo não há volume confinado numa turbomáquina.
 - Funcionam cedendo ou recebendo energia de um fluido em constante movimento.
- **Máquinas Especiais:**
 - Não se adequam às definições anteriores

Exemplos:

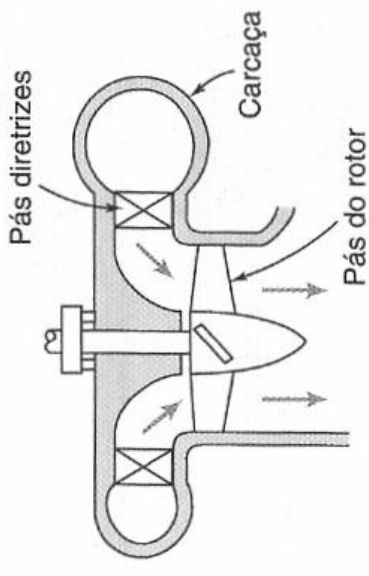
Máquinas de fluxo:



Turbina Pelton



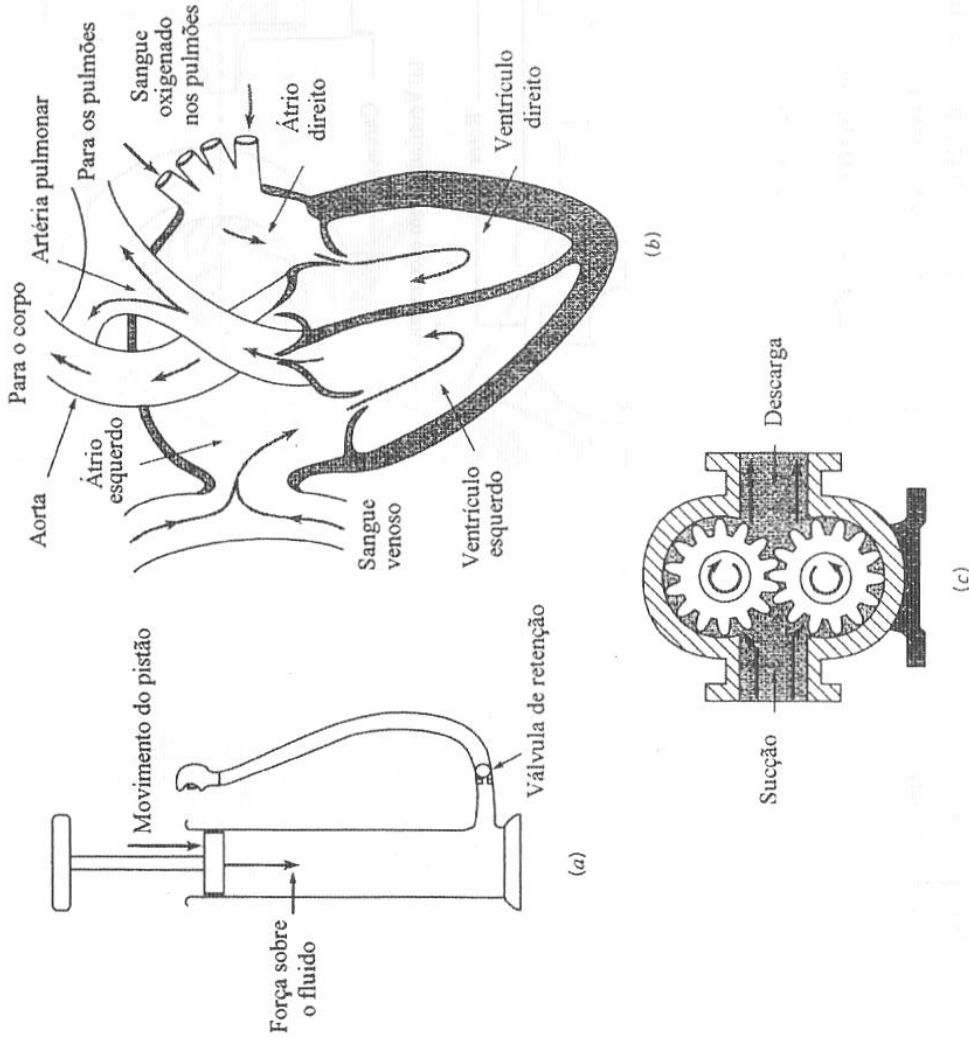
Turbina Francis



Turbina Kaplan

Exemplos:

Máquinas volumétricas:



(a) bomba de
encher pneus, (b)
coração humano,
(c) bomba de
engrenagens

Exemplos:

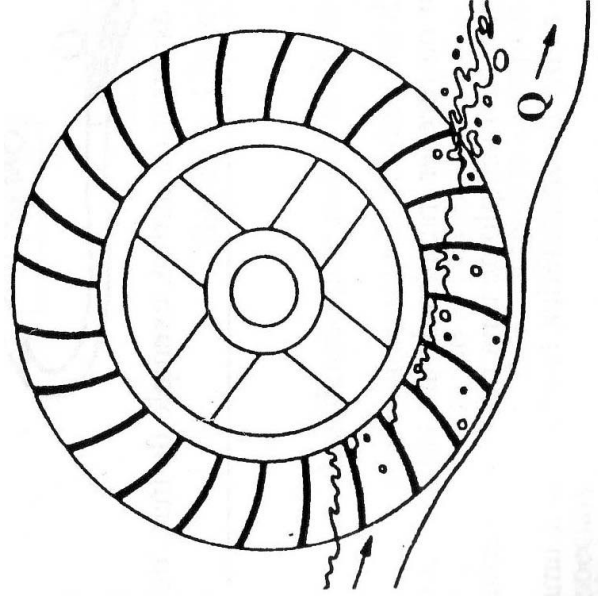
Máquinas especiais:



Rodas d'água de carregamento superior (acoplada a bomba, no caso)



Rodas d'água de carregamento inferior



Introdução: Máquinas de Transformação de Energia

7

Exemplos de máquinas de fluxo + fluidos de trabalho:

Fluido de trabalho	Máquina de fluxo
Líquido	turbina hidráulica e bomba centrífuga
Gás (neutro)	ventilador, turbocompressor
Vapor (água, freon, etc.)	turbina a vapor, turbocompressor frigorífico
Gás de combustão	turbina a gás, motor de reação

Exemplos de máquinas volumétricas + respectivos fluidos de trabalho:

Fluido de trabalho	Máquina volumétrica
Líquido	bomba de engrenagens, de cavidade progressiva, de parafuso
Gás (neutro)	compressor alternativo, compressor rotativo
Vapor (freon, amônia, etc.)	compressor alternativo, compressor rotativo
Gás de combustão	motor alternativo de pistão

Vantagens das máquinas de fluxo sobre as

volumétricas:

- Construção simples
- Elevada concentração de potência
- Modesto consumo de lubrificantes → redução considerável do custo de funcionamento e manutenção

Vantagens das volumétricas sobre as máquinas de

fluxo:

- Possibilidade de trabalhar em altas pressões e baixas vazões
- Possibilidade de trabalhar com fluidos de viscosidade elevada (acima de 10^{-3} m²/s, 1000 vezes a viscosidade cinemática da água)

Histórico: fonte de energia e técnica disponível

Fonte	Técnica de aproveitamento	Forma Social de aproveitamento	Época
Hidráulica	Rodas d'água	Artesãos nas cidades	História antiga
Eólica	Moinhos de vento		
Química	Máquina a vapor (WATT)	Industrialização	Do século 8 ao 21
	Motor a combustão interna	Desenvolvimento da sociedade industrializada	Séculos 18 e 19
Atômica	Usinas térmicas	Grupos empresariais	Século 20 e 21
			À partir de 1960

Introdução: Máquinas de Transformação de Energia

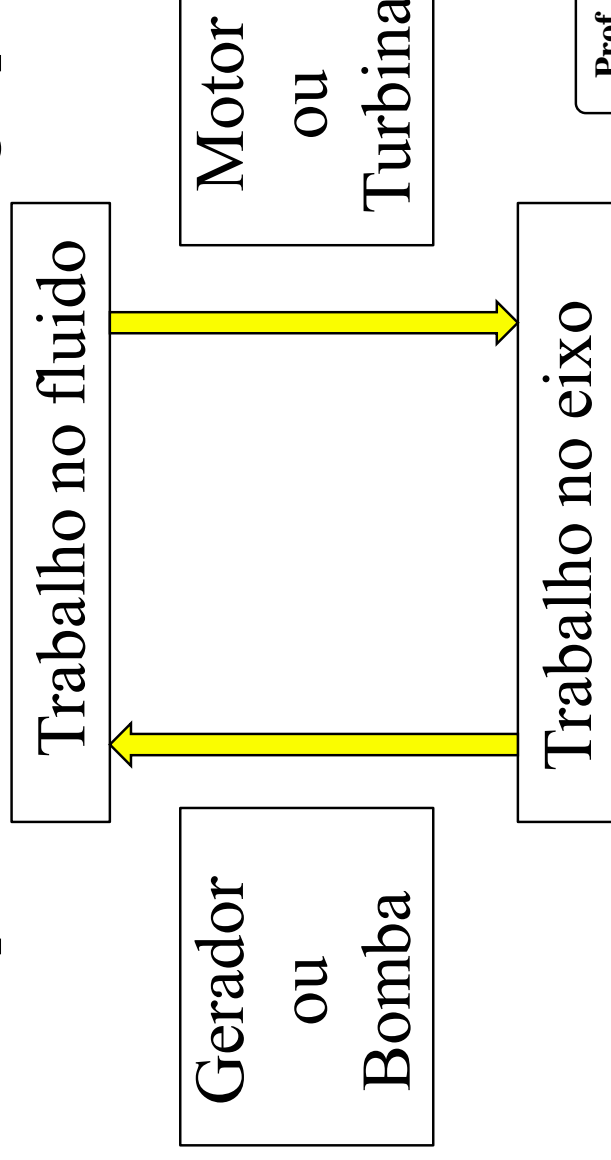
10

Pode-se separá-las em 2 grupos:

- Geradores: máquinas que transformam a energia recebida através de um eixo de uma fonte externa (elétrica, explosão) em energia mecânica, transferida a um fluido por intermédio de um rotor ou pistão, para realização de trabalho ou transporte

- Motores: máquinas que transformam a energia mecânica (potencial e/ou cinética) fornecida por fluido em escoamento a um rotor ou pistão, que por sua vez transfere a um eixo com o objetivo de realização de trabalho

Esquema da classificação em 2 grupos:



Prof. Dr. Emilio C. Nelli Silva

Exemplos considerando-se as duas classificações:

	Fluxo	Volumétricas	Especiais
Motor	Turbinas Hidráulicas, a vapor, a gás, eólicas	Motores de automóveis	Rodas d'água
Gerador	Bombas Centrifugas, Ventiladores	Bombas alternativas (ex: coração artificial)	Ejetores

Introdução: Máquinas de Transformação de Energia

12

Áreas de aplicação: pode haver superposição. Ex:

1. Para a compressão de gases são usados compressores de êmbolo e turbocompressores;
2. para a elevação de água servem as bombas de êmbolo e as bombas rotativas;
3. a turbina a gás faz concorrência com o motor de combustão interna;
4. o vapor produzido em uma caldeira pode ser usado para fornecer trabalho mecânico tanto através de uma turbina a vapor quanto através de uma máquina a vapor de êmbolo.

Desempate:

Vazão volumétrica	Potência
Máquinas de fluxo: vantajosas em grandes vazões	Altas potências: máquinas de fluxo (campo limitado inferiormente, em potência)
Máquinas Volumétricas: geralmente preferidas em pequenas vazões	Baixas potências: máquinas volumétricas

Características Construtivas:

- Pequeno número de partes componentes na máquina → simplificação da produção
- Realização de trabalho concentrada num único órgão, o rotor, na maioria dos casos único na máquina → simplifica operação
- Pequeno número de órgãos componentes e simplicidade → manutenção simples (exceção: turbinas de grande porte ~ 10m de diâmetro e mais de 400 toneladas)
- Portanto, sempre representam a primeira hipótese aventada no projeto de qualquer instalação

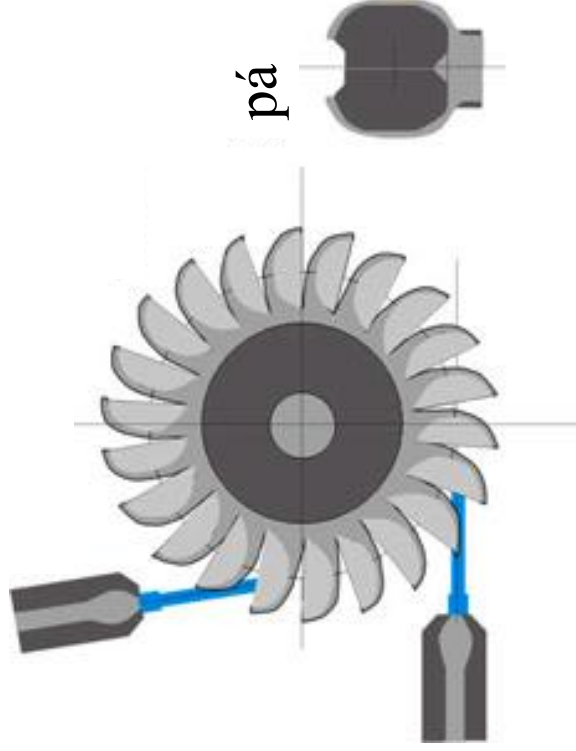
Máquinas de Fluxo

14

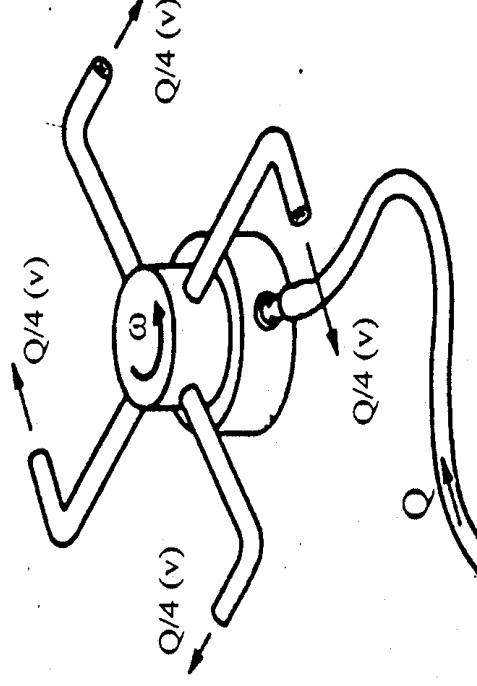
Princípio de operação:

- Trabalho envolvido, recebido ou cedido: consequência da variação de direção do escoamento relativo, provocada por pás adequadamente posicionadas no rotor da máquina → variação do momento da quantidade de movimento

Turbina Pelton:



Aspersor de jardim:



Prof. Dr. Emilio C. Nelli Silva

Exemplos:

- Turbinas hidráulicas
- Ventiladores
- Bombas Centrífugas
- Turbinas a vapor
- Turbocompressores
- Turbinas a gás
- Turbinas eólicas

Aplicações:

Turbinas (Motor):

- movimentar um outro equipamento mecânico rotativo:
 - bomba, compressor ou ventilador
- gerar de eletricidade: nesse caso, são ligadas a um gerador
- propulsão naval, ou aeronáutica.

Bombas (Gerador):

- transferência de fluidos líquidos de um local a outro:
 - saneamento básico
 - irrigação
 - edifícios residenciais
 - indústria em geral

Aplicações:

Turbinas a gás para propulsão de aviões (Motor):

- Operam segundo ciclo Brayton (ciclo ideal).
- Fabricantes: GE, Rolls-Royce...
- Vantagem: densidade de potência elevada com relação a motores de combustão interna
- Características: compressor de ar, câmara de combustão e turbina
- Gás: fluido de trabalho (não é o combustível)

- configuração 1: eixo movimentado pela turbina aciona compressor; propulsão: empuxo causado pelos gases resultantes da combustão
- configuração 2: eixo movimentado pela turbina acoplado a hélices



- turbina Rolls-Royce (otimizada para Airbus A350 XWB family, civil)

Máquinas de Fluxo

18

Grandezas associadas a máquinas de fluxo:

- Dimensionamento de máquinas de fluxo parte das condições de operação
- Grandezas associadas às máquinas de fluxo: relacionadas às condições de operação

Obs.: SI	Símbolo	Grandeza	Unidade	Aplicação
Unidades de Base	m	Massa	kg	
	L	Comprimento	m	
	t	Tempo	s	
	T	Temperatura	K	
Grandezas Principais	Y	Trabalho Específico	J/kg	Quaisquer fluidos
	H	Carga	M	Fluidos incompressíveis
	p	Pressão	kg/ms ²	Quaisquer fluidos
	h_u	Entalpia	J/kg	Quaisquer fluidos (reservada para máquinas térmicas)
	\dot{m}	Vazão mássica	Kg/s	Quaisquer fluidos
	Q	Vazão em volume	m ³ /s	Fluidos incompressíveis
	ω	Velocidade angular	rad/s	
	n	Rotação	rot/min	(SI - Exceção) Prof. Dr. Emilio C. Nelli Silva

Máquinas de Fluxo: Elementos Construtivos¹⁹

- Em todas as máquinas de fluxo → **elementos construtivos fundamentais** = fenômenos fluidomecânicos essenciais.
- Isolados ou em grupos
- São eles:
 - **Sistema Diretor**
 - **Rotor**
- Na literatura de Máquinas de Fluxo, propõe-se também a seguinte divisão:
 - Injetores
 - Difusores
 - Pás
- **Utilizaremos a primeira divisão**

Máquinas de Fluxo: Elementos Construtivos²⁰

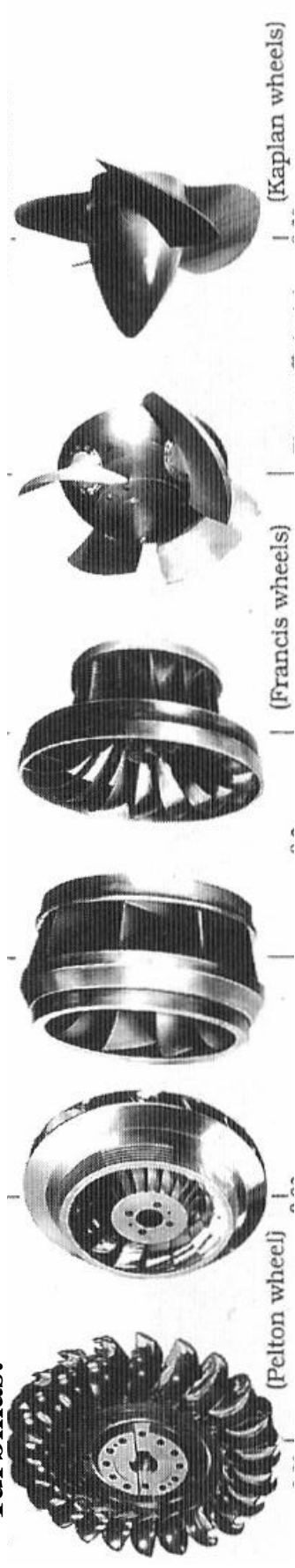
Rotor (impeller ou runner ou wheel):

- Elemento construtivo onde ocorre a transformação de energia mecânica em energia de fluido (bomba, compressor, etc.), ou energia de fluido em energia mecânica (turbina)
- Órgão principal de uma máquina de fluxo
- Constituído de um certo número de **pás** giratórias (blades)
- **Pás:**
 - Dividem o espaço em canais, por onde circula o fluido de trabalho
 - Interação com o fluido
- O **rotor** é um elemento móvel que vem sempre acoplado a um eixo, o qual atravessa o órgão de contenção da máquina, ou **carcaça**

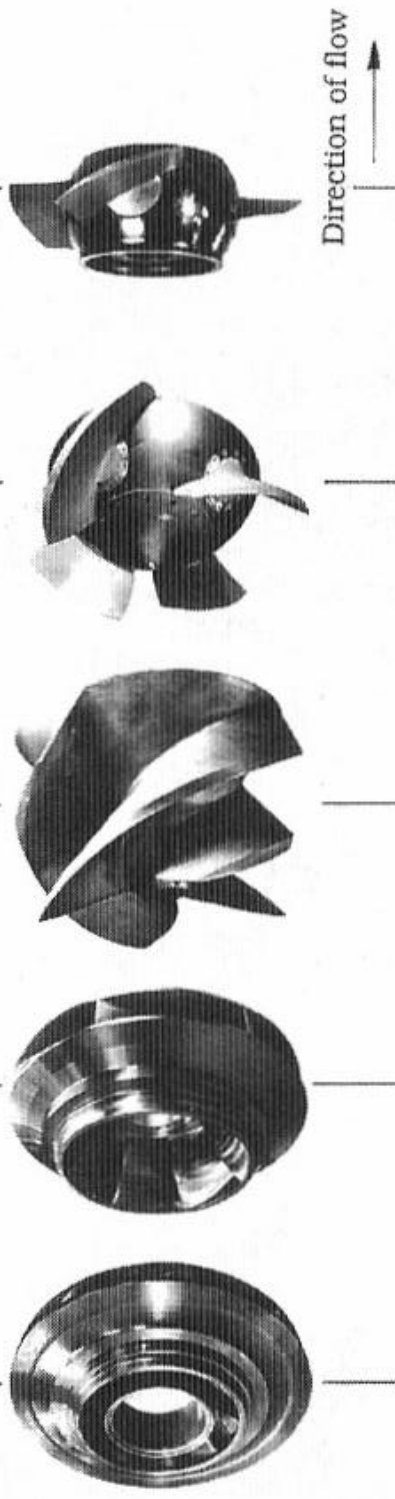
Máquinas de Fluxo: Elementos Construtivos²¹

Rotores - exemplos:

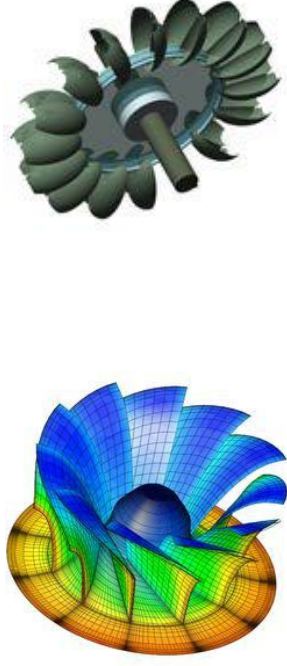
Turbinas:



Bombas:



Modelos Numéricos:



Máquinas de Fluxo: Elementos Construtivos²²

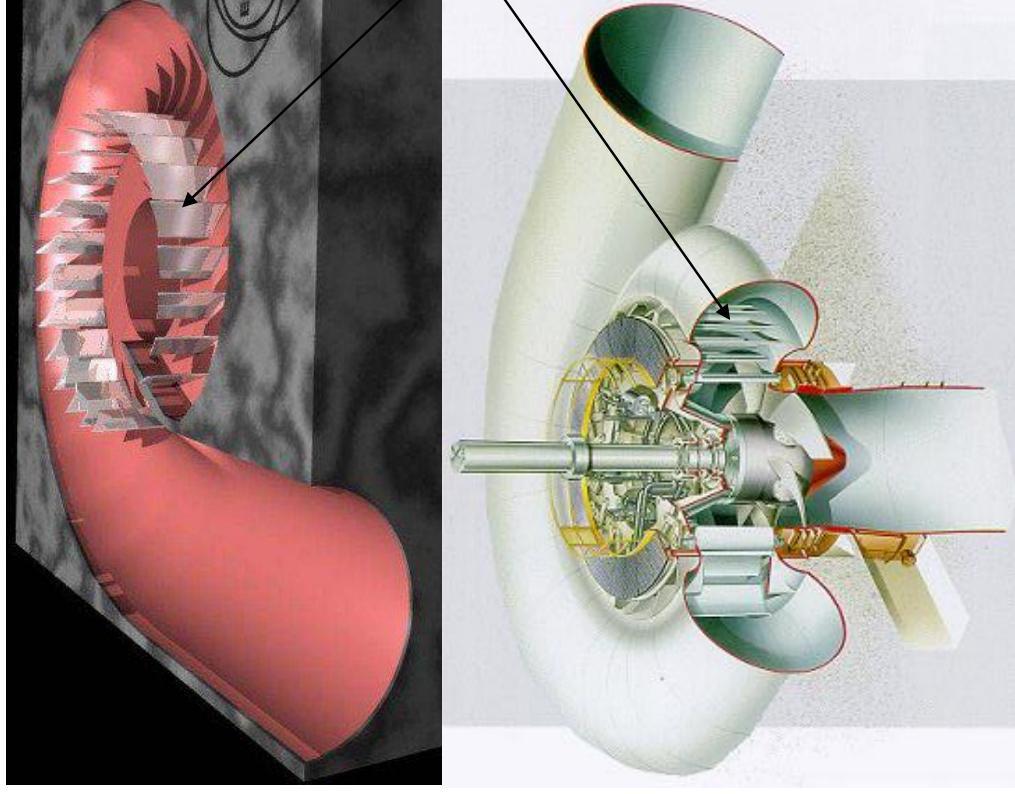
Sistema diretor:

- Funções:
 - coletar o fluido e dirigi-lo para um caminho determinado, reduzindo efeitos de choques
 - auxiliar na transformação de energia
- Formado pelas **pás diretrizes** e, via de regra, **caixas espirais**, dentre outros componentes
- **Caixas espirais:**
 - funcionam como **difusores**: essencialmente é um duto construído de tal modo que a pressão cresce no sentido do escoamento, reduzindo-se a energia cinética (e as perdas) - bombas
 - funcionam como **injetores**: o contrário dos **difusores** no que se refere ao seu funcionamento - turbinas
- Portanto: o funcionamento do **sistema diretor** depende muito do tipo de máquina de fluxo (algumas máquinas nem o possuem, como ventiladores comuns)

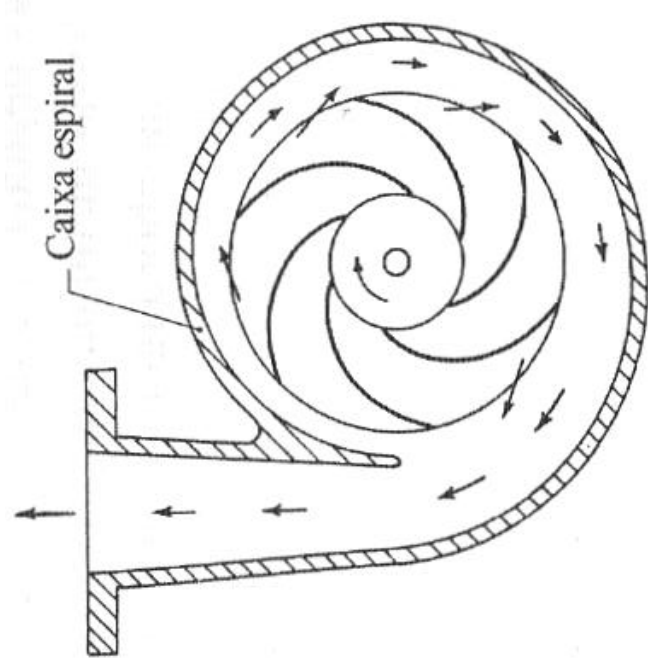
Máquinas de Fluxo: Elementos Construtivos²³

Sistema diretor – exemplos:

- Em turbinas:



- Em bombas:



Classificação:

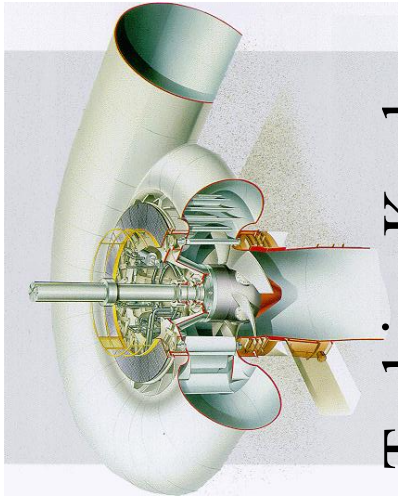
- Segundo direção de conversão de energia (motor = turbina e gerador = bomba)
- Segundo a forma da energia aproveitada (máquinas de ação e máquinas de reação)
- Segundo a trajetória do fluido no rotor (radial, axial, misto)
- Primeira classificação: já vista
 - ex: motor - Turbinas hidráulicas, turbinas a vapor, turbinas a gás, turbinas eólicas.
 - ex: gerador - Bombas centrífugas, ventiladores, compressores centrífugos

Máquinas de Fluxo: Classificação

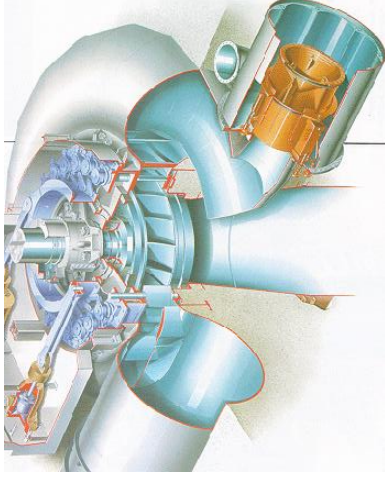
25

- Segundo direção de conversão de energia: Exemplos

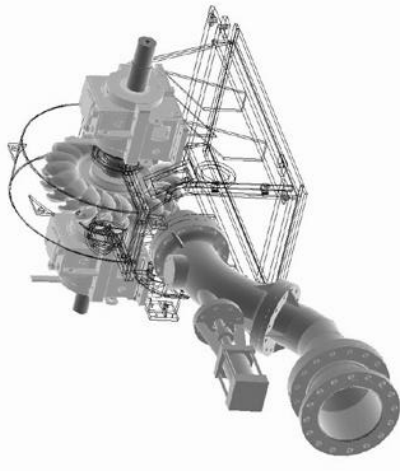
Turbinas (Motor):



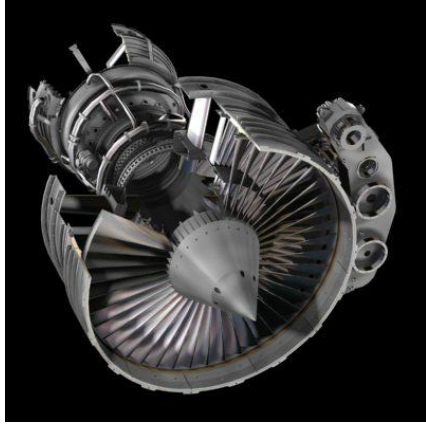
Turbina Kaplan



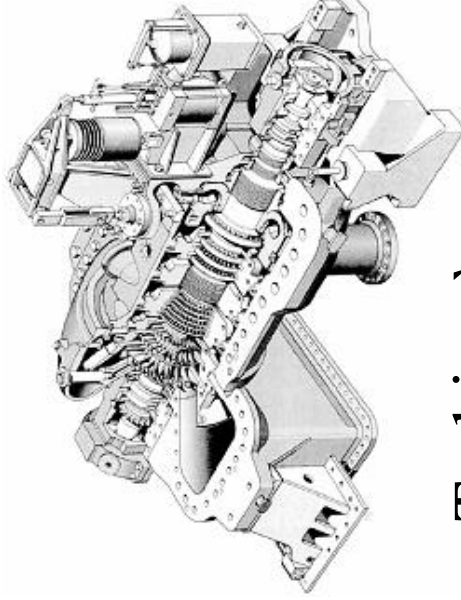
Turbina Francis



Turbina Pelton



Turbina a gás



Turbina à vapor



Turbinas eólicas

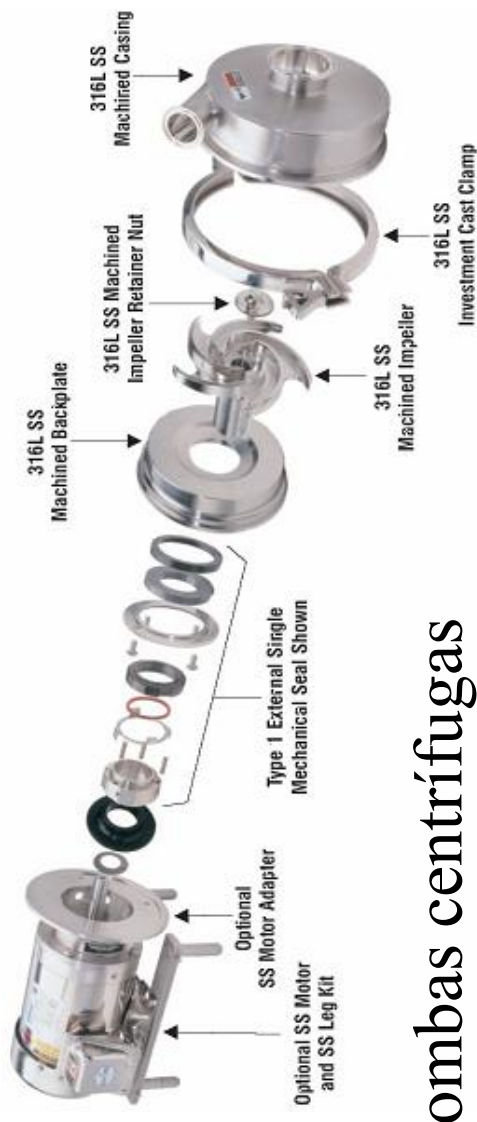
Prof. Dr. Emilio C. Nelli Silva

Máquinas de Fluxo: Classificação

26

- Segundo direção de conversão de energia: Exemplos

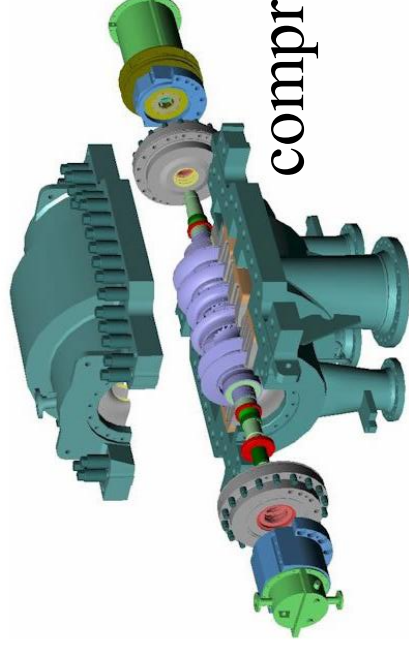
Bombas (Gerador):



Bombas centrífugas



Ventiladores axiais



compressor

Prof. Dr. Emilio C. Nelli Silva

Máquinas de Fluxo: Classificação

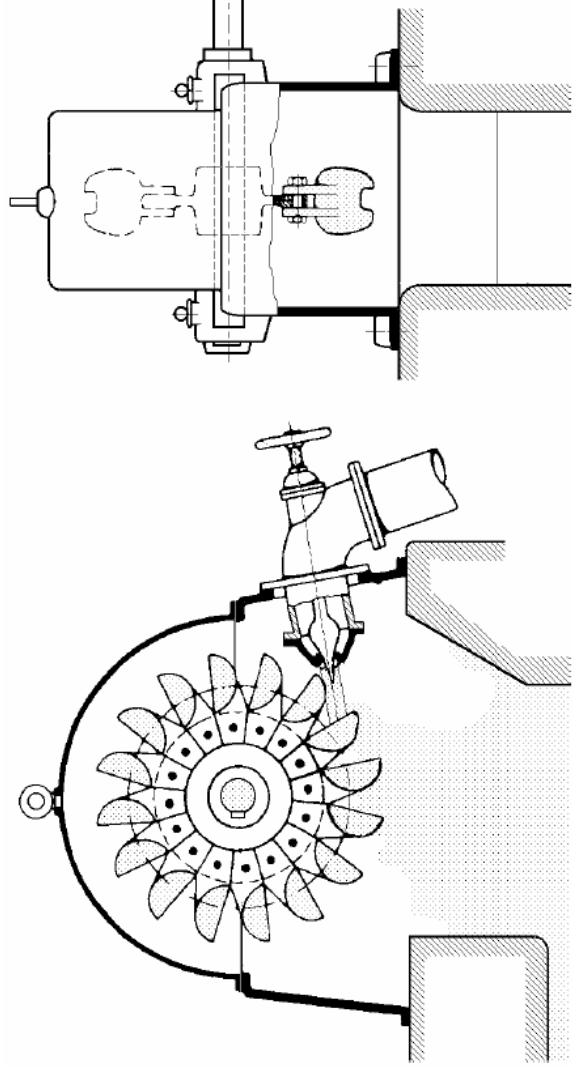
27

- Segundo a forma da energia aproveitada
- Máquinas de fluxo de ação:
 - Máquinas em que o trabalho **não** está associado à variação de pressão no rotor, não ocorrendo (a variação) na máquina
 - Exemplo: turbina Pelton: segundo norma NBR 6445, turbina de ação na qual o fluxo de água incide sob a forma de jato sobre o rotor que possui pás em forma de duas conchas.
- Máquinas de fluxo de reação:
 - Máquinas em que o trabalho está associado à variação de pressão no rotor
 - Exemplo: turbina Francis: segundo norma NBR 6445, turbina de reação na qual o fluxo de água penetra radialmente no distribuidor e no rotor, no qual as pás são fixas.
 - Outros: turbinas Kaplan e todas as bombas hidráulicas de fluxo
 - obs.: em ambos os casos, ocorre variação da energia cinética!!

Máquinas de Fluxo: Classificação

28

- Segundo a forma da energia aproveitada
- Máquinas de fluxo de ação: exemplo



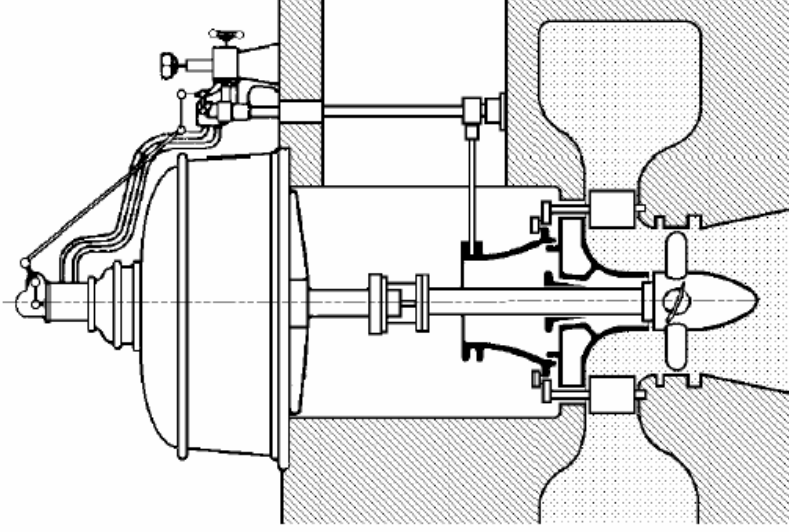
Turbina Pelton de 1 jato

- observação: as máquinas especiais citadas no início podem ser classificadas ou caracterizadas como máquinas de ação

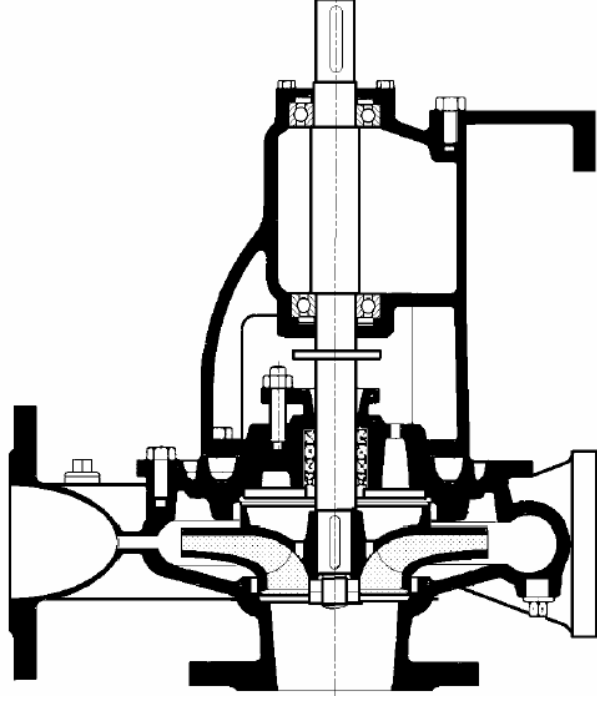
Máquinas de Fluxo: Classificação

29

- Segundo a forma da energia aproveitada
- Máquinas de fluxo de reação: exemplo



Turbina Kaplan



Bomba centrífuga

Máquinas de Fluxo: Classificação

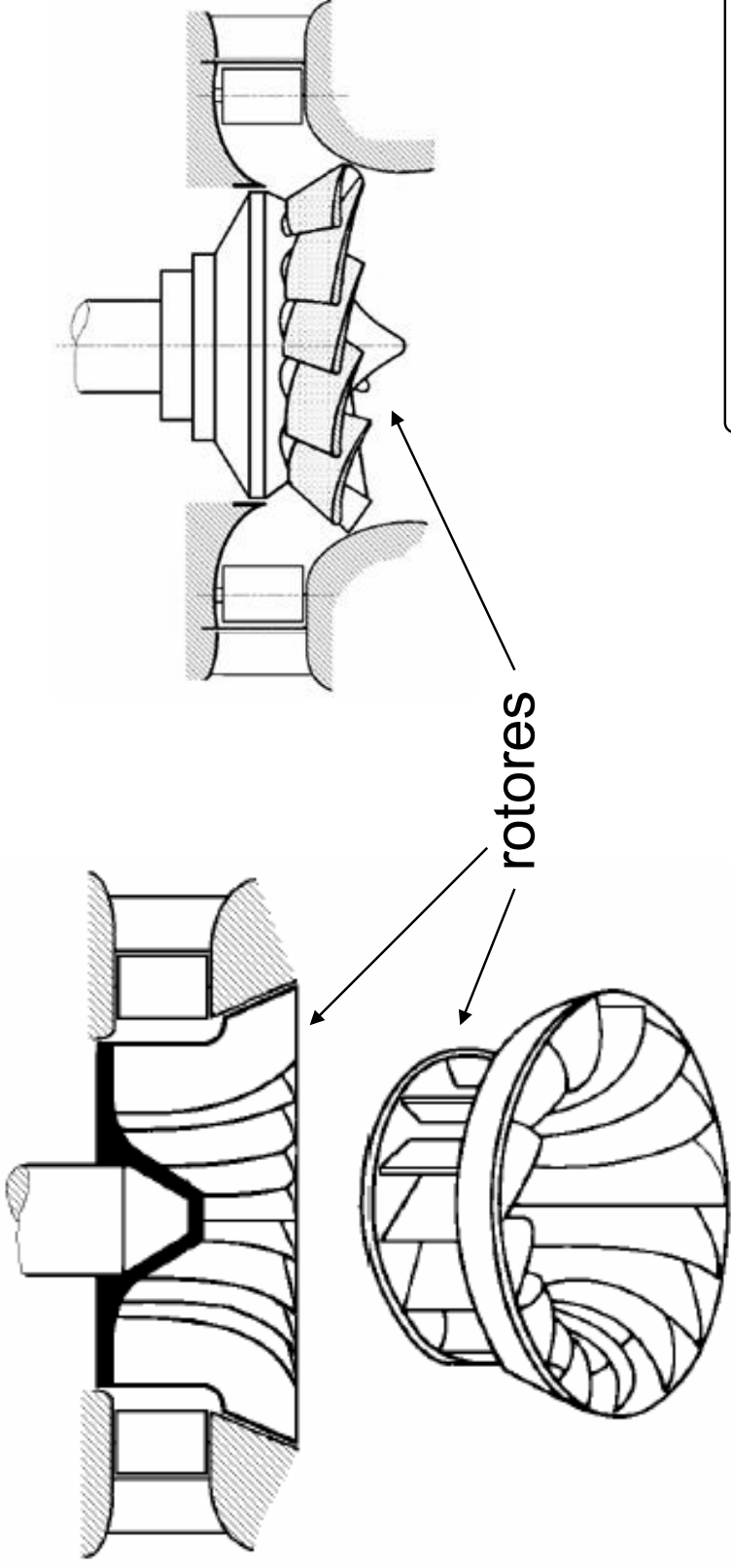
30

- Segundo a trajetória do fluido no rotor
- Máquinas de fluxo Radial
 - O escoamento do fluido através do rotor percorre uma trajetória predominantemente radial (perpendicular ao eixo do rotor).
 - Bombas centrífugas, ventiladores centrífugos e a turbina Francis lenta
- Máquinas de fluxo Axial
 - O escoamento do fluido através do rotor ocorre numa direção paralela ao eixo do rotor
 - Bombas axiais, ventiladores axiais e a turbinas hidráulicas do tipo Hélice e Kaplan
- Máquinas de fluxo Diagonal, ou de fluxo Misto
 - Quando o escoamento não é axial nem radial -> fluxo misto, com as partículas de fluido percorrendo o rotor numa trajetória situada sobre uma superfície aproximadamente cônica
 - Turbina Francis rápida e a turbina hidráulica Dériaz.
- Máquinas de Fluxo Tangencial
 - O jato líquido proveniente do injetor incide tangencialmente sobre o rotor – turbina Pelton

Máquinas de Fluxo: Classificação

31

- Segundo a trajetória do fluido no motor
 - Máquinas de fluxo radial
 - Turbina Francis Lenta
 - Máquinas de fluxo misto
 - Turbina Francis Rápida



Máquinas de Fluxo: Resumo

32

- Máquinas de fluxo:
 - **Motor** - energia oferecida pela natureza → trabalho mecânico (ex: turbina)
 - **Gerador** – trabalho mecânico → energia a um fluido → transporte (ex: bomba)
- Componentes principais: rotor e sistema diretor
- Classificação:
 - Motor e Gerador
 - Máquinas de ação e reação
 - Máquinas de fluxo radial, axial, misto e tangencial

1. Equações Fundamentais das máquinas de fluxo:
 - Equações de energia e trabalho
2. Perdas e rendimentos em máquinas de fluxo
 - Definições dos rendimentos e utilização
3. Teoria de Semelhança aplicada as máquinas de fluxo
 - Finalidade, hipóteses e utilização
4. Cavitação
 - Explicação do fenômeno e ações para minimização dos seus efeitos
5. Turbinas hidráulicas (Francis, Kaplan, Pelton)
 - Descrição detalhada dos tipos de turbina e suas peculiaridades

6. Sistemas de Recalque
 - Definição e características funcionais
7. Cálculo de Turbinas
 - Parâmetros utilizados e exemplo
8. Seleção de Bombas
 - Parâmetros utilizados e exemplo

Máquinas de Fluxo: Fabricantes

35

- Fabricantes de bombas
 - Schneider: <http://www.schneider.ind.br>
 - Sulzer: <http://www.sulzer.com> (Suíça) (tem no Brasil)
 - Grundfos: <http://www.grundfos.com> (tem no Brasil)
 - PACO: <http://www.paco-pumps.com>
 - KSB: <http://www.ksb.com> (tem no Brasil)
 - GUSHER: <http://www.gusher.com/> (EUA)
- Muitas auxiliam na escolha das bombas, com softwares, métodos descritos nos sites...

Máquinas de Fluxo: Fabricantes

36

- Fabricantes de turbinas
 - Betta: <http://www.bettahidroturbinas.com.br>
 - Alstom: <http://www.alstom.com> (França - Brasil)
 - Grupo Cemig: <http://www.cemig.com.br>
 - Dedini: www.codistil.com.br
 - Andritz: <http://www.andritz.com> (Áustria)
 - Voith: <http://www.saopaulo.voith.com> (Alemanha - Brasil)
 - Hitachi: <http://www.hitachipowersystems.us> (steam turbines)
 - Toshiba: <http://www3.toshiba.co.jp> (hidráulicas, gás)
 - Rolls-Royce: <http://www.rolls-royce.com> (gás – aviões, helicópteros, etc.)

Máquinas de Fluxo: Fabricantes

37

- Fabricantes de outros dispositivos
 - ventiladores industriais:
 - <http://www.otam.com.br/>
 - <http://www.aircontrolindustries.com/>
 - <http://www.canadianblower.com/>
 - <http://www.robinsonfans.com/>
 - turbinas eólicas:
 - <http://www.wobben.com.br/>
 - <http://www.alstom.com>
 - obs.: www.schulz.com.br/, compressores, máquinas volumétricas