

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

LUCAS LOSINSKAS

**SISTEMA DE CONVERSÃO DE ENERGIA EM ESCALA
REDUZIDA: MODELAGEM 3D, SIMULAÇÃO CFD E
PROJETO DE UM MÓDULO EXPERIMENTAL DE
MÁQUINA DE FLUXO**

**Bagé
2020**

LUCAS LOSINSKAS

**SISTEMA DE CONVERSÃO DE ENERGIA EM ESCALA
REDUZIDA: MODELAGEM 3D, SIMULAÇÃO CFD E
PROJETO DE UM MÓDULO EXPERIMENTAL DE
MÁQUINA DE FLUXO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao curso de Bacharelado em Engenharia
de Energia como requisito parcial para a
obtenção do grau de Bacharel em Engenharia
de Energia.

Orientadora: Cristine Machado Schwanke
Co-orientador:

**Bagé
2020**

— Losinskas, Lucas

SISTEMA DE CONVERSÃO DE ENERGIA EM ESCALA REDUZIDA: MODELAGEM 3D, SIMULAÇÃO CFD E PROJETO DE UM MÓDULO EXPERIMENTAL DE MÁQUINA DE FLUXO / Lucas Losinskas. – fevereiro, 2020.

46 f.: il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Pampa, Campus Bagé, Engenharia de Energia, 2020.

“Orientação: Cristine Machado Schwanke; Co-orientação: ”.

1. Turbina Francis. 2. Modelamento de Turbina Hidráulica. 3. Bancada didática. I. Título.

LUCAS LOSINSKAS

**SISTEMA DE CONVERSÃO DE ENERGIA EM ESCALA
REDUZIDA: MODELAGEM 3D, SIMULAÇÃO CFD E PRO-
JETO DE UM MÓDULO EXPERIMENTAL DE MÁQUINA DE
FLUXO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao curso de Bacharelado em Engenharia
de Energia como requisito parcial para a
obtenção do grau de Bacharel em Engenharia
de Energia.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 12 de
dezembro de 2019.

Banca examinadora:

Prof^ª. Dr^a. Cristine Machado Schwanke
Orientadora

Prof. Dr.
Universidade Federal do Pampa

Prof. Dr.
Universidade Federal do Pampa

Dr.
EMBRAPA Pecuária Sul

Dedico este trabalho ao meu Pais e amigos e colegas.

AGRADECIMENTO

Agradeço à todos que me ajudaram até o momento

“If I have seen farther than others, it is
because I stood on the shoulders of gi-
ants.”

— Sir Isaac Newton

RESUMO

Este documento é um exemplo de como formatar documentos para os cursos de graduação e pós-graduação da UNIPAMPA usando as classes \LaTeX disponibilizadas pelo UTUG e modificadas pela Prof. Ana Paula Lüdtke Ferreira, para atender às exigências expressas no manual de normalização da UNIPAMPA. Ao mesmo tempo, pode servir de consulta para comandos mais genéricos. *O texto do resumo não deve conter mais do que 500 palavras, mas também não deve ser tão curto quanto esse.*

Palavras-chave: Turbina Francis. Modelamento de Turbina Hidráulica. Bancada didática.

ABSTRACT

Resumo em inglês

Keywords: Francis Turbine, Hydraulic Turbine Modeling, didactic bench.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Formação de implosão das bolhas no tubo de sucção de uma turbina hidráulica.....	24
Figura 2	Cavitação do dorso de um perfil de máquina de fluxo axial.....	25
Figura 3	Máquinas Semelhantes	27
Figura 4	Bomba operando em série	31
Figura 5	Gráfico de associação em série altura de queda pela vazão.....	31
Figura 6	Diagrama de associação em paralelo.....	32
Figura 7	Gráfico de associação em série altura de queda pela vazão.....	32
Figura 8	Gráfico da função impulso.....	34
Figura 9	Esquema de sistema de controle de malha aberta.....	35
Figura 10	Diagrama do sistema de controle com a máquina Síncrona.....	35
Figura 11	Sistema diretor da turbina Francis	36
Figura 12	Circuito interno de inversor de frequência	37
Figura 13	Forma de onda quase quadrada trifásica.....	38
Figura 14	Circuito equivalente de máquinas síncronas.....	39
Figura 15	a) Diagrama de bloco de um sistema de controle de conjugado por um campo orientado para um motor de indução. b) Diagrama de blocos de uma malha de controle de velocidade para o motor de indução, constituída em torno de um sistema de controle de conjugado	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Categoria dos Rotores Francis	30
Tabela 2	Tabela de ganhos	37

LISTA DE SÍMBOLOS

ANELL Agência Nacional de Energia Elétrica

PID Proporcional, Integral e derivativo

RPM Rotações por minutos

T Torque

Q Vazão Volumétrica

\dot{m} Fluxo de massa

n Rotação

P Pressão estática

n_{qA} Rotação específica

∇ Operador Nabla

ω Velocidade angular

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Justificativa	15
1.2 Objetivos	16
1.2.1 Objetivo geral.....	16
1.2.2 Objetivo específico.....	16
2 REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1 Máquinas de Fluxo.....	18
2.1.1 Classificação das máquinas de fluxo	18
2.1.2 Elementos Principais.....	19
2.2 Princípios físicos.....	20
2.2.1 Linha de corrente	23
2.2.2 Análise dimensional e de semelhança.....	24
2.2.3 Cavitação.....	24
2.2.4 Teoria das semelhantes	25
2.2.5 Empuxos Axial e Radial	27
2.2.6 Empuxo Radial.....	27
2.2.7 Teoria da asa de sustentação	28
2.2.8 Limitações de projetos	28
2.2.9 Influência da forma da pá (impeller blade shape).....	28
2.3 Turbinas Hidráulicas	28
2.3.1 Tipos de Turbinas.....	29
2.3.2 Turbina de Ação.....	29
2.3.3 Turbina a Reação	29
2.3.4 Escolha do Tipo de Turbina	29
2.4 Caso do Estudo: Turbina hidráulica do Tipo Francis.....	30
2.4.1 Componentes de uma turbina Francis.....	30
2.4.2 Funcionamento de uma Turbina	30
2.5 Bombas Industriais	30
2.5.1 Classificação de Bombas.....	30
2.5.2 Associação em serie.....	30
2.5.3 Associação em paralelo.....	32
2.6 Caso do Estudo: Bombas Centrífuga.....	33
2.6.1 Projeto de Rotores.....	33
2.7 Sistema de controle	34
2.7.1 Estratégia de controle simplificado.....	34
2.7.2 Sistema de controle da Bancada	35
2.7.3 Sistema de controle de Turbina Francis.....	35
2.7.4 Proposta de um controlador PID e Preditor de Smith.....	36
2.7.5 Inversores	37
2.8 Gerador Síncrono.....	38

2.9 Controle de Motores de Indução	38
2.10 Modelagem computacional em CFD de máquinas de fluido.....	39
2.11 Modelagem e impressão 3D.....	41
3 METODOLOGIA	42
3.1 Roteiro de cálculo de um rotor hidráulico da Turbina Francis.....	42
REFERÊNCIAS.....	43
GLOSSÁRIO.....	44
APÊNDICE A — NOME DO APÊNDICE	45
ANEXO A — NOME DO ANEXO	46

1 INTRODUÇÃO

Ao longo das últimas décadas o setor elétrico vem enfrentando problemas entre a demanda e o fornecimento de energia elétrica. Passando por crises e ocorrências de racionamento o que freiam o crescimento econômico durante esse período. Os custos de implantação de uma usina de pequeno porte (PCH até 30.000kW), é muito alto em comparação as outras usinas de energias renováveis, por isso tem uma dificuldade maior para a implantação no mercado pois tem dificuldade em competir economicamente com as formas tradicionais de geração de energia.

Dentro desse contexto, desde cedo, o Estado Brasileiro desenvolveu programas que visavam a viabilização de geração a partir de pequenos potenciais e de fontes alternativas de energia. Um dos primeiros esforços nesse sentido foi a publicação da Portaria nº 109, de 24 de novembro de 1982, do Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE). Esta portaria considerava a necessidade de incentivar o aproveitamento de fontes nacionais de energia renovável e a conveniência de serem criadas condições propícias ao desenvolvimento de um Programa Nacional de Pequenas Centrais Hidroelétricas. (HOLDER, 2005).

Neste mesmo sentido, o estudo de modelos isolados através de Microcentrais Hidrelétricas como uma alternativa simples e viável ao fornecimento de energia a comunidades rurais isoladas, dando destaque ao Programa de Universalização Luz para Todos (MACHADO, 2003).

No Brasil, mesmo com os incentivos há uma dificuldade na área tecnológica, pois geralmente o serviço de dimensionamento do rotor de uma turbina hidráulica é terceirizado, as empresas brasileiras só coletam a altura e vazão da área a ser implantada, e enviam a Europa para dimensionar o rotor. Entretanto, com a tecnologia computacional e de prototipagem em constantes avanços, tornou-se cada vez mais rápido fazer cálculos precisos de projeto e simular a operação de uma turbina, facilitando a prototipagem de sistemas complexos com cálculos e

modelos precisos, através da ferramenta de impressão 3D com baixo custo, facilitando a fabricação de modelos em escalas, bem como fazer ensaios em laboratório, criando protótipos em escala de dimensões mais próximas possíveis a do modelo.

1.1 Justificativa

Os estágios iniciais do desenvolvimento de uma turbina são os mais importantes, pois nesta fase é fácil fazer modificações e os custos são menores em comparação com adequações em campo, pois há uma dificuldade maior.

Com a prototipagem rápida e precisa, o modelo em escala pode ser fabricado com uma agilidade podendo ser feito diversas modificações, ter um projeto mais eficiente, com a facilidade de inovar ou modificar soluções encontradas no mercado.

No Brasil há programas que incentivam a instalações de PCH e MCH, mas há poucas empresas que fazem o dimensionamento de rotores de turbinas no Brasil e levantamento de curvas de desempenho. Portanto, este projeto de trabalho que foi desenvolvido justifica-se, devido a possibilidade de se dimensionar, modelar e fabricar o protótipo de um modelo reduzido de uma turbina hidráulica com rotor do tipo Francis, com finalidade de se analisar os diversos parâmetros construtivos envolvidos através da modelagem e prototipagem com impressora 3D.

Projetar uma bancada didática onde será possível o professor apresentar vários conceitos e físicos de sistemas elétrico, conceitos de sistema de controle aplicar diferentes métodos de controle e principalmente levantar as curvas de desempenho de bombas e turbinas.

1.2 Objetivos

Projetar e desenvolver uma bancada didática para a simulação máquinas de fluido para ensaios de bombas e turbina do tipo Francis.

Criação do sistema de controle da bancada para simular as diferentes técnicas de controle da turbina.

Criar um ambiente de simulação do bancada.

1.2.1 Objetivo geral

O projeto envolve o dimensionamento e a modelagem em software Solidworks, fabricação por impressão 3D e ensaio experimentais de um modelo reduzido de uma turbina com rotor do tipo Francis.

O projeto envolve o dimensionamento, projeto e a construção de uma bancada didática controlada por aplicativos, para ensaio experimentais de um modelo reduzido de uma turbina com rotor Francis e de duas bombas centrífugas, onde poderá levantar as curvas de desempenho de ambas serie ou paralelo com o controle de velocidade do rotor, onde esses dados serão exportado para o aplicativo e plotando essas curvas.

1.2.2 Objetivo específico

1. Através do modelo de turbina Francis pré-determinado e remodelado buscase a melhoria do mesmo.
2. Avaliar a viabilidade de construção de um modelo geométrico e modelamento de uma turbina 3D de um modelo reduzido de uma turbina Francis.
3. Desenhos de projetos.

4. Desenvolver *softwar* e o *hardware* para o controle da bancada didática
5. Dimensionamento de uma turbina hidráulica com o rotor do tipo Francis, onde irá acionar um gerador elétrico síncrono ou de corrente contínua disponível no laboratório da UNIPAMPA Bagé, onde ela será acionada por 2 bombas centrífugas controladas por um inversor.

Daniel Bernoulli durante o século XVIII lançou os fundamentos da hidrodinâmica e Leonard Euler inventou a roda de reação com distribuidor fixo, que é considerada uma das principais precursoras da turbina atual. Porém somente no século XIX, o termo turbina apareceu pela primeira vez durante os estudos do francês Claude Burdin. (MACINTYRE, 1983).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Máquinas de Fluxo

Uma máquina de fluxo pode ser entendida como um transformador de energia, onde há uma troca de energia entre o fluido e um sistema mecânico (Souza, 2011) e em momento algum o fluido fica confinado.

São máquinas onde ocorre a transformação de energia, a do fluido em energia mecânica ou o caminho inverso dependendo de como a máquina está operando, onde o fluido não fica em nenhum momento confinado.

2.1.1 Classificação das máquinas de fluxo

Entre os diferentes critérios que podem ser utilizados para classificar as máquinas de fluxo, podem-se citar os seguintes (HENN, 2006): Segundo a direção da conversão de energia; Segundo a forma dos canais entre as pás do rotor; Segundo a trajetória do fluido no rotor.

A direção da conversão de energia as máquinas de fluxo são divididas em duas categorias, máquinas de fluxo motoras, as quais transformam energia de fluido em energia mecânica, ou seja, utiliza-se da energia oriunda da hidráulica ou térmica para fornecer trabalho mecânico; e máquinas de fluxo geradoras, que recebendo o trabalho mecânico de um meio externo e o transformam em energia hidráulica ou térmica de pressão. A forma dos canais entre as pás do rotor as máquinas de fluxo são subdivididas em máquinas de ação e reação. Nas máquinas de ação, a função dos canais é simplesmente servir de guia ou desviadores de fluxo do fluido, não havendo variação da pressão do fluido que passa pelo rotor. Nas máquinas de reação, a função dos canais é variar a pressão do fluido, dependendo da transformação de energia podem ser chamadas de turbinas ou bombas (Henn,

2006). No caso das turbinas há uma redução da pressão, já nas bombas há um aumento da pressão do fluido que passa através do rotor. A trajetória do fluido no rotor encontramos as máquinas de fluxo radial, nas quais o fluido percorre uma trajetória predominantemente radial ao eixo do rotor. De fluxo axial, onde o fluido percorre o caminho paralelamente ao eixo do rotor. De fluxo tangencial, sendo que o fluido escoar de forma tangencial ao rotor, geralmente proveniente de um jato injetor como no caso das turbinas Pelton. E também há situações onde o fluido escoar de uma forma que não é axial ou radial, neste caso, denomina-se fluxo misto, diagonal ou semi-axial, onde o fluido percorre o rotor em um sentido cônico.

2.1.2 Elementos Principais

De acordo com Henn (2006) a máquina de fluxo tem como elementos principais: a carcaça e os elementos construtivos, na qual ocorre os fenômenos fluido dinâmicos que são o rotor e o sistema diretor:

- O rotor é o órgão principal e é nele que ocorre a transformação de energia mecânica em energia de fluido, ou energia de fluido em energia mecânica. É constituído geralmente por um número de pás giratórias por onde circula o fluido de trabalho;
- O sistema diretor possui a função de coletar o fluido e dirigi-lo para um caminho determinado. Muitas vezes essa função é acompanhada da função de transformador de energia. Na saída do sistema diretor de alguns sistemas é fundamental a presença de um difusor que transforma a energia de velocidade do fluido em energia de pressão e em outras turbinas, como a Pelton, o sistema diretor é um injetor, que transforma a energia de pressão do fluido em energia de velocidade, a qual irá movimentar as pás do rotor.

2.2 Princípios físicos

O projeto se baseia em cinco princípios básicos da mecânica que regem o sistema em regime permanente em máquinas de fluxo:

Conservação de Massa - Onde a massa do fluxo que entra na máquina é igual a massa que saem do sistema dada pela seguinte equação:

$$\sum \dot{m}_1 = \sum \dot{m}_2 \rightarrow \dot{m} = \rho_1 C_1 A_1 = \rho_2 C_2 A_2 \quad (1)$$

Onde índice 1 é a entrada e 2 é a saída temos:

\dot{m} = Vazão mássica $\left[\frac{kg}{s}\right]$;

ρ = massa específica $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$;

C = Velocidade do fluido $\left[\frac{m}{s}\right]$;

A = Secção transversal $[m^2]$.

O que podemos abrir a equações em sua forma diferencial dada sua variação em um volume:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \left[\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \right] = 0 \quad (2)$$

A primeira lei da Termodinâmica estabelece que a variação de energia de um fluido através de um processo, é igual a diferença entre o calor e o trabalho transferido entre o fluido e o meio. No caso do escoamento em regime permanente, pode ser demonstrado o balanço de energia para um volume de controle com uma entrada e uma saída é dado por: (Carrilho, 2010):

$$E = \frac{\dot{Q}}{\dot{m}} - \frac{\dot{W}}{\dot{m}} = (h_2 - h_1) + \frac{1}{2}(C_2^2 - C_1^2) + g(z_2 - z_1) \quad (3)$$

Onde o índice 1 é a entrada e o índice 2 é a saída temos:

\dot{W} = potência da turbo máquina kW;

\dot{Q} = fluxo de calor $\left[\frac{kJ}{s}\right]$;

$h = \text{entalpia} \left[\frac{kJ}{kg} \right];$

$z = \text{altura } m;$

$g = \text{gravidade} \left[\frac{m}{s^2} \right].$

Conservação de Energia - Onde a energia contida no fluido que entra no sistema é igual a energia do fluido que sai do sistema dada pela seguinte equação (Zulcy, 2011):

$$\sum E_{e_i} = \sum E_{s_j} \quad (4)$$

$$[Energia \text{ que recebe}] - [Energia \text{ que entrega}] = [Variação do sistema]$$

Onde aplicando as grandezas entre a entrada e a saída da turbina temos a seguinte equação:

$$q - Y = u_s - u_e + p_s v_s - p_e v_e + \frac{1}{2}(c_s^2 - c_e^2) + g(z_s - z_e) \quad (5)$$

E a equação de conservação de energia na forma diferencial é:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \right] + \nabla \cdot \frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) V \right] = & pq + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \frac{\partial(u p)}{\partial x} - \frac{\partial(v p)}{\partial y} - \frac{\partial(w p)}{\partial z} + \frac{\partial(u \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u \tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u \tau_{zx})}{\partial z} \\ & + \frac{\partial(v \tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v \tau_{xz})}{\partial z} + \frac{\partial(w \tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w \tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w \tau_{zz})}{\partial z} + \rho f \cdot V \end{aligned} \quad (6)$$

Conservação de Quantidade de Movimento - A soma algébrica das forças que atua em uma massa de fluido é igual a variação de movimento em um intervalo de tempo dada pela seguinte equação (Zulcy, 2011):

$$\vec{F}_x = m(C_{x_2} - C_{x_1}) \quad (7)$$

Onde o somatório das forças equivale a variação

$$\sum \vec{F} \cdot dt = d(m \cdot \vec{c}) \quad (8)$$

E as equações de conservação da quantidade de movimento nas sua forma diferencial para as componentes (x, y e z) são:

$$\frac{\partial pu}{\partial t} + \nabla \cdot (pu\vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \quad (9)$$

$$\frac{\partial pv}{\partial t} + \nabla \cdot (pv\vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \quad (10)$$

$$\frac{\partial pw}{\partial t} + \nabla \cdot (pw\vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \quad (11)$$

O trabalho específico realizado pelo rotor é dado pela seguinte equação:

$$w = \frac{\dot{W}_t}{\dot{m}} = \frac{\tau \omega}{\dot{m}} = U_2 C_{\theta 2} - U_1 C_{\theta 1} \quad (12)$$

Onde:

w = trabalho específico da turbina $\left[\frac{J}{kg} \right]$;

\dot{W}_t = potência total da Turbina kW;

τ = torque do eixo Nm;

ω = velocidade angular $\left[\frac{rad}{s} \right]$.

Conservação do Momento da Quantidade de Movimento - Soma dos momentos estáticos das forças que atuam em uma massa de fluido em movimento, durante um determinado intervalo de tempo em relação ao um ponto estabelecido dado pela equação:

$$\sum m \cdot dt = d(m \cdot \vec{c}) \cdot \vec{e} \quad (13)$$

Degradação da energia - Onde o escoamento do fluido tem perdas ao longo do caminho em forma de energia térmica, essa energia é proporcional a velocidade

ao quadrado a distância percorrida pelo fluido dentro do tubo e inversamente a dimensão da secção do tubo, as perdas no escoamento é dada pela seguinte equação:

$$Y_p = \lambda \cdot \frac{c^2}{2} \cdot \frac{L}{D} \left[\frac{J}{kg} \right] \quad (14)$$

2.2.1 Linha de corrente

ipsi literis São diferentes linhas que ajudam a descrever um campo de escoamento. Linha de trajetória (pathline) é a curva traçada por uma determinada partícula viajando no campo de escoamento ao longo de um período de tempo. Linha de emissão ou de tinta (streakline) é a curva composta por todas as partículas originadas de um mesmo ponto fixo do espaço ao longo de um determinado tempo.

Linha de corrente (streamline) é uma linha no escoamento que possui a seguinte propriedade: o vetor velocidade de cada partícula que ocupa um ponto na linha de corrente, em um dado instante, é tangente à linha de corrente.

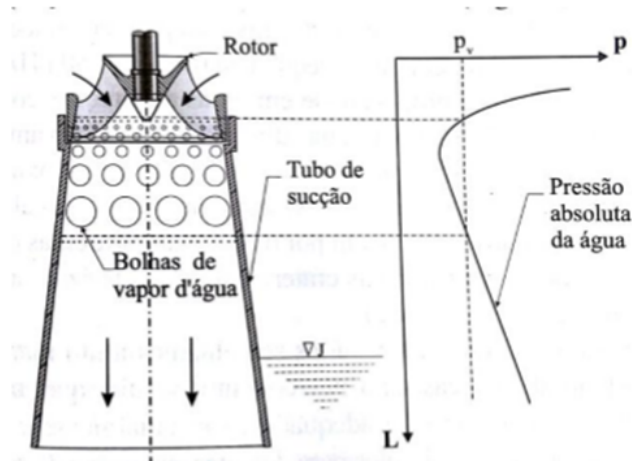
No escoamento permanente, a velocidade em cada ponto do campo permanece constante com o tempo e, em consequência, as linhas de corrente não variam de um instante a outro. Isso implica que uma partícula localizada numa determinada linha de corrente permanecerá sobre a mesma. Além disso, partículas consecutivas passando através de um ponto fixo do espaço estarão sobre a mesma linha de corrente e, subseqüentemente, permanecerão nela. Em conclusão, num escoamento permanente, linhas de trajetória, de emissão e de corrente são linhas idênticas no campo de escoamento (Potter, 1975; Fox, 1998).

2.2.2 Análise dimensional e de semelhança

2.2.3 Cavitação

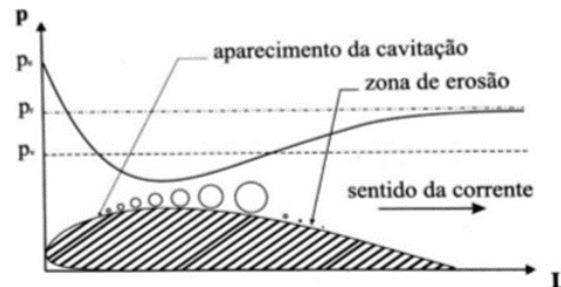
A cavitação consiste na formação e subsequente colapso, no seio de um líquido em movimento preenchidas em grande parte por vapor de líquido. (Souza, 2011) A cavitação consiste na formação de cavidades macroscópicas em um líquido a partir de núcleos gasosos microscópicos. Diz ainda da importância desses núcleos, constituídos de vapor líquido, gás não dissolvido no líquido ou de uma combinação de gás e vapor. O crescimento desses núcleos microscópicos acontece por vaporização, dando origem ao aparecimento da cavitação, no interior das pás do rotor, próxima às arestas de saída aparece zonas de baixa pressão com sobre velocidades da corrente fluida (Souza, 2011).

Figura 1 – Formação de implosão das bolhas no tubo de sucção de uma turbina hidráulica



Fonte: Henn (2006)

Figura 2 – Cavitação do dorso de um perfil de máquina de fluxo axial



Fonte: Henn (2006)

2.2.4 Teoria das semelhanças

A teoria das semelhanças ajuda a engenheiros a melhorar seus projetos pois é possível prever a dinâmica do sistema em diferentes condições operacionais (Q , H , ρ , μ), ou projetar máquinas que tem diferentes aplicações como velocidade de rotação diferente, medidas maiores ou menores onde mantem as semelhanças, potências diferentes etc.

A completa semelhança física de condições operacionais requer:

1. Semelhança geométrica: o modelo deve ser geometricamente semelhante ao protótipo;
2. Semelhança cinemática: o modelo deve ser cinematicamente semelhante ao protótipo;
3. Semelhança dinâmica: o modelo deve ser dinamicamente ao protótipo.

A semelhança geométrica para ter utilidade, um teste de modelo deve resultar em dados que possam, por meio de transposição de escala, fornece forças, momentos e cargas dinâmicas que existiriam no protótipo em tamanho real. Das condições exigidas para tal, a mais óbvia é a semelhança geométrica.

A semelhança geométrica requer que o modelo e protótipo tenha a mesma

forma, que suas dimensões lineares respeitam um fator de escala constante, que exista igualdade de ângulos, e que não ocorra nenhuma omissão ou adição das partes. Considerando duas máquinas de fluxo (MF' e MF'') geometricamente semelhantes, trabalho sob alturas de queda (ou elevação) H' e H'', com diâmetros D' e D'', e com alturas de pás b' e b'', a relação de semelhança geometricamente, definido pelo fator de escala “ λ ” será:

$$\lambda = \frac{D_4''}{D_4'} = \frac{b_4''}{b_4'} = \frac{D_5''}{D_5'} = \frac{b_5''}{b_5'} \quad (15)$$

Além da semelhança geométrica, os ângulos construtivos devem ser iguais

$$\beta_4'' = \beta_4' \text{ e } \beta_5'' = \beta_5' \quad (16)$$

A condição de semelhança cinemática impõe que as velocidades e acelerações em pontos correspondentes devem ser vetores paralelos e devem ter relações constantes entre seus módulos. Desta forma os triângulos de velocidades de duas máquinas cinematicamente semelhantes devem ser semelhantes em pontos correspondentes.

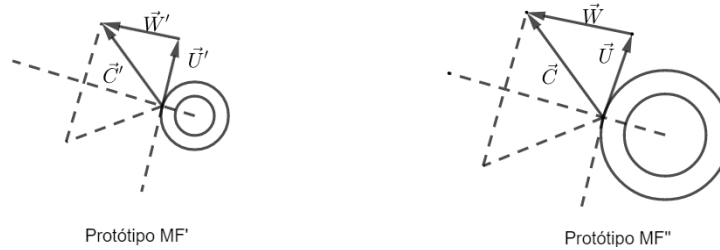
Considerando semelhantes os triângulos de velocidades traçados a partir dos pontos homólogos (semelhantes) M'' e M', situados sobre as pás de duas máquinas de fluxo MF'' e MF' geometricamente semelhantes, tem-se:

$$K = \frac{U_4''}{U_4'} = \frac{C_4''}{C_4'} = \frac{W_4''}{W_4'} = \frac{C_{m4}''}{C_{u4}'} = \frac{W_{u4}''}{W_{u4}'} = \frac{U_5''}{U_5'} = \frac{C_5''}{C_5'} = \frac{W_5''}{W_5'} = \frac{C_{m5}''}{C_{m5}'} = \frac{C_{u5}''}{C_{u5}'} = \frac{W_{u5}''}{W_{u5}'} \quad (17)$$

Onde podemos ver a representação do triângulo das velocidades em máquinas semelhante como mostra a Figura ??

A condição para obtenção da semelhança dinâmica é que tipos idênticos de força sejam vetores paralelos e que a relação entre seus módulos seja constante

Figura 3 – Máquinas Semelhantes



Fonte: Autor (2019).

para pontos correspondentes.

$$\epsilon = \frac{F''_{inércia}}{F'_{inércia}} = \frac{F''_{viscosas}}{F'_{viscosas}} = \frac{F''_{pressão}}{F'_{pressão}} \quad (18)$$

A teoria das máquinas de fluxo mecanicamente semelhantes permite determinar, com excelente aproximação, as principais características de uma grande turbina protótipo, por exemplo, partindo de resultados de ensaios feitos sobre uma pequena turbina modelo (ou padrão). Mas esta teoria não é um rigor absoluto e certamente haverá pequenos desvios entre o protótipo e o modelo. Estes desvios podem ser favoráveis (como é o caso dos rendimentos), ou preocupantes (como nos fenômenos de cavitação).

2.2.5 Empuxos Axial e Radial

2.2.6 Empuxo Radial

O sistema diretor em forma de caracol é utilizado em turbinas como a do rotor tipo Francis, onde é projetada em conduzir o fluido da boca de entrada até a boca de saída, onde são projetadas para minimizar os ruídos e vibrações, que podem gerar desgastes prematuros, queda de rendimentos

2.2.7 Teoria da asa de sustentação

O denominado teorema de Kutta-Joukowsky, a teoria bidimensional do voo ou teoria da asa de sustentação, onde a partir de 1940 foi aplicado em máquinas de fluxo hidráulicos obtendo resultados satisfatórios, pois devido à variação de pressão entre a parte superior e a parte inferior do perfil, onde ocorre o aparecimento de forças em força o movimento rotativo dos rotores.

2.2.8 Limitações de projetos

2.2.9 Influência da forma da pá (impeller blade shape)

2.3 Turbinas Hidráulicas

Daniel Bernoulli durante o século XVIII lançou os fundamentos da hidrodinâmica e Leonard Euler inventou a roda de reação com distribuidor fixo, que é considerada uma das principais precursoras da turbina atual. Porém somente no século XIX, o termo turbina apareceu pela primeira vez durante os estudos do francês Claude Burdin. (Macintyre, 1983)

A primeira construção de uma turbina industrial documentada ocorreu em 1827 por Benoit Fourneyron, que desenvolveu uma turbina centrífuga de 6 CV com um rendimento de cerca 80%. As turbinas hidráulicas apresentam uma grande variedade de formas e tamanhos. O modelo mais utilizado é o Francis, uma vez que se adapta tanto a regiões com baixa queda quanto a regiões de alta queda. Como trabalha totalmente submersa, seu eixo pode ser horizontal ou vertical (RAMAGE, 1996).

Assim, durante o projeto de uma turbina é fundamental considerar os aspectos construtivos e hidrodinâmicos, além dos princípios e conceitos envolvidos

2.3.1 Tipos de Turbinas

2.3.2 Turbina de Ação

São máquinas onde no rotor o fluido não sofre nenhuma variação de pressão, como exemplo turbina do tipo Pelton onde o fluido é direcionado para as pás do rotor onde simplesmente o fluido é desviado passando a energia cinética para o rotor.

2.3.3 Turbina a Reação

Turbina de reação é uma máquina hidráulica (de fluxo) onde converte energia mecânica-hidráulica, energia cinemática e energia de pressão em energia mecânica-hidráulica e energia cinética-motriz. As turbinas de reação funcionam com o princípio de ação e reação, como os torniquetes de jardim, que direcionam o jato em sentido tangencial onde exerce uma ação e com a reação causada pelo o jato faz com que o torniquete gire em sentido oposto ao jato.

2.3.4 Escolha do Tipo de Turbina

Turbinas com rotor do tipo Francis é o tipo de turbina hidráulica com fluxo radial de fora para dentro. É uma turbina de reação e criada por Jean-Victor Poncelet e aperfeiçoada pelo engenheiro norte-americano James Francis. As aplicações são de médias alturas de queda e grande vazões e pode ser dividido por 6 tipos de rotores:

2.4 Caso do Estudo: Turbina hidráulica do Tipo Francis

2.4.1 Componentes de uma turbina Francis

2.4.2 Funcionamento de uma Turbina

Tabela 1 – Categoria dos Rotores Francis

Categoria do Rotor	Velocidade específica (rpm)
Francis lentíssimo	$n_s \approx 60$
Francis Lenta	$n_s \approx 100$
Francis médio	$n_s \approx 160$
Francis veloz	$n_s \approx 250$
Francis ultraveloz	$n_s \approx 380$
Francis velocíssimo	$n_s \approx 460$

Fonte: Macintyre, (1938).

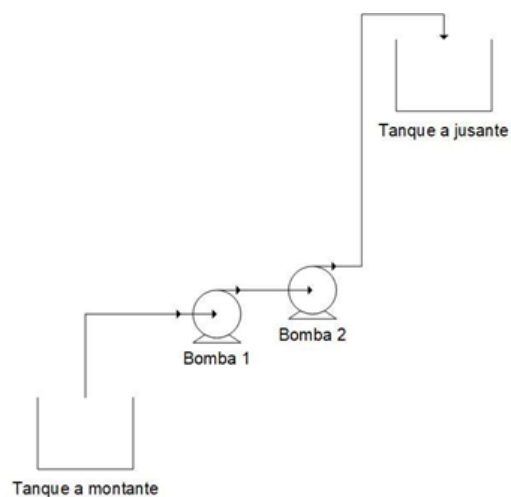
2.5 Bombas Industriais

2.5.1 Classificação de Bombas

2.5.2 Associação em serie

A associação em serie é importante para sistemas onde há uma grande perda na tubulação ou quando precisa de uma pressão alta em alguns processos, A desvantagem são a vazão é limitada pela bomba que tem a menor vazão em caso de sistema com bombas diferentes (o que não é o ideal), outra desvantagem que manutenções que tem uma parada de bomba para o sistema todo.

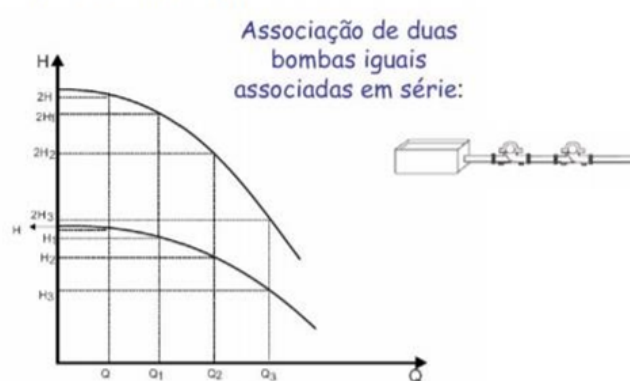
Figura 4 – Bomba operando em série



Fonte: Autor, (2019).

Figura 5 – Gráfico de associação em série altura de queda pela vazão

ASSOCIAÇÃO EM SÉRIE:

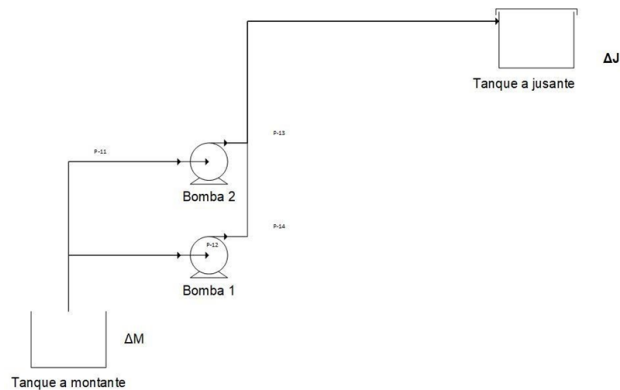


Fonte: Henn (2006).

2.5.3 Associação em paralelo

A associação dependendo da aplicação é mais vantajoso pois a manutenção que precisa parar uma bomba não irá parar o sistema todo, pois a vazão será reduzida mas o sistema poderá continuar, o que a associação em série isso não pode ocorrer pois se tirar uma bomba de operação o sistema irá parar.

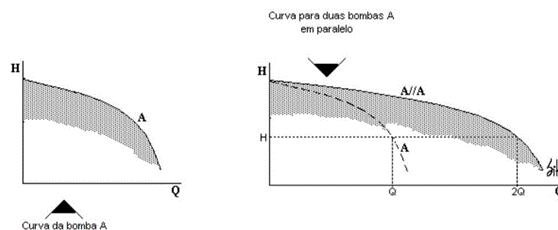
Figura 6 – Diagrama de associação em paralelo



Fonte: Autor (2019).

Figura 7 – Gráfico de associação em série altura de queda pela vazão

ASSOCIAÇÃO EM PARALELO:



Fonte: Andrade, (2015)

2.6 Caso do Estudo: Bombas Centrífuga

São capazes de converter a energia mecânica em energia cinética e em energia de pressão do fluido, em que a energia motriz mecânica é proveniente de um motor elétrico no projeto. São máquinas de fluxo radiais onde, o fluido segue a trajetória predominantemente na direção radial (perpendicular ao eixo).

2.6.1 Projeto de Rotores

Sendo o principal cálculo de projeto, os rotores são responsáveis por transformar a energia do fluido em energia mecânica em uma turbina hidráulica. O projeto tem que seguir algumas etapas:

- Pesquisa de campo ou aplicação da máquina para gerar dados para fazer um dimensionamento preliminar para determinar o escoamento limites físicos do escoamento denominado caminho hidráulico.
- Dimensionamento básico, a partir da etapa anterior elaborar esboços da turbina que satisfaz as condições do dimensionamento inicial, fazendo os estudos do caminho, cálculo dos coeficientes e limites experimentais, etapa onde se projeta.
- Projeto de fabricação do protótipo ou do modelo, essa etapa pretende construir geralmente o protótipo em escala para validar os dados calculados com ensaios em laboratório, extrapolar pontos de operação projetada podendo ser útil em aperfeiçoamento do modelo calculado.
- Fabricação final, onde se o modelo testado estiver dentro do estipulado pelo projeto, nesta etapa é onde ocorre a fabricação e a instalação turbina hidráulica, nesta etapa onde são elaborados os manuais de operação, manutenção, operação e correções nos componentes do projeto.

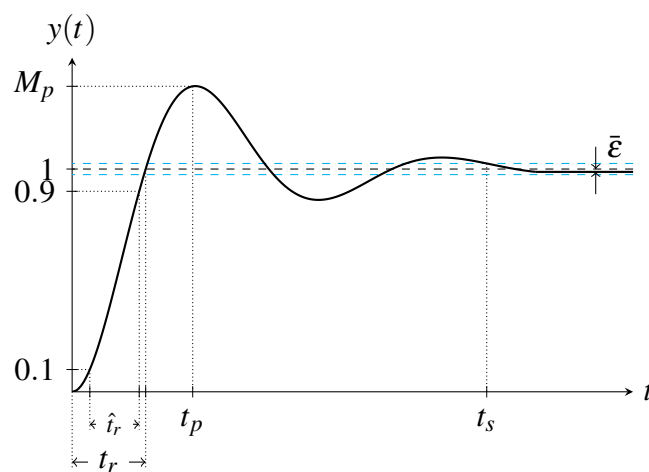
2.7 Sistema de controle

Estratégias empregadas a fim de automatizar determinado sistema geralmente são denominadas de Controle automático. Na 5ª edição do livro (Ogata, 2011) é caracterizado o controle automático como sendo essencial em qualquer campo da engenharia e da ciência. Afirma que o controle automático é um componente importante e intrínseco em sistemas de veículos espaciais, sistemas robóticos, modernos sistemas de manufatura e quaisquer operações industriais que envolvam o controle de temperatura, pressão, umidade, viscosidade, vazão, etc. Reitera dizendo que é desejável que a maioria dos engenheiros e cientistas estejam familiarizados com a teoria e a prática do controle automático.

2.7.1 Estratégia de controle simplificado

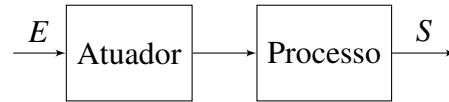
O controle

Figura 8 – Gráfico da função impulso



Fonte: Autor (2019).

Figura 9 – Esquema de sistema de controle de malha aberta



Fonte: Autor (2019).

Onde:

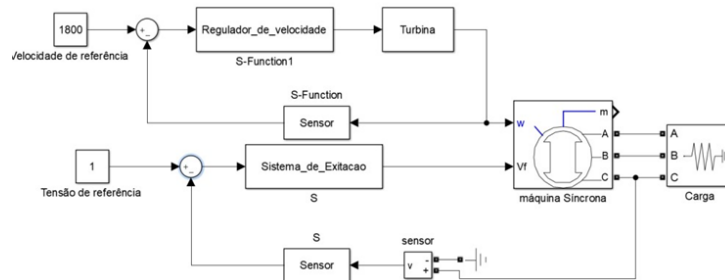
E = é o sinal de entrada com o valor de saída desejada;

S = é o sinal de saída da planta.

2.7.2 Sistema de controle da Bancada

O sistema de controle da bancada projetada será baseado em sistema de controle de pequenas centrais hídricas onde se controla a vazão, a velocidade e o despacho de energia como mostra o diagrama abaixo:

Figura 10 – Diagrama do sistema de controle com a máquina Síncrona



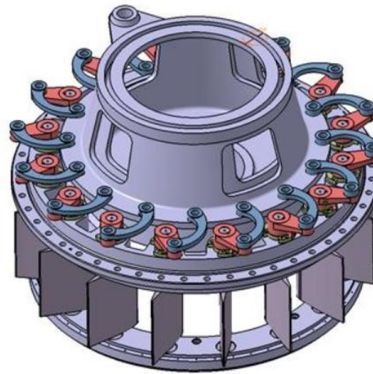
Fonte: Autor (2019)

2.7.3 Sistema de controle de Turbina Francis

O controle será feito pela mudança de vazão feito pela válvula de entra, controle das bombas ou pela variação do sistema diretor da turbina com mostra a

Figura 9, mudando o ângulo de abertura das aletas se modifica a curva de operação da turbina, assim modificando sua velocidade em que será acoplado um gerador elétrico, um freio Prony ou um freio de Foucault em que irá frear a turbina.

Figura 11 – Sistema diretor da turbina Francis



Fonte: Hidromamont S.A. (2017)

2.7.4 Proposta de um controlador PID e Preditor de Smith

(montagem e instrumentação Santander)

$$u(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} + \frac{K_p}{T_i} \int e(t) \quad (19)$$

Onde:

K_p = constante proporcional;

T_i = tempo integral;

T_d = tempo derivativo;

Ajustando a equação no domínio de Laplace é definida como:

$$U(s) = K_p E(s) + K_p T_d s E(s) + \frac{1}{T_i s} E(s) \quad (20)$$

Quando Alterado os ganhos do controlador mudamos as características de resposta da planta onde podemos ter algumas relações como mostra a Tabela

REVISAR TABELA

Tabela 2 – Tabela de ganhos

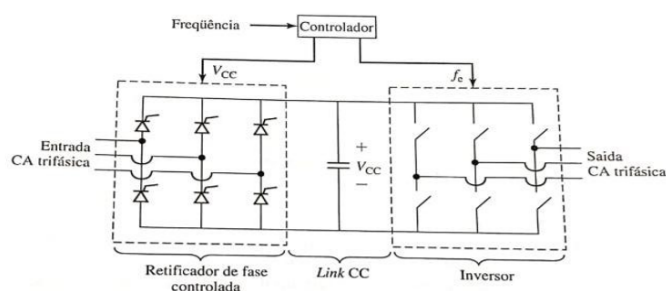
Aumento do ganho	t_p	M_p	t_s	$\bar{\varepsilon}$
K_p	Diminui	Aumenta	Pouca alteração	Aumenta
T_i	Aumenta	Diminui	Aumenta	Elimina
T_d	Pequena alteração	Diminui	Diminui	Pequena alteração

Fonte: Autor (2019)

2.7.5 Inversores

Os inversores são dispositivos capaz de variar sua frequência usados para controlar motores de indução trifásicos ou motores síncronos.

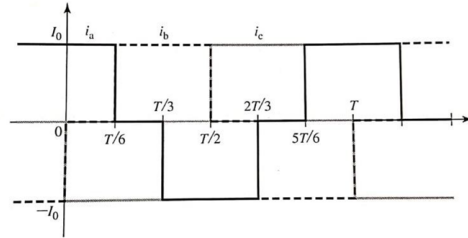
Figura 12 – Circuito interno de inversor de frequência



Fonte: Fitzgerald (2006)

A partir desse circuito é gerado a uma forma de onda de correntes abaixo onde em que variando a largura dos pulsos é possível controlar motores trifásicos

Figura 13 – Forma de onda quase quadrada trifásica



Fonte: Fitzgerald (2006)

2.8 Gerador Síncrono

Máquinas síncronas são máquinas elétricas de corrente alternada, onde tem as correntes que fluem no estator (alternada) e no circuito de excitação (corrente contínua).

O enrolamento do campo fica no rotor onde para aplicação de hidrelétrica são de polos salientes pois conseguem operar em baixa velocidade, onde a força motriz e velocidade vem da máquina primária ou máquina motriz:

$$T = \frac{\pi}{2} \left(\frac{\text{pólos}}{2} \right)^2 \phi_R F_r \sin(\delta_{RF}) \quad (21)$$

ϕ_R = fluxo resultante por polo no entreferro;

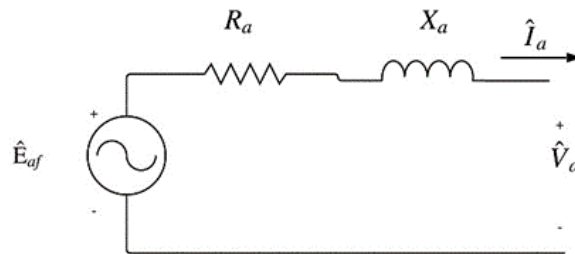
F_r = FMM do enrolamento CC de campo;

δ_{RF} = ângulo de fase elétrica entre os eixos magnéticos de ϕ_R e F_r .

2.9 Controle de Motores de Indução

Para o controle das bombas centrífugas em que será controlada sua rotação para o levantamento da curva de desempenho em diferentes tipos de operação, como a vazio, operação nominal, rotação reduzida, sobre velocidade e operação

Figura 14 – Circuito equivalente de máquinas síncronas



Fonte: Autor (2019)

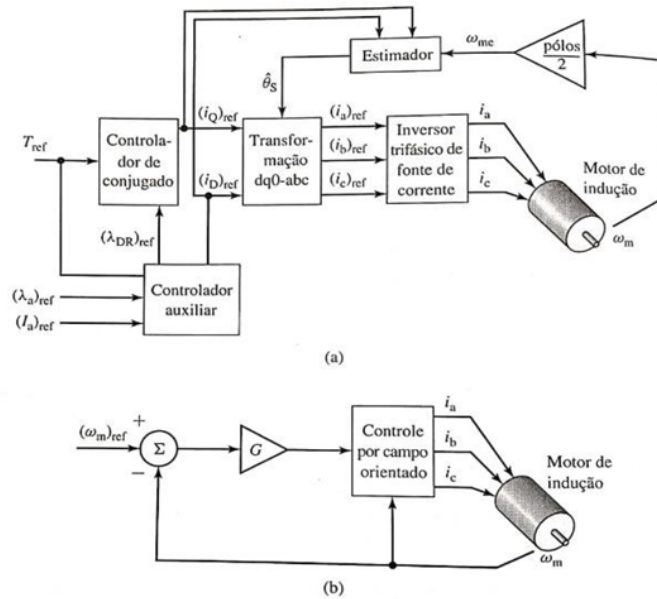
em serie e paralelo onde será indispensável a utilização de inversores trifásico para aquisição de dados e o controle.

2.10 Modelagem computacional em CFD de máquinas de fluido

A simulação numérica de máquinas de fluido tem alcançado alto nível de desenvolvimento e possibilitando não só a visualização de fluxos complexos, mas também a elaboração de programas de cálculo que permite projetar novos tipos de máquinas a partir de um banco de dados conhecido, prever seu comportamento por meio de simulações (HENN, 2006).

Computacional Fluid Dynamics (CFD) é um conjunto de modelos matemáticos e métodos numéricos utilizados para simular o comportamento de sistemas que envolvem escoamento de fluídos, trocas térmicas, reações químicas, entre outros processos. O emprego desta técnica permite a solução de diversos problemas operacionais, sem a necessidade da realização de parada de máquina ou perda de produção de vido à redução do tempo e do número de experimentos realizados em bancada de testes em unidade piloto o que traz uma considerável economia no desenvolvimento de projetos novos ou na atualização de projetos já em operação. Souza (2011).

Figura 15 – a) Diagrama de bloco de um sistema de controle de conjugado por um campo orientado para um motor de indução. b) Diagrama de blocos de uma malha de controle de velocidade para o motor de indução, constituída em torno de um sistema de controle de conjugado



Fonte: Fitzgerald (2006)

Grande parte das soluções numéricas, que em outra hora eram obtidos somente em exaustivos e custosos testes de laboratório, com inúmeras iterações, afim de se obter os resultados ótimos para mais variados sistemas, agora podem ter o seu tempo de execução e precisão melhorado com o uso de modelamento computacional, que é uma sistemática que propõe um conjunto de métodos e técnicas para a abordagem dos mais variados problemas de engenharia. Souza (2011).

2.11 Modelagem e impressão 3D

Com a modernização da prototipagem e com a invenção de impressões 3D facilitou o desenvolvimento de produtos, máquinas, processos e modelos experimentais em laboratório, sendo possível imprimir peças com uma boa resolução e qualidade.

Atualmente a forma mais comum de impressão 3D é a Modelagem por Fusão e Depósito (FDM) e funciona de maneira extremamente simples, o objeto precisa ser modelado ou scaneado.

A partir de desenvolvimento do objeto vetorial tridimensional no computador, com a ajuda de um software de edição em três dimensões, este precisa passar por um tratamento de dados para a configuração do material e da forma junto com as configurações da impressora.

Enviando o modelo para o software da impressora para que você possa definir as características principais, como as dimensões e a “resolução” da imagem, que é medida pela espessura das camadas sobrepostas no momento da impressão. Quanto mais detalhes, melhor será a qualidade do objeto, porém maior será o tempo de impressão.

Uma vez selecionada as configurações principais, como espessura de cada camada, algoritmo de escolha de caminho, o software de impressão compila todos os dados e “fatia” o objeto em centenas de camadas. Depois disso, esses dados são enviados para a impressora em códigos que representam as coordenadas dos “caminhos” a serem percorridos uma vez que é iniciado o processo de impressão.

Além disso, outros ajustes também podem ser feitos, como diminuição da porcentagem de preenchimento de um objeto para economizar matéria-prima, mudança no padrão de preenchimento.

3 METODOLOGIA

Para o dimensionamento foi realizado a partir de 2 bombas centrífugas de 1CV cada para o dimensionamento da bancada em que vai ser projetado em vazão nominal [Dados do dimensionamento] Altura de queda $H =$; Vazão $V =$ e a velocidade de Rotação no eixo $n = 1800rpm$ onde foi utilizado os *softwares* de desenho Inventor da Autodesk e para as simulações o *software* Ansys CFD.

3.1 Roteiro de cálculo de um rotor hidráulico da Turbina Francis

O primeiro passo foi determinar o tipo de rotor com o a referência a velocidade específica n_{qa} considerando os dados iniciais de projeto.

$$n_{qa} = 10^3 \cdot n \cdot \frac{Q^{1/2}}{Y^{3/4}} \quad (22)$$

Onde:

n_{qa} = velocidade de rotação específica [Adimensional];

n = rotação do rotor [rps];

Q = vazão de projeto [$\frac{m^3}{s}$];

Y = salto energético específico [$\frac{J}{kg}$].

$$Y = g \cdot h \quad (23)$$

Onde:

g = gravidade [$\frac{m}{s^2}$];

h = altura de projeto [m].

REFERÊNCIAS

- ABADI, M.; LEINO, K. R. M. A logic of object-oriented programs. In: **Theory and Practice of Software Development, TAPSOFT**. [S.l.]: Berlin: Springer-Verlag, 1997. (Lecture Notes in Computer Science, v. 1214), p. 682–696.
- ABRAMSKY, S.; JUNG, A. Domain theory. In: ABRAMSKY, S.; GABBAY, D. M.; MAIBAUM, T. S. E. (Ed.). **Handbook of Logic in Computer Science**. Oxford: Oxford Science Publications, 1994. v. 3.
- ANDERSON, R. J. et al. **Model Checking Large Software Specifications**. Seattle, 1996. 12p. (Technical Report 96-04-02).
- BIBERSTEIN, O. **CO-OPN/2: an Object-Oriented Formalism for the Specification of Concurrent Systems**. Thesis (PhD) — University of Geneva, Geneva, Switzerland, April 1997.
- EHRIG, H. et al. (Ed.). **2nd International Conference on Graph Transformation**, v. 3256 of **Lecture Notes in Computer Science**, (Lecture Notes in Computer Science, v. 3256). Rome, Italy: Berlin: Springer-Verlag, 2004. ISBN 3-540-23207-9.
- MEINKE, K.; TUCKER, J. V. Universal algebra. In: ABRAMSKY, S.; GABBAY, D. M.; MAIBAUM, T. S. E. (Ed.). **Handbook of Logic in Computer Science**. Oxford: Oxford University Press, 1992. v. 1 (Background: Mathematical Structures), p. 189–411.
- MICROSOFT CORPORATION. **C# Language Specification**. Seattle, WA, 2005. Available at <<http://msdn.microsoft.com/>>. Visited in April, 2003.
- NAGL, M. Set theoretic approaches to graph grammars. In: EHRIG, H. et al. (Ed.). **3rd International Workshop on Graph Grammars and their Application to Computer Science**. Warrenton, Virginia, USA: Berlin: Springer-Verlag, 1986. (Lecture Notes in Computer Science, v. 291), p. 41–54.
- SANTOS, C. G. dos. Dimensionamento e simulação computacional de um rotor hidráulico do tipo francis. **Formal Methods in System Design**, v. 1, p. 97–116, 2012.
- SANTOS, O. M. dos. **Verificação Formal de Sistemas Distribuídos Modelados na Gramática de Grafos Baseada em Objetos**. 89 p. Dissertation (Masters Thesis) — Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, May 2004.

GLOSSÁRIO

O glossário é opcional. Se precisar, consulte o manual sobre o seu formato adequado.

APÊNDICE A — NOME DO APÊNDICE

Depois do termo “appendix”, qualquer capítulo aparecerá na forma correta, com o termo “Apêndice”. Use apêndices quando houver material produzido pelo autor que ajuda no entendimento do trabalho mas que não faz parte do texto principal. Modelos de questionários utilizados, código fonte de programas, partituras completas, provas de teoremas acessórias, etc.

ANEXO A — NOME DO ANEXO

Depois do termo “annex”, qualquer capítulo aparecerá na forma correta, com o termo “Anexo” no título. Use anexos quando se tratar de material não produzido pelo autor, mas necessário no entendimento do trabalho. Por exemplo, definições matemáticas, sintaxe formal de linguagens de programação, trechos de manuais, etc.