

Estudo da Distribuição da Velocidade em Tubo Venturi Utilizando Medidas Experimentais e Técnicas de CFD

Alessandro Dias, Fernando das Graças Braga da Silva, Geraldo Lúcio Tiago Filho

Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, Instituto de Recursos Naturais – IRN
adcambui@yahoo.com.br ; fernandobraga@unifei.edu.br ; tiago@unifei.edu.br

Harley Souza Alencar

Alston do Brasil - Taubaté - SP
harley.alencar@power.alstom.com

Recebido: 22/09/08 - revisado: 24/09/09 - aceito: 26/10/09

RESUMO

O medidor Venturi se constitui em um dos equipamentos mais utilizados para a medição de vazão em tubos, apresentando facilidade de instalação e manutenção, boa confiabilidade e custo relativamente baixo. O presente trabalho tem como objetivo validar, através de ensaio experimental, o modelo computacional criado com a ferramenta CFD, utilizando o programa ANSYS CFX v 5.6, do tubo Venturi do LHPCH da Universidade Federal de Itajubá. Estudaram-se três tipos de refinamento de malhas e dois modelos de turbulência $k-\epsilon$ e RNG $k-\epsilon$ para cinco vazões diferentes. A malha 3 e o modelo de turbulência $k-\epsilon$ apresentaram os menores erros da simulação, com valores máximos de 1,6%, sendo os indicados para a validação da ferramenta computacional. Depois de validado, pode-se visualizar a distribuição da velocidade. A ferramenta CFD é muito promissora para estudos de comportamento hidráulicos, contribuindo para o desenvolvimento e aperfeiçoamento a um baixo custo de produtos e processos.

Palavras-chaves: dinâmica dos fluidos computacional, medidor de vazão, Venturi, CFD.

INTRODUÇÃO

O medidor Venturi se constitui em um dos métodos mais utilizados para a medição de vazão em tubos, podendo ser mais preciso em relação a orifícios e bocais, por apresentar menor perda de carga, devido à sua recuperação de pressão. Outra característica desse medidor é que são autolimpantes, impedindo a acumulação de partículas sólidas, podendo medir a vazão de fluidos com grande quantidade de sedimentos (Fox; McDonald, 1995).

Geralmente o medidor é uma peça fundida, constituída de uma seção a montante do mesmo diâmetro que o tubo, com revestimento de bronze e um anel piezométrico para medir a pressão estática, de uma seção cônica convergente, de uma garganta cilíndrica revestida de bronze contendo um anel piezométrico e de uma seção cônica gradualmente divergente que leva a uma seção cilíndrica com a medida do tubo (Streeter; Wylie, 1982).

Devido à sua relativa simplicidade e robustez na medição da vazão de fluidos, será realizado o estudo do comportamento hidráulico do tubo Venturi através de simulação da dinâmica dos fluidos computacional utilizando o programa ANSYS CFX.

A tecnologia de CFD (Dinâmica dos Fluidos Computacional) se tornou uma parte fundamental no projeto e análise de produtos e processos de muitas empresas, devido a sua habilidade de prever o desempenho destes equipamentos e processos antes mesmo de serem produzidos ou implementados e ao baixo custo envolvido na simulação. A simulação numérica realizada através de CFD emprega um esquema numérico baseado em discretização por Volumes Finitos. Nos escoamentos de fluidos, o modelo matemático é estabelecido com base nas equações de conservação da quantidade de movimento, da massa e da energia. (Engineering Simulation and Scientific Software, 2007).

Segundo Lombardi (2005), ao longo dos anos vem aumentando o uso dos computadores para resolver problemas de escoamentos de fluidos, devi-

do ao aumento de sua capacidade de processamento, à evolução dos recursos gráficos e à interatividade na manipulação de imagens 3-D, tornando a ferramenta CFD menos onerosa, reduzindo o tempo de simulação e, conseqüentemente, o seu custo de uso. Hoje essa ferramenta é utilizada por diversas áreas, como na área aeroespacial, automotiva, turbomáquinas, petróleo e naval, como uma alternativa mais econômica em novos projetos.

Os ensaios experimentais permitem realizar a validação dos modelos computacionais. Diversos estudos podem ser realizados nas estruturas simuladas, como a distribuição da velocidade, além da possibilidade de visualização do comportamento hidráulico do fluido no interior das tubulações, máquinas de fluxo, medidores de vazão, etc.

OBJETIVO

Esse trabalho tem como objetivo validar, através de ensaio experimental, o modelo computacional criado com a ferramenta CFD do tubo Venturi do LHPCH (Laboratório Hidromecânico para Pequenas Centrais Hidrelétricas) da Universidade Federal de Itajubá e criar um laboratório virtual, onde poderá ser realizados estudos para o aperfeiçoamento e desenvolvimento desse dispositivo hidráulico, de uma maneira menos dispendiosa e onerosa. A utilização da ferramenta de CFD na área de hidráulica com grande confiabilidade dos resultados, quando comparados com o modelo físico, apresenta-se como um novo caminho para futuros estudos de outros dispositivos e equipamento hidráulicos.

METODOLOGIA

A metodologia apresenta o equacionamento necessário para o desenvolvimento do ensaio experimental e a modelagem do problema, utilizando a Dinâmica dos Flúidos Computacional (CFD).

Equacionamento

Serão apresentas as equações básicas utilizadas pelo trabalho, a descrição do ensaio experimental realizado no LHPCH, e a descrição da metodologia que utiliza a ferramenta de CFD.

Formulações Básicas

- **Número de Reynolds**

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu} \quad (1)$$

Onde: Re é o número de Reynolds [adimensional];
 v é a velocidade média do escoamento, em [m/s];
 D é o diâmetro da tubulação, em [m];
 ν é a viscosidade cinemática, para água a 16°C igual a $1,007 \times 10^{-6}$ [m²/s].

- **Estimativa da espessura da camada limite**

$$\delta = \frac{5,48 \cdot L}{\sqrt{Re_L}} \quad (2)$$

Onde: δ é a espessura da camada limite [m];
 Re_L é o número de Reynolds para o comprimento de desenvolvimento [adim.];
 L é o comprimento de desenvolvimento do escoamento, em [m].

Segundo Fox e Mcdonald (1995), o comprimento de desenvolvimento do escoamento (L) é uma referência, que pode ser baseado nas distâncias que os instrumentos de medida se posicionam à montante do equipamento a ser ensaiado em laboratório. Seu valor pode variar entre 1 a 1,5 vezes o diâmetro da entrada do Venturi.

- **Equação de cálculo da vazão pelo Venturi**

$$Q = C \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h} \quad (3)$$

Onde: Q é a vazão volumétrica, em [m³/s]; C é a constante do medidor Venturi do LHPCH e igual a 1,2325; A é a área da seção transversal da contração do medidor, em [m²]; g é a aceleração da gravidade para a cidade de Itajubá, igual a 9,785 [m/s²];
 Δh é a diferença de carga entre a entrada e a contração, em [m].

Realizando o cálculo das constantes da equação 3, tem-se:

$$Q = 0,083257 \cdot \sqrt{\Delta h} \quad (4)$$

• **Pressão média relativa**

$$\bar{P} = h \cdot \rho \cdot g \quad (5)$$

Onde: \bar{P} é a pressão média relativa, em [Pa]; h é a carga hidráulica, em [m]; ρ é a massa específica da água, para 16°C igual a 999,1 [kg/m³]; g é a aceleração da gravidade, em [m/s²].

• **Vazão mássica**

$$Q_{mas} = \rho \cdot Q \quad (6)$$

Onde: Q_{mas} é a vazão mássica, em [kg/s]; ρ é a massa específica da água, em [kg/m³]; Q é a vazão volumétrica, em [m³/s].

• **Velocidade média**

$$v = \frac{Q}{A} \quad (7)$$

Onde: v é a velocidade média, em [m/s]; Q é a vazão volumétrica, em [m³/s]; A é a área da seção transversal do medidor, em [m²].

• **Equação da Continuidade**

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (8)$$

Onde: $\frac{\partial \rho}{\partial t}$ é a taxa de variação da massa no volume considerando; $\nabla \cdot (\rho U)$ é o fluxo líquido de massa através da superfície do volume considerado; ρ = massa específica da água; U = velocidade da tubulação; t = tempo;

• **Equação do Momento para escoamento incompressível e propriedades físicas constantes**

$$\frac{\partial U}{\partial t} + (U \cdot \nabla) \cdot U = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \cdot \nabla^2 U + g \quad (9)$$

Onde: $\frac{\partial U}{\partial t}$ é a taxa de variação da quantidade de movimento; $(U \cdot \nabla) \cdot U$ é o fluxo convectivo da quantidade de movimento;

$-\frac{1}{\rho} \nabla p$ é a força resultante devida ao gradiente de pressão;

$\nu \cdot \nabla^2 \cdot U$ é o fluxo líquido difusivo da quantidade de movimento ou dissipação de energia cinética dependendo das escalas em questão;

g é a aceleração da gravidade.

• **Equação da Energia**

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (U \cdot \nabla) \cdot T = \alpha \nabla^2 \cdot T + \Phi_E \quad (10)$$

Onde: $\frac{\partial T}{\partial t}$ é a taxa de acumulo de energia interna no volume considerado; U = velocidade;

$\alpha \cdot \nabla^2 \cdot T$ é o fluxo líquido difusivo de energia interna; Φ_E é o termo fonte de energia interna devido à dissipação de energia interna.

Ensaio Experimental

O ensaio foi realizado no LHPCH (Laboratório Hidromecânico para Pequenas Centrais Hidrelétricas) da Universidade Federal de Itajubá (Figura 1).

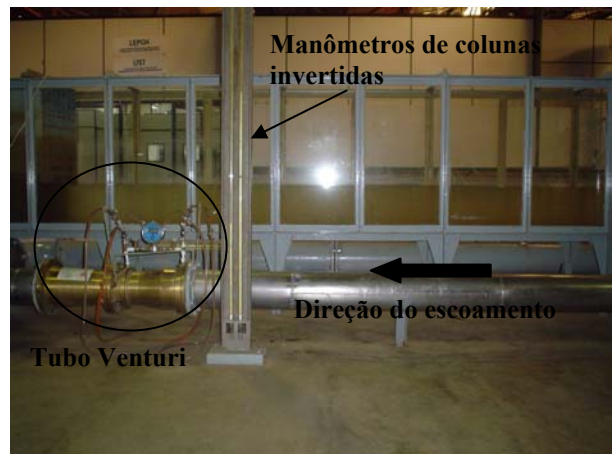


Figura 1 - Laboratório Hidromecânico para Pequenas Centrais Hidrelétricas (LHPCH).

O medidor de vazão Venturi (Figura 2) foi ensaiado para o intervalo de 5 à 70 litros por segundo. Utilizou-se um medidor de vazão ultrassônico por tempo de transito da marca THERMO, modelo DCT7088, na instalação para estabelecer o intervalo

de estudo. A precisão do equipamento de acordo com seu manual é de 0,5% da velocidade ou 0,03 m/s.

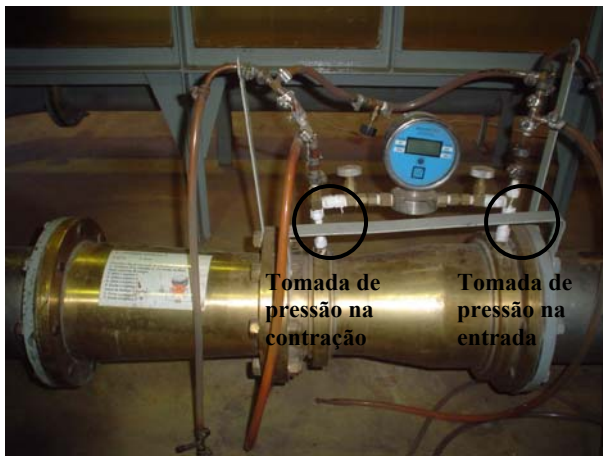


Figura 2 - Medidor Venturi do LHPCH.

O sistema é composto por uma bomba de fluxo operando com rotação constante, o medidor Venturi, que fornece as medidas de pressões estáticas na entrada e na contração, essas pressões são lidas em manômetros de colunas invertidas preenchido com água. A diferença de pressões é obtida e utilizando a Equação 4, calcula-se a vazão do Venturi.

A variação da vazão foi realizada através do fechamento da válvula à jusante. Antes de começar a realizar as leituras do medidor, deve-se retirar o ar para evitar erros.

As cinco leituras realizadas nos manômetros de colunas invertidas e nos termômetros, que foram utilizados para medir a temperatura da água e do ambiente, estão representadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Leituras do experimento.

Item	Carga de pressão entrada [m]	Carga de pressão contração [m]	Temp. água [°C]	Temp. ambiente [°C]
1	1,513	0,862	16,0	22,0
2	1,435	1,062	16,0	22,0
3	1,385	1,184	16,0	22,0
4	1,330	1,310	16,0	22,0
5	1,325	1,318	16,0	22,0

A geometria do medidor está representada nas Figuras 3 e 4. Nessas figuras pode-se visualizar o perfil longitudinal e transversal do Venturi estuda-

do. P_e e P_c são os locais onde são realizadas as medidas de pressões estáticas na entrada e na contração, respectivamente. O material do medidor é bronze, segundo Porto (2004), esse material apresenta a rugosidade absoluta equivalente (ϵ) entre o intervalo de 0,0015 a 0,010 milímetros.

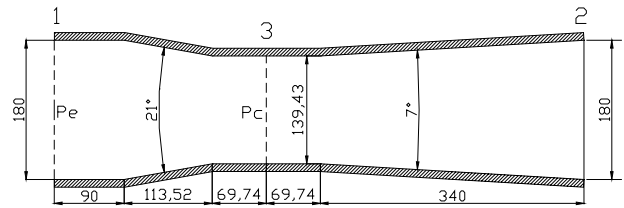


Figura 3 - Perfil longitudinal do Venturi do LHPCH, medidas em milímetros.

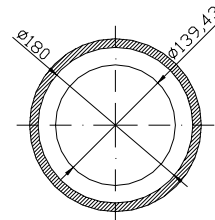


Figura 4 - Perfil transversal do Venturi do LHPCH, medidas em milímetros.

Utilizando algumas das equações do item 3.1.1, pode-se construir a Tabela 2. Os cálculos foram realizados para a seção de entrada do Venturi, o comprimento de desenvolvimento do escoamento (L) foi adotado 1,5 do diâmetro de entrada, conforme Fox e Mcdonald (1995). Como a espessura da camada limite calculada é maior do que a rugosidade absoluta do material do medidor, o tubo pode ser considerado hidraulicamente liso.

Tabela 2 – Cálculos iniciais do ensaio experimental.

Item	A [m ²]	Q [m ³ /s]	ReL	L [m]	δ [mm]
1	0,025	0,06718	720500	0,27	1,7
2	0,025	0,05085	545362	0,27	2,0
3	0,025	0,03733	400361	0,27	2,3
4	0,025	0,01177	126232	0,27	4,2
5	0,025	0,00697	74752	0,27	5,4

Simulação da Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD)

Existem vários métodos de discretização numérica. No caso do programa ANSYS CFX v 5.6 é usado o Método dos Volumes Finitos. Nesta técnica, a região de interesse é dividida em pequenas sub-regiões chamadas volumes de controle.

As equações, da conservação da quantidade de movimento, conservação da massa e da energia (equações 8, 9 e 10), são discretizadas e resolvidas iterativamente para cada volume de controle. Como resultado, uma aproximação do valor de cada variável em pontos específicos dentro do domínio é obtida (Ansys cfx, 2003).

Modelos de Turbulência

Segundo Arantes (2007), os escoamentos turbulentos apresentam campos de velocidades flutuantes. A combinação do escoamento e quantidade de movimento, de energia e de concentração, gera-se flutuações das quantidades transportadas. Considerando que estas flutuações podem ser de pequena escala e alta frequência, elas também são computacionalmente dispendiosas para serem simuladas diretamente em cálculos práticos de engenharia. Ao invés das equações para quantidades instantâneas, podem ser utilizadas médias temporais ou manipulação para remover as pequenas escalas, resultando em um grupo modificado de equações que são computacionalmente amenas para resolver. Porém, as equações modificadas contêm variáveis desconhecidas adicionais, e precisa-se de modelos de turbulência para determinar estas variáveis em termos de quantidades conhecidas. Para mais detalhes sobre os modelos de turbulência ver Pope (2000).

Os modelos de turbulência utilizados nesse trabalho são os modelos $k-\varepsilon$ (Padrão) e o $k-\varepsilon$ (RNG):

- $k-\varepsilon$ (Padrão) – é uma modelo semi-empírico baseado nas equações do modelo de transporte para a energia cinética turbulenta (k) e sua taxa de dissipação (ε). A equação do modelo de transporte para k é derivada da equação de Navier-Stokes. O modelo $k-\varepsilon$ é indicado para escoamentos completamente turbulentos com altas escalas de turbulência. Sua limitação é não conseguir resultados precisos em escoamentos com baixas escalas de turbulência envolvendo geometrias complexas.
- $k-\varepsilon$ (RNG) – é uma modelo de turbulência derivado das equações instantâneas de Navier-Stokes, usando uma técnica matemática chamada de métodos de “renormalização de grupo” (RNG) (Arantes, 2007). É uma forma melhorada do modelo $k-\varepsilon$, pois é capaz de rastrear baixas escalas de turbulência junto com as altas escalas de turbulência.

Metodologia de CFD utilizada

O CFD pode ser utilizado para validar um componente no estágio de projeto ou pode ser utilizado para encontrar meios para melhorar as características de componentes já implementados. A simulação da dinâmica dos fluidos computacional é prática, podendo alterar característica de projeto com simples e rápidas alterações na geometria do modelo.

Alguns pacotes que realizam a simulação CFD, tal como o CFX podem ser divididos em quatro partes:

- Geração da geometria e da malha – é o estágio do pré-processamento, onde será criada a geometria da região de estudo. A partir da geometria, definem-se o fluxo do fluido, regiões sólidas e nomeiam-se as respectivas superfícies. Após a definição e classificação da geometria, gera-se a malha, cujo refinamento está diretamente relacionado com a precisão dos resultados apresentados pela simulação.
- Condições de simulação – é o primeiro estágio do processamento, onde se definem o domínio, as condições de contorno da região de estudo, as propriedades do fluido e as condições iniciais e de convergência para o processamento.
- Acompanhamento da resolução – é o segundo estágio do processamento, onde ocorre a resolução das equações diferenciais parciais no espaço e no tempo, definidas como Equação da Conservação da Massa, Quantidade de Movimento e da Energia, através do cálculo de todas as grandezas físicas em um mesmo passo de tempo (iteração), cujo cálculo é realizado até alcançar a convergência ou o número de iteração estabelecida.
- Visualização dos resultados – é a fase do pós-processamento, onde se pode visualizar e apresentar os resultados de forma interativa,

e também, obter valores de grandezas físicas de qualquer região do volume de controle.

Modelagem do Problema

Existem várias ferramentas computacionais que utilizam o CFD, como ANSYS CFX, FLUENT, STAR-CD, FLOW-3D, PHOENICS CFD, entre outras. Para realizar esse trabalho, será utilizado o programa CFX v 5.6, que está disponível na Universidade Federal de Itajubá, com respaldo da licença de uso junto ao fornecedor ANSYS.

O presente trabalho propõe a validação do escoamento através do medidor Venturi no intervalo de 5 a 70 litros por segundo, que foi ensaiado em laboratório. Serão estudados três tipos diferentes de malhas e dois tipos de modelos de turbulência para o intervalo, e será analisada a precisão dos resultados obtidos na simulação com o experimento para a pressão estática média da contração (P_c).

O ANSYS CFX v 5.6 é composto por quatro módulos:

- CFX-Build – Criação da geometria e da malha;
- CFX-Pre – Condições de cálculo;
- CFX-5 Solver Manager – Execução do cálculo;
- CFX-Post – Determinação e visualização tridimensional do escoamento.

Pré-Processamento

No CFX-Build, cria-se a geometria da região de estudo a partir das medidas do Venturi. Posteriormente o sólido e a malha. A figura 5 apresenta as regiões definidas para o medidor.

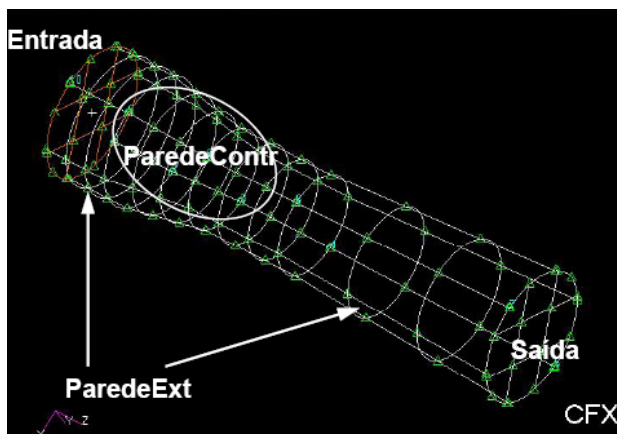


Figura 5 - Regiões definidas para o Venturi.

Processamento

A primeira parte do processamento é realizada no CFX-Pre, onde são definidas as condições de cálculo. Para condição do experimento, o regime do escoamento é permanente.

O domínio é definido como estático, o fluido de trabalho é a água, a pressão de referência é 1 atm, a aceleração da gravidade é $9,785 \text{ m/s}^2$ na direção negativa do eixo cartesiano y , as temperaturas ambiente e do fluido são respectivamente, 22°C e 16°C , o fluido foi considerado isotérmico e os modelos de turbulência utilizados são $k-\varepsilon$ (Padrão) ou $k-\varepsilon$ (RNG).

Nas regiões de Entrada e Saída são inseridas as condições do escoamento, já nas regiões Parede-Extr. e Parede-Contr. são inseridas as características da tubulação:

- Entrada – insere-se a pressão estática da entrada do medidor, lida no manômetro de coluna e a condição inicial da intensidade de turbulência, que varia com o aumento da vazão, nesse trabalho foi adotado o valor entre 5% e 10%;
- ParedeExt. – define-se que o tubo é liso e não ocorre escorregamento na parede;
- ParedeContr. – define-se que o tubo é liso e não ocorre escorregamento na parede;
- Saída – insere-se a vazão mássica obtida pela equação do Venturi.

No CFX-Pre também se define as condições iniciais para o cálculo e as condições de convergência, com o número máximo de 250 iterações e o erro residual de convergência de 1×10^{-4} , o erro é calculado para cada equação resolvida pelo modelo. As equações 8, 9 e 10 e modelos de turbulência são resolvidas passo a passo e comparadas com o valor obtido no passo anterior, desta forma defini-se a convergência. Esse valor de erro residual é usual para a maioria dos problemas de engenharia.

Na segunda parte do processamento, representado pelo CFX-5 Solver Manager, são realizados os cálculos. Nesta fase, pode-se acompanhar a convergência e o relatório dos resultados.

Pós-Processamento

No CFX-Post, podem-se visualizar as paredes e os resultados na região de estudo. Por esta ferramenta, podem-se criar pontos, retas, planos, superfícies e volumes de referências longitudinalmente e

transversalmente ao sentido do fluxo, que facilitam a análise tridimensional do escoamento.

Para a validação dos resultados, cria-se uma superfície no plano XY, transversalmente ao sentido do fluxo, na posição z igual a 273,26 milímetros, que é a posição da medida da pressão estática na contração do medidor Venturi. Para obter a pressão estática proveniente na simulação, utiliza-se as funções do CFX-Post, *Ave* e *MassFlowAve*:

As duas funções utilizadas para determinar a pressão estática do modelo computacional são descritas a seguir:

- *Ave* (Average) – a pressão média (estática ou total) pode ser obtida a partir da média ponderada em função da posição dos nós e depende do refinamento da malha;
- *MassFlowAve* - a pressão média pode ser obtida a partir da média ponderada em função da vazão mássica absoluta que passa em cada elemento do volume da malha, onde o plano intercepta.

A partir dos cálculos obtidos no CFX-Post, pode-se visualizar a distribuição da velocidade, influência da parede e entre outros parâmetros importantes para a análise hidráulica do equipamento em estudo.

RESULTADOS

Os resultados e discussões apresentam as validações da malha e do modelo de turbulência, e o comportamento do escoamento.

Validação

Para a validação da malha será utilizado o modelo de turbulência $k-\epsilon$. A malha que apresentar a maior precisão será utilizada para validação do modelo de turbulência.

Malha

A malha 1 (Figura 6) apresenta um refinamento de 17395 nós e 42291 elementos (tetraédricos e prismáticos) o tempo médio de simulação para o intervalo estudado de vazões foi de 16,5 minutos, porém, para o número de 250 iterações os cálculos não alcançaram a convergência de 1×10^{-4} .

A malha 2 (Figura 7) apresenta um refinamento de 25437 nós e 63569 elementos (tetraédri-

cos e prismáticos), o tempo médio de simulação para o intervalo estudado de vazões foi de 19,0 minutos, mas também não convergiu para 1×10^{-4} .

A malha 3 (Figura 8) apresenta um refinamento de 70377 nós e 193339 elementos (tetraédricos e prismáticos), o tempo médio de simulação para o intervalo estudado de vazões foi de 27 minutos e o modelo convergiu em média com 82 iterações.

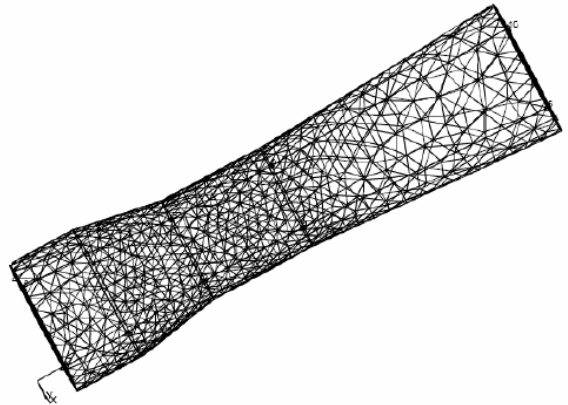


Figura 6 - Malha 1.

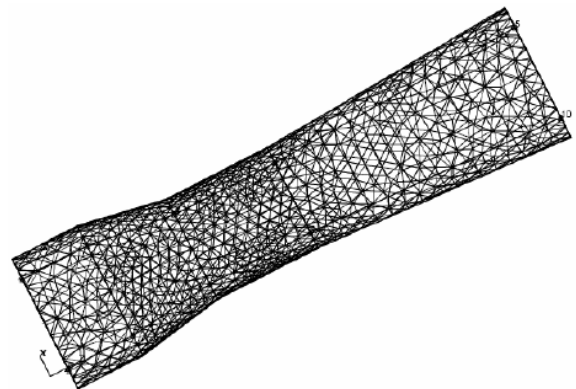


Figura 7 - Malha 2.

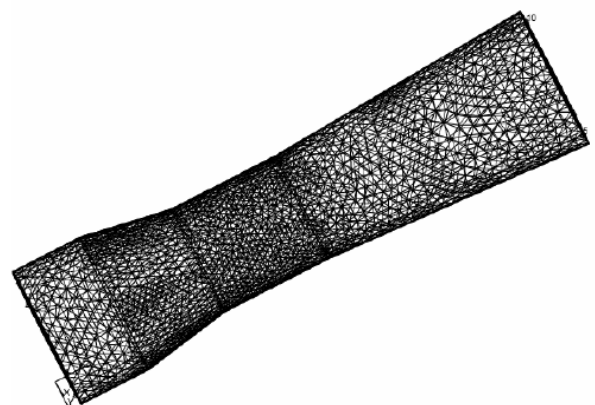


Figura 8 - Malha 3.

Para esse trabalho consideram-se bons resultados da simulação erros inferiores a 2%, esse erro será representado nos gráficos comparativos na curva do ensaio experimental. O erro foi calculado utilizando a equação 11.

$$erro = \frac{|K_{exp} - K_{num}|}{K_{exp}} \quad (11)$$

Onde: *erro* é o erro entre a simulação computacional e o ensaio experimental, em [%];
K_{exp} é o valor da pressão na contração obtido no ensaio experimental, em [Pa];
K_{num} é o valor da pressão na contração obtido na simulação, em [Pa].

Analisando o resultado apresentado pela Figura 9, a malha 2, que possui um maior refinamento do que a malha 1, apresentou um maior erro para vazões superiores à 25 litros/s. Este comportamento apresentado é mais comum em malhas muito refinadas, cujos elementos possuem dimensões tão pequenas, que passam a ser afetadas pela própria instabilidade numérica do método utilizado. Outra razão potencial é o fato da função *Ave* ser mais susceptível do que a função *MassFlowAve* as pequenas perturbações da turbulência em locais discretos, onde porventura, possam aparecer refluxos (principalmente, na região imediatamente à jusante do estrangulamento, em função do ângulo de abertura, que pode propiciar a possibilidade de descolamento).

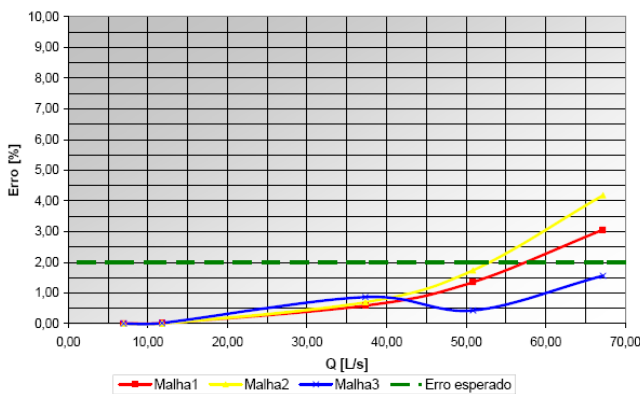


Figura 9 - Comparação do erro da simulação entre as malhas.

A malha 3 apresentou a maior precisão dos resultados, com erros inferiores a 1,8%, por isso, essa será a malha escolhida para a validação da simulação

computacional do tubo Venturi. Como a função *Ave* obteve os melhores resultados, utilizou essa função para os demais estudos.

Modelos de Turbulência

Utiliza-se a malha 3 para a validação dos modelos de turbulência, devido apresentar a maior precisão dos resultados obtidos.

- Modelo k-ε**
 O tempo médio de simulação para o intervalo estudado de vazões foi de 27 minutos e o modelo convergiu em média com 82 iterações. Esse modelo de turbulência apresentou erros inferiores a 1,8%.
- Modelo RNG k-ε**
 O tempo médio de simulação para o intervalo estudado de vazões foi de 29 minutos e o modelo convergiu em média com 84 iterações. Observa-se que o modelo RNG k-ε apresentou erros de até de 1,84% para a função *Ave*. Entretanto, o resultado apresentado está dentro do intervalo de erro proposto para esse trabalho.

Os resultados das vazões médias obtidas na simulação computacional (Tabela 3), não apresentaram erros significativos para os dois modelos de turbulência estudados. Porém, o Modelo k-ε apresentou o melhor resultado.

Tabela 3 – Comparação das vazões [L/s] dos modelos de turbulência estudados.

Experimental	Modelo k-ε	Modelo RNG k-ε
67,176	67,176	67,178
50,848	50,848	50,850
37,327	37,327	37,328
11,774	11,774	11,773
6,966	6,966	6,967

O modelo de turbulência k-ε apresentou a maior precisão dos resultados (Figura 10), utilizando a função *Ave* obteve-se erros inferiores a 1,6%, sendo o escolhido para validação do modelo computacional. Para vazões inferiores a 60 L/s, o modelo k-ε apresenta erros inferiores a 1%, isso indica um ótimo desempenho do modelo estudado.

Como a geometria em estudo não possui ranhuras, nem saliências, ou quaisquer outros ele-

mentos geométricos discretos que propiciem a formação de pequenas escalas de turbulência na forma de vórtices, é satisfatoriamente aceitável que o modelo $K-\varepsilon$ tenha obtido, aparentemente, melhor resultado do que o RNG $k-\varepsilon$.

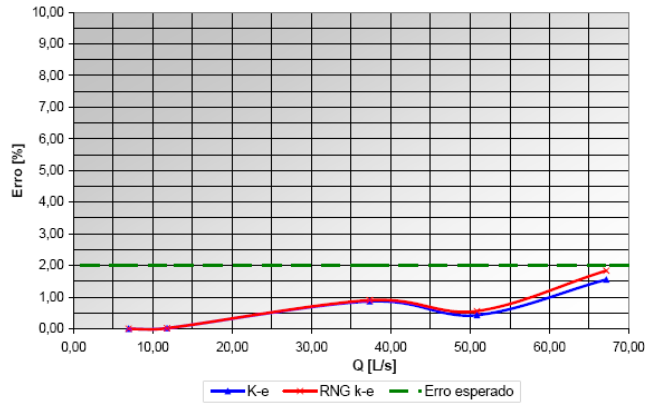


Figura 10 - Comparação do erro da simulação entre os modelos de turbulência.

Análise do Escoamento no Tubo Venturi

O modelo computacional validado é composto pela malha 3 e o modelo de turbulência $k-\varepsilon$, pois essa composição apresentou a maior precisão dos resultados. A análise do escoamento será realizada em relação ao seu comportamento, distribuição da velocidade, para as diversas vazões estudadas.

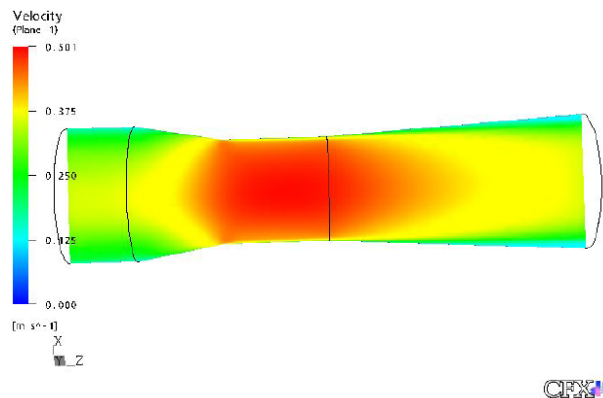


Figura 11 - Distribuição longitudinal da velocidade para Q=6,97 L/s.

A distribuição longitudinal da velocidade no Venturi para a vazão de 6,97 L/s é representada na Figura 11, onde se observa que as velocidades au-

mentam na contração e tendem a diminuir no cone divergente. A maior velocidade é de 0,5 m/s na contração e as menores velocidades são apresentadas próximas às paredes, onde ocorre a influência da camada limite.

Na Figura 12, tem-se a análise da distribuição transversal dos vetores de velocidade no ponto de validação para vazão de 6,97 L/s. Nota-se nessa figura que está bem representada a influência da parede no perfil de velocidade transversal, onde ocorrem as menores velocidades.

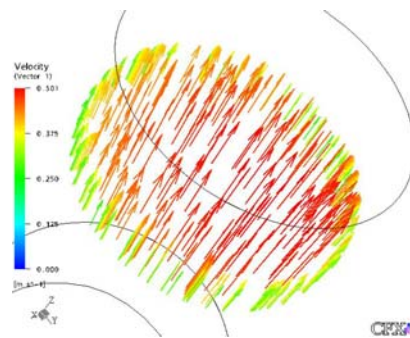


Figura 12 - Distribuição transversal do vetor velocidade no ponto de validação para Q=6,97 L/s.

As Figuras 13 e 14 apresentam a distribuição longitudinal da velocidade para a vazão volumétrica de 11,77 L/s, sendo que a Figura 14 apresenta o vetor velocidade, que representa as linhas de fluxo do escoamento. Nesse caso, a maior velocidade na contração é de aproximadamente 0,85 m/s.

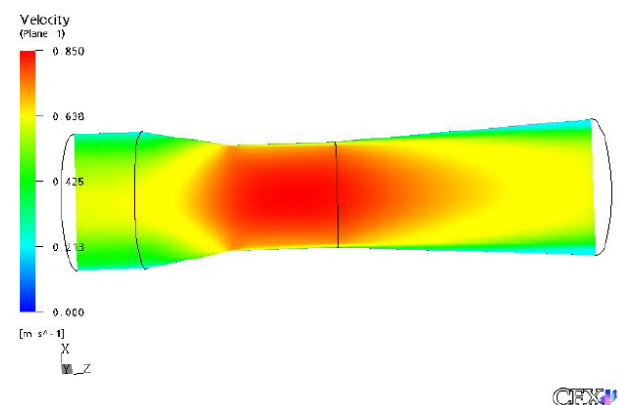


Figura 13 - Distribuição longitudinal da velocidade para Q=11,77 L/s.

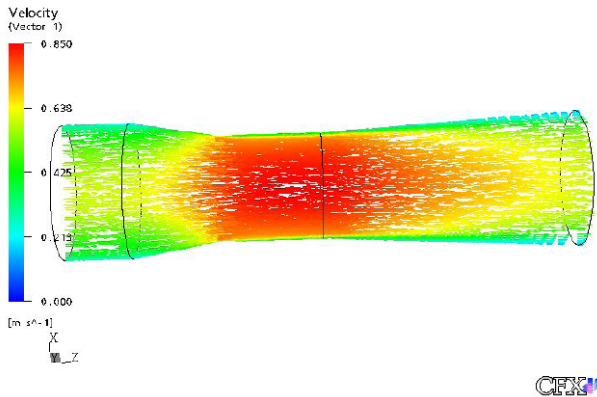


Figura 14 - Distribuição longitudinal do vetor velocidade para $Q=11,77$ L/s.

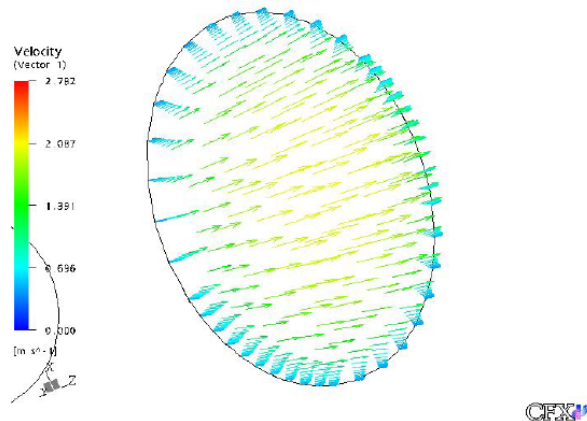


Figura 16 - Distribuição transversal do vetor velocidade na saída da contração para $Q=37,33$ L/s.

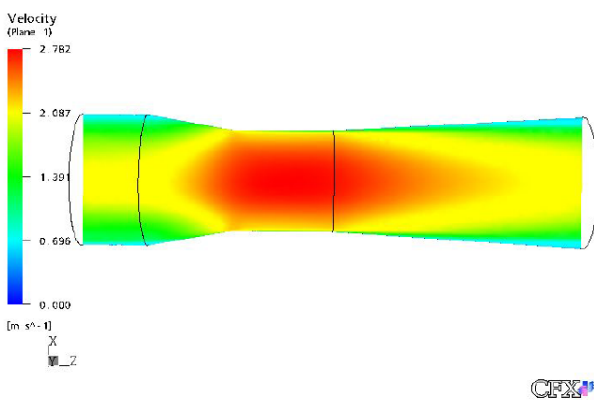


Figura 15 - Distribuição longitudinal da velocidade para $Q=37,33$ L/s.

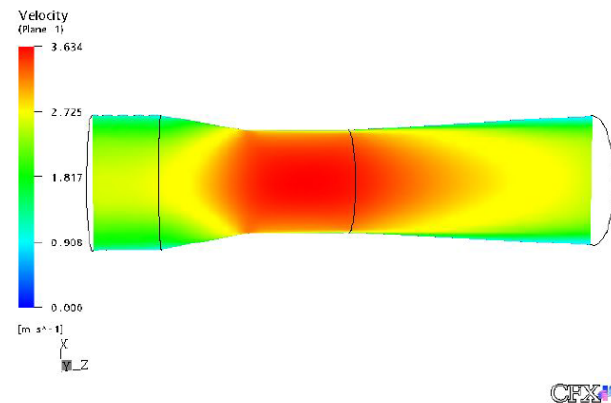


Figura 17 - Distribuição longitudinal da velocidade para $Q=50,85$ L/s.

A distribuição longitudinal de velocidade do medidor (Figura 15) apresenta um cone de máximas velocidades (cor vermelha) mais acentuado, indicando que, para maiores velocidades, e/ou vazões, o Venturi precisa de um comprimento maior à jusante para recuperar as condições iniciais, que são perturbadas pela contração. Para a vazão de 37,33 L/s, a velocidade máxima na contração é de aproximadamente 2,78 m/s.

A distribuição transversal do vetor velocidade para vazão de 37,33 L/s no final da contração é representada na Figura 16, a maior velocidade no centro é de aproximadamente 2,60 m/s.

Na Figura 17 (vazão de 50,85 L/s), observa-se que a máxima velocidade na contração é de aproximadamente 3,63 m/s. Sua distribuição obedece à lei da continuidade, começando a aumentar com a redução do diâmetro do tubo e diminuindo com o seu aumento.

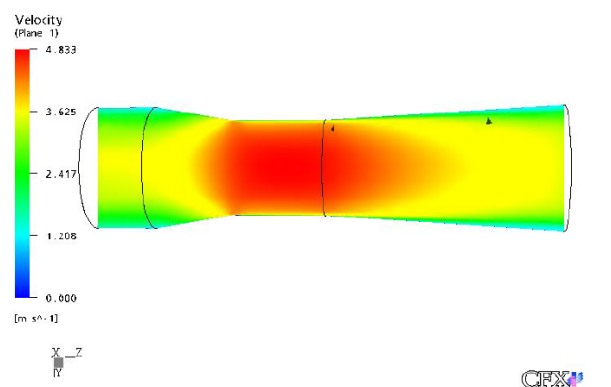


Figura 18 - Distribuição longitudinal da velocidade para $Q=67,18$ L/s.

Na Figura 18, observa-se para a vazão volumétrica de 67,18 L/s a distribuição da velocidade longitudinal, com a máxima velocidade na contração de aproximadamente 4,8 m/s. Até a vazão de 67,18 L/s não foi observado refluxo do escoamento logo após a contração, ou em qualquer outra parte do medidor Venturi.

A distribuição transversal da velocidade no ponto de validação (Figura 19), para vazão de 67,18 L/s, mostra o aumento da interferência da parede, comparando-se a velocidade do centro do escoamento até a parede. A perda de carga aumenta com o aumento da vazão.

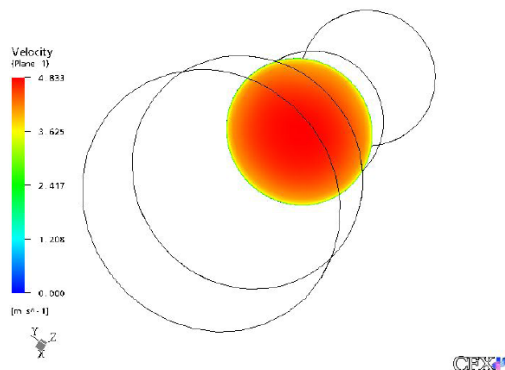


Figura 19 - Distribuição transversal da velocidade no ponto de validação para $Q=67,18$ L/s.

CONCLUSÕES

O medidor Venturi do LHPCH foi validado através de ensaio experimental em laboratório, com erros inferiores a 2%. A malha 3, mais refinada utilizada nesse trabalho, juntamente com o Modelo de Turbulência $k-\epsilon$ foram escolhidos para realizar a validação, por apresentarem a melhor precisão dos resultados, com erros máximos de 1,6%.

A distribuição da velocidade, para as maiores vazões estudadas, necessita de um comprimento maior à jusante para recuperar as condições iniciais, que são perturbadas pela contração do Venturi.

A ferramenta de CFD, utilizando o programa ANSYS CFX v 5.6, é muito promissora para este tipo de análise hidráulica. Fornece resultados com grande precisão, possibilitando a visualização do comportamento hidráulico do fluido no interior do medidor de vazão e contribuindo com o seu desenvolvimento e aperfeiçoamento a um baixo custo.

De qualquer forma, quaisquer resultados obtidos por este trabalho, podem ser utilizados como uma idéia inicial para futuros desenvolvimentos, observando a necessidade para executar os cálculos com malhas mais refinadas com maior número de iterações, como normalmente é feito em projetos industriais.

REFERÊNCIAS

- ARANTES, E. J. **Caracterização do escoamento sobre vertedouros em degraus via CFD**. 2007. 178 f. Tese (Doutorado em Eng. Civil na Área de Hidráulica e Saneamento) - EESC, USP, São Carlos, 2007.
- ANSYS CFX. **CFX 5.6 Basic Solver Capability Theory**. Ansys Canadá Ltda, Waterloo, Ontario, Canadá. p. 21. 2003.
- ENGINEERING SIMULATION AND SCIENTIFIC SOFTWARE. Disponível em: <<http://www.esss.com.br>>. Acesso em: 25 mar. 2007.
- FOX, R. W.; MCDONALD, A. T. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 4ª Ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1995, 662 p.
- LOMBARDI, J. C. **Análise de distribuição de pressão em válvulas de diafragma poroso**. 2005. 125 f. Tese (Doutorado em Computação Aplicada) – Inpe, São José dos Campos, 2005.
- POPE, S. B. **Turbulent Flows**. Cambridge University Press, 2000, 749p.
- PORTO, R. M. **Hidráulica básica**. 3ª edição. São Carlos: EESC-USP, 2004, 519 p.
- STREETER, V. L.; WYLIE, E. B. **Mecânica dos fluidos**. 7ª Ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1982. 585 p.

Study of Velocity Distribution in a Venturi Tube Using Experimental and Technical Measures of CFD

ABSTRACT

The Venturi meter is in one of the most widely used methods for measuring flow in pipes. It is easy to install and maintain, reliable and relatively low cost. This paper aims to use an experimental test to validate the computer model created with the CFD using program ANSYS CFX v 5.6, of the Venturi tube LHPCH at the Federal University of Itajubá. Three types of mesh refinement were studied and two models of turbulence $k-\epsilon$ and RNG $k-\epsilon$ for five different flow rates. The mesh model of 3 and $k-\epsilon$ turbulence showed the smallest simulation errors, with maxi-

mum values of 1.6%, and are appropriate for validation of the Venturi tube. After validation velocity distribution can be visualized. The CFD is a very promising tool for hydraulic behavior studies, contributing to low cost development and refinement of products and processes.

Keywords: computational fluid dynamics, flow meter, Venturi, CFD.