

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**

**PATRÍCIA CRISTINA DOS SANTOS**

**Estudo de um Sistema de Controle de Vazão  
utilizando a Dinâmica de Fluidos  
Computacional: Metodologia e Prática**

Orientador: **Prof. Dr. Geraldo Lúcio Tiago Filho**  
Co-Orientador: **Eng. Dr. Harley Souza Alencar**

Itajubá, 2009

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**PATRÍCIA CRISTINA DOS SANTOS**

**Estudo de um Sistema de Controle de Vazão  
utilizando a Dinâmica de Fluidos  
Computacional: Metodologia e Prática**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia da Energia como requisito parcial à  
obtenção do título de *Mestre em Engenharia da Energia*

Orientador: **Prof. Dr. Geraldo Lúcio Tiago Filho**  
Co-Orientador: **Eng. Dr. Harley Souza Alencar**

Itajubá, 2009

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**

**PATRÍCIA CRISTINA DOS SANTOS**

**Estudo de um Sistema de Controle de Vazão  
utilizando a Dinâmica de Fluidos  
Computacional: Metodologia e Prática**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 18 de Setembro de 2009,  
conferindo ao autor o título de *Mestre em Engenharia da Energia*

**Banca Examinadora:**

Prof. Dr. Antônio Cesar Pinho Brasil Junior

Prof. Dr. Ramiro Gustavo Ramirez Camacho

Prof. Dr. Fernando das Graças Braga da Silva

Prof. Dr. Geraldo Lúcio Tiago Filho

Eng. Dr. Harley Solza Alencar

Itajubá, 2009

## DEDICATÓRIA

À Deus, primeiramente, à minha família  
e aos meus amigos.

## Agradecimentos

Ao meu Orientador, Prof. Dr. Geraldo Lucio Tiago Filho, pela oportunidade de trabalhar em seu projeto, dando toda assistência e incentivo para o desenvolvimento da minha dissertação, sendo um grande professor, dedicado aos seus alunos e a Universidade, incentivando sempre o desenvolvimento e enriquecimento de nosso conhecimento.

Ao meu co-orientador Eng. Dr. Harley Souza Alencar, pela colaboração, dedicação, paciência e principalmente pela amizade dedicada durante esses anos de convivência.

Aos amigos, que sempre me apoiaram e incentivaram a continuar mesmo diante das dificuldades.

Aos Professores da Universidade Federal de Itajubá, pelo apoio e valiosas sugestões, que contribuíram para a elaboração deste trabalho.

Ao Instituto de Recursos Naturais da UNIFEI, representado pelos seus dedicados Professores e Funcionários, pela oportunidade que me concedeu na realização deste trabalho, e aos amigos desse Instituto, pelo convívio profissional.

À Alstom, pelo apoio e incentivo a conclusão do meu trabalho.

À minha família, que sempre esteve ao meu lado, me apoiando em todos os momentos e sempre batalhando junto comigo na conquista de meus objetivos.

"Sábio é aquele que conhece os limites da própria ignorância."

**Sócrates**

## Resumo

**SANTOS, P. C. (2009)**, *Estudo de um Sistema de Controle de Vazão utilizando a Dinâmica de Fluido Computacional: Metodologia e Prática*, Itajubá, 111p (Dissertação (Mestrado) - Engenharia da Energia, Universidade Federal de Itajubá.

Este trabalho de dissertação contempla o estudo de um Sistema de Controle de Velocidade (SISCOV®), desenvolvido pelo Centro de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas (CERPCH). A finalidade do desenvolvimento deste novo dispositivo é atender a necessidade de controlar a velocidade de rotação em algumas máquinas motoras desprovidas de equipamentos que possam fazer esse tipo de controle. Para realização do estudo em questão, utilizou-se uma Bomba Funcionando como Turbina (BFT), pelo fato de ser economicamente viável para utilização em MCH's, tendo como grande vantagem o seu baixo custo de instalação e manutenção e facilidade de encontrar no mercado. Para uma bomba funcionar como turbina faz-se necessário inverter o sentido do fluxo, fazendo o rotor girar no sentido contrário.

A primeira análise do SISCOV® foi feita a partir de dados obtidos experimentalmente, com a finalidade de determinar o melhor campo de atuação do dispositivo para diferentes aberturas do obturador. Considerando os valores experimentais, realiza-se também uma análise do modelo em Dinâmica do Fluido Computacional (*CFD*), sendo uma metodologia que tem apresentado cada vez mais importância nos estudos e desenvolvimento de equipamentos, tornando possível tratar numericamente os fenômenos físicos que ocorrem em escoamentos de fluidos sobre corpos das mais diversas geometrias, além de possuir grandes vantagens sobre determinações experimentais, entre as quais maior versatilidade e menor consumo de tempo e recursos financeiros. A finalidade da análise numérica é a viabilização do uso do *CFD* para o sistema de controle de velocidade. Com a análise numérica é possível realizar outras simulações para determinar o ângulo que melhor define o campo de atuação do SISCOV®. Considerando como parâmetros de referência a abertura do obturador, a vazão do escoamento e a perda de carga.

Desta forma recomenda-se para futuros trabalhos a realização de outros testes experimentais utilizando o novo ângulo de atuação do sistema obtido pelo *CFD*, objetivando a verificação /validação do resultado obtido pelo cálculo numérico.

### **Palavras-chave**

Sistema de Controle de Velocidade, Dinâmica do Fluido computacional, Bomba Funcionando como Turbina - BFT.

## Abstract

**SANTOS, P. C. (2009)**, *Study of Velocity Control System using Computational Fluid Dynamic: Methodology and Practical*, Itajubá, 111p– Engenharia da Energia, Universidade Federal de Itajubá.

This work contemplates the study of the Velocity Control System (SISCOV®), developed by Reference Center in Small Hydro Power Plants (Centro de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas - CERPCH). The purpose of the study is to improve the equipments used for this control type. In this study, was used a pump operating as turbines (Bomba Funcionando como Turbina-BFT), for the viable fact of being economically for use in MCH's, having as great advantage its low cost and easiness to find in the market.

The first analysis of SISCOV ® was made from data obtained experimentally with the purpose of determining the best action field of the device for different openings of the valve. Considering the experimental values, there is also an analysis of the model in Computational Fluid Dynamics (CFD), and a methodology that has shown increasing importance in research and development of equipment, making it possible to treat numerically the physical phenomena occurring in flows fluid on bodies of several geometries, and have great advantages on experimental measurements, including greater versatility and lower consumption of time and financial resources. The purpose of numerical analysis is the feasibility of using CFD for the speed control system.

With numerical analysis it is possible to perform other simulations to determine the angle that best defines the field of action of SISCOV ®. Considering as a benchmark to opening the valve, the flow and load loss.

It is recommended for future work the implementation of other experimental tests using the new angle of the system action obtained by CFD, to the verification / validation of the result obtained by numerical calculation.

### **Keywords**

Velocity Control System, Computacional Fluid Dynamic - CFD, Pumps operating as Turbina - BFT.

## Sumário

<b>DEDICATÓRIA</b>	<b>IV</b>
<b>AGRADECIMENTOS</b>	<b>V</b>
<b>RESUMO</b>	<b>VII</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>VIII</b>
<b>SUMÁRIO</b>	<b>IX</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>XII</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>XIV</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS</b>	<b>XV</b>
<b>LISTA DE VARIÁVEIS</b>	<b>XVI</b>
<b>CAPÍTULO 1</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
HISTÓRICO	1
JUSTIFICATIVA	3
1.3 OBJETIVO	4
1.4 CONTEÚDO DO TRABALHO	5
1.5 Revisão BIBLIOGRÁFICA	6
1.5.1 MCH	6
1.5.2 BFT	6
1.5.3 CFD (Computational Fluids Dynamic)	7
<b>CAPÍTULO 2</b>	<b>9</b>
2.1 – DEFINIÇÃO DO EQUIPAMENTO	9
2.2 - PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE CONTROLE DE VELOCIDADE	10
2.3 – DESCRIÇÃO DOS PRINCIPAIS ITENS	13
2.3.1 – Obturador Cônico	13
2.3.2 – Haste de Acionamento e Válvula de Controle	14
2.3.3– Servomotor	15
2.3.4– Controlador Lógico Programável	16
2.4 – VANTAGENS DE UTILIZAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE DE VAZÃO	17
<b>CAPÍTULO 3</b>	<b>20</b>
<b>PRÁTICA EXPERIMENTAL</b>	<b>20</b>
3.1 DESCRIÇÃO DA BANCADA DE ENSAIO	20
3.1.1 Laboratório Hidromecânico para Pequenas Centrais Hidrelétricas-LHPCH	20
3.1.2 Laboratório Hidromecânico Didático Científico	21
3.1.3 Funcionamento da Bancada de Ensaios	23
3.2 Características da Bomba ensaiada	24

	<b>x</b>
3.3 Procedimento experimental-----	26
3.4 DETERMINAÇÃO das Grandezas FÍSICAS-----	26
3.4.1 Determinação da altura manométrica na entrada da BFT-----	27
3.4.2 Medidor Venturi -----	28
3.4.3 Massa Específica da Água ( $\rho_{H_2O}$ ) -----	29
3.4.5 Potência no Freio (Pf) -----	29
3.4.6 Potência Hidráulica da Turbina (Ph)-----	29
3.4.7 Potência de Eixo da Turbina: $P_{eT}$ -----	29
3.4.8 Rendimento da Turbina ( $\eta_T$ )-----	30
<b>CAPÍTULO 4</b> _____	<b>32</b>
<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS DO ENSAIO EXPERIMENTAL</b> _____	<b>32</b>
4.1 Curvas de Recepção da BFT utilizando um Sistema de Controle de Velocidade-----	33
4.1.1 Primeiro Teste-----	33
4.1.2 Segundo Teste-----	35
4.1.3 Comparação entre os resultados dos ensaios realizados-----	37
4.1.4 Controle da vazão na entrada da BFT utilizando válvula gaveta-----	40
<b>CAPÍTULO 5</b> _____	<b>42</b>
<b>DINÂMICA DE FLUIDO COMPUTACIONAL</b> _____	<b>42</b>
5.1- DEFINIÇÃO DA METODOLOGIA -----	42
5.2- FINALIDADE DO USO DO CFD-----	44
5.2.1- Vantagens do CFD-----	44
5.3- MÉTODOS UTILIZADOS-----	45
5.3.1- Os métodos de diferenças finitas-----	45
5.3.2- Os métodos de elementos finitos-----	45
5.3.3- O método dos volumes finitos-----	45
5.4- PROCESSO DE MODELAGEM E SIMULAÇÃO-----	46
5.4.1- Geometria e malha-----	47
<b>CAPÍTULO 6</b> _____	<b>50</b>
<b>APLICAÇÃO NUMÉRICA UTILIZANDO A DINÂMICA DE FLUIDO COMPUTACIONAL NO</b>	
<b>SISCOV®</b> _____	<b>50</b>
6.1- Processo de Modelagem e Simulação-----	50
6.1.1 PROPRIEDADES FÍSICAS -----	51
6.2- Processamento -----	51
6.2.1- Geração da Malha-----	51
6.3- Condições de Contorno-----	54
6.4- Cálculo Numérico-----	56
<b>CAPÍTULO 7</b> _____	<b>58</b>
<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS DA APLICAÇÃO NUMÉRICA EM DINÂMICA DE FLUIDOS</b>	
<b>COMPUTACIONAL</b> _____	<b>58</b>

	<b>xi</b>
7.1- Distribuições das variáveis de estado-----	58
7.1.1- Pressão -----	58
7.1.2- Velocidade de Escoamento -----	62
7.1.3- Vetores Velocidade -----	65
<b>CAPÍTULO 8</b> _____	<b>70</b>
<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b> _____	<b>70</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> _____	<b>72</b>
<b>ANEXO A</b> _____	<b>75</b>
<b>ANEXO B</b> _____	<b>80</b>
B.1 Definição do Problema Físico-----	81
B.2 modelagem -----	81
B.2.1 – Criação do Modelo Geométrico -----	81
B.2.2 –Criação da Malha -----	83
B.2.2 –Setagem das Condições de contorno -----	90
<b>ANEXO C</b> _____	<b>100</b>
C.1- Instrumentação e grandezas Aquisitadas -----	105

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – Obturador na saída do tubo de sucção	10
FIGURA 2.2 – Princípio de Funcionamento do SISCOV®	12
FIGURA 2.3 – Estrutura Básica do Obturador Cônico	13
FIGURA 2.4 – Estrutura Básica do Sistema de Controle de Vazão (SISCOV®)	14
FIGURA 2.5 – Estrutura Básica do Servomotor	15
FIGURA 2.6 – Estrutura Básica do CLP	16
FIGURA 2.7 – Ciclo de Processamento dos CLPs	17
Figura 3.1 – Bancada de Ensaios	22
Figura 3.2– Circuitos de Ensaios	23
Figura 3.3 - Bomba Funcionando Como Turbina (BFT) Utilizada Nos Ensaios	25
FIGURA 3.4- Manômetro de colunas de mercúrio montado na entrada da BFT	27
Figura 3.5 – Medidor Venturi	28
Figura 4.1 – Ângulos de abertura do SISCOV®	32
Figura 4.2 – Rendimento X Vazão Para O 1º Teste	33
<b>Figura 4.3 – Sistema de Controle de Vazão</b>	34
Figura 4.4 – Posição do Cone x Vazão para o ângulo de conicidade $\alpha=60^\circ$ modificar a curva	35
Figura 4.5 – Rendimento x Vazão para o ângulo de conicidade $\alpha = 30^\circ$	36
Figura 4.6 – Posição do Cone x Vazão para o ângulo de conicidade $\alpha=30^\circ$	37
Figura 4.7 – Zonas de Controle e sem ação de controle	38
Figura 4.8 – Gráfico de Comparação entre as Posições do Cone nos 1º e 2º Testes em relação a variação da vazão na Zona de Controle	39
Figura 3.3- Fluxograma do processo de modelagem	46
Figura 5.4- Tipos de Malha	48
Figura 5.5 - Refinamento da malha	48
Figura 6.1 – Modelo Geométrico do tubo de Sucção e do Sistema de Controle de vazão	52
Figura 6.2 – Estrutura da malha formada por elementos tetraédricos	53
Figura 6.3- Condições de contorno	54
Figura 6.4- Gráfico de Convergência	57
Figure 7.1 – Pressão média total longitudinal para abertura mínima de 95 mm e máxima de 271mm para um ângulo de conicidade de $60^\circ$	59
Figure 7.2 Pressão média total longitudinal para abertura mínima de 120 mm e máxima de 283 mm para um ângulo de conicidade de $30^\circ$	60
Figure 7.3 Pontos de pressão ao longo do tubo de sucção	61
Figure 7.4 Pontos de pressão ao longo do tubo de sucção para abertura mínima de 120 mm	61
Figure 7.5 Pontos de pressão ao longo do tubo de sucção para abertura máxima de 283 mm	62

Figure 7.6 – Velocidade de Escoamento definida em [m/s] para abertura mínima de 95mm e máxima de 271mm, para ângulo de conicidade de 60°	63
Figure 7.7 – Velocidade de Escoamento definida em [m/s] para abertura mínima de 120mm e máxima de 283mm, para ângulo de conicidade de 30°	64
Figure 7.8 – Vetor Velocidade ângulo 60°	66
Figure 7.9 – Vetor Velocidade ângulo 30°	67
Figure 7.10 – Detalhamento do Vetor Velocidade na entrada do tubo de sucção ângulo 60°	68
Figure 7.11 – Detalhamento do Vetor Velocidade na entrada do tubo de sucção ângulo 30°	69
Figura B.1 – Tela inicial do ICEM CFD para construção da Geometria	81
Figura B.2- Ponto Inicial da geometria (0,0,0), coordenada (x,y,z)	82
Figura B.3-Geometria do Sistema de Controle de Velocidade instalado no tubo de sucção	83
Figura B.4-Construção da Malha Global	84
Figura B.5- Refinamento da malha para as diferentes partes da geometria	84
Figura B.6- Refinamento da malha para as diferentes partes da geometria	85
Figura B.7- Malha Tetraédrica	86
Figura B.8- “Output” da Geometria	87
Figura B.8- ANSYS CFX 11	87
Figura B.9- Caminho para abrir ANSYS CFX PRE	88
Figura B.10- Interface para importar a malha	89
Figura B.11- Malha importada	89
Figura B.12- Definição das condições de contorno	90
Figura B.12- Definição das equações utilizadas para o cálculo	91
Figura B.13- Definição dos critérios de cálculo	94
Figura B.13- definição do arquivo .def para ser lido pelo CFX Solver	95
Figura B.14- Interface para cálculo numérico	96
Figura B.15- Resultado de cálculo	97
Figura B.16- Para XoY para visualização dos resultados de cálculo	98
Figura B.17- Para XoY para visualização dos resultados de cálculo	99
Figura B.18- Ferramentas para visualização de resultados.	99
Figura C.1: Bomba Hidráulica Utilizada para simular a altura da queda.	101
Figura C.2: Manômetro de coluna de mercúrio utilizado para medir a pressão na entrada da turbina.	101
Figura C.3: Tomada de água no tanque.	102
Figura C.5: Detalhe dos equipamentos elétricos utilizados para variar a solicitação da turbina	103
Figura C.6: Medidor Venturi utilizado para medir a vazão.	103

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Condições Ótimas da Bomba Funcionando como Turbina -----	25
Tabela 4.1 – Valores calculados -----	37
Tabela 4.2 – Comparação entre Zonas de Controle para $\alpha_1=60^\circ$ e $\alpha_2=30^\circ$ -----	39
Tabela 6.1 – Lista de variáveis para o cálculo -----	51
Tabela- 6.2 – Condições de Contorno para cálculo do modelo do sistema de controle de vazão -----	55
Tabela 6.3 – Modelos usados para o cálculo -----	56
Tabela A.1– Valores Calculados para ângulo de conicidade $\alpha=60^\circ$ -----	76
Tabela A.2– Valores Calculados para ângulo de conicidade $\alpha=30^\circ$ -----	76
Tabela A.4 – Tabelas dos Valores utilizados para a construção das curvas de Recepção -----	77
Tabela A.4.1- $\alpha=60^\circ$ Tabela A.4.2- $\alpha=30^\circ$ -----	77
Tabela A.5 – Tabelas dos Valores Medidos para o ângulo de $60^\circ$ -----	78
Tabela A.6 – Tabelas dos Valores Medidos para o ângulo de $30^\circ$ -----	79

## Lista de Abreviaturas

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica  
BFT – Bomba Funcionando como Turbina  
CCC – Consumo de Combustíveis Fósseis  
CERPCH – Centro de Referências em Pequenas Centrais Hidrelétricas  
CFD – Dinâmica de Fluido Computacional (Computational Fluid Dynamic)  
CLP – Controlador Lógico Programável  
DNAEE – Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica  
EESC – Escola de Engenharia de São Carlos  
LHPCH – Laboratório Hidromecânico de Pequenas Centrais Hidrelétricas  
LHDC - Laboratório Hidromecânico Didático Científico  
MCH – Micro Centrais Hidrelétricas  
MDF – Método das Diferenças Finitas  
MVF – Método dos Volumes Finitos  
PCH – Pequenas Centrais Hidrelétricas  
SISCOV – Sistema de Controle de Velocidade  
UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá

## Lista de variáveis

$H_b$ : Pressão Barométrica

$T_a$ : Temperatura do ar

$\Phi$ : Umidade Relativa

$T_{H_2O}$ : Temperatura da água

$\Delta H_v$ : Variação da coluna de mercúrio da coluna de água no Venturi

$\Delta H_s$ : Altura de Sucção

F: Força na Balança

$H_1$ : Altura da coluna de mercúrio na entrada de água no Venturi

$H_2$ : Altura da coluna de mercúrio ligada à atmosfera

$H_3$ : Altura da coluna de Líquido

Q: Vazão do Venturi

$P_h$ : Potência Hidráulica da Turbina

$P_{et}$ : Potência de Eixo da Turbina

$P_f$ : Potência no Freio

$\eta_T$ : Rendimento da Turbina

$P_{2t}$  – pressão no ponto 2 [Pa]

$\rho$  – densidade da água [ $\text{kg/m}^3$ ]

$g$  – aceleração da gravidade [ $\text{m/s}^2$ ]

$h_1$  – altura da coluna de mercúrio do manômetro [m];

$\rho_{Hg}$  – densidade do mercúrio [ $\text{kg/m}^3$ ]

$h_3$  – altura da coluna d'água no manômetro [m]

$h_2$  – altura da coluna de mercúrio do manômetro [m]

$Q_t$  – vazão da BFT [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$C_v$  – constante do Venturi [I]

$A_s$  – área da seção transversal do estrangulamento do Venturi [ $\text{m}^2$ ]

$G$  – aceleração local da gravidade [ $\text{m/s}^2$ ]

$\Delta h$  – diferença de altura lida no manômetro de colunas d'água [m]

$\rho_{H_2O}$  – Massa específica da água

PF – Potência no Freio

L - Comprimento do Braço do freio;

$P_h$  – Potência Hidráulica da Turbina

$P_{et}$  – Potência de Eixo da Turbina

$\eta_T$  – Rendimento da Turbina

$Q_v$  – Vazão no Venturi

$P_f$  – Potência no freio

HC – Deslocamento do obturador

Q – Vazão

$X_{01}$  – ponto zero do primeiro ensaio

$X_{02}$  – ponto zero do segundo ensaio

$X_{11}$  – ponto um do primeiro ensaio

$X_{12}$  – ponto um do segundo ensaio

$X_{21}$  – ponto dois do primeiro ensaio

$X_{22}$  – ponto dois do segundo ensaio

$Q_{01}$  – Vazão do ponto zero do primeiro ensaio

$Q_{02}$  – Vazão do ponto zero do segundo ensaio

$Q_{11}$  – Vazão do ponto um do primeiro ensaio

$Q_{12}$  – Vazão do ponto um do segundo ensaio

$Q_{21}$  – Vazão do ponto dois do primeiro ensaio

$Q_{22}$  – Vazão do ponto dois do segundo ensaio

$\alpha_1$  – ângulo de conicidade para ângulo de  $60^\circ$

$\alpha_2$  – ângulo de conicidade para ângulo de  $30^\circ$

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

A importância dos empreendimentos hidrelétricos de pequeno porte para suprir as necessidades de eletrificação em comunidades isoladas consiste num processo de desenvolvimento antigo no Brasil. Neste capítulo serão mostradas algumas das principais características deste tipo de empreendimento, as justificativas, os objetivos e uma revisão bibliográfica que dão alicerce para este trabalho de dissertação de mestrado.

## HISTÓRICO

A exploração dos recursos hídricos para fins de geração de energia elétrica iniciou-se no Brasil ao final do século XIX, com a implantação de centrais hidrelétricas de pequeno porte, geralmente bancadas pela municipalidade ou por empresários que tinham interesse de suprir energeticamente seus investimentos no surto de industrialização ocorrida na época. Isto se deu de tal maneira que atualmente é comum encontrar centrais hidrelétricas associadas às fazendas, usinas de açúcar, indústria de papel, de tecidos e às pequenas prefeituras (Tiago Filho, 2000).

Várias crises de energia ocorreram até os dias atuais, como a crise do petróleo em 1973, onde fez se despertar no país as discussões sobre as fontes renováveis de energia, com destaque no início dos anos 80 para as pequenas centrais hidrelétricas (PCH's), que estavam quase no esquecimento.

Nos anos 90, aparece o autoprodutor, o produtor independente, extingue-se o Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE) e cria-se a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). A conceituação de PCH's é modificada como nas leis 9074 de 07/95 e 9427 de 12/96, onde

se estabelece que autoprodutor e produtor independente com potência abaixo ou igual a 1 MW não necessitam de autorização e concessão (Medeiros,2004).

Foi o primeiro passo. Depois viriam as resoluções que facilitariam a integração das PCH's ao sistema elétrico, estabelecendo os critérios para o enquadramento de empreendimentos hidrelétricos na condição de Pequenas Centrais Hidrelétricas. As resoluções elaboradas pela Agência permitem que a energia gerada nas PCH's entre no sistema de eletrificação, sem que o empreendedor pague as taxas pelo uso da rede de transmissão e distribuição. O benefício vale para quem entrou em operação até 2003. As PCH's são dispensadas ainda de remunerar municípios e Estados pelo uso dos recursos hídricos.

No caso da implantação no sistema isolado da Região Norte, as PCH's podem também receber incentivo do Fundo formado com recursos da Conta Consumo de Combustíveis Fósseis (CCC), para financiar os empreendimentos, caso substituam as geradoras térmicas a óleo diesel nos sistemas isolados da Região Norte. A PCH Monte Belo foi o primeiro projeto deste porte a contar com o financiamento.

Entretanto, essas leis beneficiaram empreendedores de centrais com potência acima de 1 MW, onde as gerações de potências inferiores a esse valor foram esquecidas, principalmente aquelas inferiores a 100 KW, que caracterizam as microcentrais hidrelétricas (Medeiros, 2004).

Como os incentivos para esse tipo de investimento são poucos considerando os custos do grupo gerador de uma microcentral hidrelétrica em torno de até 50% do total do investimento, o Laboratório Hidromecânico de Pequenas Centrais hidrelétricas da Universidade Federal de Itajubá (LHPCH – UNIFEI) vem desenvolvendo pesquisas em equipamentos eletromecânicos e hidromecânicos, desenvolvendo nos últimos 20 anos pesquisas em turbinas não convencionais como Michel-Banki, BFT's, turbinas Turgo e os reguladores de carga para controle da rotação em grupos geradores, equipamentos estes de custos baixos.

Diante de um processo presente de racionalização energética e um racionamento já experimentado por regiões do país, e eventualmente para os próximos anos, a proposta de geração de hidroeletricidade a partir de micro aproveitamentos pode constituir-se em um mecanismo de oferta de energia localizada, alternativa, com um curto tempo de maturação e implantação auto sustentada em todo o processo desde a concepção à operacionalização.

A experiência já adquirida no país, através de pesquisas desenvolvidas no LHPCH - UNIFEI, que iniciou os estudos em trabalhos publicados pela Worthington e alguns pesquisadores estrangeiros, demonstra que o uso da B.F.T. pode tornar-se de imediato uma solução altamente econômica para as microcentrais.

A utilização e o emprego de bombas hidráulicas funcionando como turbina é uma forma de agregar, além de um custo reduzido, uma gama de experiências ainda maiores no que se refere a quantidade e a versatilidade de máquinas existentes, com produção em série, disponíveis no mercado

Seu princípio de funcionamento dessas bombas hidráulicas como turbinas está em admitir um fluxo de água inverso, empregado pela saída da bomba e devolvido ao meio pela sucção, sem qualquer mudança ou alteração construtiva.

No manual de microcentrais da Eletrobrás (1985), o percentual de rendimento admitido é de 77% para estas máquinas, quando proposta a fórmula para cálculo da potência disponível em um aproveitamento hidráulico, considerando a tecnologia nacional, para pequenas turbinas.

## **JUSTIFICATIVA**

A implantação de microcentrais hidrelétricas é uma das soluções para suprir com energia comunidades pequenas e isoladas, situadas normalmente na área rural. O aproveitamento de potenciais hidráulicos de pequeno porte tem se tornado cada vez mais viável devido não só à falta de recursos financeiros para os grandes empreendimentos, mas também pelo imenso potencial de geração em centrais de pequeno porte, que pouco tem sido aproveitado.

Apesar das microcentrais serem uma das alternativas mais viáveis em relação as comunidades isoladas, os incentivos ainda são poucos para esse tipo de empreendimento. Entretanto o custo dos equipamentos hidro-eleto-mecânicos é elevado e se constitui em um obstáculo para a implantação das MCH's. Uma opção considerada interessante é a utilização de bombas funcionando como turbinas (BFT) que pode apresentar custos competitivos, LOPES & MARTINEZ (2006), .

Considerando que o custo do grupo gerador de uma microcentral é praticamente 50% do total do investimento, tornou-se necessário o estudo de soluções práticas e economicamente viáveis.

Pesquisas realizadas na Universidade Federal de Ponta Grossa - UEPG-PR e UNESP-SP em 2004 em relação ao custo de bombas centrífugas funcionando como turbinas em microcentrais hidrelétricas, mostram que a opção por BFTs deve ser considerada em lugar das turbinas hidráulicas, sempre que os custos constituírem o aspecto dominante. Segundo pesquisas realizadas por VIANA (1987), com bombas centrífugas, mostram a viabilidade de utilizar Bombas Funcionando como Turbinas (BFTs), mas recomendam utilizá-las com potências abaixo de 50 kW.

Apesar da viabilidade no uso da BFT em relação a custo e benefício, uma grande desvantagem desse tipo de aplicação é a incapacidade no controle da velocidade do rotor. Sabe-se que uma das

maneiras para se controlar a velocidade de rotação dos rotores de máquinas hidráulicas motoras, turbinas hidráulicas, é controlando a vazão aduzida ao rotor. Normalmente isso é feito por um conjunto de pás, denominado distribuidor, que é inserido na seção imediatamente anterior à entrada do rotor.

Entretanto há máquinas hidráulicas motoras, turbinas hidráulicas e bombas funcionando como turbina, que não vêm munidas deste dispositivo, impossibilitando o controle da velocidade através da vazão.

Visando atender a essa necessidade para viabilização de projetos em centrais de pequeno porte, o CERPCH desenvolveu um sistema sistema de controle de velocidade (SISCOV®), capaz de controlar a velocidade de rotação através do controle de vazão na saída do tubo de sucção da BFT, Santos (2005).

A fim de encontrar características potenciais para melhorias no dispositivo utilizado nos testes experimentais, será utilizado a Dinâmica de Fluido Computacional – CFD, uma ferramenta auxiliar à engenharia, que tem apresentado resultados promissores e , por isso, pode ser empregado neste trabalho para encontrar características potenciais de melhorias no dispositivo usado nos testes experimentais. *CFD* é um objeto da validação por apresentar parâmetros que podem ser comparados com os dados conhecidos, estes de origem experimental.

### **1.3 OBJETIVO**

O objetivo deste trabalho é o estudo e viabilização de um modelo de Sistema de Controle de Velocidade “SISCOV®” para máquinas hidráulicas motoras, desenvolvido pelo Centro de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas – CERPCH.

Os ensaios experimentais foram realizados no Laboratório Hidromecânico Didático – Científico para Pequenas Centrais Hidrelétricas – LHDC - da UNIFEI, objetivando o levantamento das curvas de Recepção, de modo a verificar a capacidade e a viabilidade deste controle, Santos(2005).

Para uma melhor análise do Sistema será utilizado o método computacional *CFD* – Computational Fluid Dynamics, utilizado na simulação do escoamento visando o estudo do comportamento do fluido bem como suas características. Para isso, será utilizado a mesma característica geométrica do modelo ensaiado.

## 1.4 CONTEÚDO DO TRABALHO

No capítulo 2 é mostrado de forma detalhada o que é e qual a finalidade do sistema de controle de velocidade - SISCOV®, objeto de estudo deste trabalho, mostrando os princípios de funcionamento do sistema, bem como o objetivo e vantagem de fazer a sua instalação na saída do tubo de sucção de uma BFT.

O capítulo 3 descreve o procedimento experimental do sistema de controle de velocidade, mostrando o funcionamento da bancada de ensaio, os equipamentos utilizados, bem como as equações utilizadas para o cálculo de potência hidráulica e potência de eixo, determinando o rendimento da bomba após a instalação do novo sistema de controle.

No capítulo 4 será feita uma análise dos resultados obtidos experimentalmente, mostrando as tabelas de resultados, bem como os gráficos da curva de funcionamento do SISCOV® para diferentes aberturas, fazendo uma análise comparativa entre as curvas apresentadas.

O capítulo 5 apresenta a finalidade e a importância no uso da dinâmica de fluido computacional – *CFD*, mostrando o seu campo de aplicação e contribuição para melhoria e desenvolvimento de equipamentos, bem como os métodos e processos utilizados pelo *CFD* para o cálculo numérico, destacando as características de cada um.

O capítulo 6 descreve o estudo do sistema de controle de velocidade utilizando a dinâmica de fluido computacional, mostrando as etapas de processamento, detalhando a montagem da geometria e malha e definição das condições de controle para o cálculo numérico.

No capítulo 7 é feita uma análise dos resultados obtidos a partir da aplicação do *CFD* para diferentes ângulos de abertura, 30 e 60, mostrando as distribuições de pressão, velocidade e vetores de corrente para as diferentes aberturas do sistema de controle.

No capítulo 8 são apresentadas as conclusões obtidas a partir dos resultados da prática experimental e numérica em *CFD*.

## **1.5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **1.5.1 MCH**

Segundo LUCCHESI & SOARES(2002), as Micro Centrais Hidroelétricas, podem ser consideradas como uma proposta de energia alternativa para o meio rural da Região Noroeste/RS. O trabalho mostra que proposta de geração de hidroeletricidade a partir de micro aproveitamentos pode constituir-se em um mecanismo de oferta de energia localizada, alternativa, com um curto tempo de maturação e implantação auto sustentada em todo o processo desde a concepção à operacionalização.

### **1.5.2 BFT**

No Brasil, em 1988, surgiu o projeto BFT (Bombas Funcionando como Turbinas), coordenado pela Escola Federal de Engenharia de Itajubá (EFEI), com o objetivo de desenvolver pesquisas e testes com vários tipos de bombas e apresentá-las como uma alternativa simples para a eletrificação do meio rural. Desse projeto, resultaram as publicações de SANTOS & MARTINEZ (1987), SOUZA & VIANA (198-), VIANA et al. (1986) e a proposta de duas metodologias para seleção de equipamentos (SOUZA & VIANA, 1987), que apresentam de forma detalhada o comportamento e os aspectos operacionais da utilização em modo reverso de bombas centrífugas.

Os trabalhos de Viana (1987) e Viana e Nogueira (1990) testaram duas bombas centrífugas operando como turbinas e obtiveram coeficientes de altura e vazão. Com os coeficientes, a seleção da bomba para operar com turbina fica facilitada. Este artigo apresenta as vantagens na utilização de bombas centrífugas operando como turbinas, dando uma idéia de como selecioná-la a partir da vazão e altura de queda líquida disponíveis em uma propriedade rural, limitando-se à potência em 50 [kW].

Segundo F. F. Mauad, (1997) do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos - EESC - USP, as bombas funcionando como turbinas apresentam um baixíssimo custo em relação às soluções convencionais, com um resultado satisfatório. Estes resultados são adequados para geração de potências inferiores a 50 kW com as bombas funcionando a plena carga. Segundo testes de laboratórios, não ocorrem vibrações ou outras dificuldades pertinentes.

O grande mérito da escolha acertada está em associar a bomba correta às circunstâncias encontradas na natureza, altura e vazão, alcançando o rendimento adequado.

Baralim et al. (2004), apresentam uma metodologia simples de engenharia para estimar o custo das Bombas Funcionando como Turbinas (BFTs) utilizadas em microcentrais hidrelétricas, que possam ser usadas em estudos preliminares de novos aproveitamentos hidrelétricos, concluindo que para MCH's, sempre que os custos constituírem o aspecto dominante, e para potências até 50 kW, a opção por Bombas Funcionando como Turbina (BFTs) deve ser considerada em lugar das turbinas hidráulicas.

LOPES & MARTINEZ (2006), apresentam uma análise de viabilidade do uso de BFT para a utilização em sistemas de abastecimento de água, fazendo análise de viabilidade econômica para o uso da BFT em pequenas instalações, podendo esta ser uma opção de geração, principalmente para MCH's.

### **1.5.3 CFD (Computational Fluids Dynamic)**

No trabalho realizado por Neto et al. (2008) é feito uma simulação numérica utilizando um programa de fluido dinâmica computacional (*CFD*) do escoamento em uma tubulação, enfocando uma válvula gaveta. As análises realizadas serviram tanto para validar a utilização das ferramentas de fluido dinâmica computacional como para caracterizar os escoamentos nos dispositivos hidráulicos.

Rodrigues (2007), utilizou simulações numéricas em seu trabalho de parametrização e simulação numérica da turbina hidrocínética, a fim de validar toda a metodologia de otimização, comprovando a capacidade do modelo matemático de descrever o comportamento da Turbina Hidrocínética.

Vasconcelos (2006) apresenta um exemplo de aplicação das técnicas de Dinâmica dos Fluidos Computacional (*CFD*) para modelagem de escoamentos intensos em túneis de armazenagem de águas pluviais, construído nas áreas metropolitanas nos Estados Unidos desde a década de 80, mostrando como alternativa de retenção de águas de chuvas em áreas densamente construídas. O objetivo da modelagem é simular a formação de ondas de choque (ressaltos hidráulicos), transição entre diferentes regimes de escoamento e dar alguma informação sobre a possível captura de bolsões de ar. O trabalho apresenta uma descrição de um modelo numérico desenvolvido conjuntamente na Universidade de Brasília e na Universidade de Michigan, bem como um exemplo de aplicação, que é uma alternativa preliminar para um túnel de armazenagem de águas pluviais a ser construído em Washington, Estados Unidos.

Damian (2003) apresenta em seu trabalho o desenvolvimento de um sistema de filtragem compacto para usinas de asfalto, utilizando a Dinâmica de Fluidos Computacional para análise do escoamento dos gases de exaustão para melhoria do desempenho do sistema

Batista (2005) apresenta em sua tese, um método para geração de malhas não-estruturadas tetraédricas baseado em avanço de fronteira. O algoritmo elaborado é resultado da combinação de passos de algoritmos preexistentes, demonstrando a capacidade do algoritmo em discretizar volumes arbitrários obtendo distribuições razoáveis em termos de tamanho de aresta e volume de elemento.

## **CAPÍTULO 2**

### **SISTEMA DE CONTROLE DE VELOCIDADE - SISCOV**

#### **2.1 – DEFINIÇÃO DO EQUIPAMENTO**

O uso da bomba funcionando como turbina – BFT tem se mostrado altamente adequado para geração de potências inferiores a 50 kW. Entretanto, uma das dificuldades para o seu uso é a falta de um sistema de controle de velocidade, propriedade imprescindível relacionado ao atendimento de cargas que variam durante o dia. Diante desta necessidade, o CERPCH/LHPCH desenvolveu um Sistema de controle de Velocidade (SISCOV®), cuja vazão é controlada por um obturador inserido na saída do tubo de sucção e operado através de um servomecanismo comandado pela variação da frequência na geração.

Sob a coordenação do professor Tiago da Universidade Federal de Itajubá, foi preparado um modelo que refletia a necessidade desses grupos geradores. O modelo foi testado em uma Bomba Funcionando como Turbina (BFT) e constatou-se o bom desempenho do mesmo, Santos(2005).

O SISCOV®, é um equipamento simples e capaz de controlar a velocidade de rotação a partir do controle da vazão na saída do tubo de sucção.

Esse equipamento é basicamente composto por um servomecanismo ligado a um obturador cônico através de uma haste, que se movimenta de acordo com o acionamento do servomecanismo, como indicado na Fig 2.1.

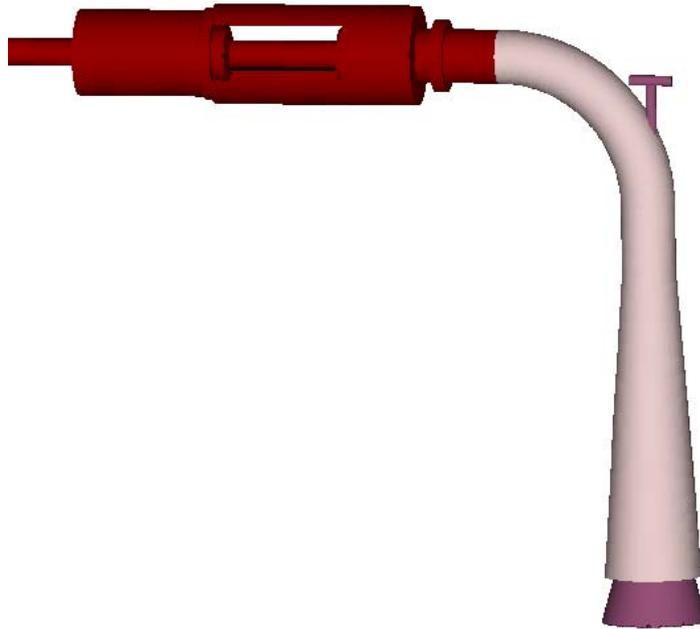


FIGURA 2.1 – Obturador na saída do tubo de sucção

O servomecanismo foi substituído pelo volante durante os ensaios de levantamento das características operacionais do obturador cônico.

## 2.2 - PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE CONTROLE DE VELOCIDADE

O funcionamento do sistema e da bancada de ensaio estão melhor detalhados no CAPÍTULO 3. Porém, a Figura 2.2 mostra um esquema básico de funcionamento do SISCOV®.

O objetivo do “SISCOV®” é manter a velocidade de rotação da BFT constante, para isso o sistema controla a saída de água no tubo de sucção modificando a área de abertura do tubo a partir da movimentação do obturador cônico.

De acordo com o esquema apresentado na Figura 2.2, a BFT, conforme um grupo gerador típico recebe uma variação de carga, nesse caso propiciado por uma resistência líquida, variando a velocidade de rotação do eixo. Essa variação é captada pelo CLP que envia um sinal ao servomotor para movimentar a haste de forma a abrir ou fechar o sistema de controle, ou seja, se aumentar ou diminuir a carga a velocidade de rotação do eixo diminui ou aumenta, essa variação na velocidade de rotação é captada pelo sensor que envia o sinal ao CLP.

## Sistema de Controle de Velocidade para Máquinas Hidráulicas Motoras desprovidas de Distribuidor

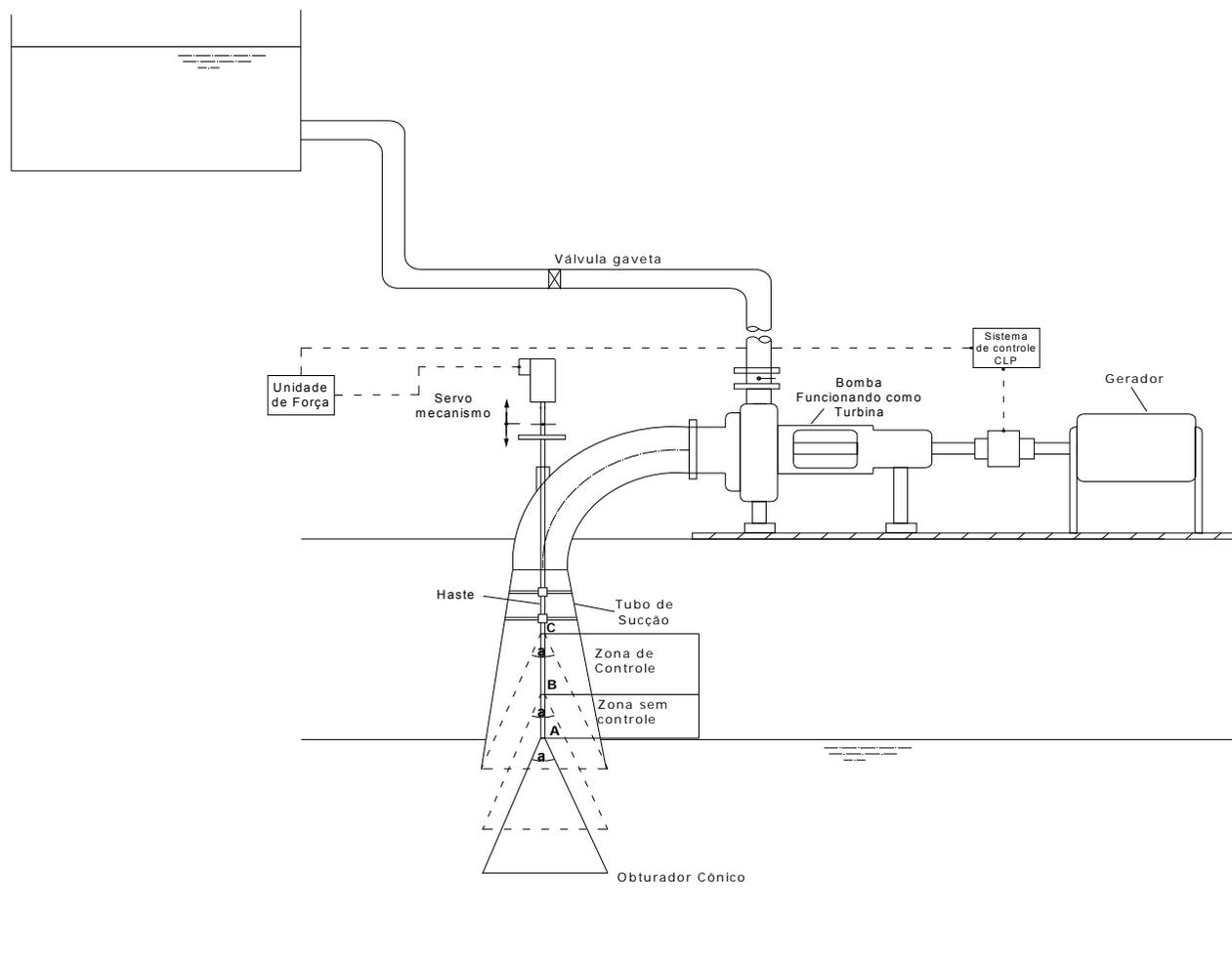


FIGURA 2.2 – Princípio de Funcionamento do SISCOV®

O sistema é operado através de um servomotor comandado pela variação da frequência na geração, através do sinal enviado pelo CLP, definindo qual deverá ser o posicionamento da válvula para manter a velocidade de rotação do eixo constante.

## 2.3 – DESCRIÇÃO DOS PRINCIPAIS ITENS

### 2.3.1 – Obturador Cônico

O obturador cônico é uma estrutura que tem por finalidade obstruir a passagem da água na saída do tubo de sucção de acordo com a variação da carga no sistema e conseqüente alteração da velocidade de rotação. Esse equipamento está instalado em uma das extremidades da haste, que tem por objetivo fazer a movimentação do mesmo.

#### 2.3.1.1 – Zonas de Atuação do obturador cônico

A Figura 2.3 mostra as zonas de atuação do obturador, definidas como Zona de Controle e Zona sem atuação de Controle

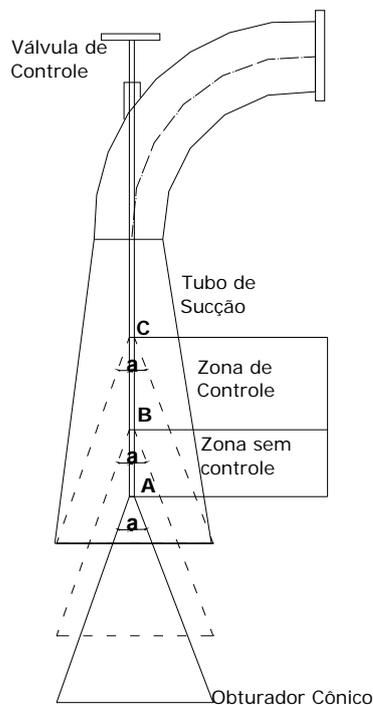


FIGURA 2.3 – Estrutura Básica do Obturador Cônico

O controle da vazão no sistema é feito a partir da movimentação do obturador cônico, instalado na saída do tubo de sucção, sendo que na medida em que esse obturador se movimenta de B para C ocorre uma variação na vazão. Essa movimentação se dá a partir de uma válvula de controle ou um Servomotor, ambos movimentam a haste conectada ao obturador .

A área entre os pontos A e B indica a zona sem controle, onde o obturador não influencia no controle da vazão, sendo o início da zona de controle dado a partir do ponto B até o ponto C.

### 2.3.2 – Haste de Acionamento e Válvula de Controle

São estruturas metálicas, com a finalidade de fazer a movimentação do obturador cônico, instalado em uma das extremidades da haste, sendo que na outra extremidade está instalada a válvula de Controle ou Servomotor, Fig.2.4. No caso dos ensaios realizados, utilizou-se um acionamento manual por um volante, dessa forma a movimentação do obturador foi feito manualmente com o fechamento ou abertura da válvula.

Com a utilização do Servomotor a movimentação da haste é feita automaticamente, a partir do sinal enviado pelo CLP, indicando qualquer alteração na velocidade de rotação. A partir dessa variação, CLP define qual o posicionamento correto da haste.

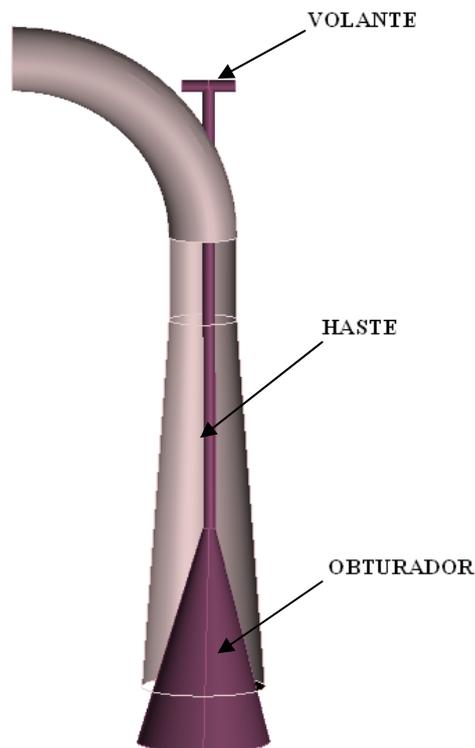


FIGURA 2.4 – Estrutura Básica do Sistema de Controle de Vazão (SISCOV®)

### 2.3.3– Servomotor

Um servomotor é um dispositivo que converte um sinal elétrico em movimento proporcional ou num deslocamento de uma alavanca, no caso a válvula, ele possui um eixo que pode ser posicionado numa posição angular desejada pelo envio de sinais codificados. Enquanto existir um sinal aplicado na entrada, o servo irá manter a posição angular do eixo. Quando o sinal mudar, a posição angular do eixo também muda.

O servo básico consta de um motor que, por meio de um sistema de redução, ou não, aciona um dispositivo de realimentação e uma alavanca. O dispositivo de realimentação serve para indicar a posição da alavanca de modo que o circuito de controle possa leva-la até uma posição desejada SANTOS (2007).

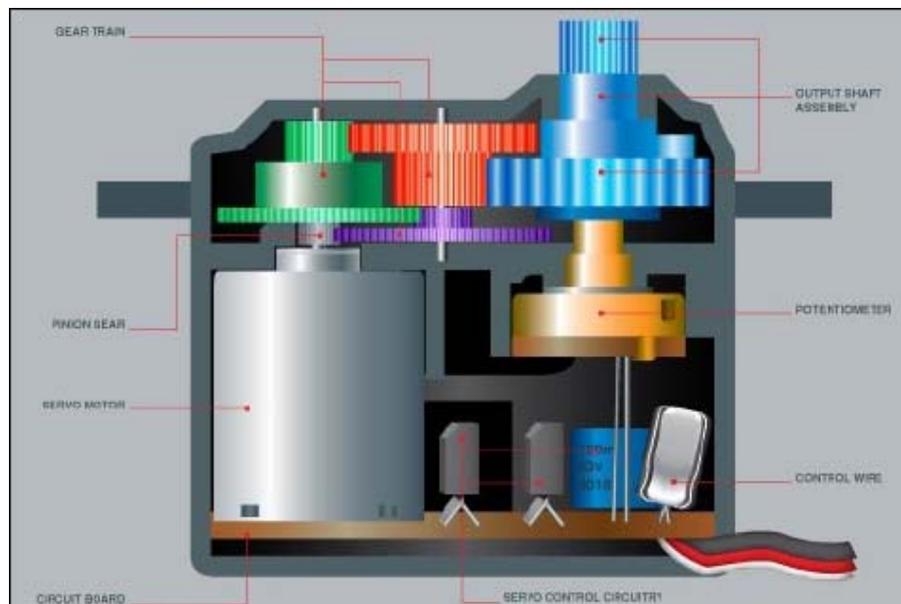


FIGURA 2.5 – Estrutura Básica do Servomotor

A figura 2.5 mostra a estrutura básica de um servomotor.

- **Circuito de Controle :**

Responsável por receber os sinais e energia do receptor, monitorar a posição do potenciômetro e controlar o motor de acordo com o sinal do receptor e a posição do potenciômetro.

- **Potenciômetro:**

Ligado ao eixo de saída do servo, o potenciômetro faz o monitoramento a posição do mesmo.

- **Motor:**

Movimenta as engrenagens e o eixo principal do servo.

- **Engrenagens:**

Reduzem a rotação do motor, transferem mais força ao eixo principal de saída e movimentam o potenciômetro junto com o eixo.

O ângulo do eixo é determinado a partir da duração da largura de pulso (PWM – “Pulse Width Modulation”) enviado à entrada de sinal do servomotor. O circuito de controle do servo fica monitorando este sinal em intervalos de 20 [ms], se dentro deste intervalo o circuito percebe uma alteração do sinal, a posição do seu eixo é alterada de forma a coincidir com o sinal que recebeu.

Uma vez que o servomotor recebe um sinal, ele verifica se o potenciômetro encontra-se na posição correspondente, se estiver ele não faz nada. Se o potenciômetro não estiver na posição correspondente ao sinal recebido, o circuito de controle aciona o motor até o potenciômetro estar na posição certa.

A direção de rotação do motor do servo vai depender também da posição do potenciômetro, o motor vai girar na direção que mais rápido levar o potenciômetro até a posição certa.

### 2.3.4– Controlador Lógico Programável

Os CLPs, são freqüentemente definidos como miniaturas de computadores industriais que contem um hardware e um software que são utilizados para realizar as funções de controle.

Um CLP consiste em duas seções básicas: a unidade central de processamento (CPU – central processing unit) e a interface de entradas e saídas do sistema, como mostra a Fig. 2.6.



FIGURA 2.6 – Estrutura Básica do CLP

Os sinais dos sensores são aplicados às entradas do controlador e a cada ciclo (varredura) todos esses sinais são lidos e transferidos para a unidade de memória interna denominada memória

imagem de entrada. Estes sinais são associados entre si e aos sinais internos. Ao término do ciclo de varredura, os resultados são transferidos à memória imagem de saída e então aplicados aos terminais de saída. Este ciclo está representado na Fig. 2.7.



FIGURA 2.7 – Ciclo de Processamento dos CLPs

## 2.4 – VANTAGENS DE UTILIZAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE DE VAZÃO

O SISCOV®, porém, exerce uma influência no rotor bem menor por estar localizado na saída do tubo de sucção, ou seja, a perda de carga ocorre a jusante da BFT, não influenciando no bom funcionamento da mesma, sendo essa uma das grandes vantagens na utilização do sistema.

Além da menor perda de carga, o baixo custo do equipamento é um fator preponderante, considerando que, para microcentrais hidrelétricas quase 50% do seu custo se dá em equipamentos geradores, sendo assim a instalação de um equipamento de baixo custo e de fácil manuseio torna-se uma solução atrativa para o problema de controle de velocidade.

Uma outra opção para o controle da vazão em grupos geradores é fazendo esse controle na entrada da BFT, porém testes já comprovaram a ineficiência do mesmo devido a grande perda de carga aduzida ao sistema.

No capítulo 3 é tratado de forma mais abrangente o processo experimental, descrevendo sucintamente as fases dos ensaios realizados e mostrando o equacionamento das grandezas relacionadas ao comportamento da BFT em função da instalação do sistema de controle no tubo de sucção.



## **CAPÍTULO 3**

### **PRÁTICA EXPERIMENTAL**

Neste capítulo serão mostradas as análises experimentais feitas em um sistema de controle de velocidade (SISCOV®) inserida na saída do tubo de sucção de uma bomba funcionando como turbina (BFT). Os ensaios foram realizados no Laboratório Hidromecânico Didático – Científico para Pequenas Centrais Hidrelétricas – LHDC - da Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI.

Os testes foram realizados com a BFT operando a uma altura de queda e rotação constantes e sujeita a variações de carga, sendo que os 1º e 2º ensaios foram realizados utilizando o sistema para o controle da vazão na saída do tubo de sucção e o 3º ensaio foi realizado utilizando uma válvula gaveta na entrada da BFT.

Os ensaios feitos na BFT tiveram como objetivo testar a viabilidade no uso do SISCOV® instalado na saída do tubo de sucção, a ser aplicado em grupos geradores dotados de BFT, Santos(2005).

#### **3.1 DESCRIÇÃO DA BANCADA DE ENSAIO**

##### **3.1.1 Laboratório Hidromecânico para Pequenas Centrais Hidrelétricas-LHPCH**

Desde a sua fundação, a Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, tem se destacado no desenvolvimento de atividades na área de geração de energia. Pelo seu pioneirismo foi escolhida em 1983, pelo governo brasileiro, para instalalar o Laboratório Hidromecânico para Pequenas Centrais Hidrelétricas, constituído de dois laboratórios, o Laboratório Hidromecânico Didático Científico- LHDC e o Laboratório Hidromecânico para Engenharia de Produto- LHEP, tendo como objetivos a formação e capacitação de pessoal especializado, assistência tecnológica às indústrias que fabricam turbinas e equipamentos para centrais hidrelétricas e desenvolvimento de produtos .

O LHPCH, desde 1985, desenvolve pesquisas na área de máquinas hidráulicas, através de vários convênios com empresas públicas e privadas, em que recebem destaque equipamentos não

convencionais para microcentrais hidrelétricas com potências inferiores a 50 kW (bombas funcionando como turbinas, reguladores eletro-eletrônicos de carga)

### **3.1.2 Laboratório Hidromecânico Didático Científico**

O Laboratório Hidromecânico Didático – LHDC, onde foram realizados os testes referentes a esse trabalho, é um dos laboratórios do LHPCH, que atende às aulas práticas da graduação, pós-graduação e treinamento na área de testes em bombas e turbinas hidráulicas.

O LHDC é um laboratório composto de 3 circuitos independentes, que são utilizados para capacitação e desenvolvimento de pessoal para PCH em nível técnico e superior. O principal circuito do LHDC é o denominado Laboratório Richard Bran, Fig. 3.1, homenagem ao Professor da EFEI pioneiro no ensino de Máquinas de Fluxo no Brasil. Este circuito é constituído por um grupo eletro-bomba de 30 [kW] de potência com variação de velocidade obtida através de acoplamento hidrocínético. o que permite obter vazões até 140 [l/s] e quedas até 30 [mCA].

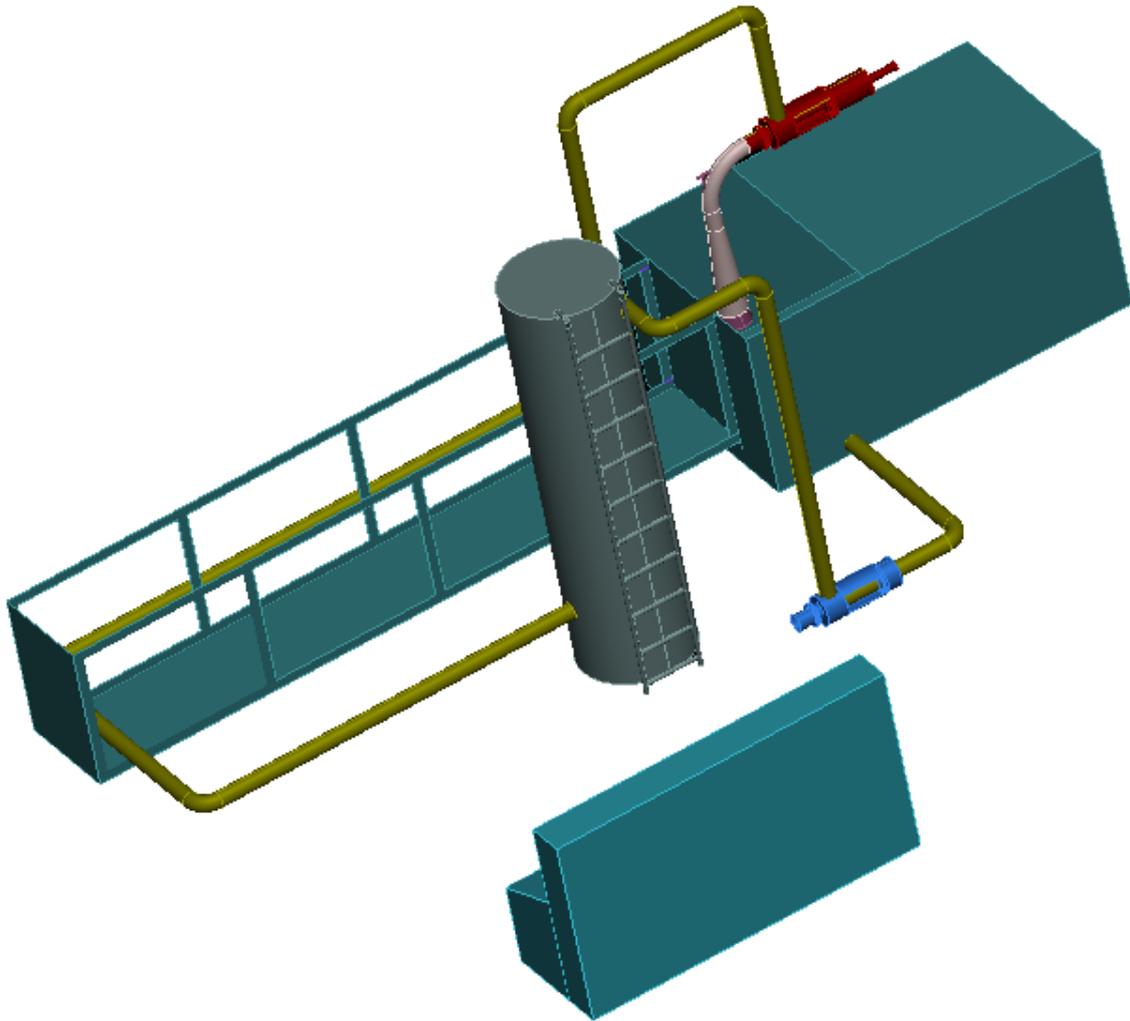


Figura 3.1 – Bancada de Ensaio

Este grupo pode alimentar um grupo gerador de 5 [kW] de potência composto de turbina tipo Francis, regulador de velocidade, volante e gerador interligado e quadro de comando para ensaios em paralelo com a rede ou em carga independente. Alternativamente o grupo pode alimentar turbina com rotor tipo Francis ou hélice para ensaios de campo de funcionamento com auxílio de freio elétrico. O circuito dispõe de moderno equipamento de medidas tanto mecânicos quanto elétricos. O segundo circuito do LHDC é uma modelagem de PCH de desvio que permite realizar os estudos dos fenômenos transitórios que ocorrem em sistemas de baixa e alta pressão e nas chaminés de equilíbrio.

O dispositivo de fechamento, com controle de tempo, pode ser regulado para fechar em décimos de segundo até vários segundos, o que permite com auxílio de transdutores de pressão e registradores

de alta resolução estudar o fenômeno transitório, em tempo real, particularmente golpe de ariete e as oscilações em chaminé de equilíbrio.

O último circuito do LHDC é um modelo de Microcentral Hidrelétrica para agricultura que utiliza como unidade geradora básica uma turbina Michell-Banki de 1,0 [kW] que pode acionar um gerador assíncrono ou uma pequena máquina agrícola. O seu objetivo principal é mostrar a estudantes e usuários como a energia hidráulica pode ser facilmente utilizada para melhorar a qualidade da vida no campo utilizando uma unidade geradora que pode ser fabricada na própria propriedade, com materiais e recursos de fácil obtenção.

A bancada de ensaios da BFT, como mostra a figura 3.2, foi montada no circuito do LHDC, sendo composta por:

- 01- Resistência Líquida
- 02- Freio;
- 03- Tanque de sucção
- 04- Piezômetro, utilizado para medir o nível da água no tanque de sucção;
- 05- Bomba Funcionando como Turbina – BFT;
- 06- SISCOV®, utilizado para controlar a vazão na saída (teste);
- 07- Válvula de Controle, utilizado para movimentação do SISCOV® (teste);
- 08- Válvula Borboleta, utilizado para controlar a vazão na entrada (teste);
- 09- Manômetro de coluna de mercúrio, utilizado para medir a pressão na entrada da BFT;
- 10- Bomba Hidráulica, utilizada para simular a altura de queda;
- 11- Câmara de Equalização de pressão;
- 12- Medidor Venturi, utilizado para medir a vazão;
- 13- Equipamentos Elétricos, utilizados para variar a solicitação da BFT;
- 14- Tacômetro, utilizado para medir a velocidade de rotação do eixo;
- 15- Painel de Controle, utilizado para controlar a bomba;

### 3.1.3 Funcionamento da Bancada de Ensaios

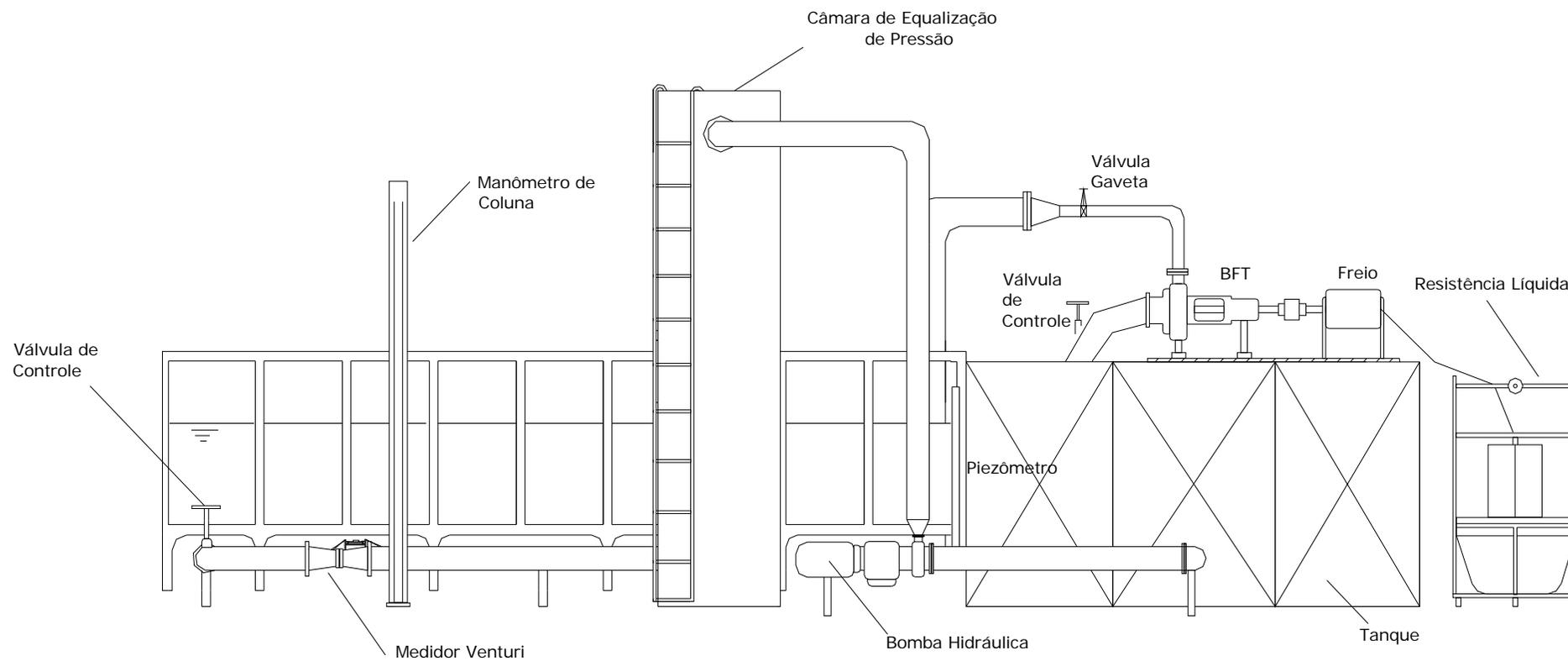


Figura 3.2– Circuitos de Ensaios

De acordo com a Figura 3.2, o funcionamento da bancada de ensaio é dado da seguinte forma:

A bomba hidráulica, utilizada para simular a queda e a vazão, succiona água do reservatório e recalca para a câmara de equalização de pressão;

Em seguida a água passa pelo medidor de Venturi para que a vazão possa ser calculada em função da diferença de altura observada no manômetro de mercúrio;

A água passa pela válvula gaveta, na entrada da BFT, onde foi montado um anel piezométrico, que permite a determinação da altura neste ponto, em função das alturas lidas no manômetro de mercúrio;

Na sequência a água passa pelo rotor da turbina fazendo-o movimentar, nesse momento é feita a leitura da velocidade de rotação do eixo, que varia de acordo com a carga do sistema;

O sensor faz a leitura da rotação do eixo e envia os sinais a um CLP;

O CLP por sua vez envia um sinal ao servomotor indicando o posicionamento correto da haste para que a velocidade se mantenha constante, fazendo a movimentação do SISCOV® para o controle da vazão na saída do tubo de sucção,

A água saindo da BFT, entra no tubo de sucção, passando pelo sistema de controle de vazão e retornando para o tanque onde o nível é medido através do piezômetro.

A BFT aciona um dinamômetro, que gera energia elétrica que será dissipada por meio de uma resistência líquida, simulando a variação de carga, medida pela balança através do torque no braço do dinamômetro.

### **3.2 CARACTERÍSTICAS DA BOMBA ENSAIADA**

A bomba utilizada neste ensaio é do tipo centrífuga, de fabricação nacional, adquirida em 1987 pelo Laboratório Hidromecânico Didático – Científico para Pequenas Centrais Hidrelétricas – LHDC - da UNIFEI, ano em que foi ensaiada por Viana (1987), sendo depois utilizada por Medeiros (2004) em sua dissertação de mestrado.

Os dados que caracterizam as condições ótimas da bomba funcionando como turbina são mostrados na Tab 3.1.

**Tabela 3.1 – Condições Ótimas da Bomba Funcionando como Turbina**

Condições Ótimas de Funcionamento				
altura Hb [m]	Rotação nb[rpm]	Vazão Qb[L/s]	Rendimento $\eta_b$ [%]	Potência de Eixo Peb[kW]
11,8	~1800	27,3	76	1,053

Fonte: Medeiros, D. M.

A Figura 3.3 mostra a BFT montada no LHPCH da UNIFEI.



Figura 3.3 - Bomba Funcionando Como Turbina (BFT) Utilizada Nos Ensaios

O funcionamento da instalação se dá pelo princípio de se operar uma bomba ao reverso, que por motivos econômicos, pode ser de fabricação seriada, não sofrendo qualquer modificação. Ainda, admite-se somente o uso de um tubo de sucção cônico e o uso de uma válvula na entrada da BFT. para pequenas regulagens de carga.

Em operação a BFT. tem se comportado sem vibrações, com rendimento igual ou, em alguns casos, superior ao rendimento da bomba quando em operação.

### 3.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O ensaio foi realizado considerando a altura de queda  $H = 11.8$  m e rotação  $n = 1800$  rpm constantes, sujeitas a variações de cargas, seguindo os seguintes passos:

No quadro de comando, parte-se a bomba centrífuga com o mínimo de óleo;

Abre-se a válvula gaveta;

Retira-se o ar dos manômetros e do Venturi;

Através do controle manual do regulador de velocidade, coloca-se uma rotação de modo que a altura de entrada na turbina seja a desejada;

Mede-se os valores das condições locais:

$H_b$ : Pressão Barométrica;

$T_a$ : Temperatura do ar;

$\Phi$ : Umidade Relativa;

$T_{H_2O}$ : Temperatura da água;

Para cada carga da resistência líquida, medem-se os valores de:

$\Delta H_v$ : Variação da coluna de mercúrio da coluna de água no Venturi;

$\Delta H_s$ : Altura de Sucção;

F: Força na Balança;

Mantendo-se constantes os valores de :

$H_1$ : Altura da coluna de mercúrio na entrada de água no Venturi;

$H_2$ : Altura da coluna de mercúrio ligada à atmosfera;

$H_3$ : Altura da coluna de Líquido;

Calcula-se, a partir dos dados medidos, os valores de:

Q: Vazão do Venturi;

$P_h$ : Potência Hidráulica da Turbina;

$P_{et}$ : Potência de Eixo da Turbina;

$P_f$ : Potência no Freio;

$\eta_T$ : Rendimento da Turbina

### 3.4 DETERMINAÇÃO DAS GRANDEZAS FÍSICAS

As grandezas do ensaio são calculadas da seguinte forma:

### 3.4.1 Determinação da altura manométrica na entrada da BFT

A altura manométrica na entrada da BFT foi determinada utilizando-se os conceitos de manometria. A figura 3.4 mostra o manômetro acoplado a entrada da BFT.

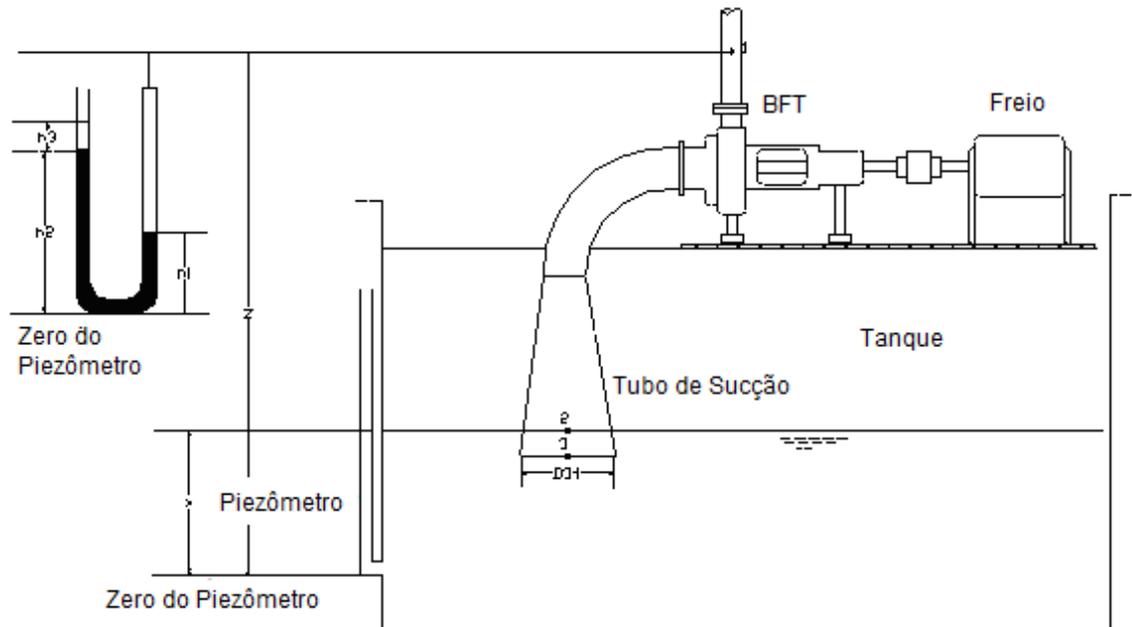


FIGURA 3.4- Manômetro de colunas de mercúrio montado na entrada da BFT

Observando a Figura 3.4 e aplicando os conceitos de manometria obtém-se:

$$p_{2t} + \rho \cdot g \cdot y - \rho \cdot g \cdot h_1 + \rho_{Hg} \cdot g \cdot h_1 - \rho \cdot g \cdot h_3 - \rho_{Hg} \cdot g \cdot h_2 = 0 \quad (3.1)$$

Onde:

$p_{2t}$  – pressão no ponto 2 [Pa];

$\rho$  – densidade da água [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$g$  – aceleração da gravidade [ $\text{m}/\text{s}^2$ ];

$h_1$  – altura da coluna de mercúrio do manômetro [m];

$\rho_{Hg}$  – densidade do mercúrio [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ];

$h_3$  – altura da coluna d'água no manômetro [m];

$h_2$  – altura da coluna de mercúrio do manômetro [m].

A densidade relativa do mercúrio é dada por:

$$\frac{\rho_{Hg}}{\rho} = 13,6 \quad (3.2)$$

Dividindo-se todos os membros da equação (3.1) por  $\rho$  e substituindo-se a equação (3.2) em (3.1) vem:

$$\frac{p_{2t}}{\rho \cdot g} = 13,6 \cdot h_2 - 12,6 \cdot h_1 + h_3 - y \quad (3.3)$$

De acordo com a figura 3.5, a altura referente ao nível do reservatório a jusante é:

$$Z_1 - Z_3 = Z - X \quad (3.4)$$

A equação (3.3) é a altura referente à pressão manométrica na entrada da BFT enquanto que a equação (3.4) é a altura entre o ponto 1 na entrada da BFT e o ponto 2.

### 3.4.2 Medidor Venturi

O medidor Venturi é um instrumento utilizado para se medir vazão. Esta é calculada em função da diferença de altura de um manômetro de coluna d'água, conectado entre dois pontos do medidor. A figura 3.5 mostra o medidor Venturi e o manômetro de colunas d'água.

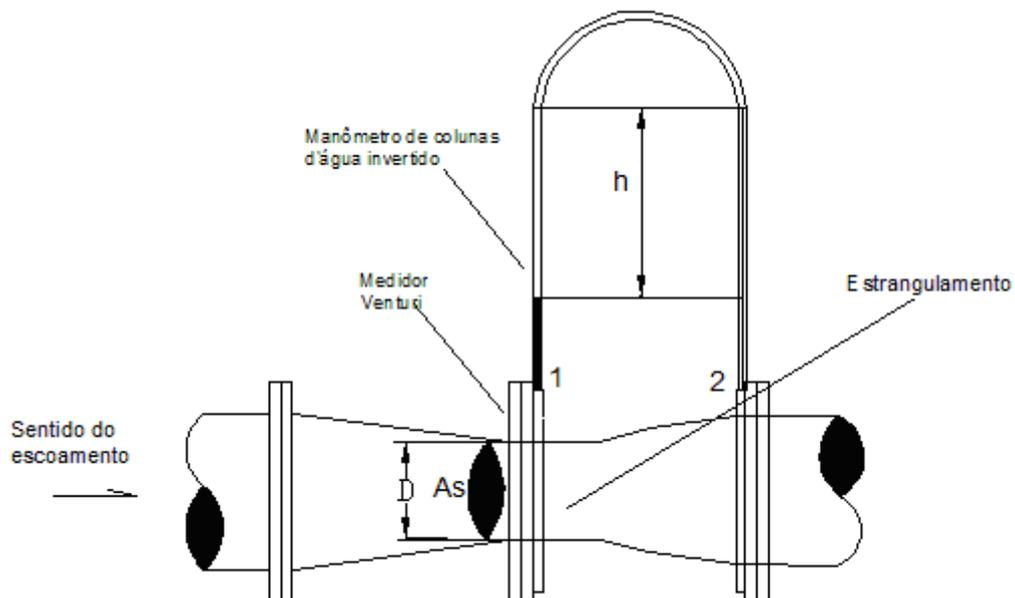


Figura 3.5 – Medidor Venturi

Aplicando-se a equação de Bernoulli entre os pontos 1 e 2 da figura 3.5, obtém-se:

$$Q_t = C_v \cdot A_s \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h}$$

Onde:

$Q_t$  – vazão da BFT [ $m^3/s$ ];

$C_v$  – constante do Venturi [1];

$A_s$  – área da seção transversal do estrangulamento do Venturi [ $m^2$ ];

$G$  – aceleração local da gravidade [ $m/s^2$ ];

$\Delta h$  – diferença de altura lida no manômetro de colunas d'água [m].

A partir do diâmetro da tubulação, calcula-se a área da seção transversal e com a aceleração da gravidade e a constante do venturi, determina-se a equação do venturi. Obteve-se, portanto:

$$Q_t = 0,083257\sqrt{\Delta h} \text{ [m}^3\text{/s]} \quad (3.6)$$

A equação (3.6) será utilizada para calcular a vazão da BFT em função da diferença de altura lida no manômetro de colunas d'água.

### 3.4.3 Massa Específica da Água (pH<sub>2</sub>O)

$$\rho_{H_2O} = 1000.5 - 0.762439 \cdot T_a - 0.00349823 \cdot T_a^2 \quad (3.7)$$

### 3.4.5 Potência no Freio (P<sub>f</sub>)

$$P_f = \frac{M_t \cdot \omega}{1000} \quad \text{onde } M_t = F \cdot L \cdot g \quad \text{e } \omega = 2 \cdot \pi \cdot \frac{nF}{60} \quad (3.8)$$

L: Comprimento do Braço do freio;

### 3.4.6 Potência Hidráulica da Turbina (P<sub>h</sub>)

$$P_h = \rho \cdot Q \cdot g \cdot H \cdot 10^{-3} \text{ [kW]} \quad (3.9)$$

### 3.4.7 Potência de Eixo da Turbina: P<sub>et</sub>

$$P_{et} = \frac{P_f}{\eta_c} \quad (3.10)$$

### 3.4.8 Rendimento da Turbina ( $\eta_T$ )

$$\eta_T = \frac{P_{et}}{P_h} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (3.11)$$

No próximo capítulo, será feito uma análise dos resultados obtidos no ensaio Experimental, mostrando as curvas de recepção para cada ângulo de abertura.



## CAPÍTULO 4

### ANÁLISE DOS RESULTADOS DO ENSAIO EXPERIMENTAL

Com as condições ótimas de funcionamento da BFT, fez-se nos ensaios as medições necessárias para o levantamento das curvas de recepção da BFT utilizando SISCOV®, bem como as curvas mostrando os resultados das zonas de atuação do sistema de controle de vazão implantado na BFT.

Foram realizados três ensaios, no primeiro ensaio utilizou-se o Sistema de Controle de Velocidade considerando o ângulo de abertura ( $\alpha_1$ ) do obturador cônico de  $60^\circ$ , no segundo ensaio foi considerado um ângulo de abertura ( $\alpha_2$ ) de  $30^\circ$ , como indicado na Figura 4.1, e finalmente no terceiro ensaio utilizou-se apenas uma válvula gaveta na entrada da BFT para o controle da vazão.

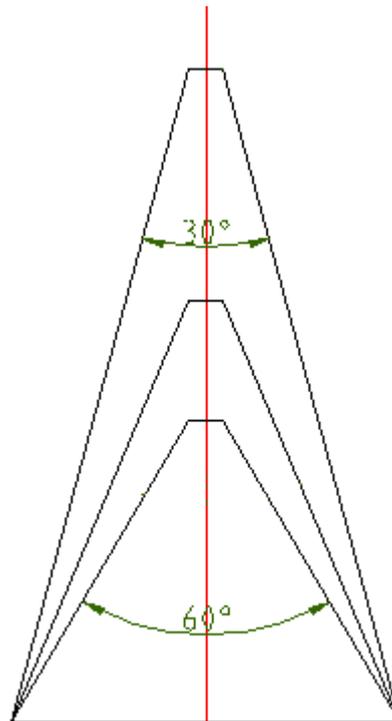


Figura 4.1 – Ângulos de abertura do SISCOV®

Nesse capítulo serão mostrados todos os resultados para os três ensaios realizados, mostrando as curvas de recepção para cada ângulo de abertura. As tabelas com os resultados de cálculo estão representadas no Anexo A.

## 4.1 CURVAS DE RECEPÇÃO DA BFT UTILIZANDO UM SISTEMA DE CONTROLE DE VELOCIDADE

### 4.1.1 Primeiro Teste

A Figura 4.2 mostra o resultado da curva do rendimento x vazão relacionado ao primeiro teste realizado, obtendo um rendimento máximo de 72% para uma vazão de 0,0301 m<sup>3</sup>/s, rotação de 1800 rpm para uma altura de 8m. Esse resultado está bem próximo ao rendimento obtido por Medeiros em seus testes experimentais, Tab. 3.1.

As tabelas com valores lidos e calculados são apresentados no Anexo A.

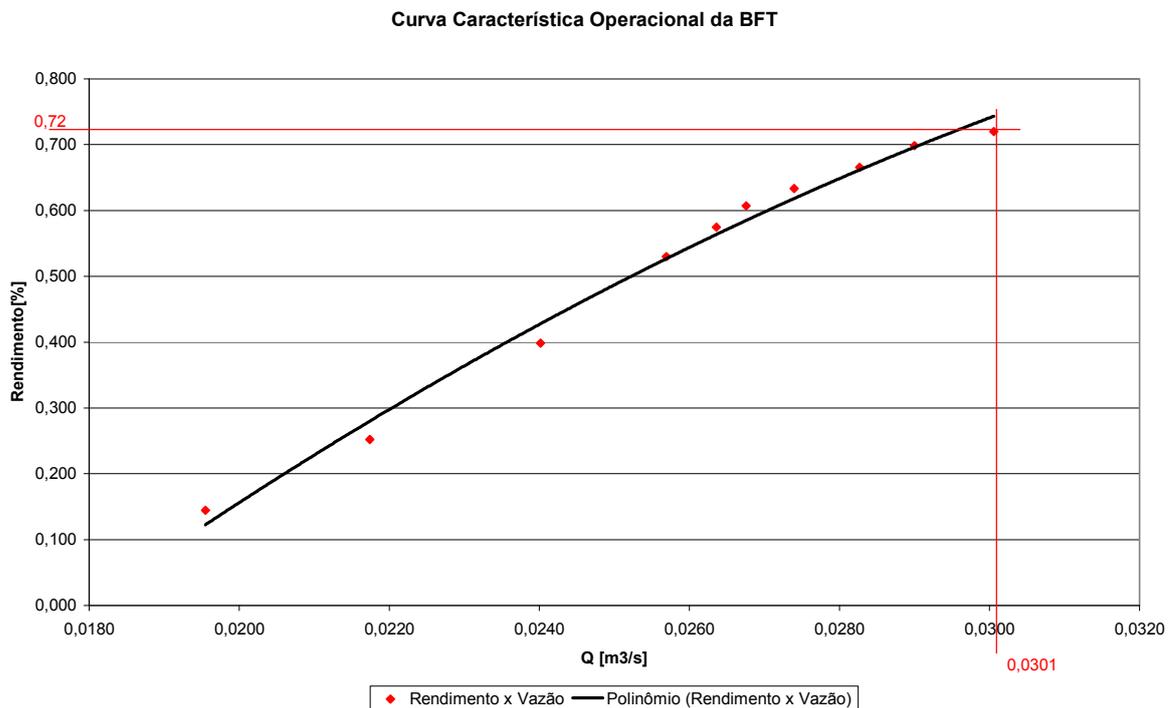
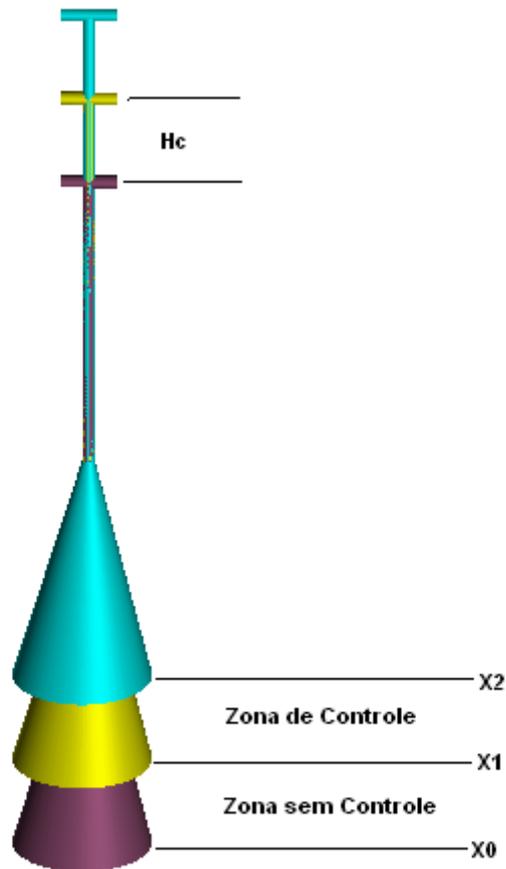


Figura 4.2 – Rendimento X Vazão Para O 1º Teste

Os pontos representados na Figura 4.3, indicam o deslocamento do obturador, sendo X0 o ponto de máxima abertura do obturador, o ponto X1 representa o ponto onde começa a zona de controle da

vazão e o ponto X2 indica o ponto de mínima abertura do obturador. Hc indica o deslocamento da válvula de controle.



**Figura 4.3 – Sistema de Controle de Vazão**

A Figura 4.4 mostra a curva de variação da vazão em relação a abertura do obturador, mostrando a zona de atuação do SISCOV®. O eixo x representa a abertura da válvula em relação a vazão na saída do tubo de sucção.

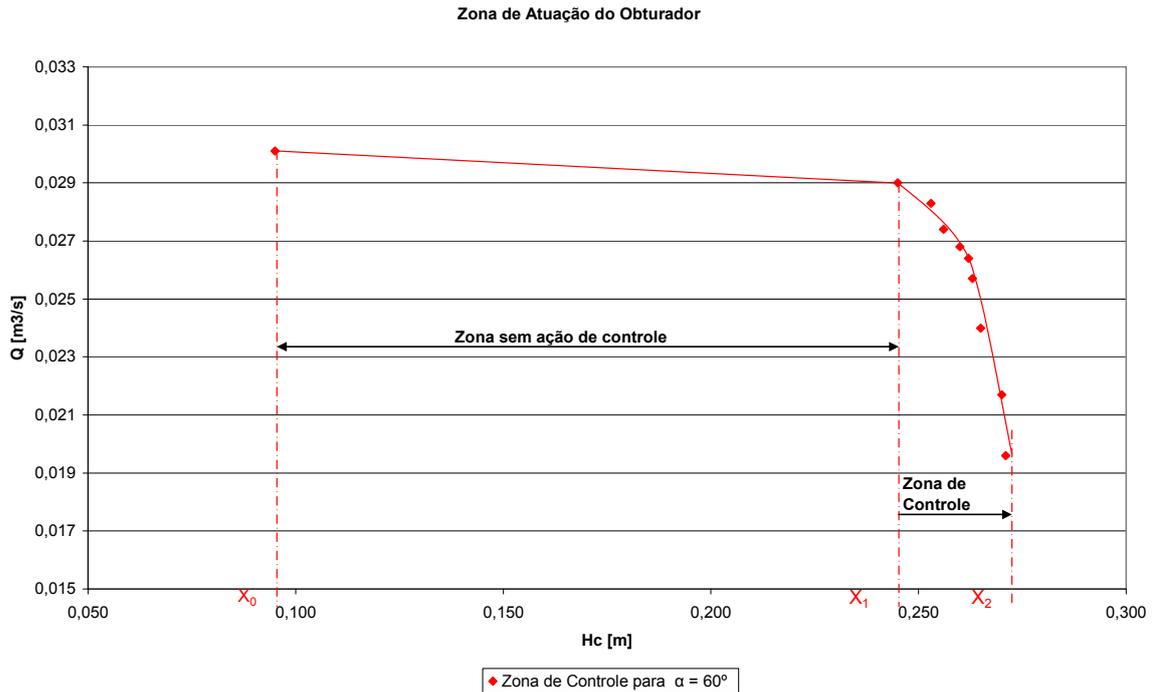
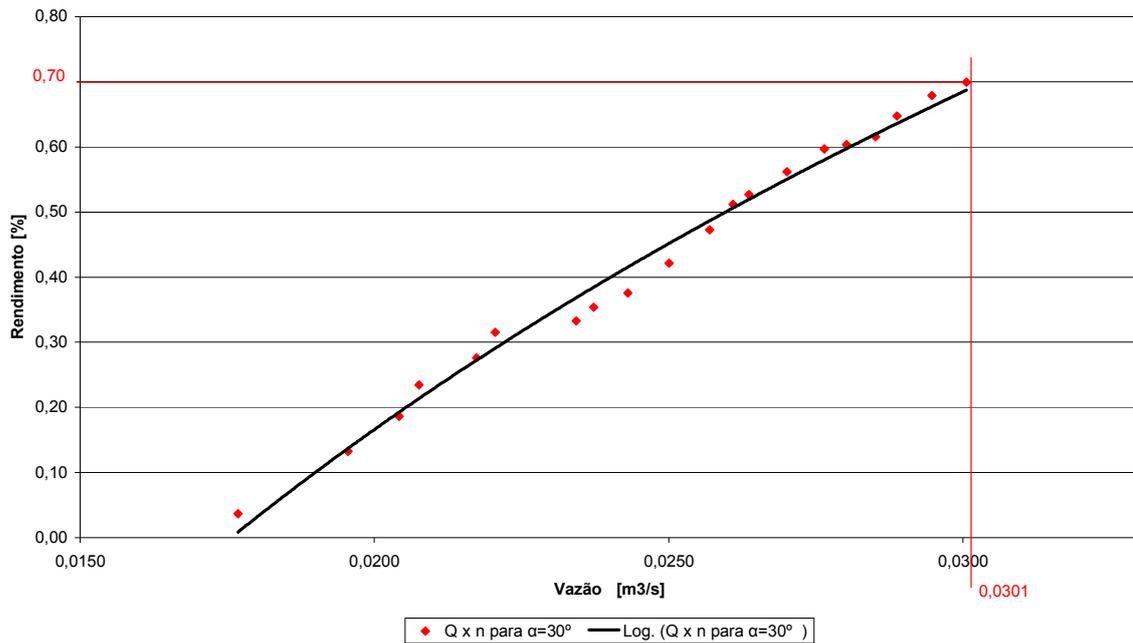


Figura 4.4 – Posição do Cone x Vazão para o ângulo de conicidade  $\alpha=60^\circ$  modificar a curva

A Figura 4.4, mostra o trecho definido pelos pontos  $X_0=0,095\text{m}$  e  $X_1=0,245\text{m}$ , denominado zona sem ação de controle. O trecho representado pelos pontos  $X_1=0,245\text{m}$  e  $X_2=0,271\text{m}$ , é denominado zona de controle, .

#### 4.1.2 Segundo Teste

Em consequência dos resultados do primeiro teste não terem sido satisfatórios, houve a necessidade de fazer uma modificação no diâmetro do obturador , ou seja, diminuir o ângulo de  $60^\circ$  para  $30^\circ$  com o objetivo de determinar um menor curso do obturador para as zonas definidas entre os pontos  $X_0$  e  $X_2$ . Considerando as modificações no ângulo, fez-se então um novo teste experimental, sendo os resultados mostrados no gráfico a seguir.

Curva Característica Operacional da BFT para  $\alpha=30^\circ$ Figura 4.5 – Rendimento x Vazão para o ângulo de conicidade  $\alpha = 30^\circ$ 

Observa-se que para um menor ângulo de conicidade, obtem-se uma diminuição de 2% no rendimento da BFT. Apesar da diminuição do rendimento, foi possível obter resultados mais satisfatórios em se tratando do deslocamento do obturador cônico, como mostra a Figura 4.5.

A Figura 4.6 mostra a curva de variação da vazão em relação a abertura do obturador, mostrando a zona de atuação do SISCOV®. O eixo x representa a abertura da válvula em relação a vazão na saída do tubo de sucção, o intervalo indicado pelos pontos ( $X_0=0,120m$ ) e ( $X_1=0,229m$ ) representa a zona sem atuação de controle, enquanto o intervalo indicado por ( $X_1=0,229m$ ) e ( $X_2=280m$ ) mostra a zona com atuação de controle.

## Zona de Atuação do Obturador

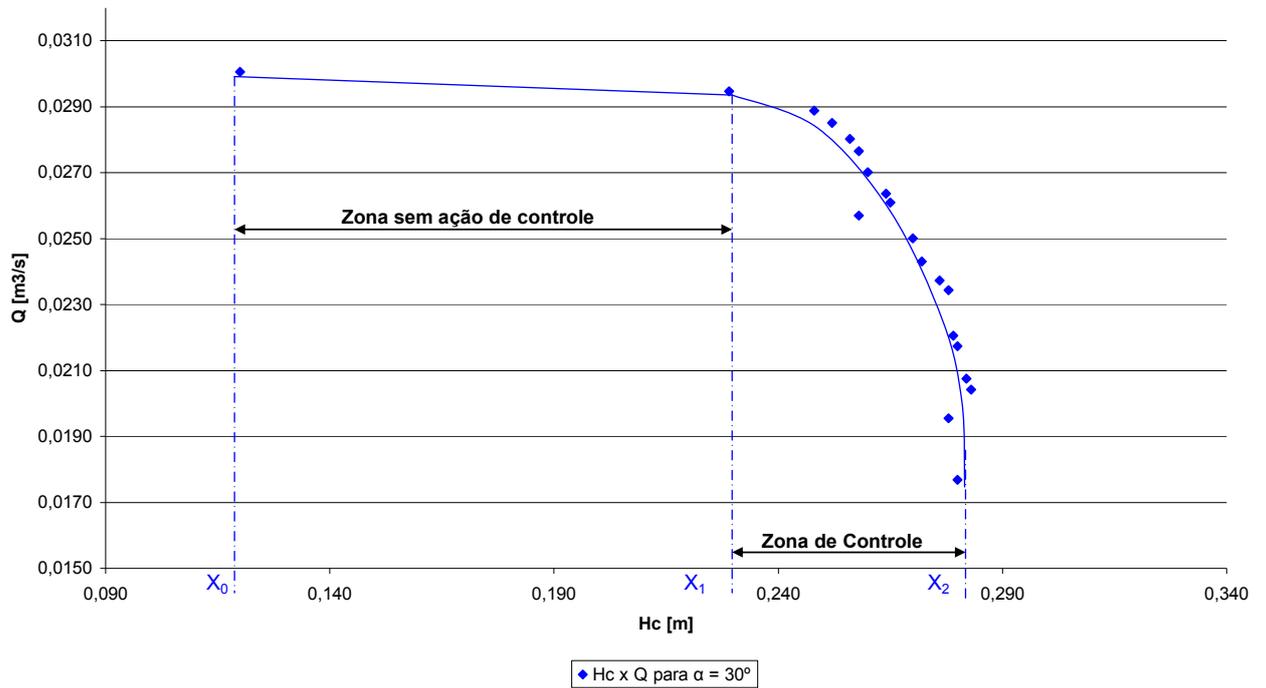


Figura 4.6 – Posição do Cone x Vazão para o ângulo de conicidade  $\alpha=30^\circ$

#### 4.1.3 Comparação entre os resultados dos ensaios realizados

A tabela 4.1, mostra os valores máximos de potência hidráulica ( $P_h$ ), potência de eixo da turbina ( $P_e$ ), rendimento ( $\eta$ ), vazão ( $Q$ ) e altura ( $H$ ), calculados a partir das equações 3.1 a 3.11, relacionadas no capítulo anterior. Observa-se, portanto, que houve uma diminuição de aproximadamente 2% no rendimento (2º teste), ocorrida após a mudança feita no sistema de controle.

Tabela 4.1 – Valores calculados

Resultados de Cálculo para os dois ensaios realizados					
Ângulo	Potência Hidráulica $P_h$ [kW]	Potência de Eixo $P_e$ [kW]	Rendimento $\eta$ [%]	Vazão $Q$ [m³/s]	Altura $H$ [m]
$\alpha_1=60^\circ$	3,45	2,48	72	0,0301	11,75
$\alpha_2=30^\circ$	3,44	2,41	70	0,0301	11,73

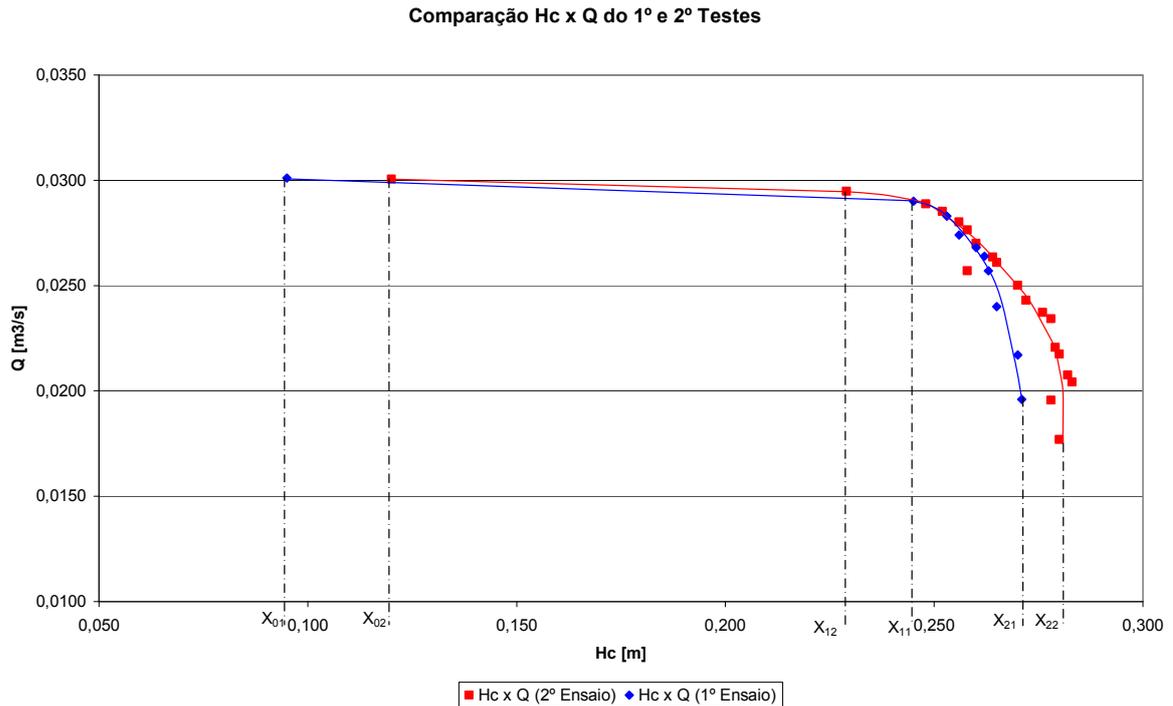


Figura 4.7 – Zonas de Controle e sem ação de controle

$X_{01}$  – ponto zero do primeiro ensaio;     $X_{02}$  – ponto zero do segundo ensaio;  
 $X_{11}$  – ponto um do primeiro ensaio;     $X_{12}$  – ponto um do segundo ensaio;  
 $X_{21}$  – ponto dois do primeiro ensaio;     $X_{22}$  – ponto dois do segundo ensaio;

O gráfico representado na Figura 4.7, mostra as variações ocorridas nas zonas de atuação do SISCOV® após as modificações feitas no sistema.

Após os resultados dos dois ensaios, considerando os diferentes ângulos de conicidade, é possível fazer comparação entre os gráficos de atuação do SISCOV® do segundo ensaio em relação ao primeiro, observando uma diminuição na zona sem ação de controle (pontos  $X_{02}$  e  $X_{12}$ ) e um aumento na zona de controle (pontos  $X_{12}$  e  $X_{22}$ ), conforme Fig. 4.8.

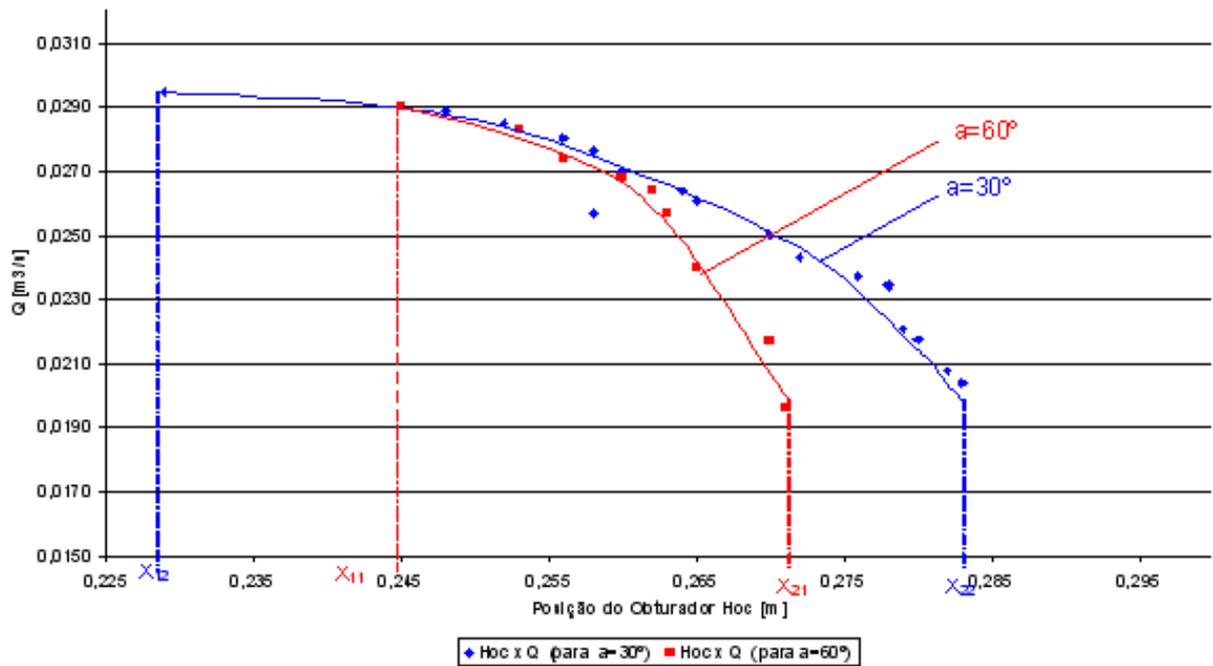
Comparação entre Zonas de Controle para  $\alpha=60^\circ$  e  $\alpha=30^\circ$ 

Figura 4.8 – Gráfico de Comparação entre as Posições do Cone nos 1º e 2º Testes em relação a variação da vazão na Zona de Controle

A tabela 4.2 mostra as variações do curso em relação ao controle do sistema inserido no tubo de sucção, especificando a zona sem variação da vazão e a zona de controle do sistema.

Tabela 4.2 – Comparação entre Zonas de Controle para  $\alpha_1=60^\circ$  e  $\alpha_2=30^\circ$

Zonas de Atuação do SISCOV®								
Ângulo	Zona sem ação de Controle				Zona de Controle			
	Pontos	Deslocamento [m]	Pontos	Vazão [m³/s]	Pontos	Deslocamento [m]	Pontos	Vazão [m³/s]
$\alpha_1=60^\circ$	$X_{01} - X_{11}$	0,150	$Q_{01} - Q_{11}$	0,0011	$X_{11} - X_{21}$	0,026	$Q_{11} - Q_{21}$	0,0094
$\alpha_2=30^\circ$	$X_{02} - X_{12}$	0,109	$Q_{02} - Q_{12}$	0,0021	$X_{12} - X_{22}$	0,051	$Q_{12} - Q_{22}$	0,0076

Verifica-se a partir dos resultados mostrados na Tabela 4.2 que no segundo teste houve um aumento na zona de controle, indicando o melhor funcionamento do sistema utilizando um obturador cônico com um ângulo de  $30^\circ$ .

#### **4.1.4 Controle da vazão na entrada da BFT utilizando válvula gaveta**

O objetivo deste ensaio foi a verificação do controle da vazão na entrada da BFT utilizando uma válvula gaveta. No teste realizado, foi possível fazer o controle da vazão apenas para o primeiro ponto, estando a mesma totalmente aberta. A partir do segundo ponto com a variação da carga, não foi possível fazer o controle da vazão utilizando a válvula gaveta, pois a mesma insere uma perda de carga muito grande na entrada da BFT, prejudicando o bom funcionamento da máquina.

O sistema de controle de vazão também insere uma perda de carga, porém, a jusante, não interferindo no funcionamento da BFT.

No próximo capítulo é apresentado a Dinâmica de fluido computacional (CFD), mostrando as etapas para construção da geometria, geração da malha e definição das condições de contorno para a realização do cálculo numérico.



## CAPÍTULO 5

# DINÂMICA DE FLUIDO COMPUTACIONAL

Atualmente, a utilidade das simulações computacionais nos mais diversos ramos do conhecimento é algo indiscutível, e isso é particularmente verdadeiro no caso das engenharias. Nesse contexto, a Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) é de vital importância estratégica, dada sua ampla aplicação nas áreas aeroespacial, automobilística, petrolífera, hidráulica e química. Este capítulo mostra a finalidade e aplicações da desta ferramenta.

### 5.1- DEFINIÇÃO DA METOLOGIA

Antes de entrar em detalhes sobre a descrição das técnicas de CFD, é conveniente definir qual o seu significado e quais são as necessidades das áreas tecnológicas.

CFD (Computational Fluid Dynamics) é o termo dado ao grupo de técnicas matemáticas, numéricas e computacionais usadas para obter, visualizar e interpretar soluções computacionais para as equações de conservação de grandezas físicas de interesse em um dado escoamento. A origem destas equações de conservação é a teoria de Fenômenos de Transporte. Assim, pode-se resumir CFD como o conjunto das técnicas de simulação computacional usadas para prever os fenômenos físicos ou físico-químicos que ocorrem em escoamentos, com ou sem transferência de calor. A importância das técnicas de simulação tem aumentado muito podendo citar várias razões para tal fato.

*-Necessidade de predição:* a impossibilidade de prever com precisão a eficiência de um novo produto tem um efeito devastador nas empresas. Os custos do desenvolvimento de novos produtos são tão grandes que a falta de retorno do investimento devido ao desempenho inadequado dos produtos pode rapidamente levar as empresas à falência. Um dos modos de minimizar o risco de se encontrar casos de desempenho insatisfatório é coletar um grande volume de informações do comportamento do produto sob as mais diversas condições operacionais, tais como as técnicas de simulação, como CFD, que podem auxiliar na obtenção deste tipo de informação.

- **Impossibilidade dos experimentos:** As simulações são importantes em casos onde os experimentos são impossíveis de serem realizados, podendo citar como exemplos os eventos solares e galácticos, explosões nucleares na atmosfera e situações biomédicas que poderiam colocar em risco a vida do paciente.

- **Detalhes de experimentos:** a maioria das simulações em larga escala oferece mais detalhes do que os experimentos. O número de pontos discretizados na simulação é equivalente ao mesmo número de pontos de medida direta em um experimento. Além disso, os resultados das simulações permitem calcular dados derivados, como por exemplo, vorticidade, tempo de residência, tensão, etc., enquanto que os mesmos são muito difíceis ou mesmo impossíveis de serem obtidos experimentalmente.

- **Velocidade computacional e memória:** a capacidade computacional (processamento e memória) continua a dobrar a cada 18 meses. Ao mesmo tempo, os algoritmos de solução continuam a ser desenvolvidos, com desempenho cada vez melhores. Deste modo, as simulações tendem a ser cada vez mais realísticas, com a inclusão de modelos mais abrangentes e uma maior resolução espacial do domínio de cálculo.

Apesar das enormes vantagens das simulações em relação aos experimentos, estes não podem ser desconsiderados, pois fornecem o único modo de comparação do modelo matemático com a realidade. Porém, devido ao declínio do custo computacional, as simulações têm reduzido o número de experimentos necessários. Na maioria das áreas, ainda é necessário o desenvolvimento de modelos mais precisos como, por exemplo, nas áreas de turbulência, radiação, combustão, escoamentos multifásicos, etc. A aplicação de condições de contorno necessita do desenvolvimento de ferramentas cada vez melhores para descrever em detalhe a geometria do domínio de cálculo.

Há uma necessidade constante de aperfeiçoamento das técnicas numéricas para ampliar a capacidade de resolução dos problemas mais complexos, mas o que é importante é ter a consciência de que CFD é uma ferramenta para auxiliar na busca de soluções para problemas reais, considerando suas capacidades e suas limitações.

Neste trabalho, o objetivo do uso do CFD é modelar fluidos contínuos, validando e encontrando uma simulação baseada na geometria desenvolvida, nesse caso aplicado à um obturador cônico de um sistema de controle.

Tradicionalmente, tem-se empregado a técnica de Volumes Finitos (FV) para a discretização espacial em associação com algum modelo de turbulência não linear. Uma das justificativas é sua capacidade de estudar geometrias complexas, graças a disposição de geradores de malha, tanto do tipo estruturada quanto não estruturada.

## 5.2- FINALIDADE DO USO DO CFD

De forma sucinta, pode-se descrever as finalidades do uso do CFD a partir dos tópicos relacionados a seguir:

- Simulação baseada na geometria virtual ao invés de “ construção e teste” :
- Menor custo e redução significativa no tempo de obtenção de resultados;
- Simulação dos fenômenos de escoamento que possuem aferição experimental complicada
- Simulações de escala (navios e aviões em grande escala)
- Situação de risco (explosões, radiação, poluição)
- Situação física (previsão do tempo, camada limite planetária, evolução estelar);
- Conhecimento e exploração da física do escoamento

### 5.2.1- Vantagens do CFD

A aplicação da Dinâmica de Fluido Computacional oferece uma série de vantagens significativas, incluindo:

- Relação custo-benefício, permitindo fazer uma simulação real de escoamento com baixo custo, podendo fazer testes de um grande número de variáveis através de simulações sem modificar as instalações existentes.
- Redução de risco, podendo prever o desempenho em qualquer escala, fornecendo informações mais detalhadas e minimizando o risco inerente à concepção de grande escala e a redução do número de etapas necessárias para a escala piloto.
- Redução do tempo para estudo das variáveis, tendo os resultados em um curto período de tempo.
- Em questão de segurança, o CFD é particularmente útil para simular as condições em que não são possíveis tomar medidas detalhadas

## 5.3- MÉTODOS UTILIZADOS

Existem várias técnicas numéricas de solução e suas diferenças estão associadas à forma com que as variáveis incógnitas são aproximadas e ao procedimento de discretização. Todas estas metodologias numéricas levam a sistemas de equações algébricas lineares com um grande número de equações e, portanto, uma abordagem numérica para a solução de tal sistema se torna necessária.

### 5.3.1- Os métodos de diferenças finitas

Os Métodos de Diferenças Finitas (MDF) descrevem as variáveis de estado do problema de escoamento por meio de valores pontuais nos pontos nodais de uma malha estruturada. Expansões em série de Taylor são normalmente usadas para gerar as aproximações de diferenças finitas das derivadas das variáveis em cada ponto da malha usando os valores de nos pontos vizinhos. Assim, as derivadas que aparecem nas equações de transporte são substituídas pelas diferenças finitas, levando a uma equação algébrica para os valores das variáveis em cada ponto da malha.

### 5.3.2- Os métodos de elementos finitos

Os métodos de Elementos Finitos utilizam funções simples, tais como: lineares ou quadráticas, para descrever as variações das variáveis de estado a serem calculadas dentro de cada elemento. Estas funções simples são nulas fora do elemento considerado. Somando-se as aproximações para todos os elementos obtém-se uma aproximação funcional para cada variável de estado em todo o domínio de cálculo.

Quando as funções aproximadas para as variáveis de estado são substituídas nas equações de transporte, elas deixam de ser exatas e cada uma delas tem um resíduo que pode ser usado para medir o erro da aproximação. Cada equação aproximada é multiplicada por um conjunto de funções peso e integrada no domínio de cálculo. Como resultado, obtém-se um sistema de equações algébricas para determinar os coeficientes de cada uma das aproximações funcionais.

### 5.3.3- O método dos volumes finitos

O Método dos Volumes Finitos (MVF) é a técnica de CFD mais bem estabelecida e usada para propósitos gerais. Esta técnica parte da integração formal das equações de transporte que regem o escoamento do fluido em todos os volumes de controle obtidos pela discretização do domínio. Nesta integração, a forma conservativa de cada equação é usada para que seja possível transformar as

integrais em volume dos divergentes dos fluxos advectivos e difusivos em integrais em área dos fluxos normais à superfície dos volumes de controle, através da aplicação do teorema da divergência.

Entre os métodos citados, o mais adequado ao estudo proposto é o método de volumes finitos, devido a sua capacidade de estudar geometrias complexas, graças a disposição de geradores de malha, tanto do tipo estruturada quanto não estruturada.

#### 5.4- PROCESSO DE MODELAGEM E SIMULAÇÃO

Existem diversas definições para a simulação, dentre elas pode-se citar a de Pegden (1990) que diz “a simulação é um processo de projetar um modelo computacional de um sistema real e conduzir experimentos com este modelo com o propósito de entender seu comportamento e/ou avaliar estratégias para sua operação”, ou seja, a simulação é um processo amplo que engloba não apenas a construção do modelo, mas todo o método experimental que se segue, buscando:

- Descrever o comportamento do sistema;
- Construir teorias e hipóteses considerando as observações efetuadas;
- Usar o modelo para prever o comportamento futuro, isto é, os efeitos produzidos por alterações no sistema ou nos métodos empregados em sua operação.

De maneira simplificada, os processos de modelagem e simulação podem ser representados pelo Fluxograma mostrado na Figura 3.3:



Figura 3.3- Fluxograma do processo de modelagem

O pré-processamento contempla fases importantes do processo, como definição da geometria e da malha de discretização do problema, definição do domínio, qual o tipo de fluido e suas características, fazendo o estabelecimento de hipóteses e finalmente definindo as condições de contorno. O

processamento contempla as resoluções de cálculo, enquanto o pós-processamento faz a visualização de todo resultado de cálculo.

Para realização dos cálculos em CFD, são necessários alguns passos, como

- Aquisição de dados técnicos do objeto em estudo;
- Construção da geometria e geração da malha do modelo;
- Definição das condições de cálculo e das condições iniciais de contorno;
- Execução dos cálculos e supervisão dos critérios de convergência;
- Visualização dos resultados.

Neste trabalho foi adotado ANSYS CFX ® v.11 da ANSYS, para gerar a geometria, definir as condições de contorno, executar os cálculos e visualizar os resultados. Para este fim, utilizou-se as seguintes ferramentas:

- ICEM CFD: utilizado para a construção da geometria e geração da malha;
- CFX PRE: para a definição das condições de cálculo e das condições iniciais de contorno;
- CFX SOLVER: para a execução dos cálculos e supervisão dos critérios de convergência;
- CFX POST: para a visualização dos resultados.

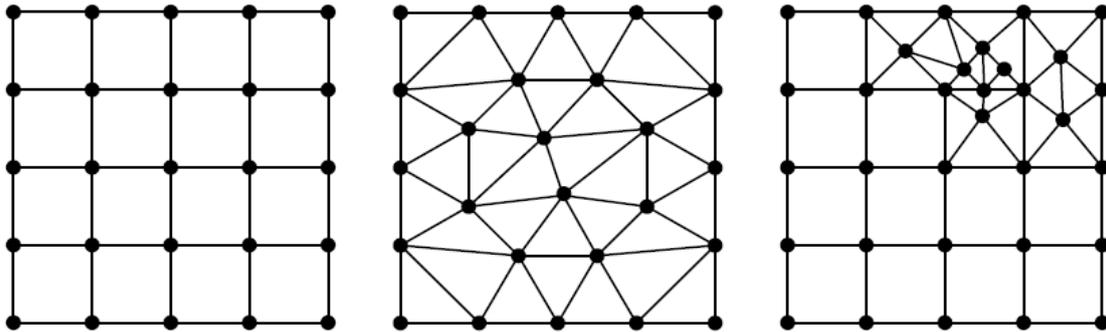
A aquisição de dados refere-se as características de funcionamento do equipamento, os quais são úteis para delimitar as condições do cálculo, esses dados são obtidos a partir do ensaio experimental.

#### **5.4.1- Geometria e malha**

Este processo interativo é o primeiro estágio do pré-processamento, cujo objetivo é produzir uma malha com as especificações dos parâmetros físicos, Neto et al (2008). A malha é criada a partir de uma geometria, que pode ser elaborada em CAD (Computer Aided Design), no Icem CFD, solid Work, enfim, qualquer ferramenta que permite a criação de um modelo em 3D, podendo depois ser importada para o pré-processador (CFX PRE).

Em métodos numéricos para obter soluções aproximadas de equações diferenciais, tais como o método de elementos finitos e o método de volumes finitos, o domínio no qual estas equações foram definidas é discretizado em subdomínios simples denominados elementos. O conjunto gerado pela união destes elementos, os quais compartilham apenas nós e arestas (e faces, em 3D) com elementos adjacentes, é a representação discreta do domínio contínuo conhecida como malha, diretamente relacionada com a qualidade das soluções. Geralmente, qualquer esquema de solução obtém resultados satisfatórios quando aplicado a malhas de boa qualidade. Entretanto, a utilização de malhas de má qualidade, mesmo com esquemas de solução precisos, compromete a validação das soluções, Batista (2005).

Usualmente, as malhas são classificadas em três grupos principais: estruturadas, não estruturadas e híbridas. Contudo, não há unanimidade a respeito de uma definição associada a cada grupo. Um modo comum de diferenciá-los é quanto a topologia da vizinhança dos elementos. Com este, malhas estruturadas são caracterizadas por seus nós internos não possuírem número constante de elementos adjacentes (Figura 5.4a), malhas não estruturadas possuem nós internos com número de elementos adjacentes variável (Figura 5.4b), e as malhas híbridas, resultado de combinações entre as duas anteriores, não possuem características bem definidas (Figura 5.4c).



(a)- estruturada(Hexaédrica)

(b) Não estruturada (Tetraédrica)

(c) Híbrida

Figura 5.4- Tipos de Malha

Dependendo do modelo e do estudo em questão, é necessário fazer um refinamento de algumas partes da geometria para uma melhor discretização da malha, a Figura 5.5, mostra o refinamento de uma malha em alguns pontos da geometria, como o tubo de sucção, para melhor discretização dos elementos.

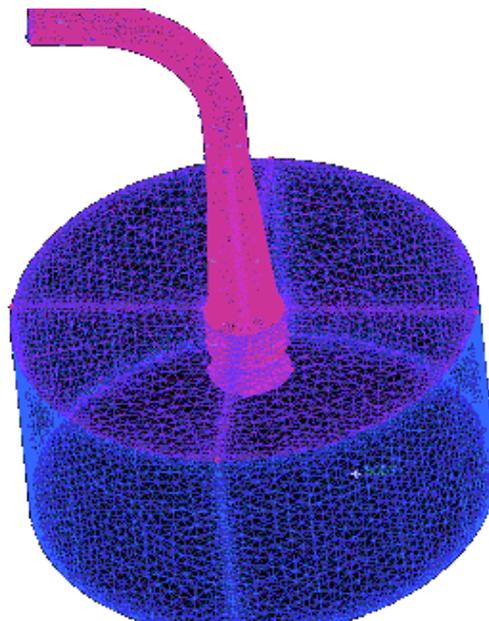


Figura 5.5 - Refinamento da malha

Após a criação da malha, os parâmetros de entrada são definidos no CFX Pré, onde são especificadas as condições de contorno e as propriedades do fluido.

O CFX é um código de Dinâmica do Fluido Computacional multipropósito, desenvolvido pela empresa ANSYS, Inc. Utiliza tecnologias modernas, como um solver multigrid acoplado, propiciando robustez e rapidez nas suas soluções.

O pós-processamento é a visualização dos resultados obtidos a partir dos cálculos realizados pelo “Solver”, utiliza-se o CFX POST para a visualização tridimensional do escoamento, sendo essa uma das vantagens do CFD, que objetiva demonstrar as variáveis físicas que caracterizam o comportamento hidráulico do equipamento (distribuição da pressão, velocidade e vazão mássica);

Após definição do processo de modelagem e simulação, o próximo capítulo irá mostrar a aplicação numérica em CFD, utilizando o modelo do Sistema de Controle de Vazão.

## **CAPÍTULO 6**

# **APLICAÇÃO NUMÉRICA UTILIZANDO A DINÂMICA DE FLUIDO COMPUTACIONAL NO SISCOV®**

Neste capítulo será apresentada a modelagem geométrica do Sistema de Controle de Velocidade (SISCOV®) utilizando a Dinâmica de Fluido Computacional (CFD), descrevendo suas características funcionais e limitações, bem como o estabelecimento das condições de convergência para os cálculos, conforme é requerido pela metodologia prática do cálculo CFD, essa análise será feita levando em consideração os mesmos dados utilizados para realização do ensaio experimental.

### **6.1- PROCESSO DE MODELAGEM E SIMULAÇÃO**

A simulação computacional de sistemas, ou apenas simulação, consiste na utilização de certas técnicas matemáticas, empregadas em computadores, as quais permitem imitar o funcionamento de, praticamente qualquer tipo de operação ou processo do mundo real, ou seja, é o estudo do comportamento de sistemas reais através do exercício de modelos.

No modelo testado, considerou-se para a geometria adotada a disposição de um reservatório de água de jusante.

As condições de contorno na entrada são dadas em função da velocidade do escoamento, considerando as direções radial, tangencial e axial. Para as superfícies que delimitam a saída do fluido, considera-se a variação da vazão em função da abertura do sistema.

### 6.1.1 PROPRIEDADES FÍSICAS

A tabela 6.1 mostra as propriedades Físicas necessárias utilizadas como variáveis para definição da condição de contorno para realização dos cálculos em CFD.

**Tabela 6.1 – Lista de variáveis para o cálculo**

Propriedades Físicas (SI)		Ângulo de Abertura		unidade
		30 °	60°	
Aceleração da gravidade	g	9,81	9,81	m/s <sup>2</sup>
Temperatura da água	TH <sub>2</sub> O	18	18	°C
Temperatura do ar	T <sub>a</sub>	20	18	°C
Densidade específica da água	d	997	997	kg/m <sup>3</sup>
Umidade Relativa	φ	75	75	%

## 6.2- PROCESSAMENTO

### 6.2.1- Geração da Malha

A figura 6.1 refere-se ao modelo geométrico do SISCOV®, construído a partir do Icem CFD. Observa-se que para a construção da geometria, considera-se apenas o local de interesse, no caso o tubo de sucção e o sistema de controle de vazão, não havendo a necessidade da construção da BFT localizada a montante do tubo de sucção, pois o objeto de estudo é o sistema de controle de vazão.

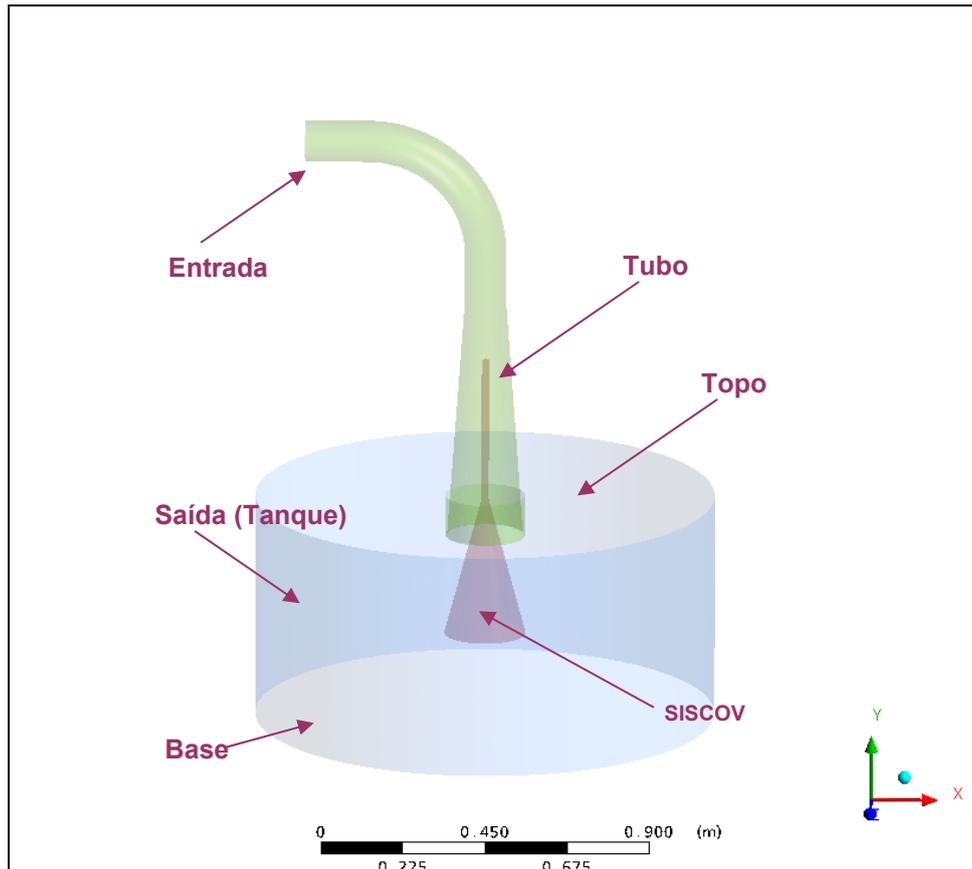


Figura 6.1 – Modelo Geométrico do tubo de Sucção e do Sistema de Controle de vazão

Foi considerado na construção da geometria um tanque circular para facilitar a definição das condições de contorno, facilitando o cálculo, porém na prática o tanque possui um formato retangular, pode-se considerar para este estudo irrelevante o formato do tanque, pois o mesmo não influenciará nos resultados devido a sua dimensão ser muito maior que a dimensão da saída do tubo de sucção.

Após a construção da geometria é feito uma verificação na geometria, utilizando ferramentas do próprio ICEM CFD, eliminando todos os erros que possam ter ocorrido na geometria durante a construção da mesma. Esses erros, porém, se não forem corrigidos antes da geração malha, podem resultar em erros de formação da mesma e possivelmente nos resultados de cálculos.

Feito a verificação na geometria, faz-se então geração da malha. Para essa geometria em questão foi gerada uma malha para diferentes posições de abertura da válvula.

Durante o ensaio experimental, foram determinadas várias posições de abertura da válvula, porém o cálculo em CFD nos permite obter o mesmo resultado utilizando uma menor amostragem, sendo então considerados, para o ângulo de conicidade  $\alpha_1=60^\circ$ , 6 pontos mais significativos e para o ângulo de conicidade  $\alpha_2=30^\circ$  7 pontos significativos.

A figura 6.2, representada pelo plano longitudinal no eixo de coordenada X-Y, com o centro do eixo de coordenada cartesiano localizado na posição central da seção transversal da entrada de fluido no domínio geométrico considerado.

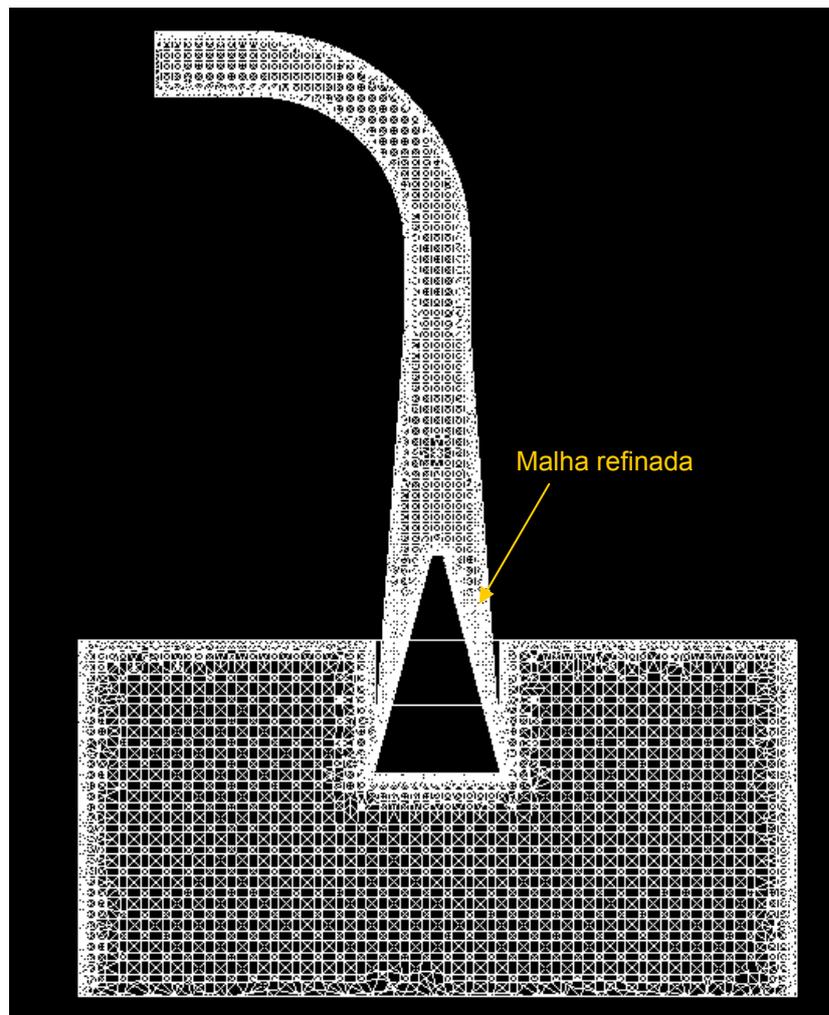


Figura 6.2 – Estrutura da malha formada por elementos tetraédricos

Pode-se observar, a partir da figura 6.2, o refinamento da malha na área do sistema de controle, cujo refinamento foi adotado para melhor discretização da geometria.

### 6.3- CONDIÇÕES DE CONTORNO

As condições de contorno são definidas no CFX PRÉ, onde é importada a malha gerada no Icem CFD. Para as condições de contorno, considera-se as características de cada superfície de referência definida para a geometria.

A figura 6.3 fornece um esquema básico referente às condições de contorno, bem como as superfícies de referência.

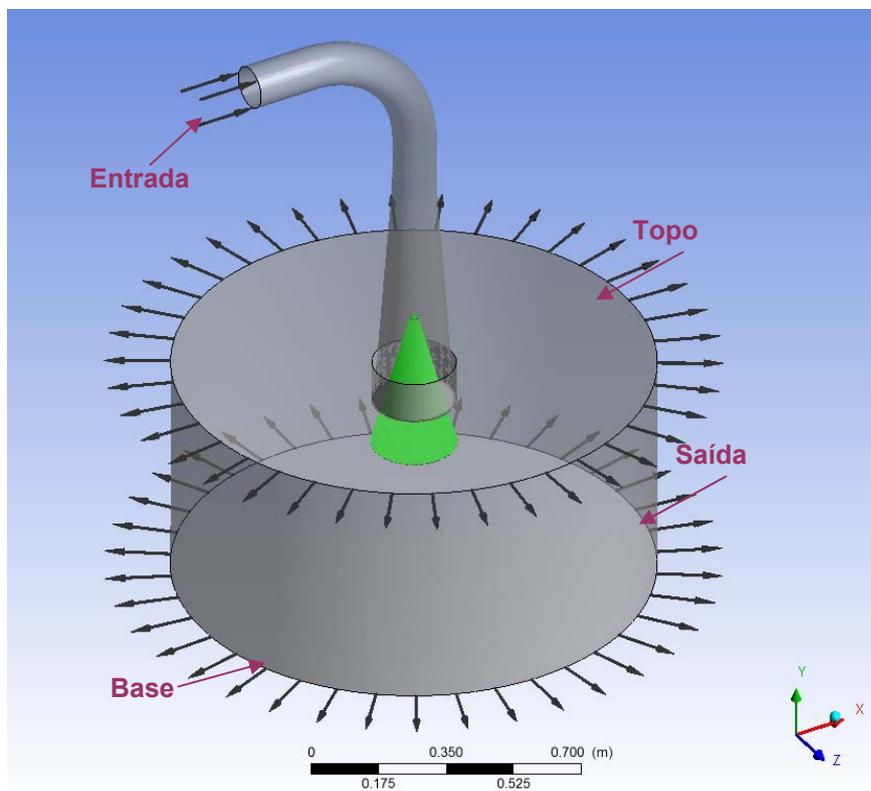


Figura 6.3- Condições de contorno

A tabela 6.2 mostra as condições de contorno, considerando a velocidade do escoamento nas projeções radial, tangencial e axial, respectivamente,  $V_r$ ,  $V_u$  and  $V_z$  na entrada do modelo do tubo de sucção.

Em particular, é necessário considerar o domínio físico como água simplesmente, não considerando o efeito do ar.

**Tabela- 6.2 – Condições de Contorno para cálculo do modelo do sistema de controle de vazão**

Local	Tipo	Condição	Observação
Entrada Principal	Entrada	Projeções da velocidade $V_r$ , $V_u$ e $V_z$ em [m/s]	
Tubo de Sucção	Parede	Hidraulicamente Lisa	
SISCOV	Parede	Hidraulicamente Lisa	
Parede da caixa d'água	Parede	Hidraulicamente Lisa	
Superfície Superior da Caixa d'água	Abertura	Hidraulicamente Lisa	Pressão estática igual a zero [Pa] para a água
Saída	Reservatório Inferior	Equação 6.1	Pressão estática
Superfície Inferior da caixa d'água	Parede	Suave	Não escorregamento

Para a entrada do tubo de sucção na condição de operação considera-se uma vazão máxima (**Q**) de 0,0301 [m<sup>3</sup> / s] e velocidade de rotação constante de 1800 [rpm]

Para a Pressão Estática adotada na saída do modelo, **P<sub>out</sub>** [Pa], considera-se o efeito do nível de água a jusante, esse valor pode ser calculado pela equação 01:

$$P_{OUT} = \rho \cdot g \cdot (h_1 - y) \cdot \text{step}(h_1 - y) \quad [\text{Pa}] \quad (6.1)$$

(01)

Onde:

- $h_1$  se refere a diferença entre o eixo horizontal da BFT em relação a superfície livre, ou seja, o nível da água do tanque na saída do tubo de sucção;
- $y$  e  $\text{step}$  são, respectivamente, a variável e a função interna dada pelo software ANSYS CFX® para o cálculo em CFD; ( $\text{step}$  é unitário quando  $y > h_1$ ).
- $g$  é a aceleração da gravidade

## 6.4- CÁLCULO NUMÉRICO

Após definição das condições de contorno no “CFX PRÉ”, na fase de processamento, é possível fazer o cálculo numérico utilizando o “CFX solver”. Para o cálculo numérico, a tabela 6.3 mostra os modelos matemáticos adotados.

**Tabela 6.3 – Modelos usados para o cálculo**

Modelo de Escoamento	Viscoso – turbulento ( <b>Navier-Stokes</b> )
Modelo de Turbulência	RNG K -ε

As equações diferenciais parciais no espaço (x,y,z) de vazão mássica e momento são resolvidas utilizando o Método de Volumes Finitos. Esse método foi escolhido, devido a sua grande capacidade de fazer cálculos mais complexos.

O modelo de turbulência RNG k-ε adotado, é capaz de identificar pequenas escalas de turbulência junto com altas escalas de turbulência, bem como detectar os refluxos em superfícies curvas.

Para cálculo, considerou-se a equação 6.2, definida a partir da Lei da Continuidade, mantendo a velocidade constante, variando a vazão de acordo com a variação na área de saída do tubo de sucção.

$$Q = V \cdot \left( \frac{\pi}{4} \right) \cdot (D_{ts}^2 - D_o^2) \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (6.2)$$

Onde:

- D<sub>ts</sub> é o diâmetro na saída do tubo de sucção [mm];
- D<sub>o</sub> é o diâmetro do obturador cônico em cada posição de abertura [mm].
- V é a velocidade do escoamento na entrada do tubo.

O gráfico representado na Figura 6.4, indica a curva de convergência dada pelo cálculo de erros das velocidades, vazão mássica, momento e dissipação da energia e turbulência para cada iteração. A Figura 6.4 mostra as curvas de convergência de turbulência considerando um ângulo de conicidade de 30° e abertura de 120 mm. Vale ressaltar que em todos os cálculos realizados, considerou-se um erro de 1,00E-04 para condição de convergência.

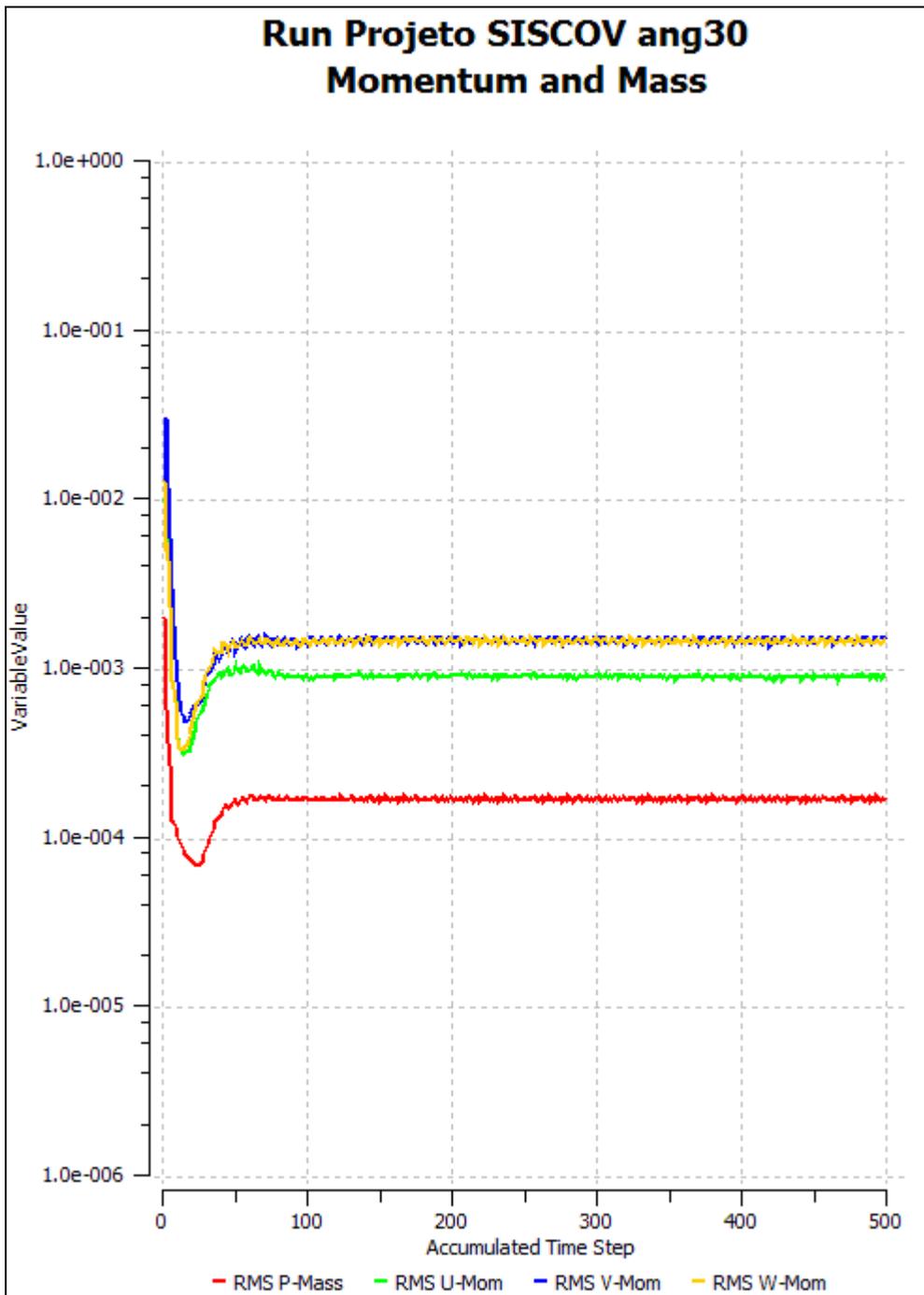


Figura 6.4- Gráfico de Convergência

Todas as simulações realizadas para o modelo do sistema de controle de vazão, tiveram as curvas convergindo com número máximo de iterações de aproximadamente 250. Após a convergência das curvas indicadas na Figura 6.4, é possível fazer a visualização dos resultados no CFX POST, a análise dos resultados obtidos é apresentada no próximo capítulo, onde serão mostradas as curvas de variação de alguns parâmetros estudados nessa simulação.

## CAPÍTULO 7

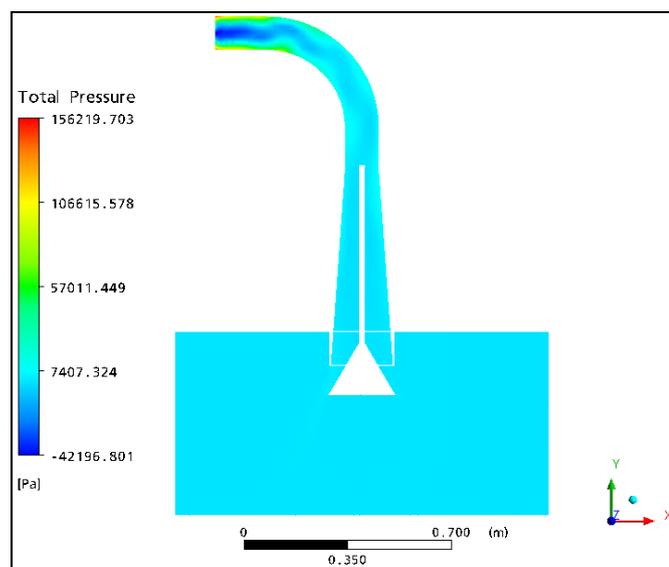
# ANÁLISE DOS RESULTADOS DA APLICAÇÃO NUMÉRICA EM DINÂMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

Neste capítulo são demonstrados os resultados obtidos através da simulação dinâmica computacional, bem como o comportamento do fluido no interior do tubo de sucção após instalação de um sistema de controle de velocidade em uma bomba funcionando como turbina.

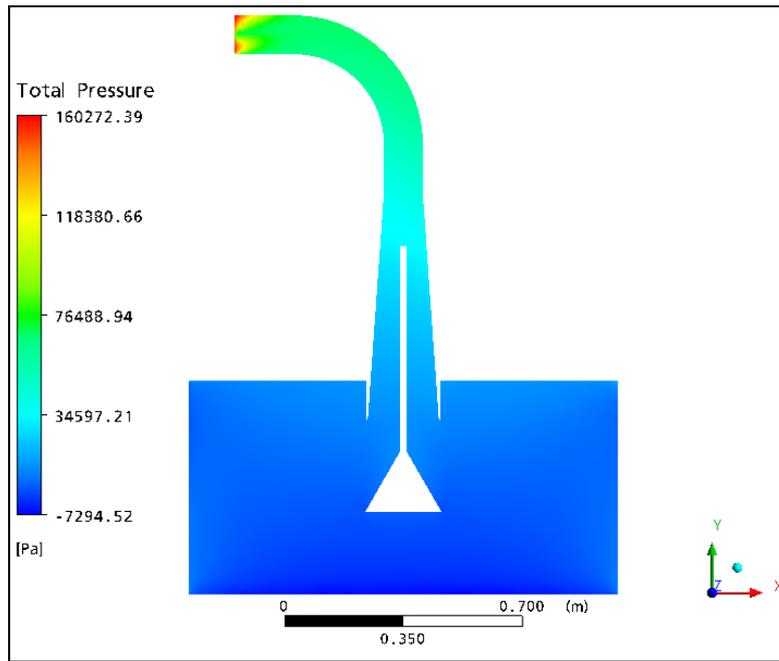
### 7.1- DISTRIBUIÇÕES DAS VARIÁVEIS DE ESTADO

#### 7.1.1- Pressão

As figuras 7.1 e 7.2 mostram a distribuição de pressão estática média ao longo do tubo de sucção, referentes aos ensaios experimentais, considerando ângulos de conicidade de  $60^\circ$  e  $30^\circ$ , respectivamente. Em ambos são analisados os pontos de máxima e mínima aberturas, representados nas Figuras 7.1a e 7.2a como pontos de abertura mínima do SISCOV® e as Figuras 7.1b e 7.2b como sendo os pontos de máxima abertura.

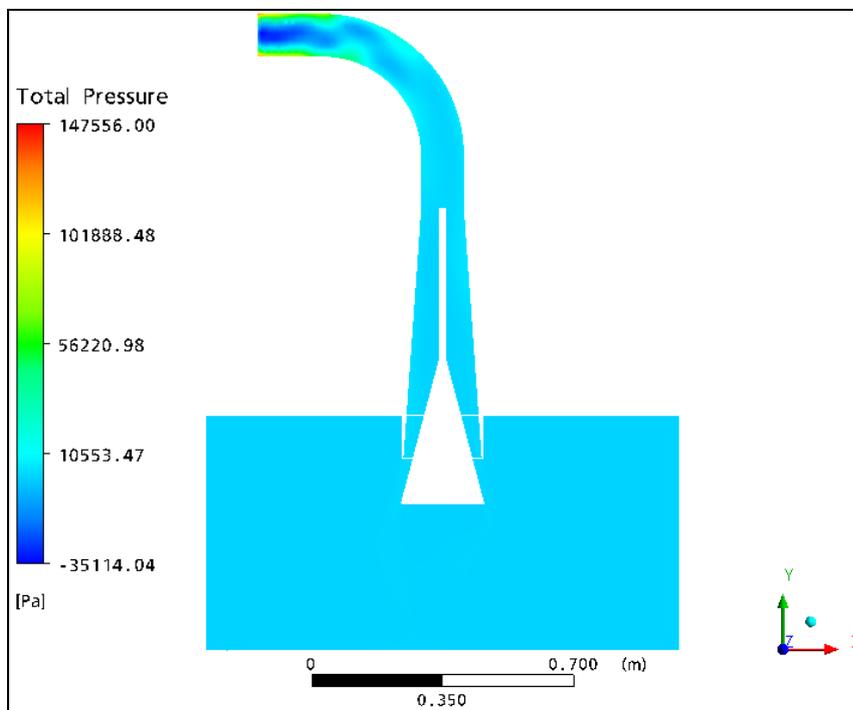


(a)

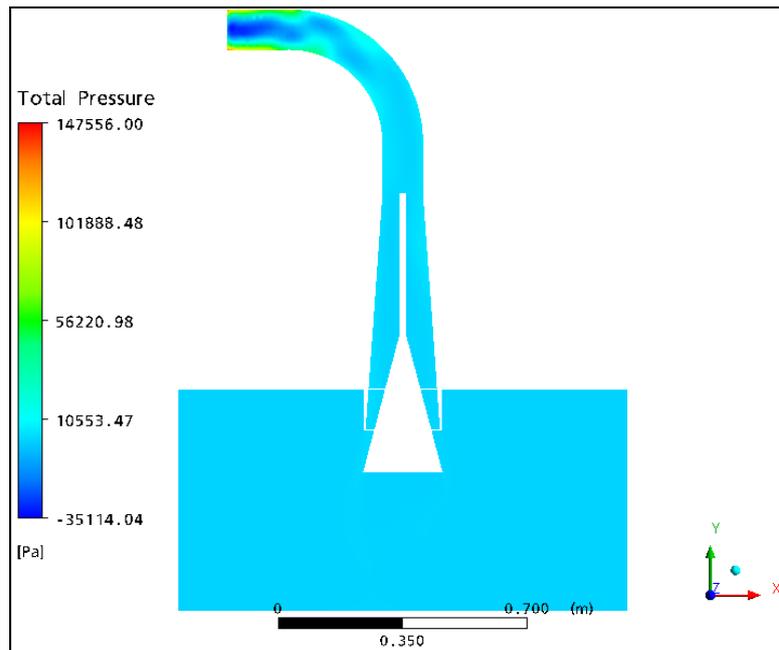


(b)

Figure 7.1 – Pressão média total longitudinal para abertura mínima de 95 mm e máxima de 271mm para um ângulo de conicidade de 60°



(a)



(b)

Figure 7.2 Pressão média total longitudinal para abertura mínima de 120 mm e máxima de 283 mm para um ângulo de conicidade de 30°

O tubo de sucção atua na recuperação da pressão total do escoamento (pressão estática + pressão dinâmica).

A partir da distribuição da pressão, observa-se que as pressões mais elevadas ocorrem na parede do tubo de sucção, logo na entrada devido a contribuição da parcela dinâmica da pressão com a componente tangencial da velocidade do escoamento, principalmente detectável nas menores aberturas do obturador..

A Figura 7.3 mostra os pontos adotados ao longo do tubo de sucção, cujo posicionamento é definido apenas de maneira representativa.

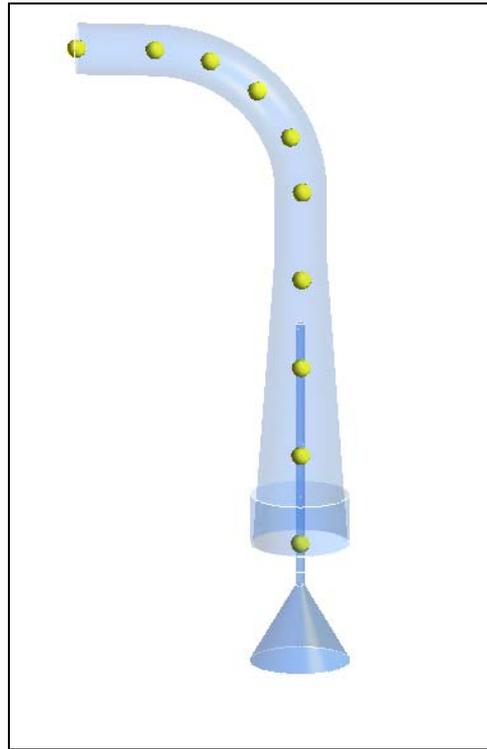


Figure 7.3 Pontos de pressão ao longo do tubo de sucção

Os gráficos representados abaixo pelas Figuras 7.4 e 7.5 mostram a variação da pressão ao longo do tubo de sucção para aberturas mínimas e máximas para um ângulo de abertura do SISCOV® de 30°.

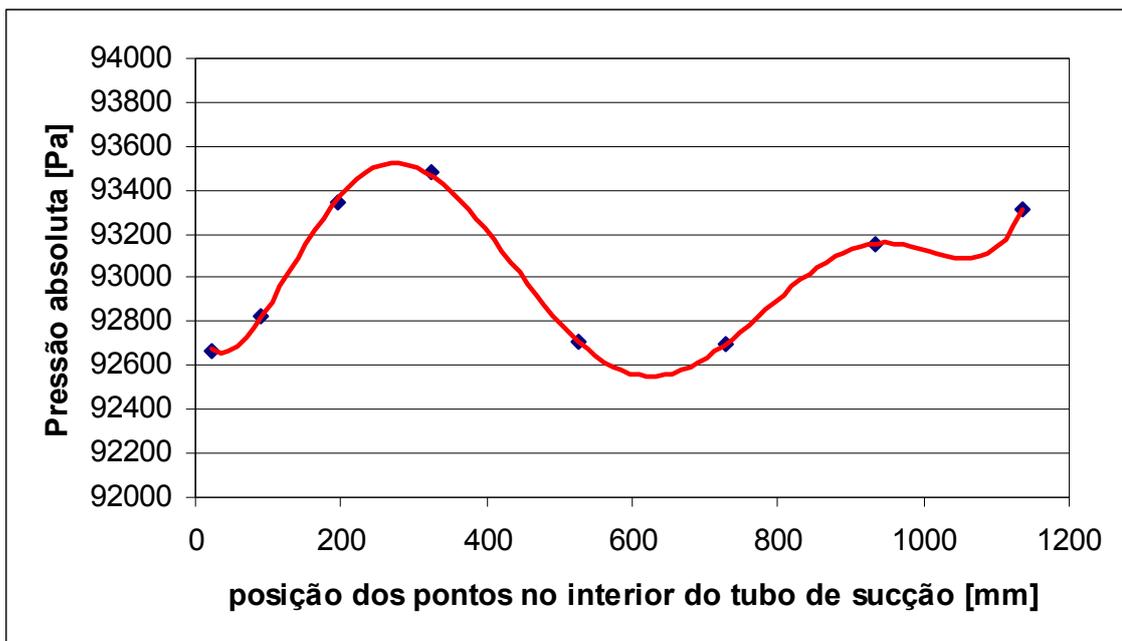


Figure 7.4 Pontos de pressão ao longo do tubo de sucção para abertura mínima de 120 mm

Observa-se que o gráfico representado pela Figura 7.4 para abertura mínima do obturador, mostra a flutuação de pressão induzida pelo movimento de rotação do rotor e que este efeito diminui com o aumento da distância do ponto referenciado na entrada do tubo de sucção.

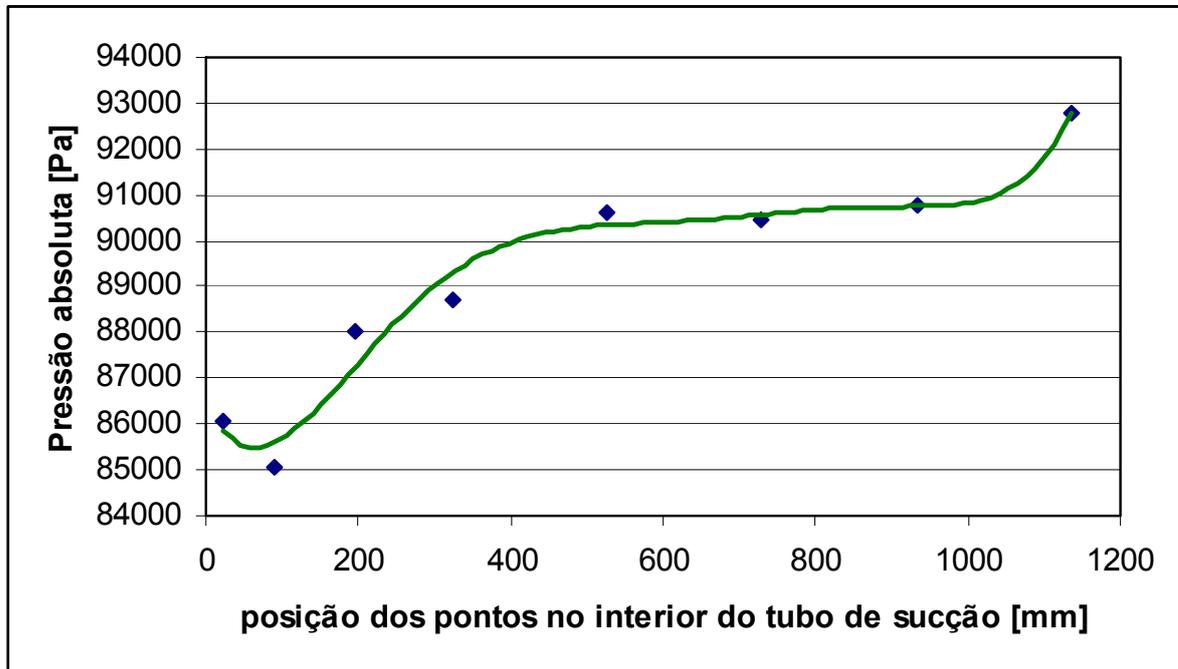
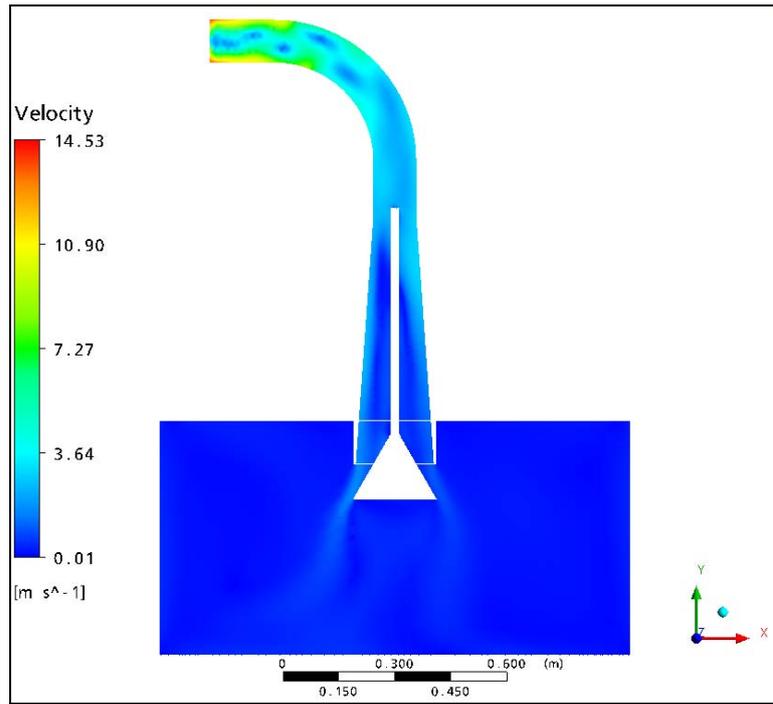


Figure 7.5 Pontos de pressão ao longo do tubo de sucção para abertura máxima de 283 mm

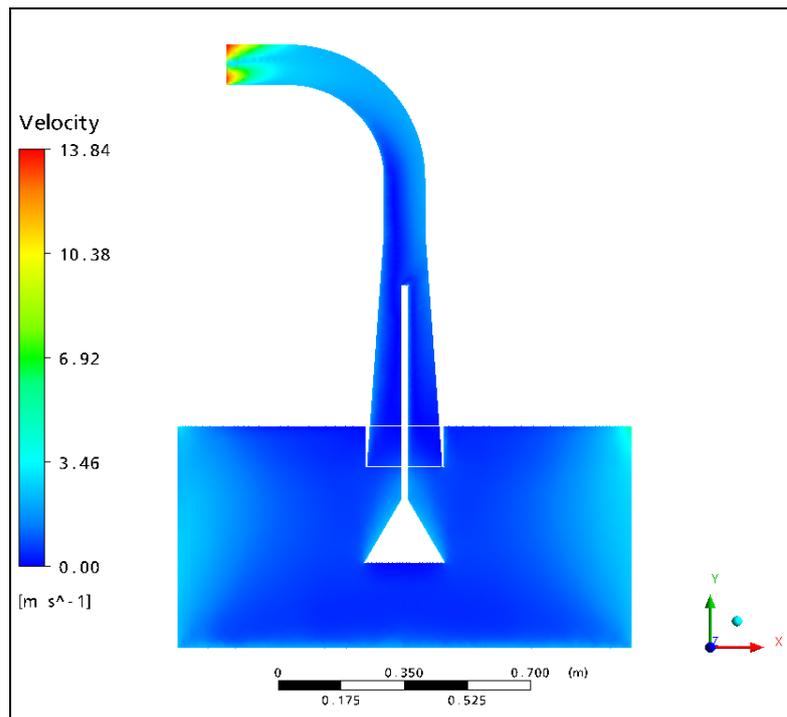
O gráfico representados pela Figura 7.5 mostra a tendência crescente, justificando a recuperação de pressão ao longo do tubo de sucção.

### 7.1.2- Velocidade de Escoamento

As figuras 7.6 e 7.7 representam a distribuição da velocidade média de escoamento ao longo do tubo de sucção, para aberturas máximas e mínimas do SISCOV®. Observa-se que para aberturas menores para os ângulos de 30° e 60° (Figuras 7.6a e 7.7a), percebe-se uma diminuição da velocidade ao longo do tubo, isso ocorre devido a obstrução da passagem da água na saída do tubo de sucção, mostrando que essa obstrução diminui a velocidade de rotação.

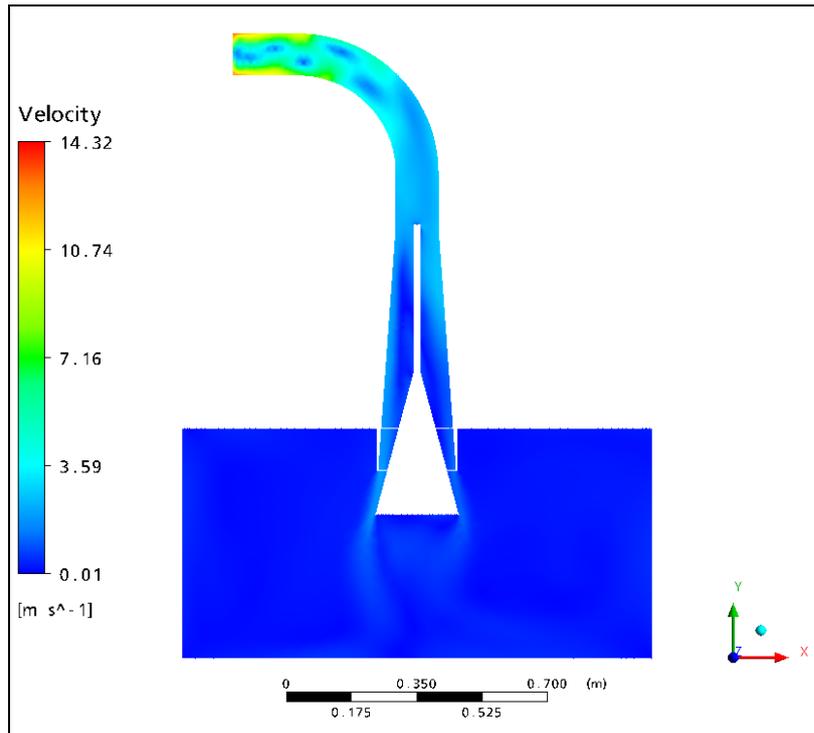


(a)

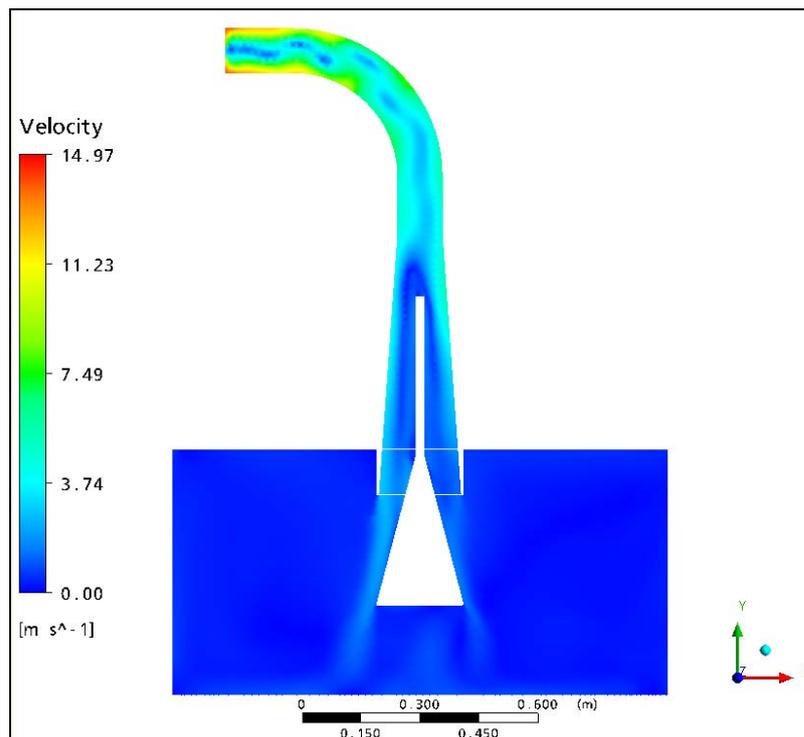


(b)

Figure 7.6 – Velocidade de Escoamento definida em [m/s] para abertura mínima de 95mm e máxima de 271mm, para ângulo de conicidade de 60°



(a)



(b)

Figure 7.7 – Velocidade de Escoamento definida em [m/s] para abertura mínima de 120mm e máxima de 283mm, para ângulo de conicidade de 30°

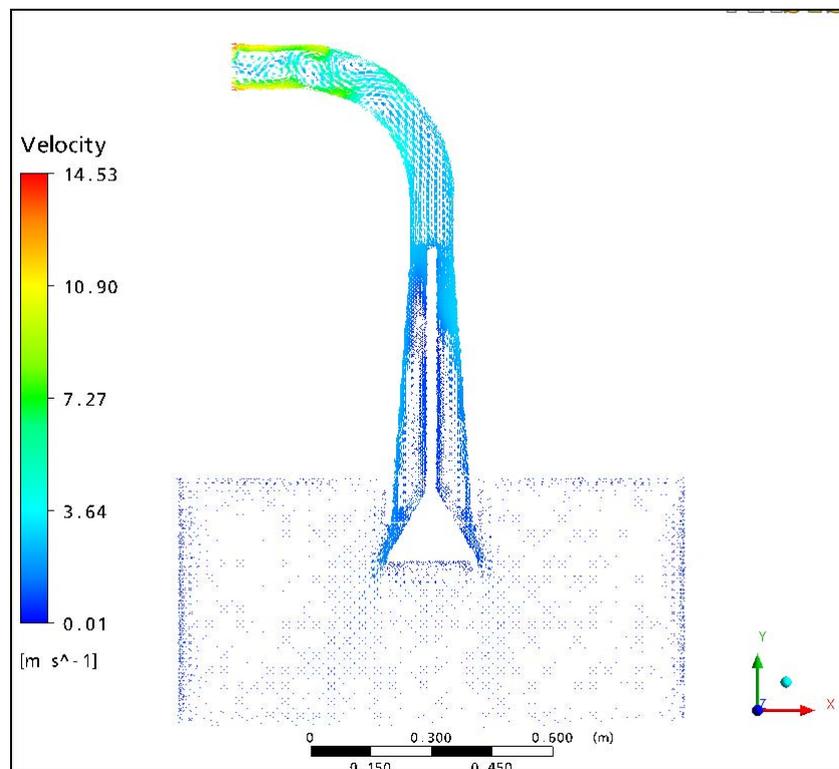
De acordo com a abertura do SISCOV®, ocorre um aumento gradativo na componente axial da velocidade de escoamento ao longo do tubo, caracterizando o aumento da vazão (Figuras 7.6b e

7.7b), sendo essa velocidade maior no local de menor área, ou seja, na entrada do tubo. As Figuras demonstram que a velocidade do escoamento no tanque de jusante são pequenas, face a proporção existente entre o mesmo e o tubo de sucção

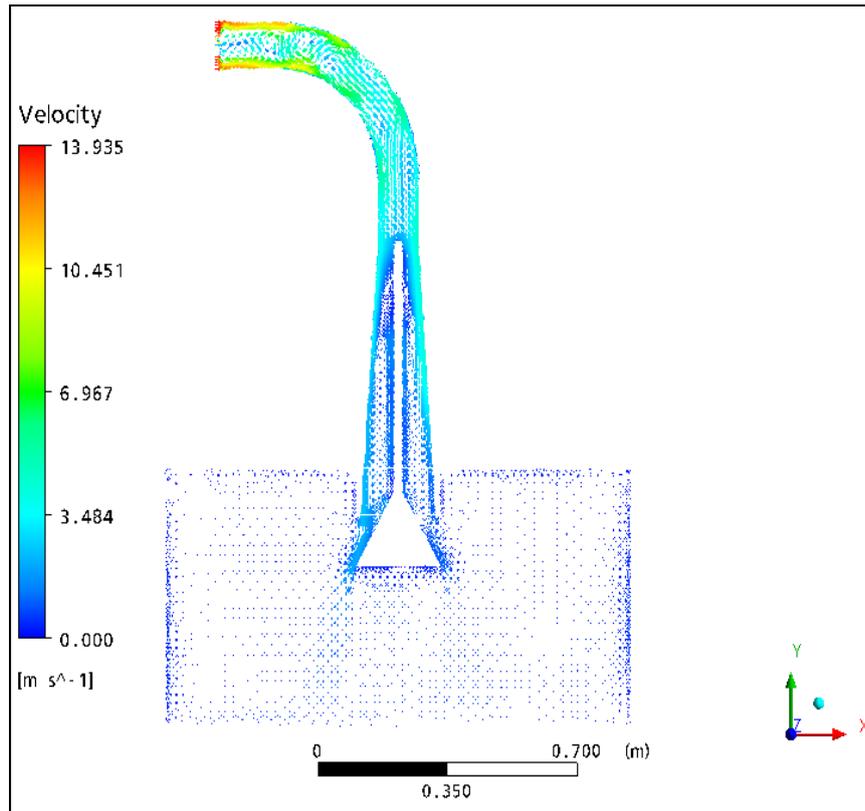
### 7.1.3- Vetores Velocidade

Os vetores velocidade representam a composição das projeções da velocidade do escoamento nas direções axial, radial e tangencial, sendo a componente radial nula na entrada principal, conforme condição de contorno definida no capítulo 6.

As Figuras 7.8 e 7.9 mostram a distribuição do vetor velocidade ao longo do tubo., mostrando o direcionamento do fluxo.

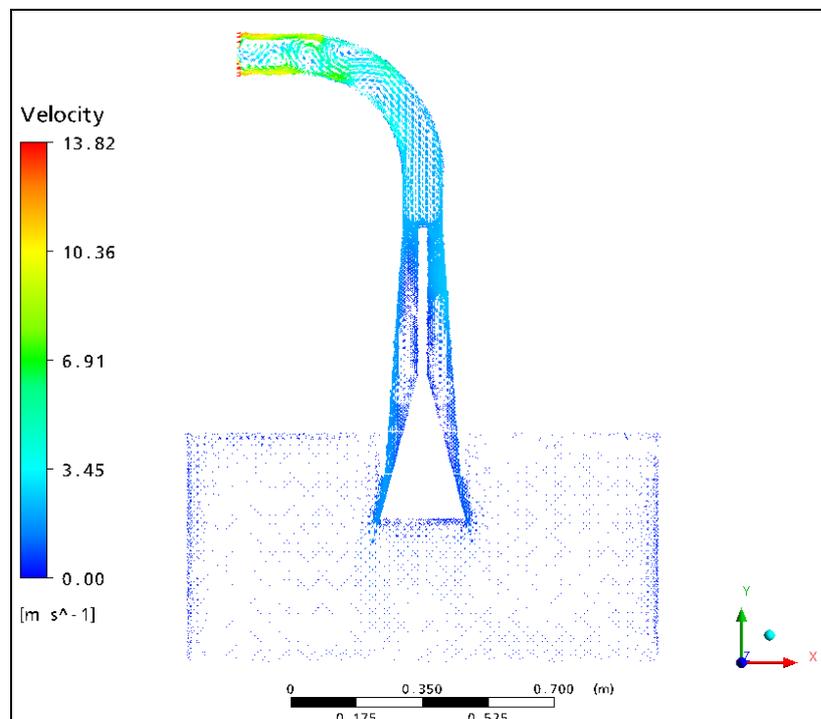


(a)

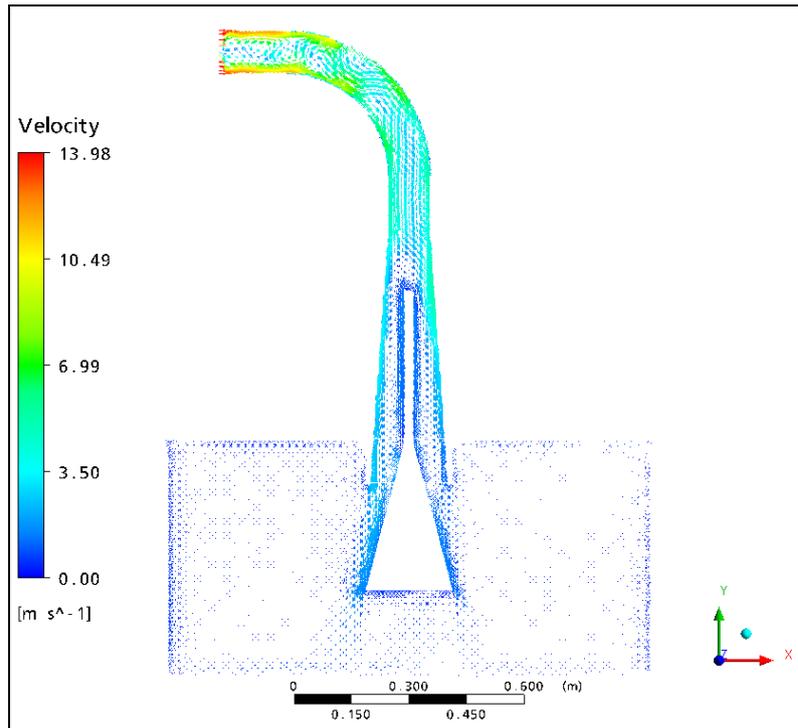


(b)

Figure7.8 – Vetor Velocidade ângulo 60°



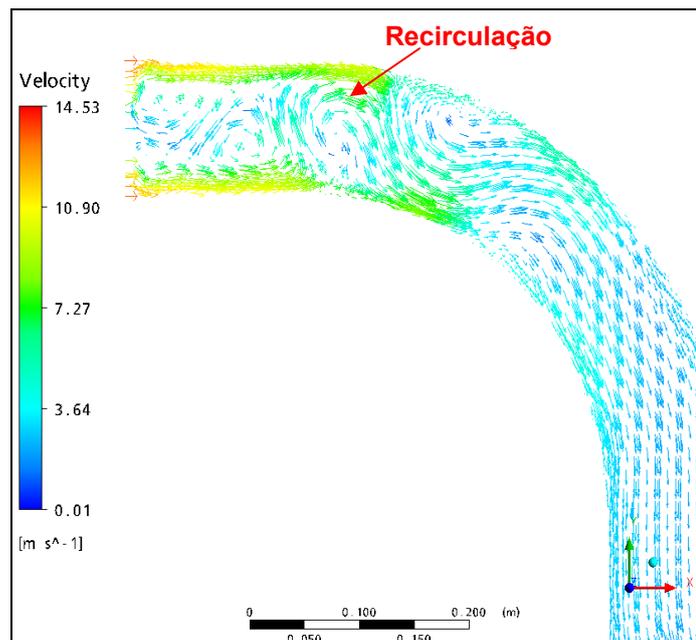
(a)



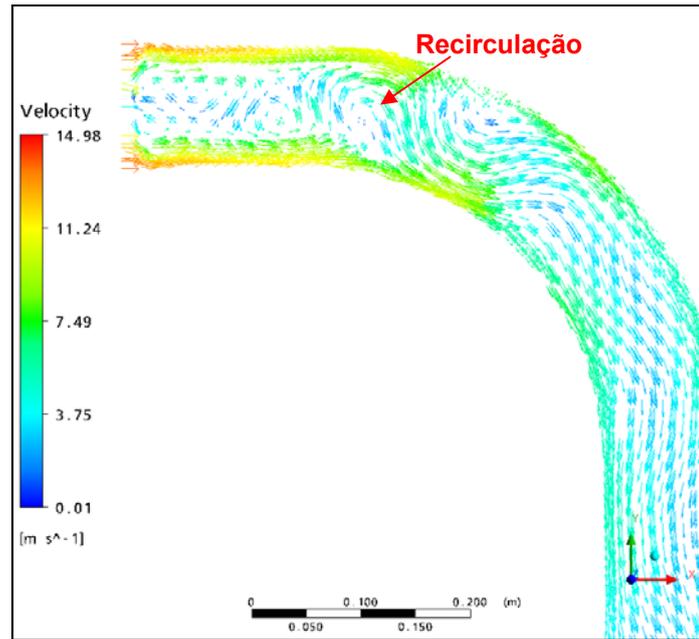
(b)

Figure 7.9 – Vetor Velocidade ângulo 30°

Os vetores velocidade podem ser melhor visualizados no detalhamento mostrado nas Figuras 7.10 e 7.11. Observa-se uma recirculação imediatamente após a entrada do tubo de sucção, isso ocorre devido a concentração dos vetores de maior velocidade na parede do tubo, sendo que ao longo do tubo os vetores se mostram mais realinhados devido a diminuição da velocidade.

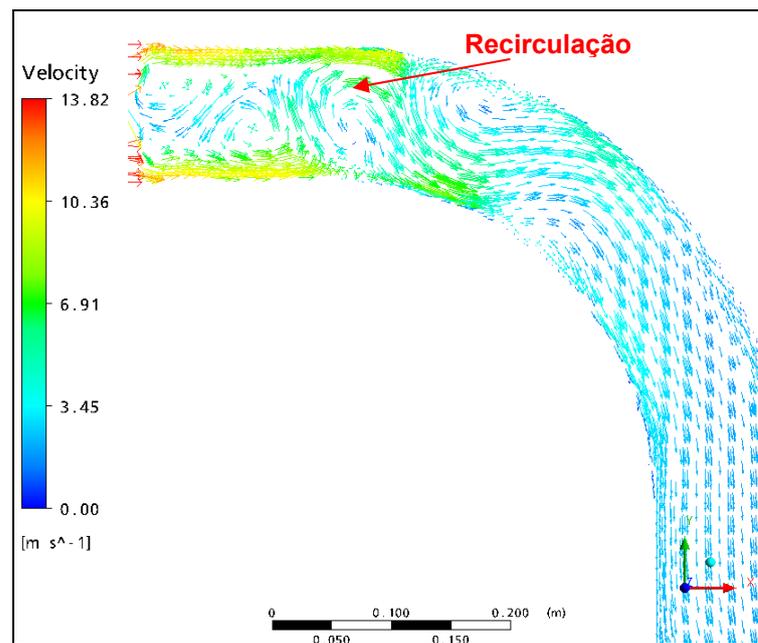


(a)

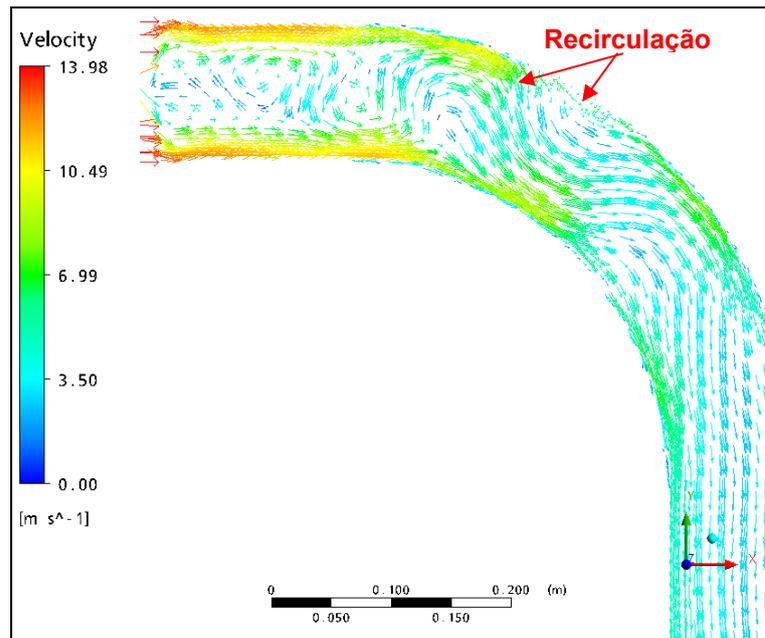


(b)

Figure 7.10 – Detalhamento do Vetor Velocidade na entrada do tubo de sucção ângulo 60



(a)



(b)

Figure 7.11 – Detalhamento do Vetor Velocidade na entrada do tubo de sucção ângulo  $30^\circ$ 

No próximo capítulo, a partir dos dados apresentados nessa seção, serão feitas as conclusões e recomendações referentes aos resultados obtidos a partir dos ensaios experimentais e aplicação numérica em CFD.

## CAPÍTULO 8

# CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### CONCLUSÕES

Os resultados obtidos nos ensaios experimentais mostram a viabilidade no controle da velocidade da Bomba Funcionando como Turbina (BFT), através do sistema de controle de velocidade inserido na seção de saída do tubo de sucção.

O primeiro teste realizado considerando um ângulo de conicidade de  $60^\circ$ , resultou em um menor curso do obturador, tendo uma zona de controle de aproximadamente 26 mm, conseqüentemente resultando em um maior curso para a zona sem ação de controle, chegando a 150mm, onde não foi possível manter constante a velocidade a partir da aplicação do SISCOV<sup>®</sup>, Fig 4.3. Vale ressaltar que apesar de obter um menor curso, o sistema mostra uma resposta rápida para pequenas variações (fechamento ou abertura da válvula de controle), tornando possível a utilização do sistema mesmo para o ângulo de  $60^\circ$ .

O segundo teste experimental, realizado após alteração do ângulo de conicidade de  $60^\circ$  para  $30^\circ$ , resultou em um maior curso do obturador (Fig 4.5), facilitando a regulagem do sistema de controle. Isso indica que para menor ângulo o sistema trabalha com uma melhor resposta ao controle, ou seja, com uma pequena variação na posição do SISCOV<sup>®</sup>, obtém-se uma resposta mais rápida para o controle da velocidade de rotação e conseqüente diminuição da zona sem ação de controle do sistema.

Com os resultados obtidos através da análise da aplicação numérica em CFD (Dinâmica do Fluido Computacional), mostrados nas Figuras 7.1 e 7.2, observa-se pequenas variações da pressão ao longo do tubo de sucção, sendo essas variações mais concentradas na entrada

do tubo devido a parcela dinâmica da pressão com a componente tangencial da velocidade do escoamento.

As Figuras 7.5 e 7.6 , correspondentes as aberturas mínimas e máximas consideradas para os ângulos de conicidade de 30° e 60° , indicam uma diminuição da velocidade ao longo do tubo. Isso ocorre devido a obstrução da passagem da água na saída do tubo de sucção, ou seja, a partir da instalação do sistema de controle de vazão (SISCOV®), mostrando através da simulação numérica que a partir da abertura ou fechamento do sistema é possível fazer o controle da velocidade de rotação, como observado nos ensaios experimentais.

Pode-se observar, a partir da Figura 7.8, trechos de recirculação ou vórtices mais concentrados na entrada do tubo de sucção, resultantes da diferença de pressão devido a rotação do rotor da BFT. Esse fenômeno pode ser melhor observado na Figuras 7.10 e 7.11, a partir do detalhamento das linhas de corrente em função da velocidade e vazão médias na entrada do tubo de sucção para as diferentes aberturas.

O uso da válvula gaveta inserida na entrada da BFT mostrou ser inviável para o controle da velocidade, já que não foi possível manter a rotação da BFT nas condições nominais, quando submetida a variação de carga.

## **RECOMENDAÇÕES**

Baseando-se nos resultados obtidos por esta dissertação, recomenda-se a utilização do CFD para estudo da atuação do SISCOV® para diferentes ângulos de abertura do obturador.

Devido a rapidez que são inerentes à simulação pela dinâmica de fluido computacional em entretenimento dos testes convencionais realizados experimentalmente, pode-se sugerir a realização de novas modelagens do SISCOV®, considerando diferentes ângulos de conicidade para o obturador, por exemplo, 15 °, 25, 35 ° e 45°, objetivando determinar o ângulo ótimo de conicidade a fim de garantir o maior trecho possível para o controle da velocidade pelo SISCOV®.

Para validação dos resultados numéricos para os diferentes ângulos de conicidade para o obturador, recomenda-se realizar ensaios experimentais adicionais para cada ângulo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**ALENCAR H. S, (2007)**, “Estudo Numérico da Termo-Aerodinâmica de Câmaras de Combustão para Turbinas a Gás: Aplicação ao caso de Micro Turbinas”, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá-MG, p.151.

**ALENCAR H. S, (1999)**, “Análise do Comportamento de Turbinas Hidráulicas para Operar com Rotação Variável”, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá-MG, p.210.

**BALARIM C. R., TARGA L. A.,FILHO J. S. V., ANDRADE A. G., WIECHETECK G. K. (2004)** , “Custo de Bombas Funcionando como Turbinas em Microcentrais Hidrelétricas”, Artigo Técnico, Eng. Agric, Jaboticabal, p.219-225.

**CORDEIRO A.F., MEDRONHO R. A.,TELLES A. C. S. S., FURTADO C. J. A. (2007)**,”Simulação da Injeção de Água em Reservatórios Empregando CFD”, 4º PDPETRO, Campinas-SP.

**ERBISTE P. C., (1987)**, “Comportas Hidráulicas”, Editora Campus / Eletrobrás, Rio de Janeiro, Brasil, pp. 358.

**FRANK M. W. (2006)**, “Fluid Mechanics”, 6<sup>th</sup> Edition, McGraw-Hill Science Engineering, ISBN 9780073309200, Columbus, OH, USA, p. 864.

**LOISEAU F., DAVIDSON R. A.,COUSTON M., SABOURIN M. (2006)**,”Fish Environment and New Turbines Design ”, 23 IAHR Symposium, Yokohama.

**LOPES R. E., MARTINEZ C. B. (2006)**, “O uso de Bombas Funcionando como Turbinas para Sistemas de Recalque de Água”, VI SEREA- Seminário Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água, João Pessoa, pp. 7.

**LUCCHESI F. A., SOARES J. C. (2002)**, “Microcentrais Hidroelétricas- Uma proposta de Energia Alternativa para o Meio Rural da Região Noroeste/RS”, XXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção , Curitiba-PR, pp. 8.

**NETO H. J., ALENCAR H. S., BERNARDES M. E. C., SILVA F. G. B. (2008)**, “Modelagem e Simulação do Comportamento de um Válvula de Fluxo Hidráulica com Uso de Ferramenta de Hidroinformática” Ver. Tecnol. Fortaleza, v.29, n. 2, p 224-232.

**SANTOS A. (2007)**, “Servomotores”, Tutorial Técnico, Porto Alegre- RS, pp. 7.

**VIANA A. N. C. (1987)**, “Comportamento de Bombas Centrífugas Funcionando como Turbinas Hidráulicas”, Dissertação de Mestrado, EFEI, Itajubá/ MG, pp. 95.

**VIANA A. N. C.**, “Bombas de Fluxo Operando como Turbinas.Por que Usá-las?”, Artigo Técnico, EFEI, Itajubá/ MG, pp.13.

**VIANA A. N. C., NOGUEIRA F. J. H.(1990)**, “Bombas Centrífugas Funcionando como Turbinas”, Trabalho de Pesquisa, Departamento de Mecânica, EFEI, Itajubá/ MG..

**YAO Q., XU D, PAN L.S, TEO M. A.L.,HO W.M., LEE P. V.S., SHABBIR M. (2007)**,”CFD Simulations of Flows in Valveless Micropumps”, Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, Vol. 1, No.3 , pp. 181-188.



## **ANEXO A**

### **TABELAS DE RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS NA BOMBA FUNCIONANDO COMO TURBINA BFT**

Tabela A.1– Valores Calculados para ângulo de conicidade  $\alpha=60^\circ$ 

Valores Calculados										
Medida	Ph	Pet	$\eta$	Pf	Mt	$\omega$	Q	V1	V2	H
13	KW	KW	%	KW	n*m	rad/s	m3/s	m/s	m/s	m
1	3,45	2,48	0,720	2,48	13,12	189,24	0,0301	0,425	0,319	11,75
2	3,32	2,32	0,699	2,32	12,28	189,13	0,0290	0,410	0,308	11,74
3	3,24	2,16	0,665	2,16	11,45	188,40	0,0283	0,400	0,300	11,74
4	3,14	1,99	0,634	1,99	10,56	188,40	0,0274	0,388	0,291	11,74
5	3,07	1,86	0,607	1,86	9,87	188,61	0,0268	0,378	0,284	11,74
6	3,02	1,74	0,575	1,74	9,19	189,13	0,0264	0,373	0,280	11,74
7	2,95	1,56	0,530	1,56	8,25	189,13	0,0257	0,363	0,273	11,74
8	2,75	1,10	0,398	1,10	5,80	189,24	0,0240	0,340	0,255	11,74
9	2,49	0,63	0,252	0,63	3,34	188,19	0,0217	0,308	0,231	11,74
10	2,24	0,32	0,145	0,32	1,72	188,40	0,0196	0,277	0,207	11,74

Tabela A.2– Valores Calculados para ângulo de conicidade  $\alpha=30^\circ$ 

Valores Calculados										
Medida	Ph	Pet	$\eta$	Pf	Mt	$\omega$	Q	V1	V2	H
	KW	KW	%	KW	n*m	rad/s	m3/s	m/s	m/s	m
1	3,44	2,41	0,700	2,41	12,77	188,61	0,0301	0,425	0,319	11,73
2	3,38	2,29	0,679	2,29	12,18	188,19	0,0295	0,417	0,313	11,73
3	3,31	2,14	0,648	2,14	11,35	188,82	0,0289	0,409	0,306	11,73
4	3,27	2,01	0,615	2,01	10,66	188,61	0,0285	0,403	0,303	11,73
5	3,21	1,94	0,603	1,94	10,27	188,71	0,0280	0,396	0,297	11,73
6	3,17	1,89	0,597	1,89	10,02	188,61	0,0276	0,391	0,293	11,73
7	3,09	1,74	0,562	1,74	9,23	188,30	0,0270	0,382	0,287	11,73
8	3,02	1,59	0,527	1,59	8,45	188,40	0,0264	0,373	0,280	11,73
9	2,99	1,53	0,512	1,53	8,10	188,82	0,0261	0,369	0,277	11,73
10	2,94	1,39	0,473	1,39	7,37	188,92	0,0257	0,363	0,273	11,73
11	2,86	1,21	0,421	1,21	6,39	188,92	0,0250	0,354	0,265	11,73
12	2,78	1,05	0,375	1,05	5,55	188,30	0,0243	0,344	0,258	11,73
13	2,72	0,96	0,354	0,96	5,11	188,30	0,0237	0,336	0,252	11,73
14	2,68	0,89	0,333	0,89	4,72	189,34	0,0234	0,331	0,249	11,73
15	2,53	0,80	0,315	0,80	4,22	188,50	0,0221	0,312	0,234	11,73
16	2,49	0,69	0,276	0,69	3,63	189,13	0,0217	0,308	0,231	11,73
17	2,38	0,56	0,234	0,56	2,95	189,13	0,0208	0,294	0,220	11,72
18	2,34	0,44	0,186	0,44	2,31	188,82	0,0204	0,289	0,217	11,72
19	2,24	0,30	0,133	0,30	1,57	189,03	0,0196	0,277	0,207	11,72
20	2,03	0,07	0,037	0,07	0,39	188,71	0,0177	0,250	0,188	11,72

**Tabela A.3-** Valores medidos utilizando válvula gaveta na entrada da BFT

Valores Calculados										
Medida	Ph	Pet	$\eta$	Pf	Mt	$\omega$	Q	V1	V2	H
	KW	KW	%	KW	n*m	rad/s	m <sup>3</sup> /s	m/s	m/s	M
1	3,36	2,59	0,769	2,59	13,70	188,71	0,0295	0,417	0,313	11,68

**Tabela A.4 – Tabelas dos Valores utilizados para a construção das curvas de Recepção**Tabela A.4.1-  $\alpha=60^\circ$ 

$\eta$	Q
%	M <sup>3</sup> /s
0,720	0,0301
0,699	0,0290
0,665	0,0283
0,634	0,0274
0,607	0,0268
0,575	0,0264
0,530	0,0257
0,398	0,0240
0,252	0,0217
0,145	0,0196

Tabela A.4.2-  $\alpha=30^\circ$ 

$\eta$	Q
%	m <sup>3</sup> /s
0,700	0,0301
0,679	0,0295
0,648	0,0289
0,615	0,0285
0,603	0,0280
0,597	0,0276
0,562	0,0270
0,527	0,0264
0,512	0,0261
0,473	0,0257
0,421	0,0250
0,375	0,0243
0,354	0,0237
0,333	0,0234
0,315	0,0221
0,276	0,0217
0,234	0,0208
0,186	0,0204
0,133	0,0196
0,037	0,0177

Tabela A.5 – Tabelas dos Valores Medidos para o ângulo de 60°

Condições locais		
Grandeza	Unidade	Valor
Hb	mHG	0,694
Ta	°C	18
$\varphi$	%	75
g	m/s <sup>2</sup>	9,785
TH2O	°C	18

Valores medidos para altura H=8m								
Medida	Vazão'	H1	Alt. suc	Rot. Fr	Rot. Turb.	Carga Freio	H2	H3
-----	$\Delta H_v$	H1	$\Delta H_s$	nT	HC	F	H2	H3
-----	[mH2O]	[mH2O]	[m]	[rpm]	[m]	[Kgf]	[mH2O]	[mH2O]
1	0,130	0,460	1,01	1812	0,260	2,74	1,34	0,135
2	0,115	0,465	1,01	1805	0,255	2,29	1,335	0,135
3	0,105	0,455	1,01	1802	0,258	1,88	1,34	0,135
4	0,095	0,460	1,01	1808	0,260	1,63	1,335	0,135
5	0,080	0,458	1,01	1792	0,270	1,26	1,34	0,135
6	0,075	0,460	1,01	1805	0,272	1,11	1,34	0,135
7	0,070	0,459	1,01	1795	0,273	0,98	1,34	0,135
8	0,060	0,460	1,01	1794	0,272	0,75	1,34	0,135
9	0,058	0,462	1,01	1803	0,273	0,64	1,335	0,135
10	0,050	0,460	1,01	1803	0,273	0,3	1,338	0,135

Tabela A.6 – Tabelas dos Valores Medidos para o ângulo de 30°

Condições locais		
Grandeza	Unidade	Valor
Hb	mHG	0,694
Ta	°C	20
$\varphi$	%	75
g	m/s <sup>2</sup>	9,785
TH2O	°C	18

Valores medidos para altura H=8m								
Medida	Vazão'	H1	Alt. suc	Rot. Fr	Alt. Ch	Carga Freio	H2	H3
-----	$\Delta H_v$	H1	$\Delta H_s$	nT	HC	F	H2	H3
-----	[mH2O]	[mH2O]	[m]	[rpm]	[m]	[Kgf]	[mH2O]	[mH2O]
1	0,130	0,460	0,99	1802	0,120	2,60	1,34	0,135
2	0,125	0,460	0,99	1798	0,229	2,48	1,34	0,135
3	0,120	0,460	0,99	1804	0,248	2,31	1,34	0,135
4	0,117	0,460	0,99	1802	0,252	2,17	1,34	0,135
5	0,113	0,460	0,99	1803	0,256	2,09	1,34	0,135
6	0,110	0,460	0,99	1802	0,258	2,04	1,34	0,135
7	0,105	0,460	0,99	1799	0,260	1,88	1,34	0,135
8	0,100	0,460	0,99	1800	0,264	1,72	1,34	0,135
9	0,098	0,460	0,99	1804	0,265	1,65	1,34	0,135
10	0,095	0,460	0,99	1805	0,258	1,50	1,34	0,135
11	0,090	0,460	0,99	1805	0,270	1,30	1,34	0,135
12	0,085	0,460	0,99	1799	0,272	1,13	1,34	0,135
13	0,081	0,460	0,99	1799	0,276	1,04	1,34	0,135
14	0,079	0,460	0,99	1809	0,278	0,96	1,34	0,135
15	0,070	0,460	0,99	1801	0,279	0,86	1,34	0,135
16	0,068	0,460	0,99	1807	0,280	0,74	1,34	0,135
17	0,062	0,460	0,99	1807	0,282	0,60	1,34	0,135
18	0,060	0,460	0,99	1804	0,283	0,47	1,34	0,135
19	0,055	0,460	0,99	1806	0,278	0,32	1,34	0,135
20	0,045	0,460	0,99	1803	0,280	0,08	1,34	0,135

## **ANEXO B**

### **GUIA DE UTILIZAÇÃO DO CFX PARA MODELAGEM DO SISTEMA DE CONTROLE DE VELOCIDADE**

Este guia apresenta os procedimentos necessários para o cálculo CFD pelo CFX aplicado na simulação do comportamento do sistema de controle de velocidade instalado no tubo de sucção.

## B.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA FÍSICO

Pretende-se realizar um estudo de comportamento de um sistema de controle de velocidade, instalado na saída do tubo de sucção, com o objetivo de terminar a atuação do sistema quando sujeito a mudanças de carga. As etapas do estudo são:

- modelar a geometria;
- estabelecer as condições de cálculo; e
- visualizar a distribuição da velocidade e pressão sobre um plano longitudinal XoY.

## B.2 MODELAGEM

### B.2.1 – Criação do Modelo Geométrico

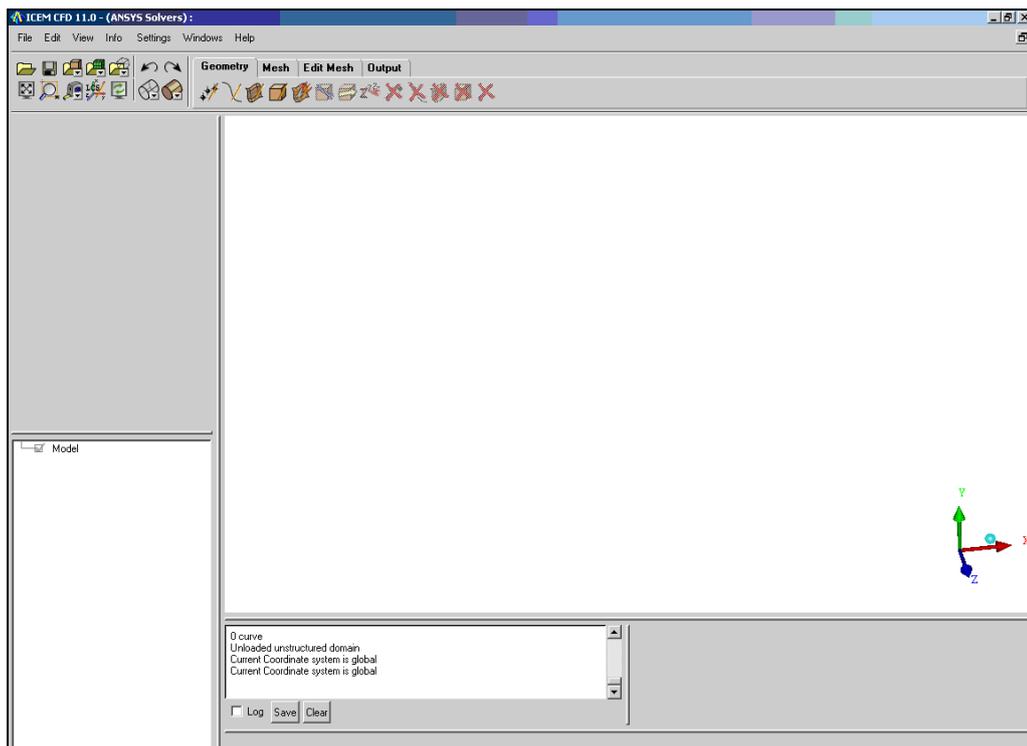


Figura B.1 – Tela inicial do ICEM CFD para construção da Geometria

- Iniciar o software ICEM CFD
- A partir do menu principal, salvar o projeto selecionando File> Save project as
- Recomenda-se definir o primeiro das coordenadas x, y e z (0,0,0), para a definição dos pontos durante a construção da geometria.

A partir das ferramentas mostradas na Figura B.2, indicada por um círculo, iniciar a construção da Geometria:

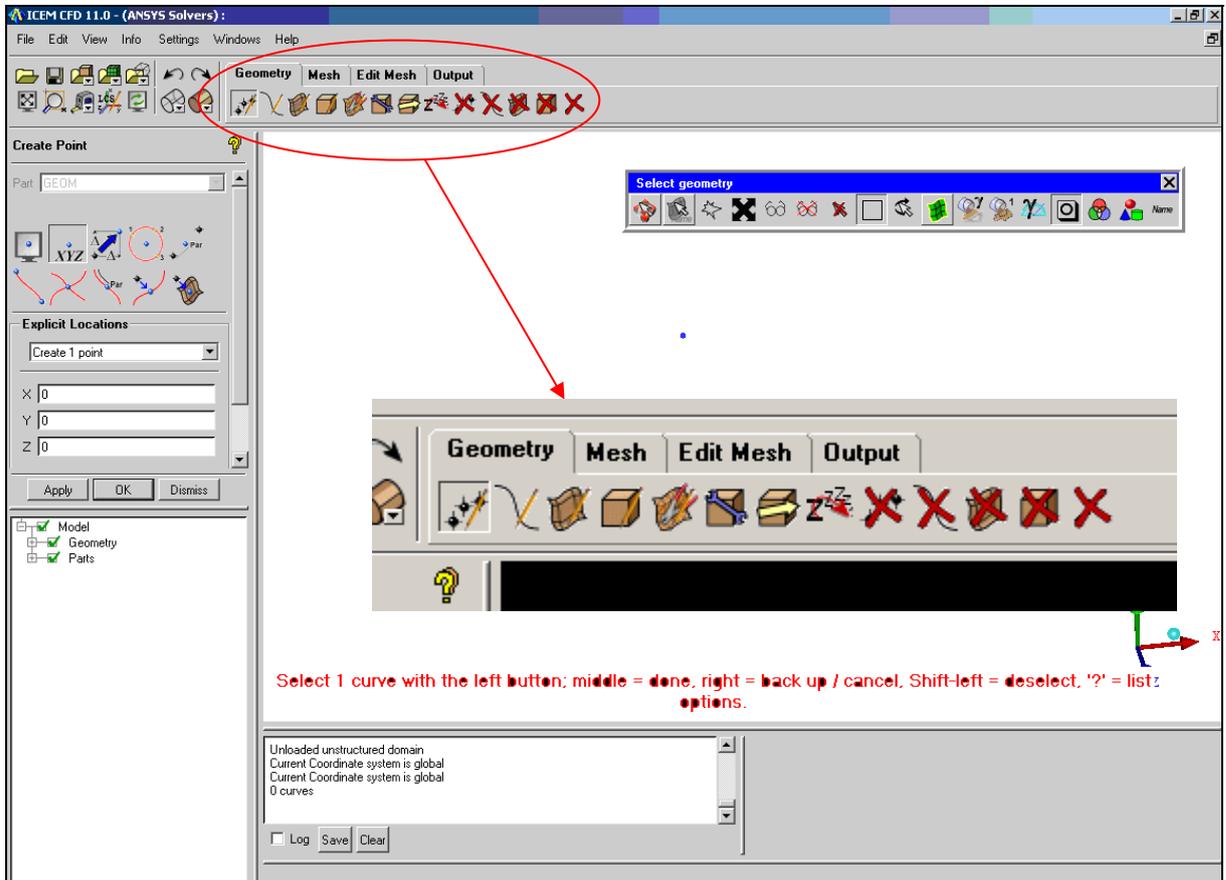


Figura B.2- Ponto Inicial da geometria (0,0,0), coordenada (x,y,z)

Primeira aba **Geometry**.: Permite a construção de pontos, curvas e superfícies. As figuras indicas com um x(em vermelho), são utilizadas para deletar pontos, curvas ou superfícies.

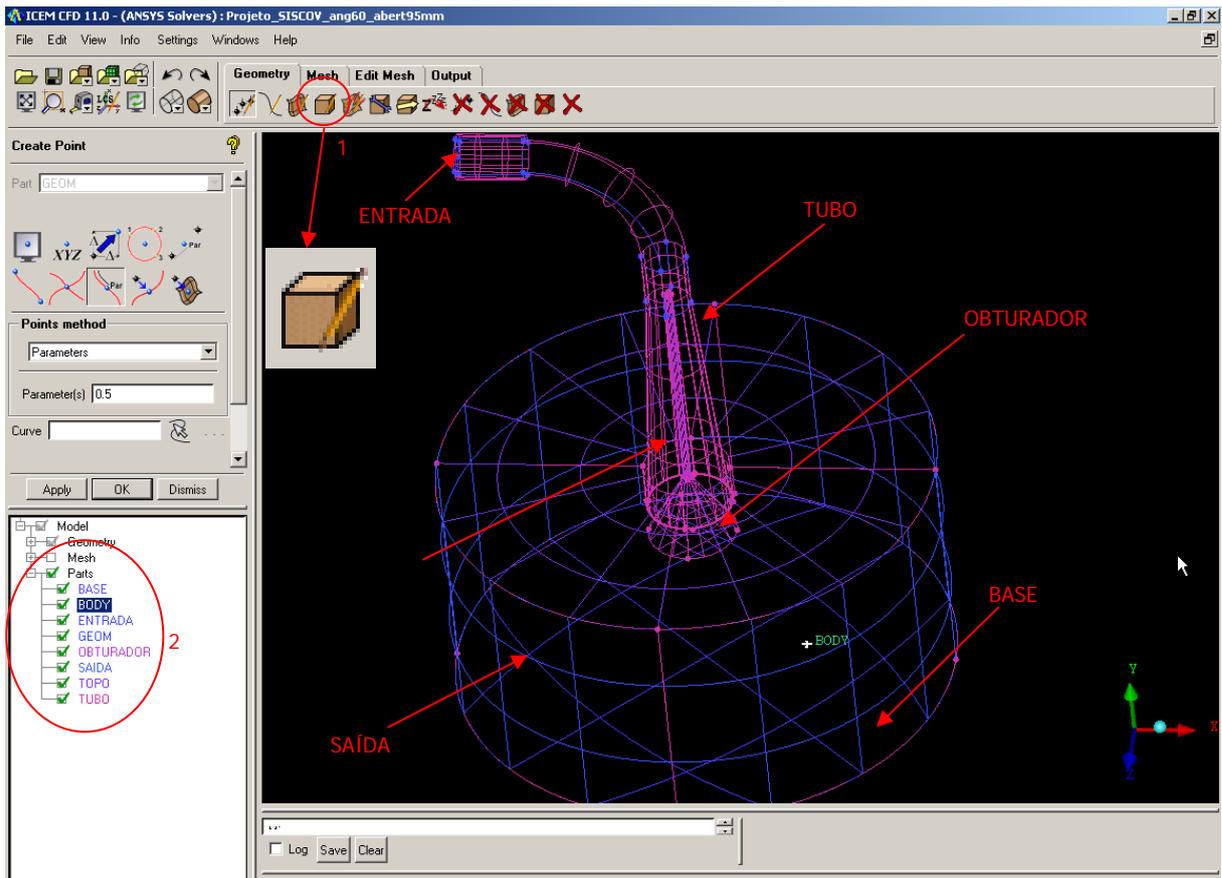


Figura B.3-Geometria do Sistema de Controle de Velocidade instalado no tubo de sucção

NOTA: Após a construção da geometria é necessário definir o “Body”, indicado na figura B.3 pelo círculo 1. O body dá base para definição dos limites do corpo para a construção da malha de volume.

É necessário definir as partes da geometria para facilitar a definição das condições de contorno no CFD PRE, como indicado na Figura B.3 pelo círculo 2. No caso o SISCOV® foram definidos a BASE, ENTRADA, OBTURADOR, SAÍDA, TOPO, TUBO.

## B.2.2 –Criação da Malha

Segunda aba **Mesh**: Definição da malha Global de toda a geometria, bem como das partes separadas da geometria, como mostra a Fig. B.4.

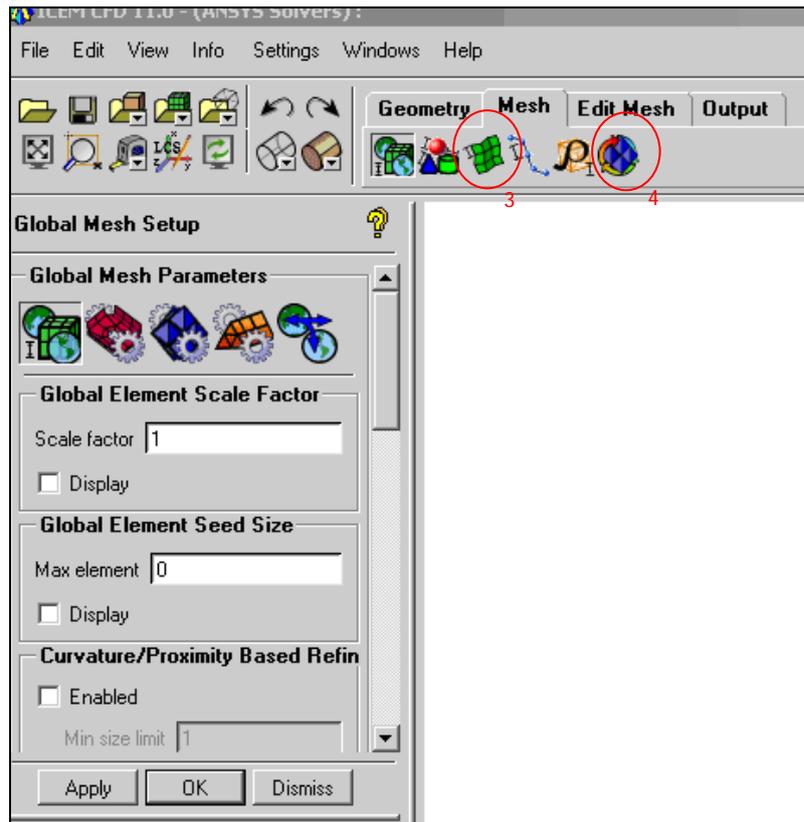


Figura B.4-Construção da Malha Global

NOTA: Muitas geometrias necessitam de um refinamento da malha para uma melhor discretização da geometria, para isso utiliza-se a “Part Mesh Setup”, indicado na figura B.4 pelo ponto 3. Na tabela indicada na Figura B.5, é possível definir o tamanho da malha em cada parte da geometria. No este trabalho foi feito um refinamento na malha do obturador.

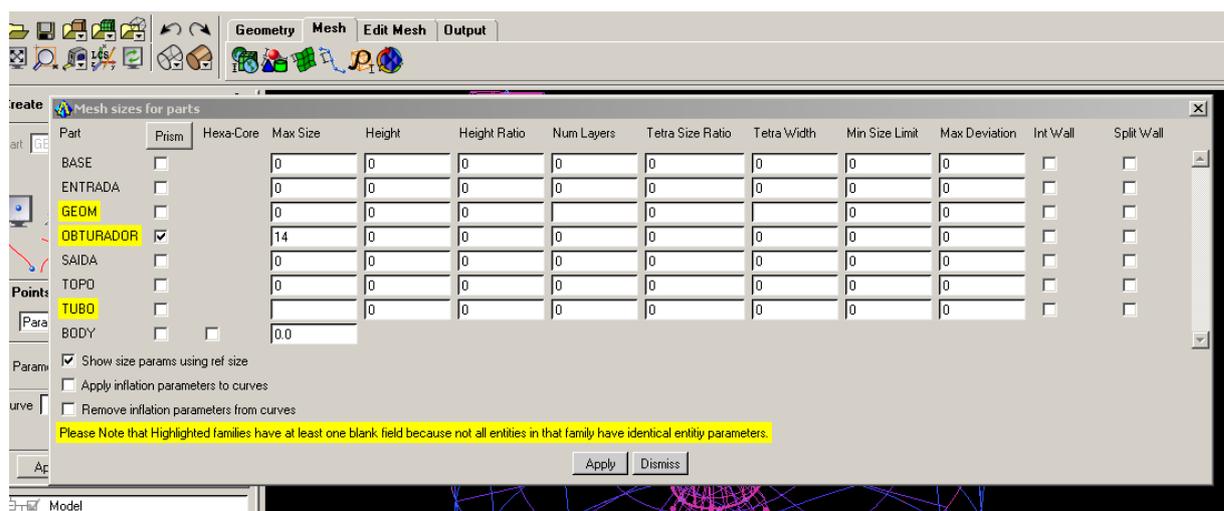


Figura B.5- Refinamento da malha para as diferentes partes da geometria

Após discretização da malha é utilizada a ferramenta indicada na Figura B.4 pelo número 4 “Compute Mesh” para geração da malha, ao clicar neste botão irá habilitar uma outra janela, indicada na Fig. B.6.

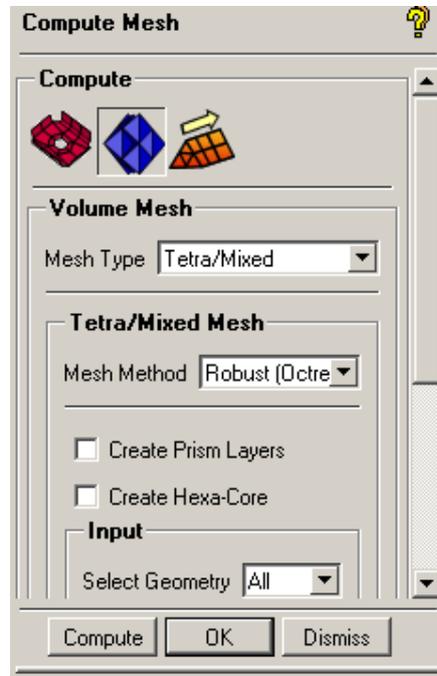


Figura B.6- Refinamento da malha para as diferentes partes da geometria

Na Figura B.6 aparecem três opções: criar somente malha de superfície “Surface Mesh Only”, malha de volume “Volume Mesh” e malha prismática “Prism Mesh”. Escolher a segunda opção para criar a malha de volume para estudo de toda a geometria. Em seguida clicar no botão “Compute” e aguardar para o software concluir a malha.

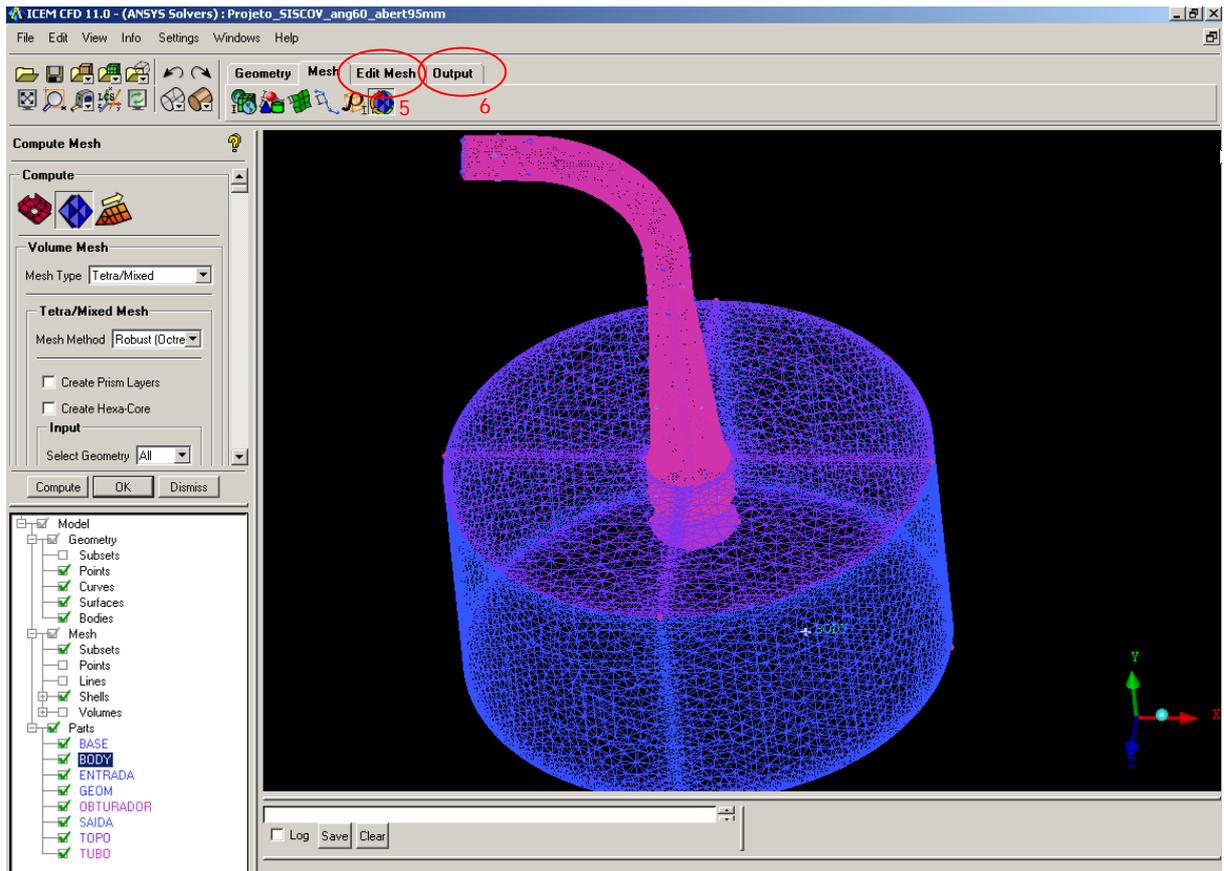


Figura B.7- Malha Tetraédrica

- Terceira aba “**Edit Mesh**”: Opção utilizada caso seja necessário deletar ou editar a malha, representada pelo número 5 na Fig. B.7
- Quarta aba “**Output**”: Opção representada pelo número 6 na Figura B.7, é utilizada para transferir a malha gerada para CFX PRE. A
  - clicar em Output to CFX, indicado pelo número 7 na Figura B.8;
  - Na janela “Name for CFX-5 file” escolher o diretório para salvar a geometria.

**NOTA:** Para não ocorrer confusão em relação ao CFX 12 que possui extensão msh, recomenda-se colocar no final do nome da geometria \_CFX5 como mostra a Fig B.8. Essa extensão será importante no momento em que o CFX PRE for importar a geometria feita no ICEM CFD.

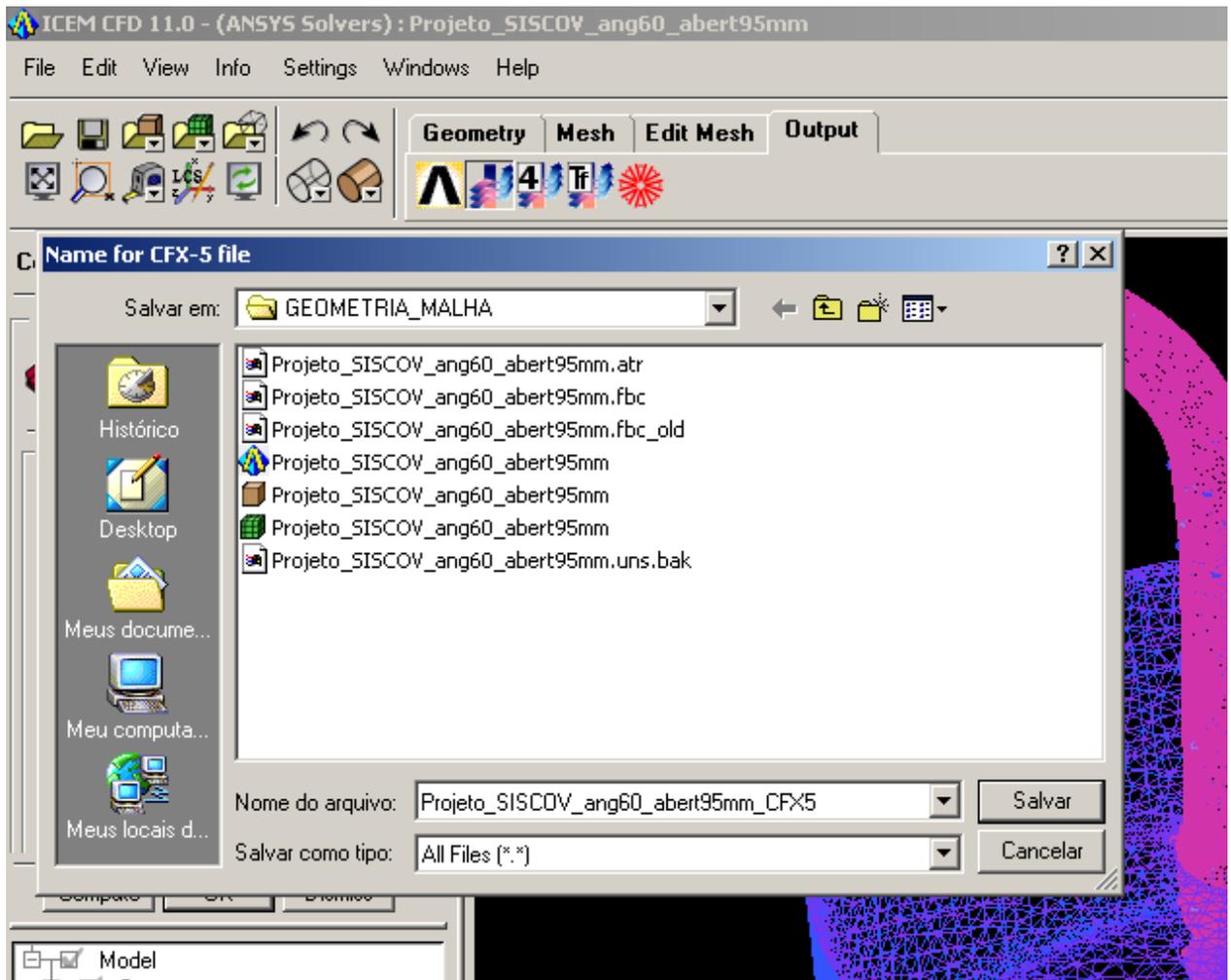


Figura B.8- "Output" da Geometria



Figura B.8- ANSYS CFX 11

- Clicar em CFX- PRE 11,
- Na interface do CFX PRE, clicar em **File> New Simulation**. Irá aparecer uma janela para escolha do tipo de simulação, Fig B.9. Escolher **General**.

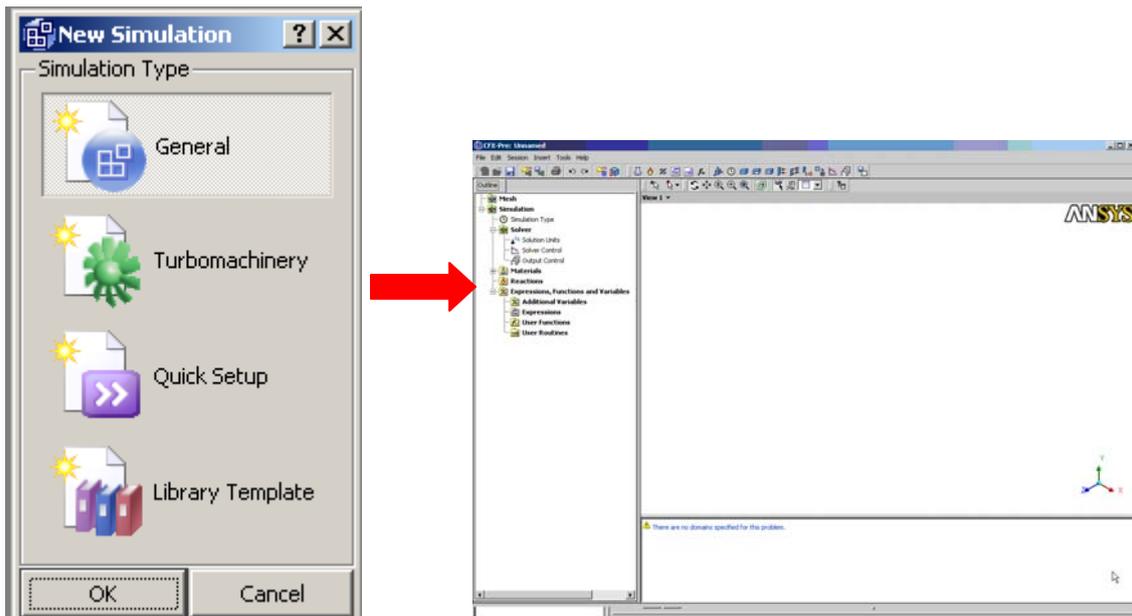


Figura B.9- Caminho para abrir ANSYS CFX PRE

- Na tela inicial do CFX PRE, clicar em File> Import Mesh
- Na tela representada na Figura B.10, em File Name procurar o diretório onde foi salvo a geometria com a malha, antes colocar em File Type a extensão do arquivo ICEM CD (\* cfx \*cfx5 \*msh), como já foi dito anteriormente, o msh é extensão do ANSYS CFD12 e o cfx5 é extensão do ANSYS CFD 11, versão utilizada neste trabalho.

**NOTA IMPORTANTE:** Não esquecer de escolher a opção “MESH UNIT” em mm, pois a default do ICEM CFX é sempre em m, se escolher em m, os resultados de cálculo não serão verdadeiros.

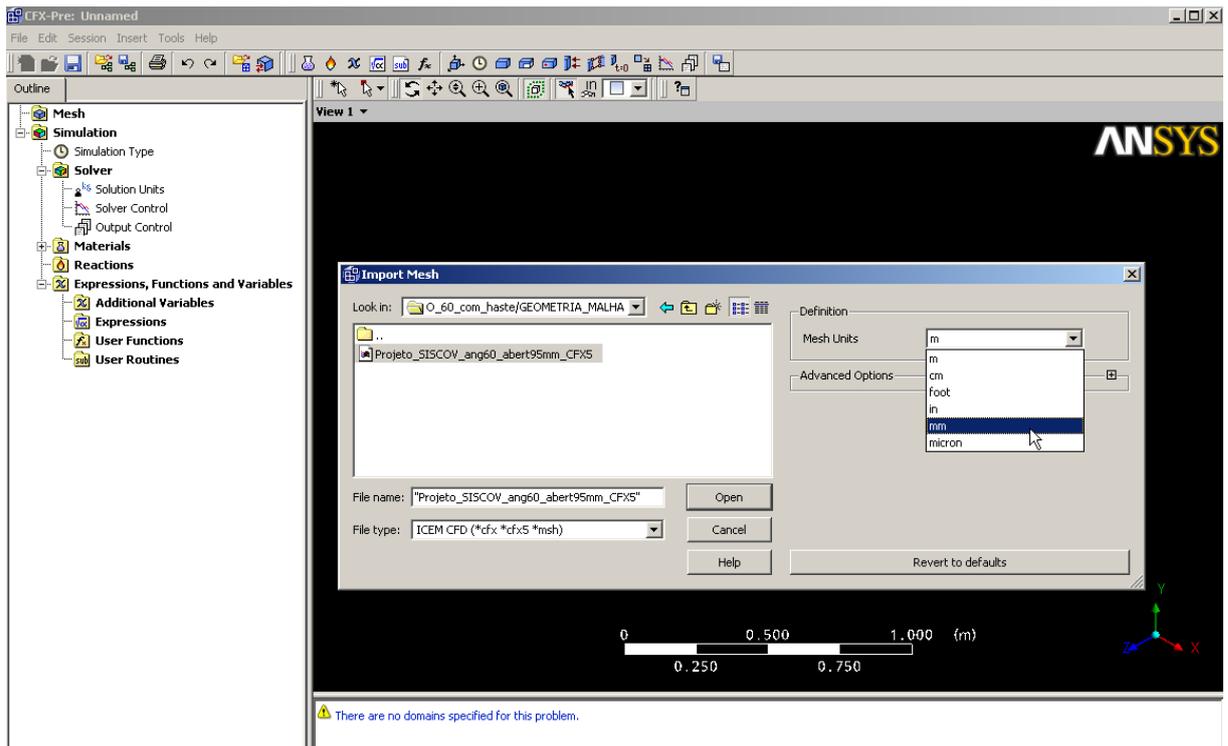


Figura B.10- Interface para importar a malha

A figura B.11 mostra a geometria importada do ICEM CFD.

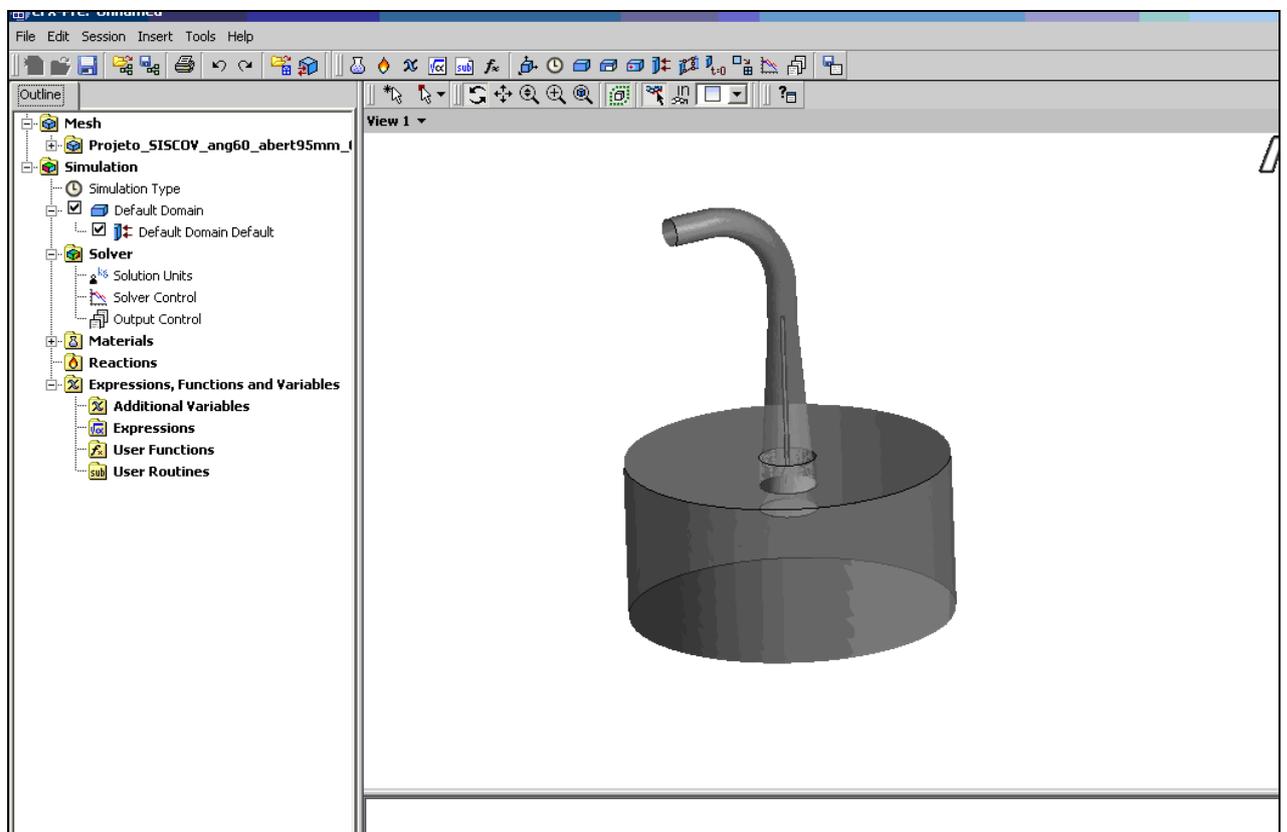


Figura B.11- Malha importada

## B.2.2 –Setagem das Condições de contorno

- Após importar a malha, fazer a setagem das condições de contorno para cada parte da geometria, Fig B.12.

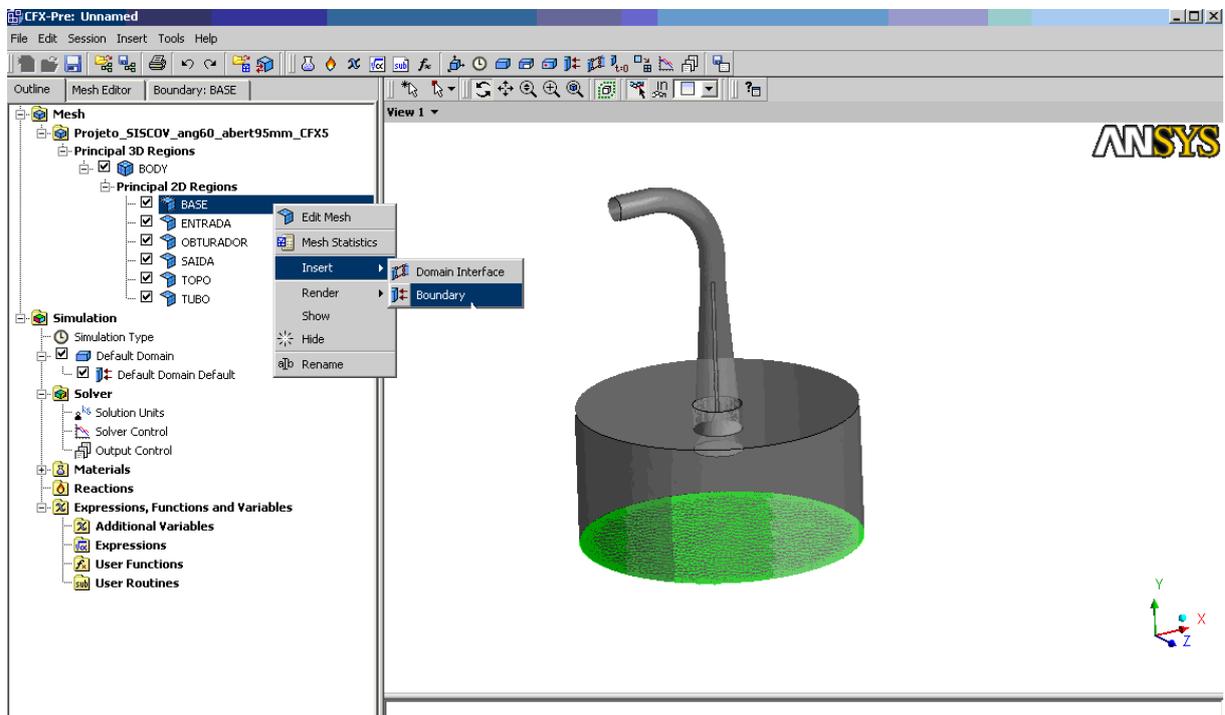
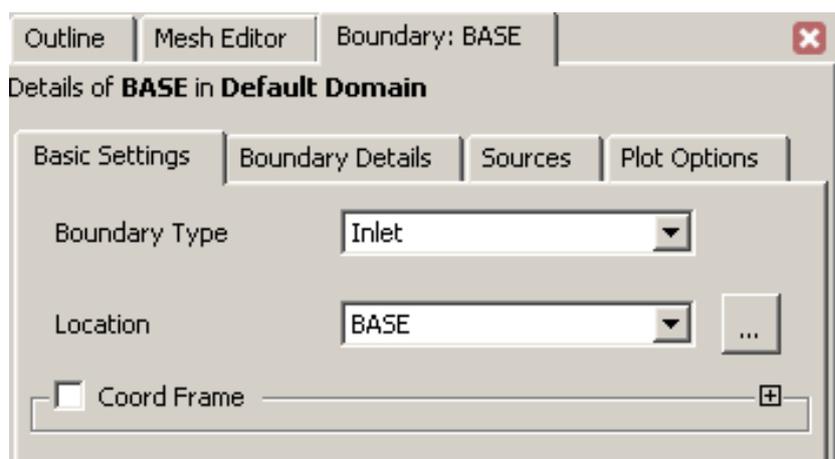


Figura B.12- Definição das condições de contorno

- Clicar com o botão direito no nome da superfície de referência definida anteriormente, como mostra a figura B.12,
- Selecionar Insert>Boundary



- Na interface preencher os dados das condições iniciais de cada superfície de referência, como mostra os passos seguintes, definindo as condições de contorno para BASE, ENTRADA, OBTURADOR, SAÍDA TOPO e TUBO.

Antes de começar a setar as condições, colocar as equações que serão utilizadas para o cálculo. Para isso, utiliza-se a opção “New spression”, indicado na Figura B.12 pelo número 7.

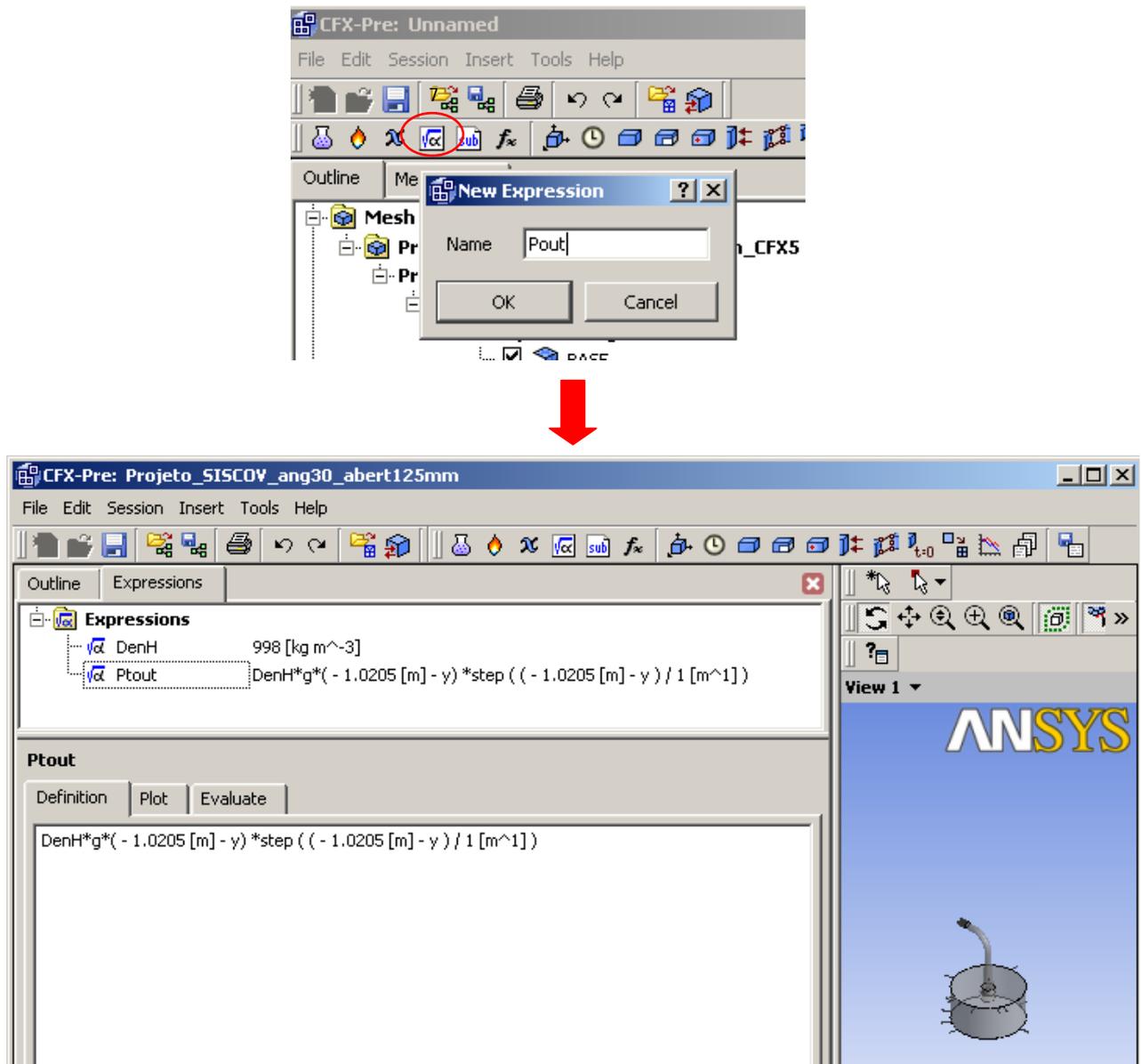


Figura B.12- Definição das equações utilizadas para o cálculo

- BASE
  - o Basic Settings:
    - Boundary type: wall
    - Location: BASE
  - o Boundary Details
    - Wall influence on flow
      - Option: No slip
    - Wall Roughness

- Option: Smooth wall

- ENTRADA

○ Basic Settings:

- Boundary type: inlet
- Location: ENTRADA

○ Boundary Details

- Flow Regime
  - Option: Subsonic
- Mass and Momentum
  - Option: Cyl. Vel. Components
  - Axial Component: 1,82 [m/s] (explicar valor)
  - Radial Component: 0 [m/s]
  - Theta Component: 13,69 [m/s]
- Axis Definition
  - Option: Coordinate Axis
  - Rotation Axis: Global x
- Turbulence:
  - Option: Medium (Intensity=5%)

- OBTURADOR

○ Basic Settings:

- Boundary type: wall
- Location: OBTURADOR

○ Boundary Details

- Wall influence on flow
  - Option: No slip
- Wall Roughness
  - Option: Smooth wall

- SAÍDA

○ Basic Settings:

- Boundary type: Out let
    - Location: SAÍDA
    -
  - Boundary Details
    - Flow Regime
      - Option: Subsonic
  - Mass and Momentum
    - Option: Static Pressure
    - Relative Pressure: Pout (fórmula definida pelo usuário referente ao modelo estudado, para este estudo ver Equação XX, mostrada no capítuloXX)
- TOPO
  - Basic Settings:
    - Boundary type: wall
    - Location: TOPO
  - Boundary Details
    - Wall influence on flow
      - Option: No slip
    - Wall Roughness
      - Option: Smooth wall
- TUBO
  - Basic Settings:
    - Boundary type: wall
    - Location: TUBO
  - Boundary Details
    - Wall influence on flow
      - Option: No slip
    - Wall Roughness
      - Option: Smooth wall
- Setadas todas as condições de contorno, deverá ser definido os critérios de calculo, representado pelo número 8 da Figura B.13, definindo número de iterações(500), residual type( RMS ) e Residual Target ( 1e-04).

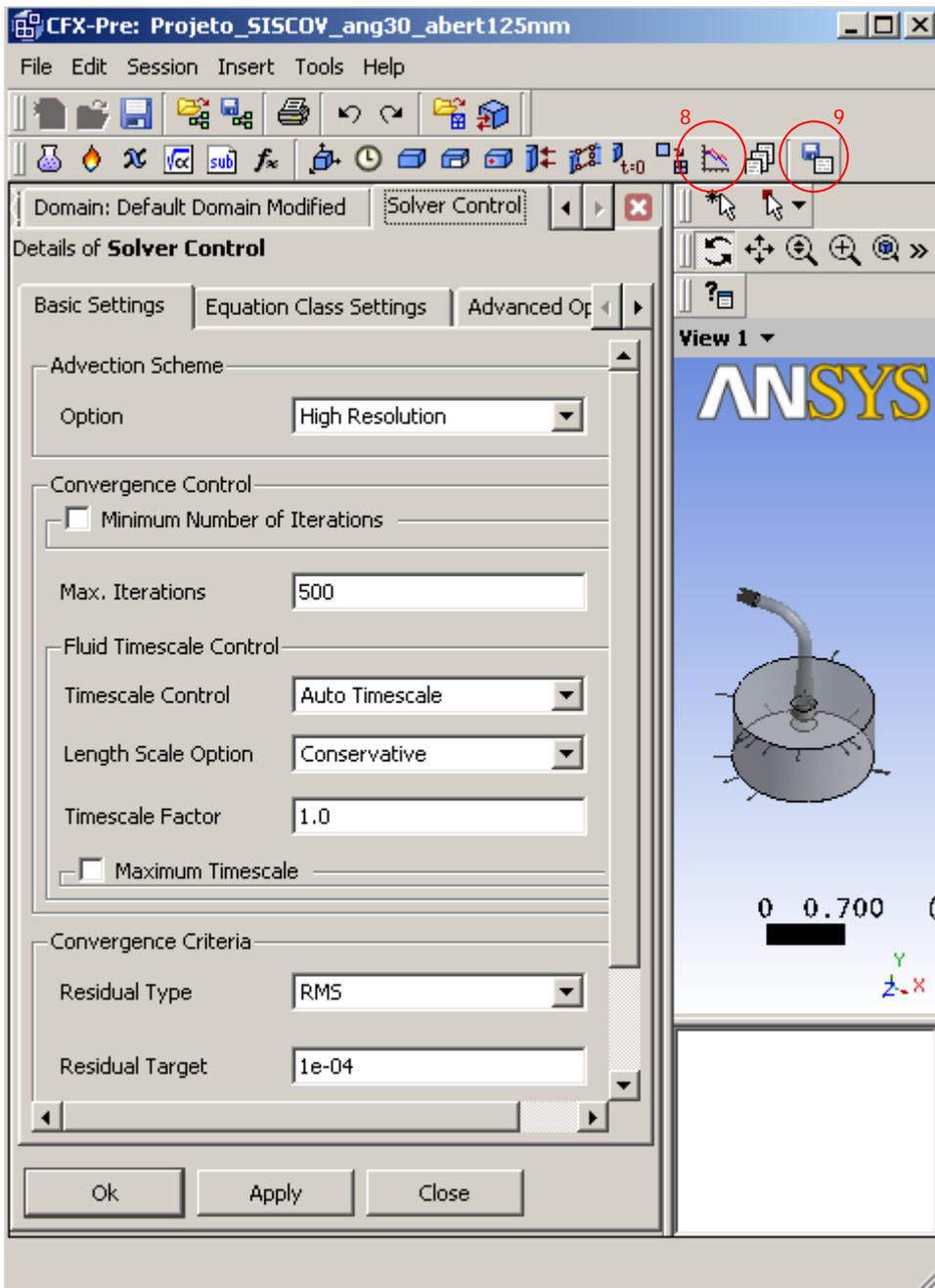


Figura B.13- Definição dos critérios de cálculo

- clicando na opção "Write solve file" , número 9 da Figura B.13 para salvar as condições ( \*def ) para serem lidas pelo CFX Solver.
-

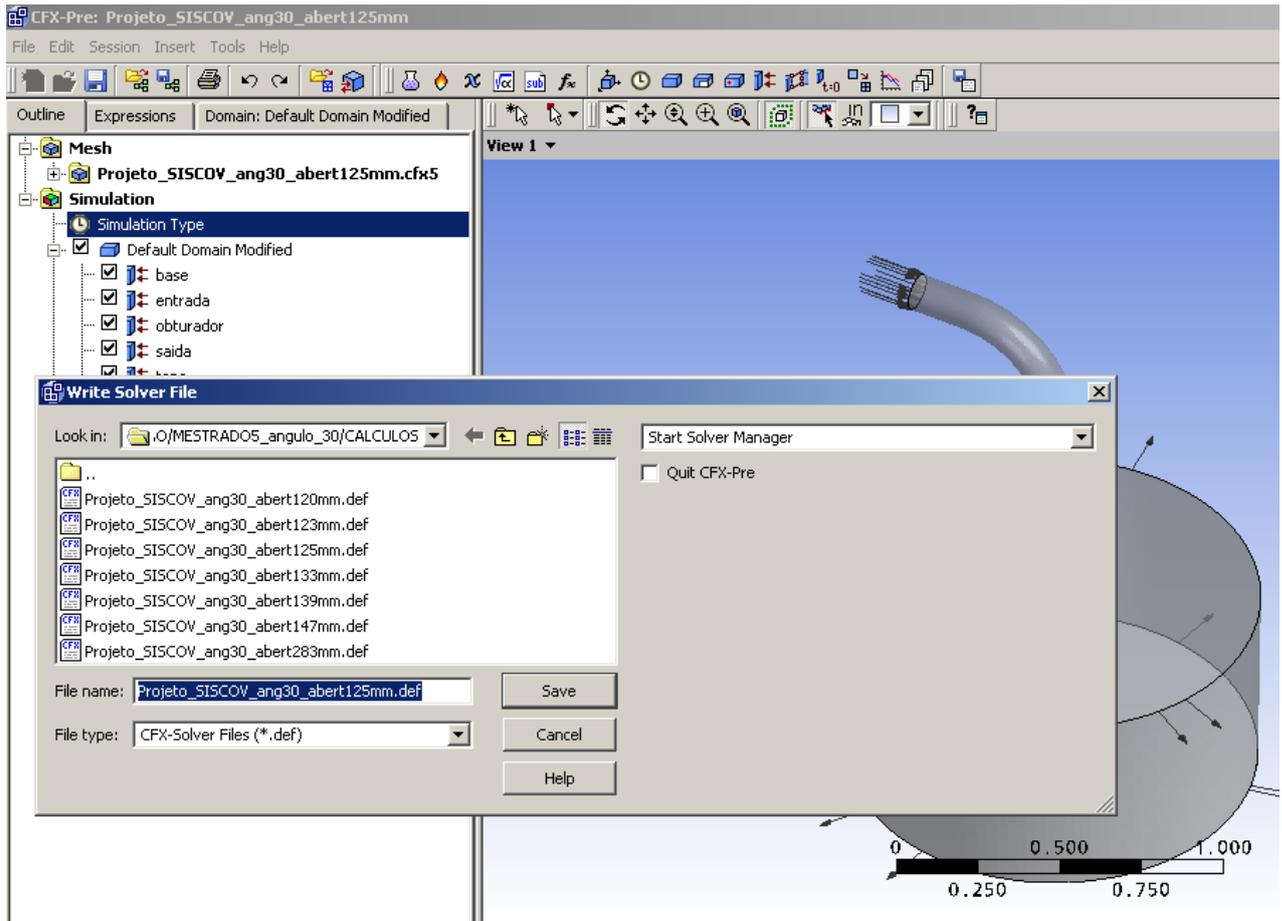


Figura B.13- definição do arquivo .def para ser lido pelo CFX Solver

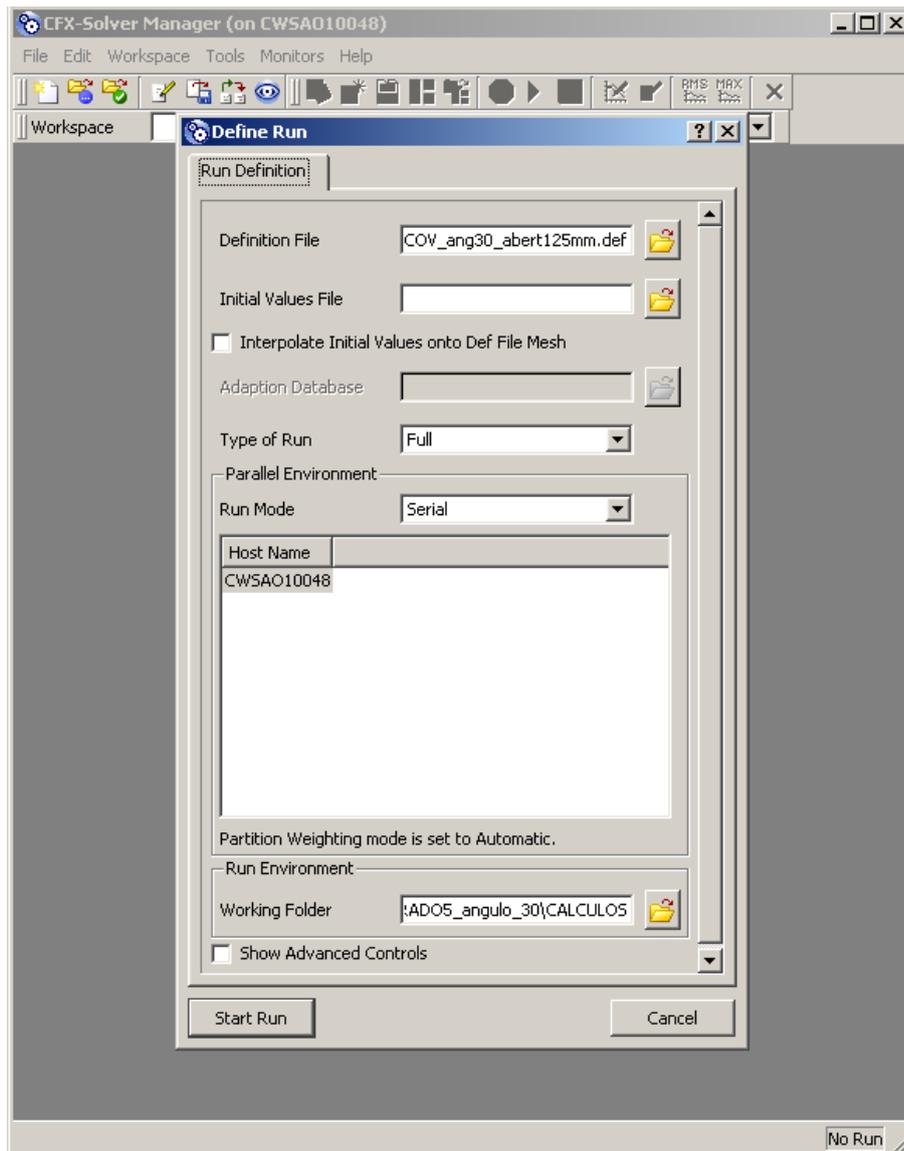


Figura B.14- Interface para cálculo numérico

- Na tela representada pela Figura B.14, serão definidas as condições da máquina para fazer o cálculo no CFX Solver.
- Para começar o cálculo basta clicar em **Start Run** (no canto inferior esquerdo da Figura B.14).

O software irá fazer o cálculo até as curvas convergirem para o ponto  $1e-04$ , definido anteriormente nos critérios de cálculo, como mostra a figura B.15

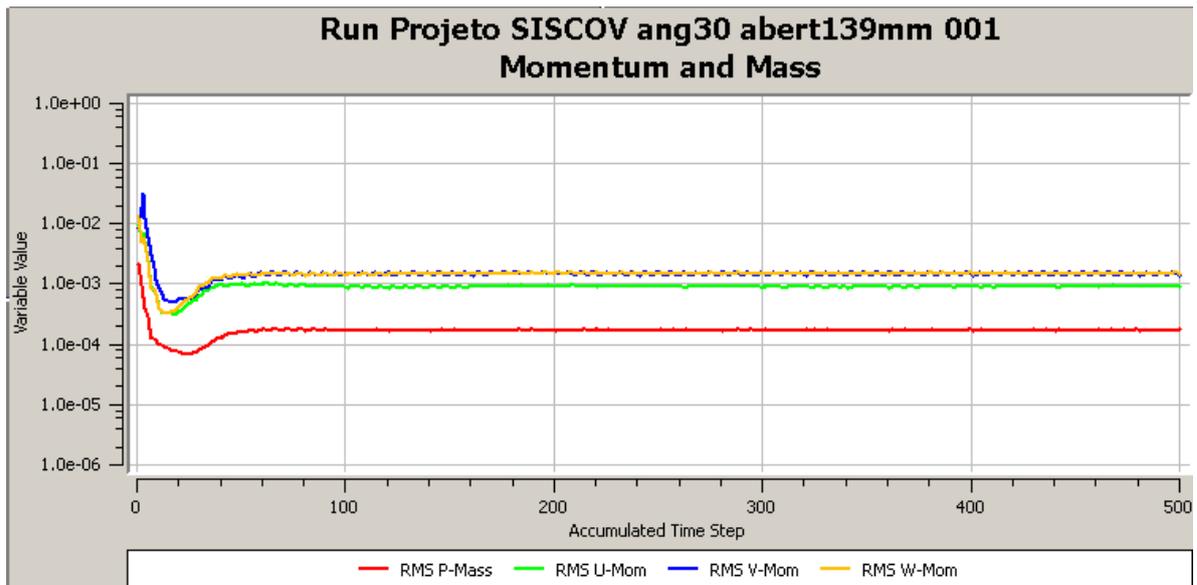


Figura B.15- Resultado de cálculo

Após cálculos é possível fazer a visualização dos resultados no CFX POST, Fig.

- Voltando na tela representada pela Fig. B.8, selecionar a opção CFX POST 11
- Na tela de interface, clicar em File>Load State e abrir o arquivo .cst, no mesmo diretório onde foram salvos os outros arquivos.
- Criar o plano XoY para visualização da distribuição de pressão e velocidade

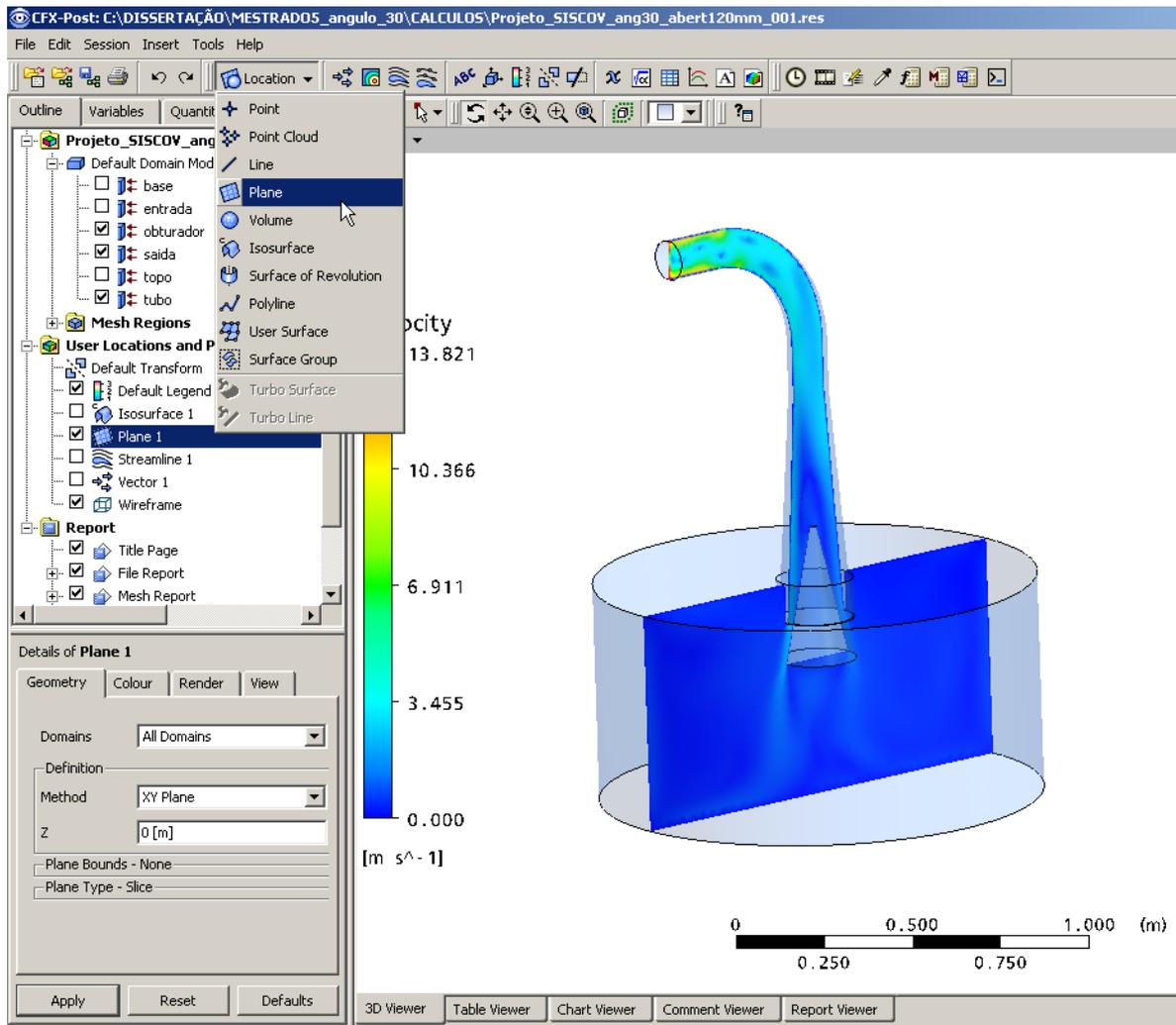


Figura B.16- Para XoY para visualização dos resultados de cálculo

- O plano pode ser criado clicando em Location> Plane, como mostra a figura B.16.
- No canto inferior esquerdo da tela, abrirá uma janela para definição do plano e o domínio. No caso colocar All Domains e XY plane, as outras abas representam cor do plano, tipo de resultado a ser escolhido (velocidade, pressão)

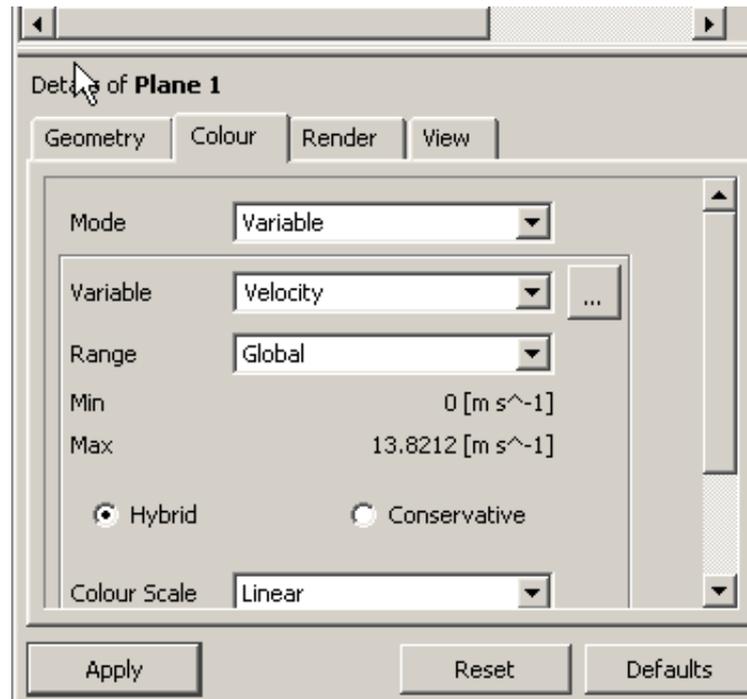


Figura B.17- Para XoY para visualização dos resultados de cálculo

O mesmo passo pode ser feito para criar as linhas de contorno, vetores e superfície livre, utilizando as ferramentas representadas pela Fig B.18.



Figura B.18- Ferramentas para visualização de resultados.

**NOTA:** As curvas de distribuição de velocidade , pressão, linhas de corrente, vetores velocidade, estão melhor detalhadas no capítulo7

## **ANEXO C**

**FOTOS DOS EQUIPAMENTOS E INSTRUMENTOS UTILIZADOS NO ENSAIO**



Figura C.1: Bomba Hidráulica Utilizada para simular a altura da queda.



Figura C.2: Manômetro de coluna de mercúrio utilizado para medir a pressão na entrada da turbina.

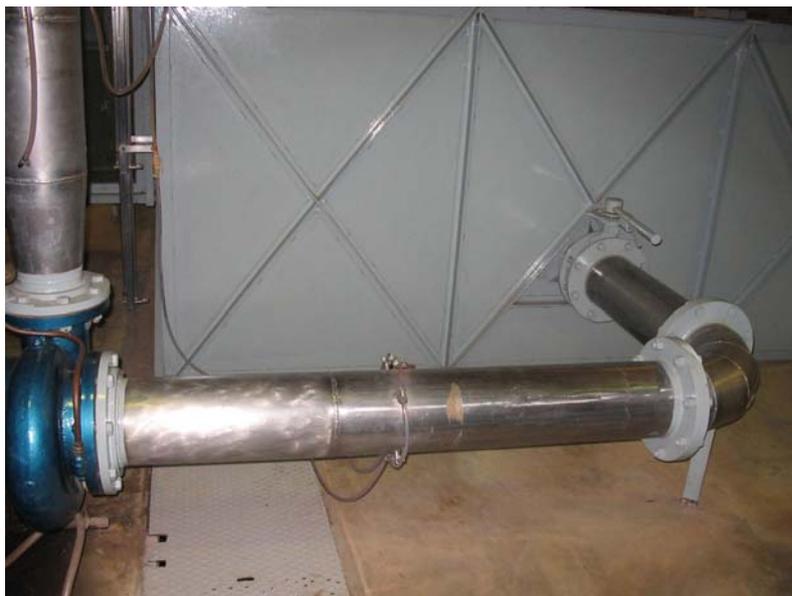


Figura C.3: Tomada de água no tanque.



Figura C.4: Resistência Líquida.

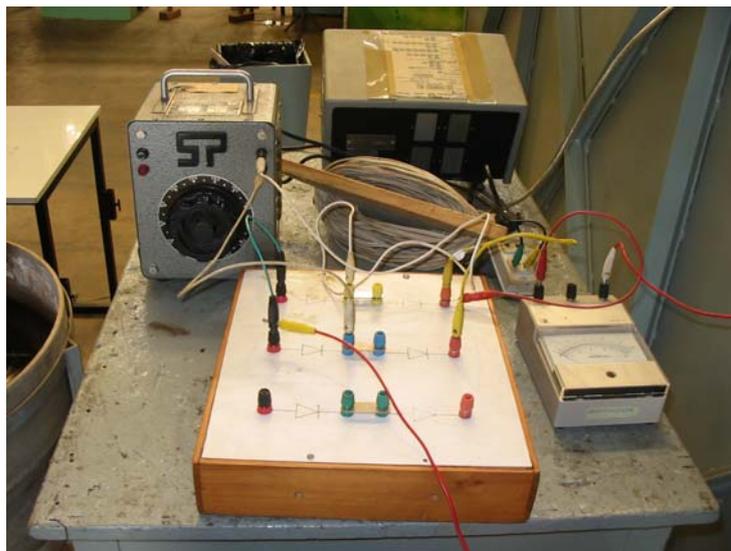


Figura C.5: Detalhe dos equipamentos elétricos utilizados para variar a solicitação da turbina



Figura C.6: Medidor Venturi utilizado para medir a vazão.



Figura C.7: Detalhe do painel de controle da bomba



Figura C. 8: Câmara de equalização da pressão.

## C.1- Instrumentação e grandezas Aquisitadas

### C.1.1 Simulação da Altura de queda:

**Dispositivo 1:** Bomba centrífuga monoestágio (Bomba + hidrocínético)

- Marca: Mark;
- Modelo: SFO-15

**Característica:**

- Rotação: 1770 [rpm];
- Rendimento: 78 [%];
- Vazão média: 250 [m<sup>3</sup>/h];
- Vazão máxima: 325 [m<sup>3</sup>/h];
- Pressão média : 13 [mca];
- pressão maxima = 22 [mca];

**Dispositivo 2:** Motor 2 polos trifásico

- Proteção:IP54;
- Marca: Weg;

**Característica:**

- Potência: 40 [cv];
- Rotação: 1750 [rpm];

**Dispositivo 3:** Variador hidrocínético

- Modelo: Hidroconstant 2B;
- Rotação do eixo de 0 a 1700 [rpm];
- Rendimento: 93,7 [%];

### Velocidade de Rotação

**Dispositivo:** Tacômetro Digital Ótico

- Marca: Icel;
- Modelo: TC5010

### C.1.2 Pressão na Entrada da BFT

- **Dispositivo:** Manometro de coluna de mercúrio
- Manômetro construído na UNIFEI, sem marca e modelo;

#### **Característica:**

- Manômetro de inóx, recipiente de vidro;
- Escala: 0 a 2000 mm coluna de mercúrio;

### C.1.3 Tomada D'água no tanque

#### **Dispositivo:** Piezomêtro

Piezômetro construído na UNIFEI, sem marca e modelo;

#### **Característica:**

- Escala: 0 a 50 mm coluna de água.

### C.1.4 Variação da solicitação

#### **Dispositivos:**

- Ponte retificadora de diodos de potência;
- Variavolte de 220 [V];
- Amperímetro de 0 a 25 [A], utilizado para medir corrente de excitação;

### C.1.5 Vazão

#### **Dispositivos:**

- Venturi: Diâmetro interno 0,13943 [m];
- Manômetro conectado ao venturi: Escala de 0 a 2000 mm de coluna de água.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)