

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA  
ENGENHARIA MECÂNICA**

**NAITHA MALLMANN CAETANO**

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO EM UM VENTURI**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PONTA GROSSA**

**2014**

**NAITHA MALLMANN CAETANO**

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO EM UM VENTURI**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharela em Engenharia Mecânica, do Departamento Acadêmico de Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Eduardo Melo Lima

**PONTA GROSSA**

**2014**



## **TERMO DE APROVAÇÃO**

### **MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO EM UM VENTURI**

por

**NAITHA MALLMANN CAETANO**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 25 de agosto de 2014 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharela em Engenharia Mecânica. A candidata foi arguida pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof. Dr. Luiz Eduardo Melo Lima  
Orientador

---

Prof. Dr. Thiago Antonini Alves  
Membro Titular

---

Prof. Me. Gilberto Zammar  
Membro Titular

---

Prof. Dr. Luiz Eduardo Melo Lima  
Responsável pelos Trabalhos  
de Conclusão de Curso

---

Prof. Dr. Laercio Javarez Junior  
Coordenador do Curso de  
Engenharia Mecânica

## RESUMO

MALLMANN, Naitha Caetano. **Modelagem e Simulação do escoamento em um Venturi**. 2014. 50 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2014.

O presente trabalho tem como principal objetivo estudar o comportamento do escoamento de natureza turbulenta ao longo de um Venturi. O Venturi analisado possui seção transversal circular, o escoamento turbulento foi considerado permanente, de um fluido incompressível. Para a realização desta análise das características de um escoamento ocorrendo ao longo de um Venturi foram seguidas dois tipos de abordagem: a computacional e a experimental. A primeira constitui-se o foco principal do trabalho. Os dados obtidos experimentalmente foram usados para validação do modelo computacional utilizado, além de permitir a determinação das condições de contorno necessárias à simulação computacional. O modelo computacional foi desenvolvido com o *software* Ansys/Fluent versão 14.5, que permite a simulação de escoamentos turbulentos utilizando as equações de Navier-Stokes com médias de Reynolds (RANS), dentre outras técnicas. O modelo de turbulência utilizado para fechamento das equações RANS foi o modelo k-epsilon, que é usado em larga escala para simulações com características semelhantes à realizada neste trabalho. Foram investigadas, nas simulações realizadas, as distribuições de pressão e de velocidade, bem como as demais propriedades relacionadas com a turbulência característica do escoamento. Vórtices e contra fluxos de velocidade de escoamento foram observados na análise realizada com o modelo computacional e os resultados confrontados contra dados experimentais apresentaram uma boa concordância. Esta análise permitiu uma melhor compreensão dos fenômenos envolvidos.

**Palavras-chave:** Venturi. Turbulência. Modelo de Turbulência. Equações RANS. Modelo k-epsilon.

## ABSTRACT

MALLMANN, Naitha Caetano. **Modeling and Simulation of Flow in Venturi**. 2014. 50 p. Final Coursework (Bachelor of Mechanical Engineering) – Federal University of Technology – Paraná. Ponta Grossa, 2014.

The main objective in this work is the behavior analysis of a turbulent flow in a Venturi. The Venturi used had circular cross section, the turbulent flow was considered steady and the fluid flow inside the Venturi is water, incompressible. In order to analyze the characteristics of a flow in a Venturi, two approaches were made: computational and experimental, and the first approach is the research focus. The data experimentally acquired has used in the computational model validation; in addition, it allows the boundary conditions determination. The computational model has developed with the version 14.5 of Ansys/Fluent, Computational Fluid Dynamics (CFD) software that simulates turbulent flows using the Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) equations, among others techniques. The turbulence model k-epsilon was used for resolution of the RANS equations, that model is used widely for simulate turbulence flows, which has similar characteristics to those found in that paper. On the simulations undertaken, were investigated the pressure and velocity distribution field, as well as other properties related with the turbulence presents in the computational modeling. Vortices and changing of the velocity vectors directions in the flow has observed on the analysis by computational model, the results were confronted against experimental data and presents convergence. That analysis allowed a better understanding of the phenomena involved on flow in Venturi.

**Keywords:** Venturi. Turbulence. Turbulence Models. RANS equations. K-epsilon Model.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representação esquemática de um Venturi. ....	11
Figura 2 – Representação esquemática das linhas de corrente em um Venturi. ....	12
Figura 3 – <i>Vena contracta</i> em uma placa de orifício. ....	12
Figura 4 – Surgimento do ponto de separação. ....	13
Figura 5 – Medidor de vazão tipo Venturi. ....	14
Figura 6 – Umidificador de ar Venturi – saída. ....	15
Figura 7 – Injetor de partículas Venturi. ....	17
Figura 8 – Esquema de um ejetor tipo Venturi. ....	18
Figura 9 – Bomba a jato usada na elevação artificial de água. ....	19
Figura 10 – Perfil de revolução da malha. ....	21
Figura 11 – Condições e modelo da malha. ....	23
Figura 12 – Gráfico custo computacional x grau de modelagem. ....	27
Figura 13 – Condições de contorno do sistema. ....	32
Figura 14 – Malha computacional utilizada. ....	33
Figura 15 – Bancada experimental de perda de carga da Edibon. ....	37
Figura 16 – Representação esquemática do aparato experimental utilizado. ....	38
Figura 17 – Análise comparativa entre dados numéricos e experimentais. ....	41
Figura 18 – Campos de distribuição de pressão (a) e vetores-velocidade (b). ....	42
Figura 19 – Contrafluxo da velocidade. ....	43
Figura 20 – Campos de distribuição da energia cinética turbulenta $k$ (a) e dissipação de energia cinética turbulenta $\varepsilon$ (b). ....	44

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Letras latinas

$\bar{C}_m$	comprimento médio, [m]
$d, \partial$	operadores diferenciais
$g$	aceleração da gravidade, [m/s <sup>2</sup> ]
$h^{camada}$	altura da camada, [m]
$h^{prisma}$	altura do elemento prismático, [m]
$k$	energia cinética, [kg. m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]
$N$	número máximo de camadas
$P, p$	pressão, [Pa]
$Q$	vazão volumétrica, [m <sup>3</sup> /s]
$Re$	número de Reynolds
$T_c, T_T$	taxas de crescimento e de transição
$T$	temperatura, [°C, K]
$V$	magnitude de velocidade, [m/s]
$\vec{V}$	vetor velocidade, [m/s]
$u, x$	velocidade e coordenada horizontais, [m/s]
$v, y$	velocidade e coordenada verticais, [m/s]
$w, z$	velocidade e coordenada azimutais, [m/s]

### Letras gregas

$\beta$	coeficiente de expansão térmica [°C <sup>-1</sup> ]
$\varepsilon$	taxa de dissipação turbulenta, [kg. m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]
$\mu$	viscosidade dinâmica, [Pa. s]
$\nabla$	operador gradiente
$\rho$	massa específica, [kg/m <sup>3</sup> ]
$\tau$	tensor, [Pa]
$\nu$	viscosidade cinemática, [m/s]
$\omega$	taxa de dissipação específica da energia cinética turbulenta, [kg. m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>8</b>
1.1	MOTIVAÇÃO .....	9
1.2	OBJETIVOS.....	9
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>10</b>
2.1	HISTÓRICO E CARACTERÍSTICAS DO VENTURI .....	10
2.2	APLICAÇÕES DO PRINCÍPIO DE VENTURI .....	14
2.3	ESTUDOS REALIZADOS SOBRE O VENTURI .....	20
<b>3</b>	<b>EQUAÇÕES GOVERNANTES E MODELO NUMÉRICO</b> .....	<b>25</b>
3.1	EQUAÇÕES DE NAVIER-STOKES COM MÉDIAS DE REYNOLDS .....	28
3.2	MODELOS DE TURBULÊNCIA.....	29
3.3	MÉTODO DE SOLUÇÃO .....	31
<b>4</b>	<b>APARATO E DADOS EXPERIMENTAIS</b> .....	<b>37</b>
4.1	COLETA E ANÁLISE DE DADOS.....	38
<b>5</b>	<b>ANÁLISE DE RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>40</b>
5.1	ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS .....	40
5.2	ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS DO ESCOAMENTO TUBULENTO.....	41
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>46</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>48</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Para análise e resolução de problemas do meio industrial no século XVIII, Giovanni B. Venturi criou um dispositivo cuja finalidade era melhorar o conhecimento sobre hidráulica, sendo utilizado principalmente em estudos da mecânica dos fluidos. Este dispositivo, antes aplicado somente para fins de pesquisa, mostrou-se eficaz para aprimorar processos que dependiam da medição de grandezas que até então eram feitas de maneira primitiva, por exemplo, a medição de vazão. O dispositivo em questão foi denominado tubo de Venturi em homenagem a seu criador.

O tubo de Venturi permitiu a realização da medição de vazão com uma precisão mais elevada do que as realizadas até antes do seu desenvolvimento. Na época, a determinação do valor de uma grandeza não era obtida com uma precisão considerável. A medição precisa de uma determinada grandeza foi essencial para o desenvolvimento da indústria e dos equipamentos utilizados nos processos de produção, que estavam no começo de sua evolução.

O tubo de Venturi, ou simplesmente Venturi, é constituído de três partes sequenciais: a convergente, a garganta e a divergente. Apresenta seção transversal circular ou na forma de polígono, dependendo da aplicação. Ao longo deste percurso por onde o fluido escoar, podem ocorrer fenômenos que influenciam no próprio escoamento trazendo vantagens, dependendo da aplicação do Venturi. Contudo, certos tipos de fenômenos devem ser evitados para manter a uniformidade do movimento, de tal forma que os resultados esperados sejam alcançados. Portanto, as equações básicas constituintes da mecânica dos fluidos devem ser aplicadas, tais como as de conservação de massa, de energia e de quantidade de movimento, permitindo o dimensionamento do duto e a determinação das grandezas relevantes para o processo.

Ao longo de décadas este dispositivo foi ganhando seu espaço na indústria, sendo constituído por diversos tipos de materiais: polímeros, metais, ligas metálicas, compósitos, entre outros. A vasta aplicação do Venturi é resultado de sua capacidade de gerar diferenciais de pressão e de velocidade ao longo de sua extensão, permitindo-o acelerar ou desacelerar fluidos, transportar partículas sólidas e também succionar substâncias que estão no seu entorno.

## 1.1 MOTIVAÇÃO

As aplicações em processos industriais do princípio de Venturi estão em diversos mercados e áreas de produção: alimentícias; automotivas; agrícolas; petrolíferas; entre outras. A aplicação do Venturi nestas indústrias varia, desde pequenas adaptações no dispositivo até modificações mais complexas que exigem uma reengenharia. Por exemplo, sua utilização varia desde a realização de medição de vazão, passando por aplicação em sistemas de purificação de ar (PUENTES *et al.*, 2012) e injetores gás-sólido (DOMINGUES, 2006), até sistemas de bombeamento hidráulico a jato (OLIVEIRA *et al.*, 1996). Portanto, a utilização de um modelo computacional para análise do escoamento em um Venturi pode permitir o desenvolvimento e estudo de outras aplicações para este dispositivo, bem como um maior conhecimento dos fenômenos que ocorrem nas atuais aplicações.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é o desenvolvimento de um modelo computacional para análise do escoamento em um tubo tipo Venturi em suas mais diversas aplicações. A partir desta análise é possível obter um maior entendimento dos fenômenos físicos que ocorrem neste tipo de dispositivo. Os objetivos específicos deste trabalho são descritos na sequência:

- Verificar computacionalmente os fenômenos que ocorrem no escoamento ao longo do Venturi.
- Determinar as magnitudes de velocidade e de pressão para posterior validação do modelo computacional contra dados experimentais.
- Obter detalhes do campo de escoamento, como distribuição de velocidades e o campo de pressão ao longo do Venturi.
- Obter as características turbulentas do escoamento ao longo do Venturi.
- Verificar a influencia destas características turbulentas no campo de velocidades, resultando no aparecimento de zonas de recirculação de fluido que proporcionam um maior nível de mistura.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta revisão bibliográfica é abordado no primeiro momento um breve histórico e a inserção do Venturi<sup>1</sup> na indústria. Também são apresentadas as características do escoamento nesse tipo de dispositivo e alguns fenômenos que ocorrem durante a passagem do fluido.

Em seguida é apresentada uma revisão de trabalhos relacionados ao estudo e aplicações do Venturi, mostrando algumas vantagens e problemas que surgem em decorrência da sua utilização.

### 2.1 HISTÓRICO E CARACTERÍSTICAS DO VENTURI

As relações de distribuição de energia vêm sendo analisadas há muitos anos no decorrer da história da engenharia, como meio de desenvolvimento de teorias e também como solução de problemas práticos. As transformações pelas quais a energia passa podem ser observadas por vários meios, dentre eles o escoamento em dutos. Quando a área por onde o fluido escoar é alterada, por exemplo, as características do sistema dentro do tubo mudam transformando assim a energia em seu volume de controle.

Em um escoamento que ocorre num duto do tipo convergente existe a conversão da energia no estado de pressão para a energia na forma de velocidade, quando o tubo é divergente o inverso ocorre. Venturi *apud* Kent (1912, p. 5) ao apresentar o resultado de suas pesquisas em 1797, apontou que: “fluidos sobre pressão, ao passarem sobre um tubo convergente ganham velocidade e vice versa, para tubos divergentes”.

Kent (1912) destaca que, em um de seus experimentos, Venturi realizou a junção dos tubos convergente e divergente, unidos por uma garganta de seção transversal menor, para estudar os princípios físicos desse experimento, semelhante a configuração apresentada na Figura 1. Kent (1912) aponta também que quase um século depois, Hershel utilizou os princípios propostos por Venturi para determinar a vazão em tubos e então o princípio do experimento estudado há décadas atrás começou a ser aplicado na indústria.

---

<sup>1</sup> Devido à variedade de nomenclaturas por parte dos autores pesquisados o tubo, mecanismo ou dispositivo de Venturi será denominado somente como Venturi ao longo do texto.

Na Figura 1 é mostrada uma representação esquemática do Venturi com suas dimensões características: comprimento ( $L$ ); diâmetro da garganta ( $d$ ) e diâmetro das seções de entrada e de saída ( $D$ ). O Venturi é constituído de um tubo com uma seção convergente até o diâmetro da garganta, a garganta de seção transversal constante e uma seção divergente até o diâmetro da seção de entrada, vide Figura 1. De maneira simplificada, ocorre um aumento de velocidade do escoamento sem perda significativa da pressão no Venturi. Isto porque na parte convergente, onde a área da seção transversal diminui, a velocidade aumenta sem formação de uma *vena contracta*, pois o estrangulamento do duto ocorre de forma gradativa. Pela ausência dessa ocorrência física, a recuperação de pressão no difusor é quase que completa, exceto por pequenas perdas por atrito (FOX; PRITCHARD; MCDONALD, 2010).

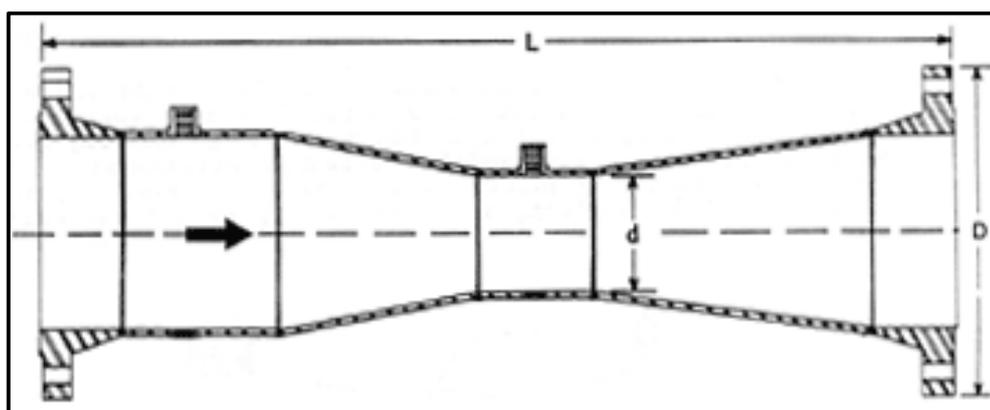
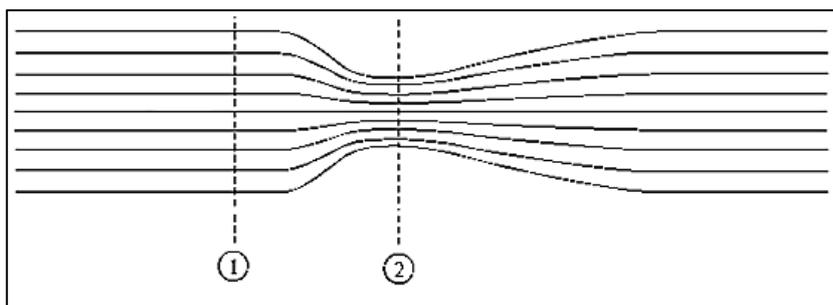


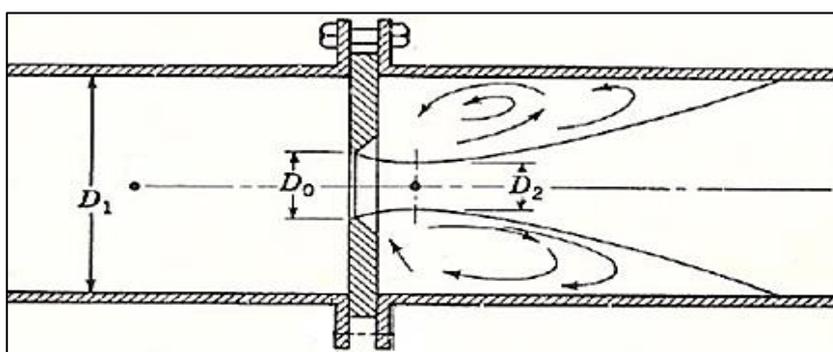
Figura 1 – Representação esquemática de um Venturi.  
Fonte: Nascimento (2014).

As linhas de corrente em um escoamento indicam o caminho percorrido pelo fluido ao longo de sua trajetória. Nas linhas de corrente do escoamento em um Venturi é indicada a uniformidade do fluxo ao longo do tubo, no decorrer da garganta, onde a queda de pressão acontece devido à redução da área da seção transversal por onde o escoamento ocorre, vide Figura 2. Essa uniformidade pode ser alterada conforme a ocorrência de certos fenômenos. A Figura 2 mostra uma representação da trajetória do fluido em um Venturi. Pode-se observar uma redução na amplitude da área onde sofre retração (1) com relação à área de entrada (2).



**Figura 2 – Representação esquemática das linhas de corrente em um Venturi.**  
**Fonte: Autoria própria.**

A *vena contracta*, conforme representação apresentada na Figura 3, é uma irregularidade no escoamento ao longo de um duto, causada pela redução drástica e rápida da seção transversal ao longo do interior do percurso do escoamento, geralmente uma barreira como no caso de uma placa de orifício em um tubo. Esse efeito no percurso do fluido faz com que ocorra uma desordem nas direções das correntes e é caracterizado basicamente pela incapacidade do fluido em realizar uma curva de 90°. Como consequência desta redução drástica e rápida da seção transversal há uma grande instabilidade nas linhas de corrente logo após a redução da área, de  $D_1$  para  $D_0$ , então o fluido passa a percorrer em outra área por dentro do tubo, delimitada por  $D_2$ , que não é facilmente determinada (FOX; PRITCHARD; MCDONALD, 2010).

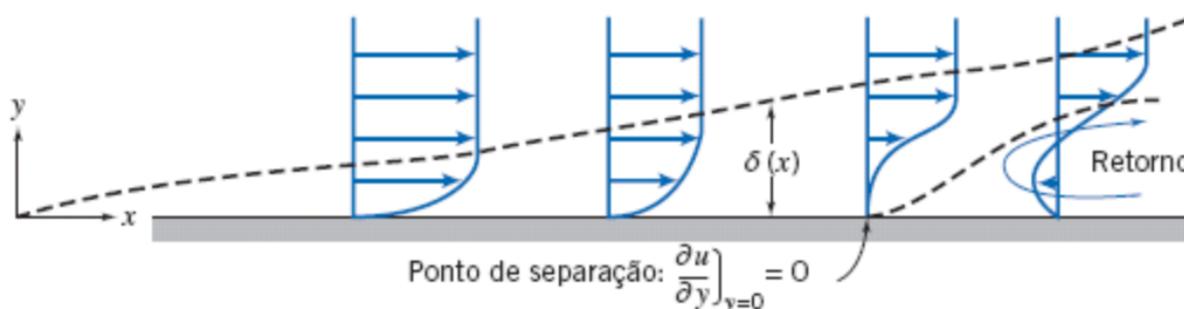


**Figura 3 – Vena contracta em uma placa de orifício.**  
**Fonte: Fox, Pritchard e McDonald (2010).**

Quando ocorre a *vena contracta* no escoamento, a área por onde o fluxo passa após a diminuição da pressão somente pode ser determinada com precisão considerável para números de Reynolds altos, ou seja, para escoamentos turbulentos. No Venturi isto não ocorre, pois a redução de área ocorre de forma gradativa, assim as linhas de corrente seguem de maneira ordenada, conforme a

natureza do escoamento. Isso possibilita uma melhor análise da área por onde o fluxo passa após a redução da seção transversal, bem como uma determinação mais precisa dos elementos como vazão, diferencial de velocidade e diferencial de pressão (FOX; PRITCHARD; MCDONALD, 2010).

Uma das partes mais importantes do Venturi é a seção divergente (difusor), portanto estudos sobre esta parte também foram realizados ao longo dos anos. Fox e McDonald (1966) realizaram estudos experimentais em um difusor de plástico transparente, onde era possível visualizar o escoamento de água ao longo deste difusor. Eles verificaram que no difusor do Venturi existem regiões onde o fluido se desprende das extremidades por onde escoam, denominadas “regiões de separação” ou “pontos de separação”, conforme Figura 4. Tais condições de instabilidade formam-se na área de transição do escoamento, caracterizadas pela redução da velocidade nas paredes limitantes por onde o fluido escoam.



**Figura 4 – Surgimento do ponto de separação.**  
**Fonte: Fox, Pritchard e McDonald (2010).**

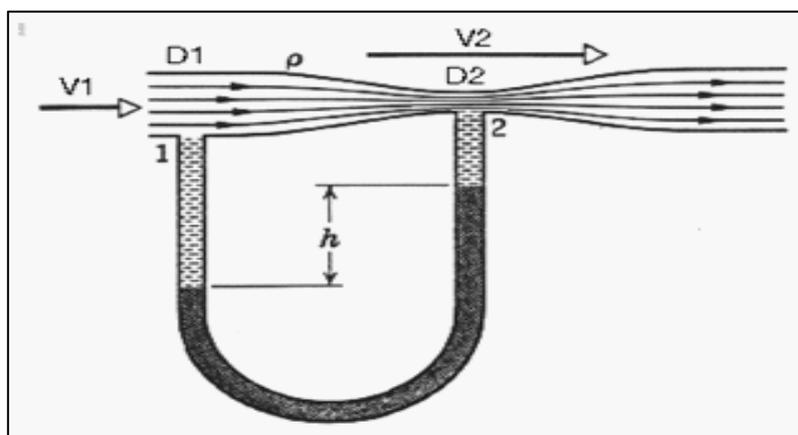
Em um ponto de separação, o diferencial de velocidade vai se reduzindo a um valor nulo, até que as linhas de corrente não seguem sua trajetória de origem e se desprendem da parede do duto que limita o escoamento. Após o desprendimento do fluido ocorrem contrafluxos na direção de escoamento do fluido, gerando vórtices que dificultam significativamente a recuperação de pressão. Quanto maiores forem os diferenciais de pressão entre as regiões posterior e anterior ao escoamento, no caso do Venturi entre a região de estrangulamento e a de saída do fluido, mais cedo ocorrerá a formação de uma região de separação (FOX; PRITCHARD; MCDONALD, 2010). Portanto, o Venturi deve ser dimensionado de modo que não permita que essa região ocorra no decorrer de seu difusor, através de um valor limitante para o diferencial de pressão.

Análises devem ser realizadas para verificar a efetividade da recuperação de pressão na saída do Venturi e a variação da velocidade, entretanto se o dispositivo for projetado com as características corretas, de maneira a evitar efeitos como a região de separação ele pode ser usado em diversas aplicações industriais.

No difusor podem existir diferentes regiões de tensões e de regimes de escoamento, que podem ser classificadas como uma região de entrada, duas intermediárias e uma de saída de fluxo, cada uma com características distintas quanto ao o nível de movimentação de fluido (AZAD, 1996).

## 2.2 APLICAÇÕES DO PRINCÍPIO DE VENTURI

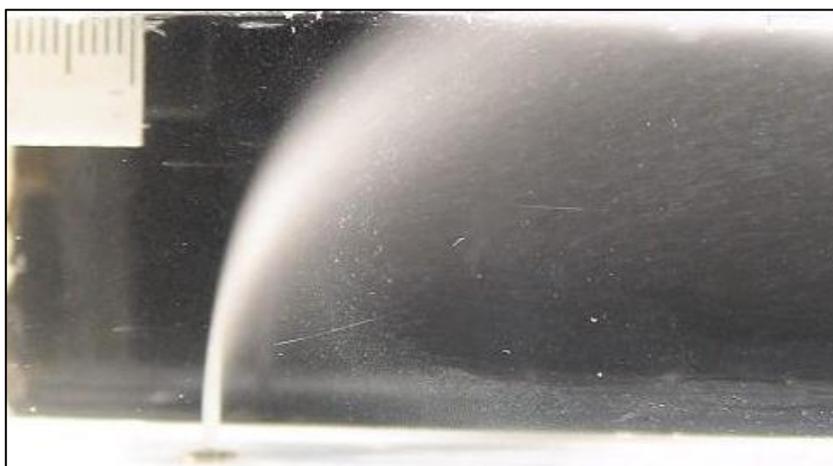
Medidores de vazão do tipo Venturi, com o mesmo princípio daquele adaptado para a indústria por Herschel (KENT, 1912), são em geral caros, pois não permitem uma tolerância dimensional elevada se comparado aos outros medidores, assim a qualidade de seu acabamento superficial é elevada, o que aumenta os custos na sua produção. Na Figura 5 é apresentada uma representação esquemática de um medidor de vazão do tipo Venturi. Observa-se que a montante da garganta está a seção convergente e a jusante da garganta está a seção divergente, responsável pela recuperação de pressão. Nas duas partes que existem as mudanças gradativas de área no Venturi são instalados canais verticais que possibilitam a medição de pressão diferencial e, por consequência, o cálculo da vazão utilizando as equações de Bernoulli, de conservação da massa e da hidrostática.



**Figura 5 – Medidor de vazão tipo Venturi.**  
Fonte: Fox, Pritchard e McDonald (2010).

Como a qualidade superficial que esse tipo de medidor demanda é elevada, seu custo inicial é relativamente alto em comparação a outros medidores, bocal medidor ou placa de orifício, por exemplo. Entretanto, se os custos de operação forem contabilizados, o Venturi acaba levando vantagem, pois sua manutenção é simples e também, por conta da superfície muito bem nivelada, esse tipo de tubo é considerado autolimpante. Dentro do medidor de Venturi o tubo é extremamente liso fazendo com que a perda de carga por atrito na recuperação da pressão seja minimizada. Sendo assim, a medição de vazão nos aparelhos desse modelo é bastante precisa, pois essa grandeza é obtida diretamente da solução de equações. (FOX; PRITCHARD; MCDONALD, 2010).

Os equipamentos baseados no princípio de Venturi são capazes de realizar a transformação da energia de pressão de um determinado fluido para a energia de velocidade. Tal aplicação é usada em larga escala pela indústria para melhorar a qualidade do ar e também delimitar sua umidade, recebendo a denominação de “aeração de Venturi” (BAYLAR *et al.*, 2009). De acordo com Guerra *et al.* (2001), para que água saia do Venturi e entre na região da atmosfera, para umidificar o ar, é necessário um diferencial de pressão de 8% da garganta para o meio externo, onde a pressão é equivalente à atmosférica. Com esse diferencial de pressão as gotículas de água contidas dentro do Venturi podem ir para o ar dentro da câmara que se deseja umidificar, formando um jato em sua saída, geralmente instaladas no teto do umidificador, conforme observado na Figura 6.

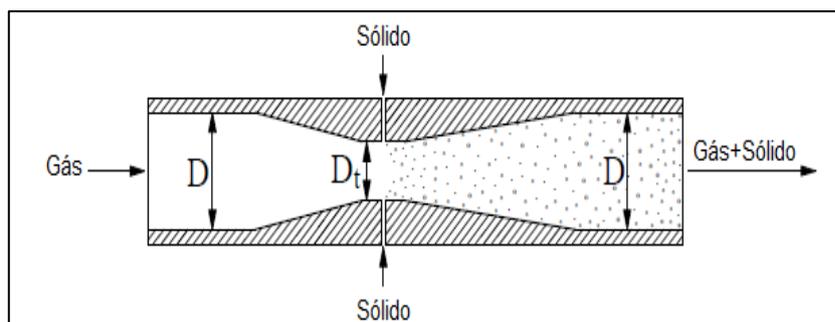


**Figura 6 – Umidificador de ar Venturi – saída.**  
**Fonte: Guerra *et al.* (2001).**

Em purificadores de ar, o princípio é basicamente o mesmo dos umidificadores. No interior do Venturi circula um líquido na forma de gotículas, cuja principal propriedade é retirar impurezas do ar e até mesmo reduzir a temperatura do ambiente em questão. Muito usado em indústrias alimentícias, esse tipo de purificador tem um custo relativamente barato, se comparado aos demais existentes no mercado. Consiste em uma única peça, que pode ser retirada totalmente para manutenção. Guerra *et al.* (2011) aponta que um dos principais problemas com esse tipo de purificador é a formação de um filme de líquido nas paredes internas do duto. Esse filme que se forma diminui a fração mássica de líquido que vai para o ambiente, afetando assim o índice de purificação deste ambiente. Pelo fato de que líquido e ar são transportados simultaneamente ao longo do Venturi, o filme se forma através da deposição de gotículas de líquido na parede do duto e fica retido devido à condição de não deslizamento.

Cheong e Parker (1973) testaram esta condição de não deslizamento para uma mistura de ar e água passando internamente pelo Venturi resultando na formação de um filme de líquido. Eles observaram que o filme de líquido desgasta a quina da parte da garganta, onde a velocidade do escoamento é acelerada. Esse problema pode ser minimizado se uma fração de filme uniforme for mantida ao longo de todo o percurso por onde o fluido escoar.

Para a movimentação, ou aceleração de um fluido, por sucção em injetores o efeito Venturi mostra-se uma alternativa eficiente, pois o aumento na velocidade do escoamento que ocorre na região da garganta pode também impulsionar o fluido. Para succionar os fluidos que estão na vizinhança do Venturi, orifícios são instalados na região da garganta onde a velocidade aumenta, então o fluido que está na região externa ao tubo será succionado para dentro por meio desses orifícios, em consequência do diferencial de pressão entre o meio externo e o interior do Venturi. À medida que o fluido externo é succionado uma mistura se forma com o fluido que está dentro do Venturi, com a chegada da mistura na região divergente, a pressão é recuperada (BAYLAR *et al.*, 2009). A Figura 7 mostra a ilustração deste fenômeno aplicado também no transporte de partículas sólidas, com detalhe na região dos orifícios pelos quais as partículas sólidas (ou fluidos) da região externa sofrem sucção para dentro do Venturi. Para o transporte de partículas sólidas, o fluido de trabalho que passa por dentro do duto geralmente é o ar, pois seu custo é menor que o de muitos fluidos, mesmo se sofrer um tratamento.



**Figura 7 – Injetor de partículas Venturi.**  
**Fonte: Baylar et al. (2009).**

A variação do ângulo do cone, que é o ângulo formado entre a horizontal e as regiões a jusante e a montante da garganta, é outro fator no Venturi que foi observado por Puentes (2012). Dentre os resultados apresentados, podemos destacar o fato de que a velocidade de sucção nos orifícios do injetor não é fortemente influenciada pelo ângulo de cone da parte convergente em si, mas sim pelo tamanho do estrangulamento na garganta, ou seja, o que influencia diretamente a capacidade de sucção do Venturi é a área da seção transversal na garganta. Se a parte cônica-divergente do Venturi for suficientemente grande em comprimento, a mistura entre o fluido interno e o succionado ocorrerá de maneira mais eficaz. Isto porque o jato que sai dos orifícios do injetor não irá encostar nas paredes do tubo tão facilmente, tampouco sofrer perdas por atrito e, devido à turbulência gerada, a mistura ficará homogênea (DOMINGUES, 2006).

Essa transformação de energia de pressão para energia de velocidade, e posterior recuperação de pressão que ocorre no Venturi, resulta em um coeficiente de perda que, segundo Fox, Pritchard e McDonald (2010), varia de 0,985 a 0,99. De acordo com Bohnet e Teifke (1985 *apud* DOMINGUES, 2006) o coeficiente de transformação de energia (coeficiente de descarga) decresce com o aumento do número de Reynolds, com isso pode-se observar que à medida que o escoamento vai aumentando os níveis de turbulência a recuperação da pressão vai sendo dificultada. Segundo os experimentos realizados por eles, a razão entre o diâmetro do tubo de mistura e do diâmetro do tubo de entrada do gás não pode exceder 1,3; do contrário a recuperação de energia de pressão na saída é baixa. Sendo assim, no caso de injetores do tipo Venturi, observa-se que a turbulência é necessária para que ocorra da melhor forma a mistura do fluido de trabalho, dentro do tubo, com os

fluidos (ou partículas sólidas) succionados de fora do tubo, mas a turbulência em excesso pode reduzir a recuperação de pressão, diminuindo assim a efetividade do sistema.

Troskolanski (1977 *apud* OLIVEIRA, 1996) analisou de forma global a questão do efeito Venturi como instrumento de bombeamento, ou sucção, conceituando assim os equipamentos a jato em geral como aplicação prática desse tipo de princípio. Esses equipamentos se dividem em dois grupos: os injetores e os ejetores. Os injetores transportam o fluido para um determinado local que está com uma pressão igual ou equivalente à atmosférica e os ejetores são aqueles constituídos de três partes, semelhantes às do tubo de Venturi, com um fluido motor (ou fluido de potência) passando pelo mesmo, causando a redução de pressão e trazendo para o interior do ejetor o fluido adjacente, conforme observado na Figura 8.

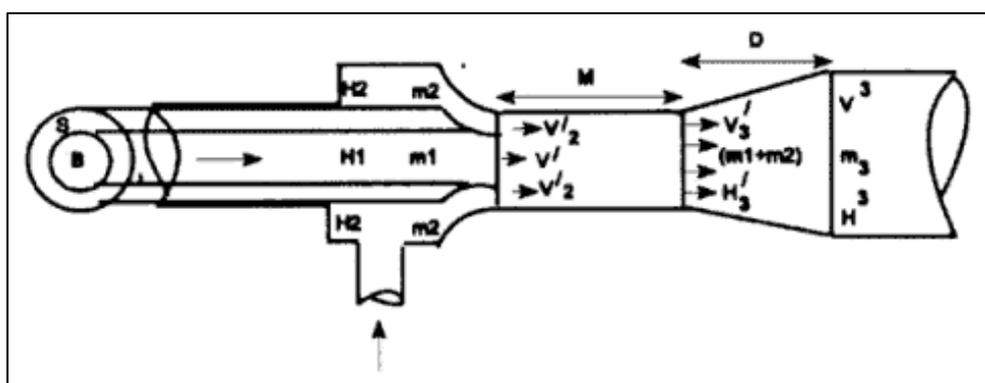
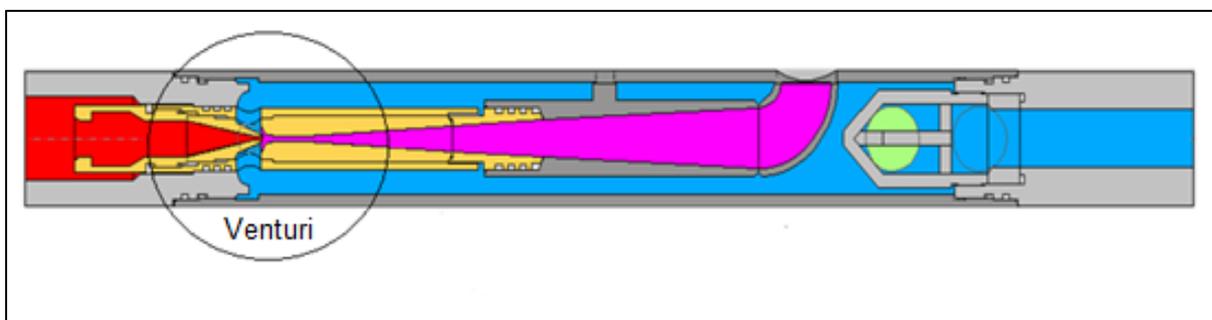


Figura 8 – Esquema de um ejetor tipo Venturi.  
Fonte: Peters (1969 *apud* Oliveira, 1996).

O princípio de funcionamento de um ejetor é explicado por Peters (1969 *apud* OLIVEIRA, 1996). Na Figura 8, observa-se que o fluido que tem uma energia  $H_1$  e uma vazão  $m_1$  passa pelo bocal  $B$ , quando entra na câmara de mistura  $M$ , onde o fluido com vazão  $m_2$  e potencial energético  $H_2$  se encontra. Nesse choque as massas  $m_1$  e  $m_2$  são misturadas e parte da energia  $H_1$  é cedida para a movimentação do fluido com menos nível de energia,  $H_2$ . Na saída os fluidos assumem a mesma velocidade  $V_3$  e possuem a mesma energia  $H_3$ . Na Figura 8 podemos observar ainda as características geométricas do Venturi, onde na parte da entrada estão os fluidos 1 e 2 ainda separados, a câmara de mistura  $M$  é a garganta e a saída  $D$  é o difusor.

O primeiro relato do uso de bombas a jato é do ano de 1870, por James Thompson na Inglaterra, o envolvimento teórico que relaciona a teoria de bombeamento hidráulico a jato foi formulada no mesmo ano, por Willian Rankine, afirmou Noronha (1995). Usada atualmente na elevação artificial de fluidos submersos em poços, tais como petróleo e água, a técnica de bombeamento a jato mostra-se uma alternativa plausível para aplicação em sistemas de bombeamento onde se deseja uma redução da necessidade de manutenção. No caso da elevação artificial de petróleo, quando se está em estações remotas onde o acesso é dificultado, como plataformas oceânicas, esse sistema é bastante eficiente. Para a elevação de água, em poços muito profundos, essas bombas a jato são utilizadas em larga escala, também pela questão da redução de custos na manutenção. Quando se está em locais muito afastados ou de difícil acesso a bomba de elevação a jato é uma boa opção, pois se trata de um equipamento mais simplificado que em outros sistemas de bombeio e que não necessita de peças muito complexas para seu funcionamento.

O funcionamento de uma bomba de elevação a jato é relativamente simples. O fluido motor passa pelo estrangulamento, correspondente à área em vermelho da Figura 9, e ganha velocidade criando um diferencial de pressão. A baixa pressão do fluido que circunda a área da garganta (área em azul da Figura 9) faz com que o mesmo seja succionado para o interior do tubo. Os dois fluidos são misturados (área em rosa da Figura 9) e então transportados para a superfície através do duto anular pela impulsão resultante do fluido motor (LAMBERTH, 2013).



**Figura 9 – Bomba a jato usada na elevação artificial de água.  
Fonte: Lamberth (2013).**

## 2.3 ESTUDOS REALIZADOS SOBRE O VENTURI

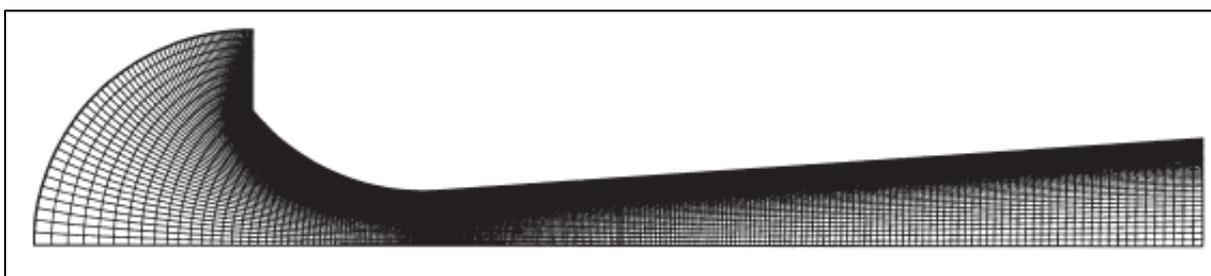
O Venturi é utilizado nas mais diversas aplicações, como os purificadores ou lavadores de ar (PUENTES *et al.*, 2012); injetores gás-sólidos, para transporte de material (DOMINGUES, 2006); e também bombas a jato (OLIVEIRA *et al.*, 1996). Além de sua aplicabilidade prática, ele pode ser usado em estudos e simulações de escoamentos de maneira eficaz. Em muitos ramos da indústria, tais como a alimentícia, a aeroespacial, entre outras, foram desenvolvidos estudos que se utilizaram do Venturi para comprovar sua veracidade ou simplesmente para observar os fenômenos existentes. Com base nisto, foi desenvolvido um padrão ISO de medição dos principais fenômenos que ocorrem no interior de um Venturi nas condições críticas, ou seja, em velocidades críticas. Esse desenvolvimento se deu ao fato de que tais condições são largamente usadas na indústria aeroespacial, quando o assunto são os jatos propulsores de foguetes (ISO, 2014).

O padrão ISO 9300 é utilizado para determinar as etapas e procedimentos em medições realizadas no escoamento ao longo do Venturi em condições críticas, ou CFVN (do inglês, *Critical Flow Venturi Nozzles*), que ocorre quando o gás que escoar internamente pelo Venturi atinge uma velocidade crítica, devido à aceleração que ocorre na garganta (ISO, 2014). Esse padrão foi utilizado por Lavante *et al.* (2000), para investigar as condições críticas que ocorrem no Venturi, para tanto o modelo foi investigado numericamente com as Equações de Navier-Stokes com médias de Reynolds. Os resultados obtidos para cada número de Reynolds foram validados contra dados experimentais.

O escoamento no estudo de Lavante *et al.* (2000) foi considerado transiente, compressível e viscoso e foi simulado através das equações de Navier-Stokes utilizando o *software* de simulação Achieve, desenvolvido pelos autores. O modelo do Venturi utilizado foi modelado segundo as recomendações da norma ISO 9300, que consiste em uma seção convergente-divergente, unidas por uma garganta de 10 milímetros de diâmetro, com a parte divergente medindo 70 milímetros e um ângulo de 4 graus de inclinação com relação a horizontal. Os números de Reynolds utilizados no estudo variaram de  $5 \times 10^5$  a  $10^7$  e o material com o qual foi produzido o Venturi foi o aço inoxidável.

As condições dos campos de pressão e velocidade foram consideradas simétricas com relação ao eixo horizontal, sendo assim se fez necessário somente o

desenvolvimento da malha somente no perfil de revolução, conforme ilustrado na Figura 10. O refinamento da malha ocorre na região da parede, pois é onde os fenômenos são observados mais atentamente. Dentre os fenômenos observados, podemos citar que foi caracterizada uma flutuação no valor do coeficiente de perda do Venturi, coeficiente que define a capacidade de recuperação de pressão do difusor, devido à descontinuidade do escoamento (LAVANTE, *et al.*; 2000).



**Figura 10 – Perfil de revolução da malha.**  
**Fonte: Lavante *et al.* (2000).**

De maneira análoga ao estudo realizado por Lavante *et al.* (2000), Ahmadvand e Talaie (2010) desenvolveram um modelo para simular as condições do escoamento dentro de um Venturi, entretanto o objetivo de seu trabalho era analisar a dispersão de gotículas de água através de um Venturi de seção transversal circular, utilizado para remover impurezas do ar, seguindo o mesmo princípio dos purificadores ou lavadores de ar de Puentes *et al.* (2012).

Baseado nas equações de Euler, as condições de dispersão das gotículas foi desenvolvido o campo de velocidades através das equações governantes da conservação da massa e da quantidade de movimento, usando o modelo de turbulência  $k - \varepsilon$ , foram determinados os campos de velocidade e pressão. Com a finalidade de validar o modelo, foi utilizado um aparato experimental, com um Venturi e uma injeção axial de líquido. Durante o experimento a vazão de líquido foi medida em diversos pontos da seção da garganta, do meio até a parede, onde o fluxo teoricamente, pelas condições de não deslizamento descritas por Fox, Pritchard e McDonald (2010), tem de cair a um valor nulo, devido às condições de contorno existentes. As considerações feitas no modelo matemático foram as seguintes: o Venturi é cilíndrico; o líquido é injetado em sentido axial, através de um único orifício, para dentro o fluxo de gás no Venturi; a velocidade do gás e a concentração da distribuição de gotículas são simétricas com relação ao eixo de revolução; as

distribuições das propriedades do gás são determinadas pelas equações governantes através da utilização do modelo de turbulência  $k - \varepsilon$ ; o fluxo de gás não sofre influência das gotículas dispersas contidas nele; somente a turbulência do escoamento gasoso é responsável pela dispersão das gotículas e; o jato de líquido é dividido em diversas partes, cada uma com seu local de geração de gotículas (AHMADVAND e TALAIE, 2010).

Como o método de desenvolvimento da malha para os campos no escoamento pode ser considerado simétrico com relação ao eixo de revolução, somente o perfil bidimensional da malha é então desenvolvido. Assim como nos estudos de Lavante *et al.* (2000) e de Ahmadvand e Talaie (2010), no presente trabalho o perfil de malha desenvolvido possui as características de simetria com relação ao eixo de revolução, perfil esse permite que observar de maneira clara o desenvolvimento das condições de escoamento ao longo do Venturi e diminui custos computacionais e tempo de operação do *software*. A condição dos elementos na malha foi feita seguindo Lavante *et al.* (2000), apresentando maior refinamento de malha nas extremidades próximas à parede, diminuindo gradativamente os elementos até chegar ao centro.

Além de observar as condições de escoamento e os fenômenos que ocorrem nas regiões próximas à parede, o estudo dos fenômenos e as simulações numéricas podem ser utilizados para outras finalidades, como no caso de Ishimoto e Kamijo (2002), que observaram as condições de cavitação em um Venturi com um fluido bifásico, o hélio. O hélio líquido é utilizado em larga escala para refrigerar supercondutores magnéticos ou raios infravermelhos de telescópios, entre outras aplicações que exigem um maior nível de refrigeração do sistema. Quando esse fluido é usado para a refrigeração, a cavitação ocorre no interior do duto de transporte, pois o fluido, que antes era somente líquido, assume a fase gasosa ainda dentro do duto de distribuição.

Com a finalidade de observar a gaseificação do hélio no interior dos tubos, as condições de operação foram atribuídas no interior de um Venturi, considerando que a cavitação ocorre quando a seção transversal da área é reduzida gradativamente, que é uma das principais características geométricas do Venturi. Ainda, considerando que as aplicações que utilizam fluido criogênico geralmente encontram “obstáculos”, ou interferências, ao longo do sistema hidráulico por onde o fluido passa, e que alguns desses obstáculos são ocorrências de seções

convergentes ou divergentes ao longo do percurso, o Venturi tem a capacidade de simular tais situações de irregularidade ao longo do escoamento. As condições atribuídas no estudo da cavitação foi a de que o hélio começa a escoar em estado saturado, logo após foi induzida a cavitação, por meio da mudança de temperatura (ISHIMOTO; KAMIJO, 2002). Assim, o modelo utilizado para a distribuição das propriedades foi, o de simetria axial, com as principais condições de escoamento ilustradas na Figura 11.

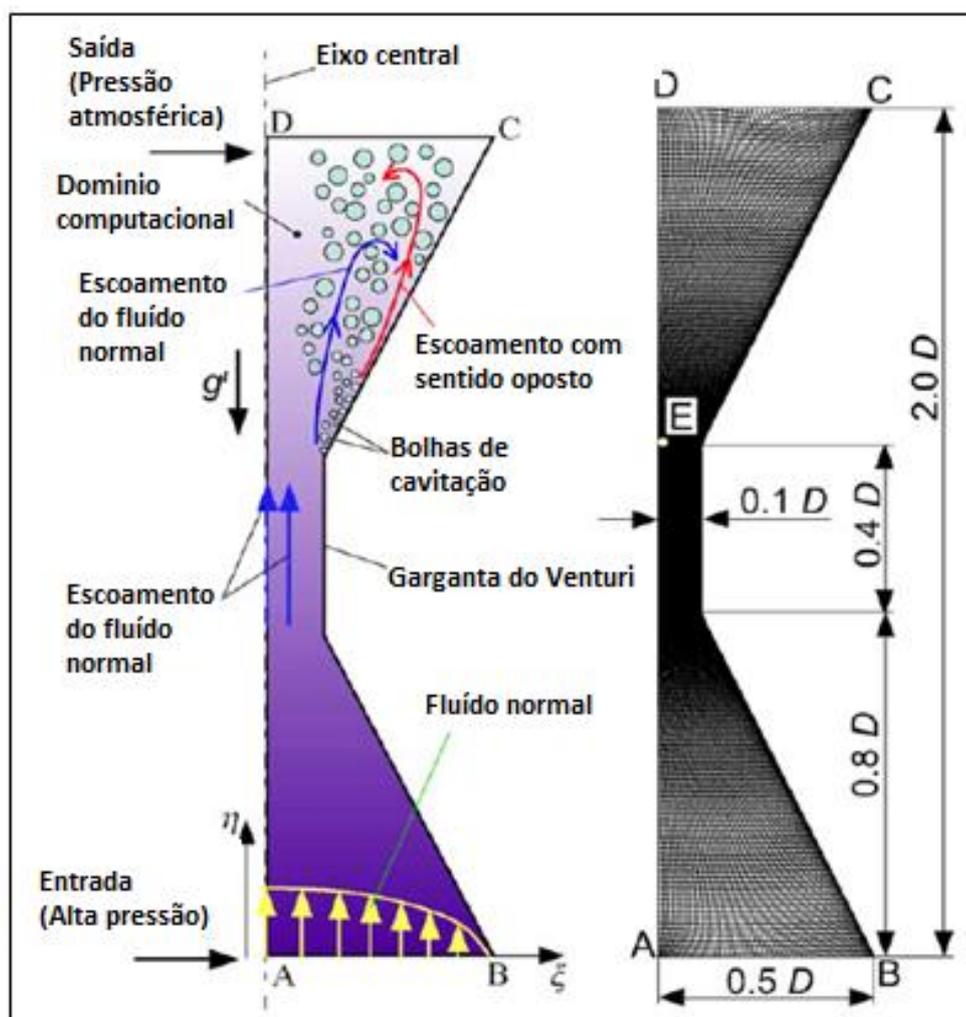


Figura 11 – Condições e modelo da malha.  
Fonte: Ishimoto e Kamijo (2002).

Como podemos observar o Venturi neste caso, diferentemente dos citados acima, é considerado alinhado na posição vertical, isto porque a gravidade influencia na destruição das bolhas e por isso não pode ser desconsiderada. O hélio líquido saturado é injetado de baixo para cima, a uma alta pressão, e sai à pressão atmosférica. A cavitação ocorre na mudança de área na região divergente, gerando

vórtices, o que comprova a turbulência do escoamento nessa área. A malha neste caso é desenvolvida de maneira diferente, apresentando maior refinamento na região da garganta, onde são encontradas as condições para que comece a ocorrer a cavitação.

Para a construção do modelo numérico, as características de cavitação do fluido para o desenvolvimento da fase gasosa foi considerado homogêneo, ou seja, apresenta um padrão regular. O fluxo de cavitação foi assumido como bidimensional e transiente, e a troca de energia entre as fases líquida e gasosa foi considerada. As equações utilizadas para as simulações foram as do modelo de turbulência  $k - \varepsilon$  padrão, e o *software* utilizado nas simulações foi o Ansys/Fluent (ISHIMOTO; KAMIJO, 2002).

O estudo realizado no presente trabalho utilizou as equações de Navier-Stokes com médias de Reynolds e de conservação da massa, para a simulação numérica, utilizando as informações obtidas das medições experimentais como parâmetros no desenvolvimento do modelo computacional. O modelo de turbulência utilizado foi o mesmo utilizado nos trabalhos de Lavante *et al.* (2000) e de Ahmadvand e Talaie (2010), o  $k - \varepsilon$  padrão. Cada vez mais, torna-se importante a realização de análises tanto numéricas quanto experimentais para obtenção das características do escoamento ocorrendo ao longo de um Venturi, pois, além de ele ser usado em larga escala pela indústria, é instrumento de análise e pesquisa nas mais diversas áreas do conhecimento.

### 3 EQUAÇÕES GOVERNANTES E MODELO NUMÉRICO

Nesta metodologia é apresentada a modelagem computacional utilizada no presente trabalho. Esta descrição da modelagem apresenta as equações governantes do problema, suas condições de contorno, bem como as equações constitutivas e/ou submodelos necessários ao fechamento desta modelagem.

Para a análise do escoamento em um Venturi foi utilizado o *software* comercial Ansys/Fluent versão 14.5, um *software* de simulação de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD, do inglês *Computational Fluid Dynamics*). Este tipo de ferramenta é empregada na análise de sistemas que envolvem escoamentos de fluidos, transferência de calor e fenômenos físicos associados. As equações governantes do escoamento de fluidos podem ser resolvidas utilizando diversos métodos numéricos, por exemplo, o método dos volumes finitos, que é aplicado na solução de muitos problemas da engenharia.

Versteeg e Malalasekera (2007) classificam em três etapas o procedimento de solução de um problema utilizando uma ferramenta CFD:

- I. Pré-processamento: onde são feitas as etapas de definição da região do domínio computacional (região de interesse), divisão do domínio em células (elementos finitos ou volumes de controle), seleção do fenômeno físico a ser modelado, definição das propriedades dos fluidos e especificação das condições de contorno.
- II. Resolução: onde é realizada a integração das equações governantes do escoamento por todo o domínio dos volumes de controles previamente divididos em células na etapa I, a discretização, ou seja, conversão das equações governantes (equações diferenciais parciais) do escoamento para um sistema de equações algébricas e sua solução das pelo método iterativo.
- III. Pós-processamento: etapa responsável pela visualização dos resultados obtidos com a resolução do problema, que consiste em visualizar domínio e malhas, vetores, contorno, superfícies 2D e 3D, manipulação das visualizações (rotação, alteração de escala), mudança de magnitudes no campo de escoamento, entre outros.

As simulações CFD dos escoamentos laminares são bem mais simples de serem realizadas do que as dos escoamentos turbulentos. A simulação de

escoamentos turbulentos pode ser realizada por três técnicas: Simulação Numérica Direta (DNS, do inglês *Direct Numerical Simulation*), Simulações de Grandes Escalas (LES, do inglês, *Large Eddy Simulation*) ou através das equações de Navier-Stokes com médias de Reynolds (RANS, do inglês *Reynolds Averaged Navier-Stokes*) (SAMPAIO, 2008).

A utilização da técnica DNS consiste na aplicação e resolução direta das equações de Navier-Stokes em todas as escalas de vórtices do escoamento, ou seja, por menores que sejam os vórtices gerados pela turbulência do escoamento eles acabam sendo considerados nos cálculos. Isto acaba limitando as condições de resolução de problemas, pois exige um esforço computacional excessivo e impossível de ser feito nos padrões atuais de desenvolvimento computacional. Em ordem de complexidade, após o método de solução por DNS temos o método de solução por LES. No LES os pequenos vórtices gerados na turbulência são considerados como dissipativos, assim somente os maiores e mais significantes vórtices são incorporados à solução do problema. Entretanto, apesar desse método desconsiderar os menores vórtices, ele não é utilizado devido ao mesmo fato pelo qual o DNS não é utilizado: as limitações computacionais atuais (ÇENGEL; CIMBALA, 2006).

A modelagem utilizando RANS, que é a última na ordem de complexidade, é a utilizada atualmente para a resolução de problemas envolvendo a turbulência, pois é a que menos exige esforço computacional, se comparada com DNS e LES, e também é o modelo que proporciona soluções de modelagem numérica e computacional turbulenta dentro dos padrões computacionais atuais, com um custo relativamente baixo. No modelo RANS todos os vórtices são padronizados, e os considerados não permanentes são descartados. Apesar da modelagem por RANS desconsiderar a maioria dos vórtices e padronizar os demais através de uma média de números de Reynolds, ele proporciona a solução adequada dos problemas envolvendo turbulência, desde que as condições atribuídas ao escoamento estejam corretas e dentro do padrão do *software* de simulação utilizado (ÇENGEL; CIMBALA, 2006).

A Figura 12 ilustra a relação custo computacional versus grau de modelagem, evidenciando que o modelo RANS está à frente dos modelos DNS e LES porque, ao passo que ele permite maior complexidade no grau de modelagem,

proporciona um custo computacional reduzido perante os outros modelos (SAMPAIO, 2008).

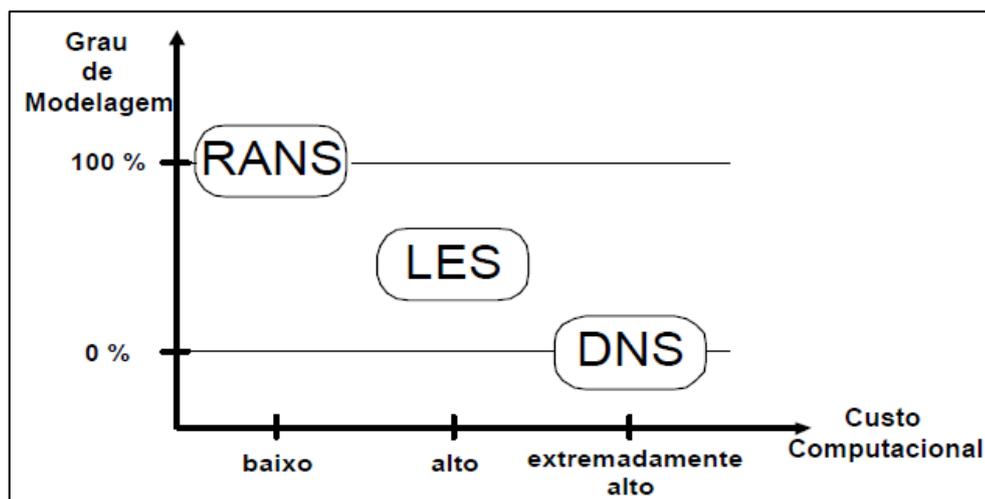


Figura 12 – Gráfico custo computacional x grau de modelagem.  
Fonte: SAMPAIO (2008).

O modelo computacional utilizado nas simulações do Venturi no presente trabalho foi a que utiliza RANS, de acordo com as implicações e limitações do *software* e visto que é o modelo se aplica as condições de contorno do problema. As condições de contorno são necessárias para obtenção de uma solução exata e devem ser aplicadas em todas as fronteiras do sistema, ou volume de controle (domínio computacional).

As condições de contorno na parede impermeável seguem basicamente a condição de não deslizamento descrita por Fox, Pritchard e McDonald (2010), que consiste em fixar as componentes normal e tangencial da velocidade em zero nas regiões limitantes. Além disso, os usuários de *softwares* CFD devem selecionar entre diversos tratamentos aplicáveis as condições de contorno da parede. Para as condições de entrada e saída existe uma grande gama de opções nos *softwares*, geralmente elas são divididas em condições especificadas para a velocidade ou condições especificadas para a pressão (ÇENGEL; CIMBALA, 2006).

Dentre outros tipos de condições de contorno, agora aborda-se sobre as condições de simetria das propriedades, pois foi essa uma das condições estabelecidas nas simulações. Para condições de simetria as variáveis como campos de velocidade, força e pressão são imagens espelhadas com relação a um plano. Em escoamentos mais complexos, essa condição economiza recursos

computacionais, pois permite uma análise do escoamento como um todo efetuando os cálculos e iterações somente em uma parte definida como superfície de trabalho. Para escoamentos com simetria axial, essa condição se aplica a um lado reto que representa o eixo de simetria do sistema com o fluido escoando paralelamente a ele (ÇENGEL; CIMBALA, 2006).

Em resumo, o presente estudo numérico de escoamentos de fluidos incompressíveis em um dispositivo tipo Venturi foi feito usando o software comercial para Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) Ansys/Fluent versão 14.5. O modelo numérico utilizado é baseado na solução das equações de Navier-Stokes com médias de Reynolds (RANS) para escoamentos isotérmicos de fluidos incompressíveis, utilizando o método de volumes finitos com grade estruturada e não uniforme. Os termos de tensões turbulentas foram fechados com o modelo de turbulência de duas equações  $k - \varepsilon$ , a ser apresentado posteriormente após as equações governantes do problema.

### 3.1 EQUAÇÕES DE NAVIER-STOKES COM MÉDIAS DE REYNOLDS

As equações de Navier-Stokes com médias de Reynolds (RANS) são obtidas de processos de média temporal aplicadas às equações de Navier-Stokes na forma instantânea, através da decomposição da velocidade em termos de um valor médio e de uma flutuação. Para um fluido newtoniano incompressível em regime permanente, as equações de conservação da massa e de quantidade de movimento, podem ser escritas como, respectivamente:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0 \quad (1)$$

$$(\vec{V} \cdot \vec{\nabla}) \vec{V} = -\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} P' + \nu \nabla^2 \vec{V} + \vec{\nabla}(\tau_{ij,turb.}) \quad (2)$$

Sendo  $\vec{\nabla} \cdot \vec{V}$  o termo que representa a conservação da massa, o termo  $P'$  mostra a pressão modificada (onde o termo referente à gravidade é eliminado da equação),  $\vec{V}$  é a velocidade do fluido,  $\rho$  a massa específica,  $\nu$  é a viscosidade cinemática ( $\nu = \mu/\rho$ ), o termo e o termo  $(\tau_{ij,turb.})$  é denominado tensor específico de Reynolds, que age de modo semelhante ao tensor de tensão viscosa e é representado em coordenadas cartesianas, na forma matricial, pela equação (3) (ÇENGEL; CIMBALA,

2006). O tensor específico de Reynolds surge como resultado dos processos de média de Reynolds aplicados às equações de conservação de massa e de quantidade de movimento na forma instantânea.

$$\tau_{ij,turb.} = - \begin{pmatrix} \overline{u'^2} & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} \\ \overline{u'v'} & \overline{v'^2} & \overline{v'w'} \\ \overline{u'w'} & \overline{u'w'} & \overline{w'^2} \end{pmatrix} \quad (3)$$

Onde a barra superior nos termos da matriz indica a média temporal (de Reynolds) dos produtos entre duas flutuações de componentes de velocidade ( $u, v, w$ ). Para determinação do tensor específico de Reynolds se faz necessário o uso de modelos de turbulência (ÇENGEL; CIMBALA, 2006).

### 3.2 MODELOS DE TURBULÊNCIA

Existem muitos modelos de turbulência em uso hoje em dia, incluindo modelos algébricos, modelos de uma equação, modelos de duas equações e modelos de tensões de Reynolds. Dentre os principais modelos de duas equações para solução do tensor específico de Reynolds, que surgem nas equações RANS, existem três que se destacam: o modelo  $k - \varepsilon$  e o modelo  $k - \omega$ . Estes modelos de turbulência devem ser resolvidos simultaneamente com as equações RANS (ÇENGEL; CIMBALA, 2006). O modelo utilizado para as simulações do escoamento no Venturi foi o  $k - \varepsilon$  padrão e suas principais variantes, pois é o modelo mais usado atualmente em simuladores CFD e não requer condição de contorno não homogênea, como no caso dos modelos que usam a taxa de dissipação específica de energia cinética turbulenta,  $\omega$  (MIRANDA; NASCIMENTO; REZENDE, 2013).

No modelo  $k - \varepsilon$  padrão, a energia cinética turbulenta,  $k$ , é derivada de sua equação exata, enquanto que a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta,  $\varepsilon$ , é obtida através da intuição física sobre os fenômenos. O modelo  $k - \varepsilon$  RNG é derivado usando técnicas estatísticas da teoria do grupo de renormalização (RNG, do inglês *Re-Normalization Group*) e tem um termo extra na taxa de dissipação que melhora a precisão dos resultados para fluidos submetidos a uma tensão mais rapidamente. O modelo  $k - \varepsilon$  realizável difere do modelo padrão por conter uma formulação alternativa para o modelo de turbulência e apresentar uma equação de

movimento modificada para a taxa de dissipação, derivada da equação exata para o movimento na área principal de mudança de vorticidade. As equações de transporte para o modelo  $k - \varepsilon$  padrão na sua forma completa são apresentados a seguir (LAUNDER; SPALDING, 1974).

A energia cinética turbulenta,  $k$ , e a taxa de dissipação,  $\varepsilon$ , são definidas de acordo com as equações de transporte (4) e (5):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k \bar{u}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + P_k + P_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon \bar{u}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon}(P_k + C_{3\varepsilon}P_b) - C_{2\varepsilon}\rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (5)$$

Nas equações acima a produção de energia cinética da turbulência devido aos gradientes de velocidade média é representada por  $P_k$ , a produção de energia cinética turbulenta gerada pela força de empuxo é o termo  $P_b$ . O termo  $Y_M$  mostra a contribuição das flutuações de dilatação na compressibilidade devido à turbulência para a taxa de dissipação global,  $C$  representa as constantes do modelo de uma maneira geral,  $\sigma_k$  e  $\sigma_\varepsilon$  representam os números de Prandtl para  $k$  e  $\varepsilon$ , respectivamente e  $S$  são termos fontes definidos pelo usuário.

A viscosidade turbulenta,  $\mu$ , é definida através da equação (6), que estabelece uma relação entre  $\mu$ ,  $k$  e  $\varepsilon$ :

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

A produção da energia cinética,  $P_k$ , é dada pela equação (7):

$$P_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \left( \frac{\partial \overline{u'_j}}{\partial x'_i} \right) \equiv \mu_t S^2 \quad (7)$$

Onde  $S$  representa o módulo do valor médio do tensor de tensões (tensões de Reynolds), considerando a hipótese de Boussinesq:

$$S \equiv \sqrt{2\mu_t \overline{S_{ij} \cdot S_{ij}}} \quad (8)$$

A produção de energia cinética devido ao efeito do empuxo,  $P_b$ , é definida pela equação (9):

$$P_b = \beta g_i \left( \frac{\mu_t}{Pr_t} \cdot \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i} \right) \quad (9)$$

Sendo  $\bar{T}$  a temperatura média e  $g_i$  a componente do vetor de aceleração gravitacional na direção  $i$ . Para os modelos de turbulência  $k - \varepsilon$  (padrão ou realizável), o valor padrão do número de Prandtl,  $Pr_t$ , é 0,85. O coeficiente de expansão térmica,  $\beta$ , é definido pela equação (10):

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial \bar{T}} \right) \quad (10)$$

Os valores padrões para as constantes no modelo de turbulência  $k - \varepsilon$  são:  $C_{1\varepsilon} = 1,44$ ;  $C_{2\varepsilon} = 1,92$ ;  $C_{3\varepsilon} = -0,33$ ;  $C_\mu = 1,44$ ;  $\sigma_k = 1,0$  e  $\sigma_\varepsilon = 1,3$ .

Independente do modelo utilizado ou do refinamento da malha na modelagem computacional é importante constatar que as soluções dos modelos de turbulência são aproximações que dependem diretamente de constantes empíricas para fechamento dos cálculos. Assim, a solução para a modelagem computacional em um *software* CFD é tão boa quanto à adequação e validação do modelo e das condições de contorno usadas (CENGEL; CIMBALA, 2006).

### 3.3 MÉTODO DE SOLUÇÃO

Nas seções 3.1 e 3.2 foram descritas as equações gerais para solução do problema. Estas equações envolvem a determinação das distribuições de pressão e de velocidade em um escoamento turbulento. Nesta seção serão descritos os métodos de solução para as equações governantes e auxiliares adotados no *software* Ansys/Fluent versão 14.5.

Para definição do domínio computacional, as dimensões utilizadas são as mesmas descritas no aparato experimental que contém o Venturi a ser estudado, conforme Capítulo 4, que correspondem às seguintes dimensões características:

- Diâmetro de entrada e do difusor: 32 mm.
- Diâmetro da garganta: 20 mm.

- Distância da entrada à garganta: 50 mm.
- Distância da garganta à saída do difusor: 60 mm.

Com base nestas dimensões foram definidas as fronteiras do domínio computacional. As condições de contorno do volume de controle estão divididas conforme a Figura 13, sendo elas: entrada, parede, eixo e saída. Na entrada temos velocidade, ou vazão mássica, inicial do escoamento sendo especificada. O escoamento é restrito entre o eixo de simetria axial e a região da parede, que limita o desenvolvimento dos perfis de velocidade e turbulência. E, por fim, na região de saída temos a pressão final do escoamento.



**Figura 13 – Condições de contorno do sistema.**  
Fonte: Autoria própria.

Como a geometria do problema não é de grande complexidade, não se faz necessário um estudo de refinamento de malha, portanto a malha foi feita utilizando somente um tipo de expansão. A expansão e os cálculos dos tamanhos dos elementos na malha se dão pelo modo que é denominado de “Transição Suave” pelo *software* utilizado, que se resume a expandir as camadas de malha até uma parede limitante do escoamento, refinando as células nessa última parte da expansão.

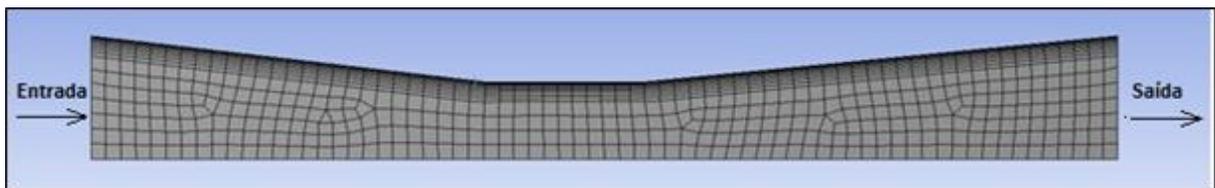
O desenvolvimento da malha com esse modo consiste em utilizar o tamanho dos elementos em seu local na malha para calcular cada altura local inicial e final dos próximos elementos, de modo que a taxa de variação volumétrica é regular a cada camada. Cada triângulo é expandido de modo a ter uma altura inicial calculada com base em sua área média, que é medida entre os nós de seus elementos adjacentes. Implicando que, para uma malha uniforme teremos um crescimento uniforme, e para uma malha variável os tamanhos dos elementos irão variar.

Para determinar a altura da primeira camada,  $h_{inicial}^{camada}$ , é usada a equação (11) e para determinar as alturas das camadas adjacentes,  $h_{final}^{prisma}$ , é usada a equação (12).

$$h_{inicial}^{camada} = (T_C)^{N-1} / h_{final}^{prisma} \quad (11)$$

$$h_{final}^{prisma} = T_T * \overline{C_m} \quad (12)$$

Onde os parâmetros de taxa de crescimento, representada por  $T_C$ , taxa de transição,  $T_T$ , e o número máximo de camadas são definidos pelo usuário. Os valores definidos para essas variáveis foram 0,272; 10 e 1,2 respectivamente, todos selecionados de acordo com o padrão do *software*, resultando na malha apresentada na Figura 14.



**Figura 14 – Malha computacional utilizada.**  
Fonte: Autoria própria.

A malha é composta por células 2D estruturadas, ou seja, com três ou quatro arestas definidas, como pode ser observado na Figura 14. As células são prismáticas e irregulares, devido às características do Venturi, e a região de maior refinamento da malha é a região da parede, pois é nela onde estão os maiores gradientes e, portanto, onde ocorrem os fenômenos como a região de separação e o contrafluxo, que são observados com maior ênfase (FOX; PRITCHARD; MCDONALD, 2010). A malha apresenta tamanhos mínimos e máximos de células definidos de acordo com os padrões do *software* utilizado e o número total de elementos na malha corresponde a 1.128 células.

A avaliação da qualidade da malha se dá por dois padrões: a ortogonalidade e a proporcionalidade:

- Ortogonalidade: são utilizadas duas equações (razões entre produtos escalares dos vetores área e comprimento), cujo menor resultado dentre elas é definido como a “qualidade ortogonal” das células, os

piores conjuntos de células tem seu valor próximo a zero e os melhores próximos a um.

- Proporcionalidade: é a medida do alongamento da célula, determinada como razão entre o valor máximo e mínimo para quaisquer das distancias entre o centro da célula e o centro da face ou entre o centro da célula e os nós que unem as mesmas.

Depois de avaliadas as condições qualitativas da malha, é realizada a verificação dos parâmetros de solução do problema, como o tipo de tratamento teórico que se pretende utilizar, que pode ser baseado na pressão ou na massa específica. Como um dos objetivos desta pesquisa é analisar a relação de pressão que há no Venturi, e ainda considerando que para tais cálculos na análise teórica são utilizadas as variações de pressão, que é baseado nas equações de Navier-Stokes com Médias de Reynolds, o tratamento dado foi o baseado na pressão.

Quando se opta pelo modo baseado na pressão, se têm dois tipos de equacionamento da velocidade, a velocidade absoluta e a velocidade relativa. É recomendável que se use a absoluta quando a maior parte de seu domínio está em estado estacionário e a relativa quando a maior parte do fluido está em movimento, sendo assim a opção usada para análise da velocidade foi a relativa (ANSYS, 2014).

As condições temporais sempre afetam as partículas de um sistema, mesmo que apenas microscopicamente, entretanto a análise do regime de escoamento considera as características influenciáveis na solução. No escoamento transiente a velocidade e a pressão variam em um determinado ponto e também de um ponto a outro, simultaneamente; já no escoamento permanente a velocidade e pressão não variam em um determinado ponto, mas variam de um ponto ao outro (FOX; PRITCHAR; MCDONALD, 2010). Sendo assim, o regime de escoamento escolhido no presente trabalho foi o permanente.

O espaço onde ocorre o fluxo deve ser definido nas características gerais do problema, devido à geometria utilizada e às características do Venturi, o tipo de espaço utilizado é o de simetria axial, pois as propriedades são iguais em todo o perfil de revolução do Venturi. Para as condições de contorno da parede foram utilizados os valores padrão do *software* utilizado.

O modelo de turbulência utilizado foi o  $k - \varepsilon$ , onde se assume que o escoamento é completamente turbulento e que os efeitos da viscosidade molecular

são desprezíveis. Para realizar as simulações foram utilizadas três versões do modelo  $k - \varepsilon$ : padrão, RNG e realizável.

O fluido de trabalho utilizado foi água líquida, disponível na biblioteca do Ansys/Fluent. O material da parede, que foi o metacrilato transparente (ou acrílico), não está disponível na biblioteca, sendo assim teve de ser incluído. Para efeito de cálculo, e devido às condições simples do problema, não foi necessário nenhum dado sobre alguma propriedade do material além da densidade, que vale  $1180 \text{ kg/m}^3$  de acordo com Indac (2014).

O método de resolução baseado na pressão permite resolver o problema de fluxo de maneira a distinguir os termos da equação ou acoplá-los. Para escoamento em regime permanente são usados acoplamentos entre pressão e velocidade do tipo Simple (do inglês, *Semi Implicit Linked Equations*) ou do tipo Simplec (do inglês, *Semi Implicit Linked Equations – Constant*). Para problemas relativamente simples (de escoamento laminar e sem modelos acionais, por exemplo) cada convergência é limitada pelo acoplamento pressão-velocidade. Frequentemente se pode obter uma solução mais rápida usando o acoplamento Simplec onde a correção do fator de pressão sobre relaxamento é travado para um valor fixo, o que proporciona maior rapidez nos cálculos (ANSYS, 2014).

Em alguns casos deixar o fator de correção de pressão nesse valor fixo pode gerar instabilidade devido à falta de simetria da malha. Para esses casos recomenda-se usar o algoritmo tipo Simple. No caso de escoamentos turbulentos, ou de escoamentos envolvendo modelos físicos adicionais, o modelo Simplec será convergente somente quando estiver limitado a um acoplamento pressão-velocidade adicional (ANSYS, 2014). Observando as características dos algoritmos e considerando que a malha possui diferença de seção transversal ao longo do Venturi e que possui elementos com tamanhos variáveis, o modelo utilizado no presente trabalho foi o Simple.

O método Simple foi desenvolvido por Patankar e Spalding (1972), onde a pressão é escrita como a soma da melhor estimativa da pressão possível somada a um fator de correção. Tal como outros métodos de acoplamento pressão-velocidade, no Simple a sequencia de cálculo segue duas etapas: inicialmente as velocidades são corrigidas de modo a satisfazer a equação da conservação da massa e em seguida as pressões são computadas para completar o ciclo iterativo (MALISKA, 2004).

Os dados de entrada e saída utilizados serão discutidos posteriormente no Capítulo 5, juntamente com os gráficos com resultados de distribuições das propriedades como os campos de pressão, de vetores de velocidade, energia cinética turbulenta, entre outros.

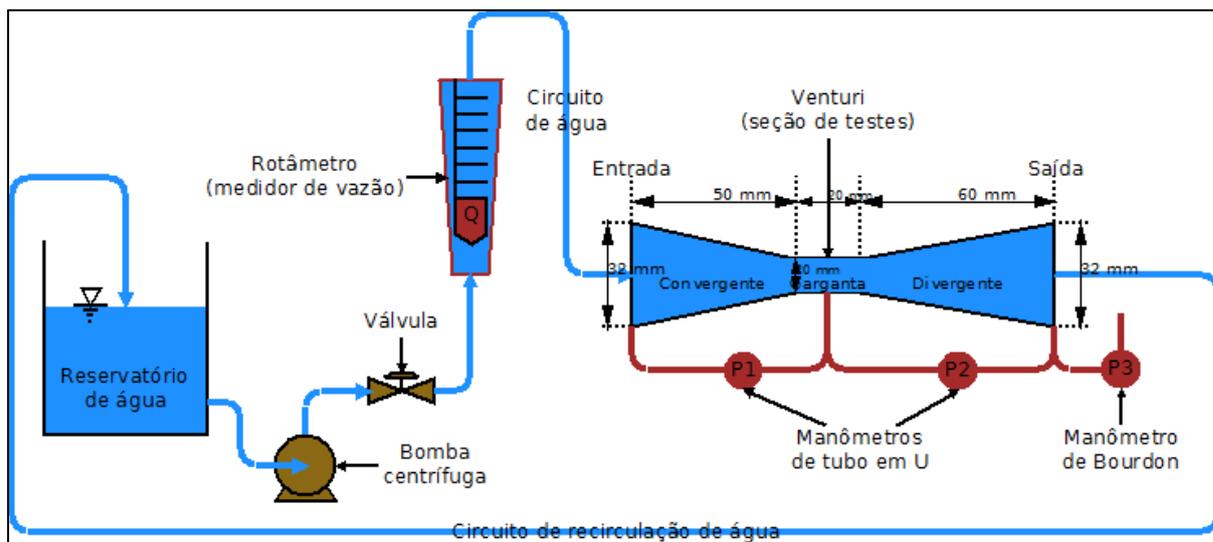
#### 4 APARATO E DADOS EXPERIMENTAIS

O aparato experimental utilizado para obtenção de dados sobre o Venturi encontra-se no Laboratório Didático de Ciências Térmicas nas instalações da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Campus Ponta Grossa, conforme apresentado na Figura 15.



**Figura 15 – Bancada experimental de perda de carga da Edibon.  
Fonte: Edibon (2012)**

O aparato experimental (Figura 15) usado neste trabalho foi produzido pela empresa Edibon – Equipamentos de Ensino Técnico, cujo propósito é o estudo da perda de carga em tubos e acessórios de sistemas hidráulicos (Edibon, 2012). Os componentes utilizados nos experimentos estão ilustrados esquematicamente na Figura 16, sendo eles: uma bomba centrífuga usada para fornecer água ao sistema, cuja potência é de 370 Watts, com vazão de operação variando de 30 l/min a 80 l/min e altura manométrica de 12,8 m a 20,1 m; um tanque de abastecimento utilizado para coletar a água do sistema, com capacidade para 165 l; um rotâmetro utilizado para medição das vazões, cuja escala de medição varia de 600 l/h a 6000 l/h e com uma incerteza de medição de  $\pm 100$  l/h. O material do qual é feito o Venturi é o acrílico (metacrilato transparente).



**Figura 16 – Representação esquemática do aparato experimental utilizado.**  
**Fonte: Autoria própria.**

As tomadas de pressão estão localizadas em três posições: entrada, garganta e saída. Dois manômetros de tubo em U são utilizados para medir a diferença de pressão entre a entrada e a garganta, e entre a saída e a garganta, simultaneamente. Um manômetro de Bourdon mede a pressão relativa à atmosférica na seção de saída do Venturi. A vazão medida pelo rotâmetro foi, posteriormente, usada como dado de entrada na modelagem computacional.

#### 4.1 COLETA E ANÁLISE DE DADOS

Inicialmente foram coletados os dados referentes à temperatura e pressão atmosférica, no dia em que foram realizados os experimentos, que correspondem a 18 °C e 1010,08 hPa respectivamente (SIMEPAR, 2014). A densidade específica ( $\rho$ ) da água a essa temperatura vale aproximadamente 998 kg/m<sup>3</sup> e a viscosidade dinâmica ( $\mu$ ) em torno de 0,00101 Pa.s (SHAPIRO, 2010).

Com o manômetro de Bourdon foi medida a pressão relativa na saída; e com o manômetro de tubo em “U” foi medida a diferença de pressão entre entrada-garganta e saída-garganta. A escala do manômetro de tubo em U está em milímetros de coluna d’água assim a incerteza encontra-se em torno de  $\pm 1$  mmH<sub>2</sub>O. No manômetro de Bourdon a menor escala é de 0,02 bar, portanto, a incerteza foi estimada em  $\pm 0,01$  bar. As vazões de trabalho utilizadas  $Q$  são apresentadas na Tabela 1 e foram medidas em litros por hora. Para cada vazão, foram medidas com manômetros de tubo em U as pressões manométricas (man.), em milímetros de

coluna d'água, para os trechos entrada-garganta e garganta-saída, representadas por  $P_1(\text{man.})$  e  $P_2(\text{man.})$ , respectivamente. A pressão na saída foi medida com o manômetro de Bourdon em bar, representada por  $P_3(\text{man.})$ . O número de Reynolds  $Re$  foi obtido para cada vazão utilizando como comprimento característico o diâmetro da garganta. A pressão absoluta (abs.) na saída  $P_3(\text{abs.})$  foi obtida somando a pressão manométrica na saída  $P_3(\text{man.})$  com a pressão atmosférica estimada. A pressão absoluta  $P_2(\text{abs.})$  foi obtida subtraindo a pressão manométrica  $P_2(\text{man.})$  da pressão absoluta estimada na saída  $P_3(\text{abs.})$ . A pressão absoluta  $P_1(\text{abs.})$  foi obtida somando a pressão absoluta  $P_2(\text{abs.})$  com a pressão manométrica  $P_1(\text{man.})$ .

**Tabela 1 – Dados experimentais obtidos.**

$Q$ [l/h]	$Re$ [ ]	$P_1(\text{man.})$ [mmH <sub>2</sub> O]	$P_2(\text{man.})$ [mmH <sub>2</sub> O]	$P_3(\text{man.})$ [bar]	$P_1(\text{abs.})$ [Pa]	$P_2(\text{abs.})$ [Pa]	$P_3(\text{abs.})$ [Pa]
600	6552	10	5	0,02	108149	108051	108100
800	8737	19	9	0,02	108198	108012	108100
1000	10921	27	16	0,04	110208	109943	110100
1200	13105	38	24	0,06	112237	111865	112100
1400	15289	52	36	0,1	116257	115747	116100
1600	17473	68	47	0,14	120306	119639	120100
1800	19657	49	56	0,18	124031	123551	124100
2000	21842	108	74	0,22	128433	127374	128100
2200	24026	131	88	0,26	132522	131237	132100
2400	26210	154	104	0,32	138590	137080	138100
2600	28394	172	125	0,38	144561	142874	144100
2800	30578	211	145	0,44	150747	148678	150100
3000	32762	247	167	0,5	156885	154462	156100
3200	34947	275	189	0,58	164943	162247	164100

**Fonte: Autoria própria.**

Os resultados experimentais foram obtidos para 14 valores diferentes de vazões, conforme Tabela 1, medidas com o rotâmetro, apresentado na Figura 16. Com os valores de número de Reynolds calculados verifica-se que os todos os pontos experimentais estão no regime turbulento. O índice nas pressões 1, 2 e 3 na Tabela 1 indicam a pressão absoluta medida na entrada, na garganta e na saída do Venturi, respectivamente.

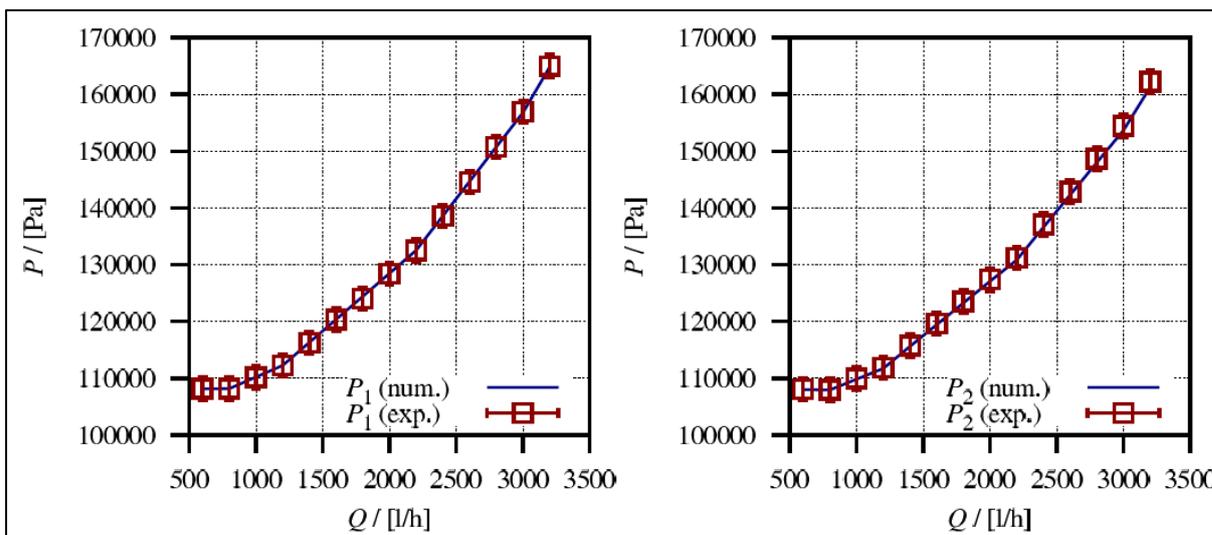
## 5 ANÁLISE DE RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados das simulações computacionais realizadas. Os resultados obtidos computacionalmente foram analisados em duas partes: uma análise comparativa contra dados experimentais obtidos no aparato descrito no Capítulo 4 e uma análise das características do escoamento, incluindo as características turbulentas.

### 5.1 ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS

O domínio computacional usado nas simulações corresponde à região interna do Venturi, cujas dimensões estão definidas na Figura 16, usando a condição de contorno de simetria em torno do eixo de revolução, o eixo  $z$ . A condição de entrada utilizada foi a da vazão mássica, e a condição de contorno de saída corresponde a  $P_3$  (pressão absoluta na saída do Venturi), de acordo com a Tabela 1, ambas as condições (entrada e saída) foram obtidas experimentalmente. A malha computacional desenvolvida seguiu o padrão adotado por Lavante *et al.* (2000) e Ahmadvand e Talaie (2010), apresentando maior refinamento na região da parede, onde as características do escoamento são mais significativas ao estudo do que no restante do perfil de revolução desenvolvido. As simulações foram feitas em regime permanente e o acoplamento pressão-velocidade foi feito utilizando o método SIMPLE.

A Figura 17 mostra uma análise comparativa entre as simulações computacionais e os dados experimentais para a pressão absoluta na entrada,  $P_1$ , e na garganta,  $P_2$ , como função da vazão volumétrica,  $Q$ . Os resultados numéricos foram obtidos com o modelo  $k - \varepsilon$  padrão.



**Figura 17 – Análise comparativa entre dados numéricos e experimentais.**  
**Fonte: Autoria própria.**

De acordo com a Figura 17, os resultados mostram uma boa convergência entre os valores numéricos e experimentais. As três variantes do modelo  $k - \varepsilon$  (padrão, RNG e realizável) apresentaram em média 1% de desvio em relação aos dados experimentais, isto se deve ao fato de que a geometria do Venturi é simples e desta forma os modelos de turbulência usados, juntamente com as condições de contorno especificadas, apresentaram um bom desempenho. Os resultados obtidos com as três variantes do modelo  $k - \varepsilon$  apresentaram resultados similares, portanto, os demais resultados apresentados na sequência serão obtidos somente com o modelo  $k - \varepsilon$  padrão.

## 5.2 ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS DO ESCOAMENTO TUBULENTO

As condições de contorno de entrada e saída foram as mensuradas nos experimentos. Para a modelagem computacional foi determinado um dado de entrada e um de saída, e então foi observado o comportamento do escoamento conforme os modelos de turbulência e o tipo tratamentos dos dados, como o tipo de tratamento dado as condições da parede, por exemplo. Os dados de entrada do modelo computacional são as vazões apresentada na Tabela 1. Com esses dados e condições de escoamento inseridas nas configurações de simulação, foram geradas tabelas de valores para as vazões, variação de pressão, variação e sentido dos vetores de velocidade. A seguir serão mostradas as distribuições de propriedades

relevantes na modelagem de escoamento em um Venturi com escoamento turbulento em regime permanente com a vazão máxima atingida pelo circuito hidráulico com o Venturi, que é 3200 l/h.

A distribuição de pressão absoluta e como estão dispostos os vetores de velocidade estão ilustrados na Figura 18. À medida que a velocidade do escoamento vai aumentando a pressão vai atingindo seu menor valor e, posteriormente, tanto a pressão quando a velocidade não recupera seu valor original devido às perdas de energia existente no Venturi, associadas a seu coeficiente de perda.

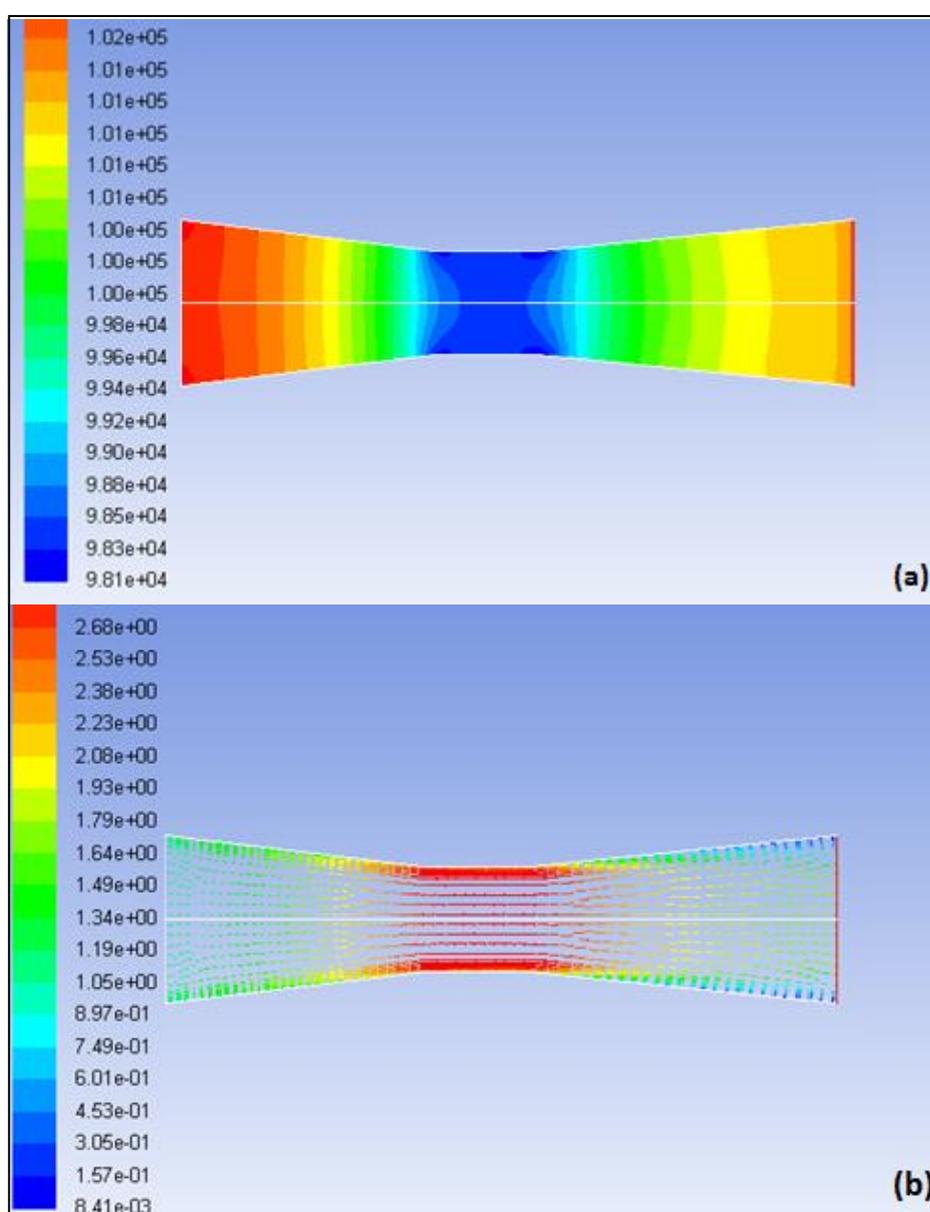
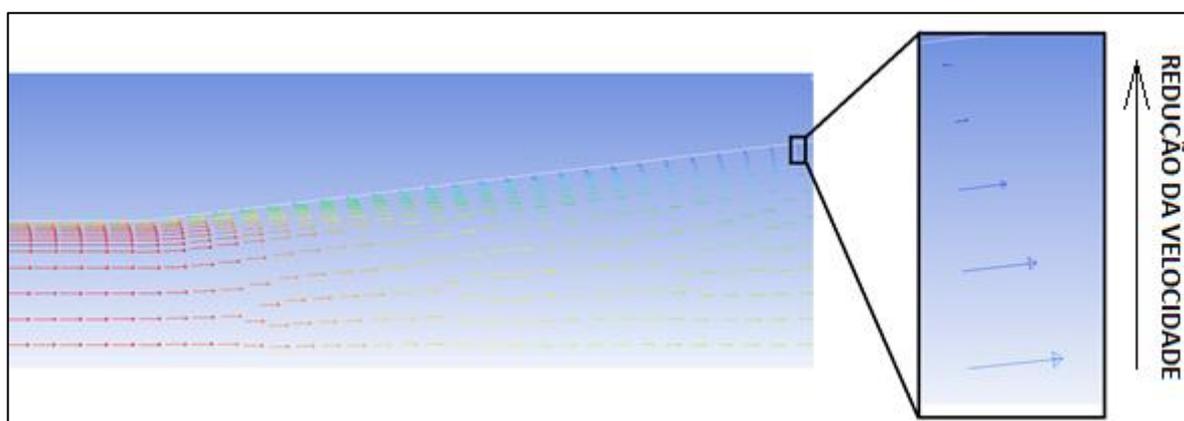


Figura 18 –Campos de distribuição de pressão (a) e vetores-velocidade (b).  
Fonte: Autoria própria.

Com a diminuição da área na secção da garganta do Venturi temos uma redução na pressão, observado na Figura 18 (a), e, através da observação das escalas, vemos que a pressão não é recuperada totalmente, como afirma Fox, Pritchard e McDonald (2010), isso acontece devido às regiões de separação formadas, que geram contrafluxo.

A velocidade na região da parede depois da garganta sofre redução drástica em sua magnitude, até atingir um valor nulo, vide Figura 19. Esse fenômeno ocorre pela formação de regiões de separação (FOX; MCDONALD, 1966), que mudam o sentido dos vetores velocidades na região da parede, gerando vórtices que são característicos do escoamento turbulento.



**Figura 19 – Contrafluxo da velocidade.**  
**Fonte: Autoria própria.**

A recuperação de pressão é prejudicada à medida que a velocidade do escoamento aumenta isto ocorre a partir da vazão de 1200 l/h, ou seja, para um número de Reynolds acima de 13105. Com isso o é gerado um contrafluxo, que pode ser observado na Figura 19, o que faz com que ocorram pequenos vórtices nas linhas de corrente. As regiões de separação, estudadas por Fox e McDonald (1966), fazem com que o fluxo, que antes era constante, se desprenda da parede, ocasionando assim o surgimento de vórtices, que geram os contrafluxos. Esses vórtices gerados mostram o aumento na energia cinética turbulenta na região de maior instabilidade de fluxo, que corresponde à região logo após a garganta até o final do difusor, e aumenta a taxa de dissipação turbulenta.

A energia cinética turbulenta,  $k$ , é gerada na região onde os vórtices surgem no Venturi, que é onde começa a região da garganta. Isso porque, apesar da redução não ser imediata como ocorre na placa de orifício e da não ocorrência de

*vena contracta* (FOX; PRITCHARD; MCDONALD, 2010), a alteração na área da seção transversal impede que o escoamento se mantenha laminar, conforme observado através dos números de Reynolds apresentados na Tabela 1. A distribuição da energia cinética turbulenta ocorre a partir dessa mesma região, a garganta, pois a partir do momento que a turbulência é gerada, ela se propaga e influencia as demais áreas atingindo, por fim, todo o escoamento, vide Figura 20.

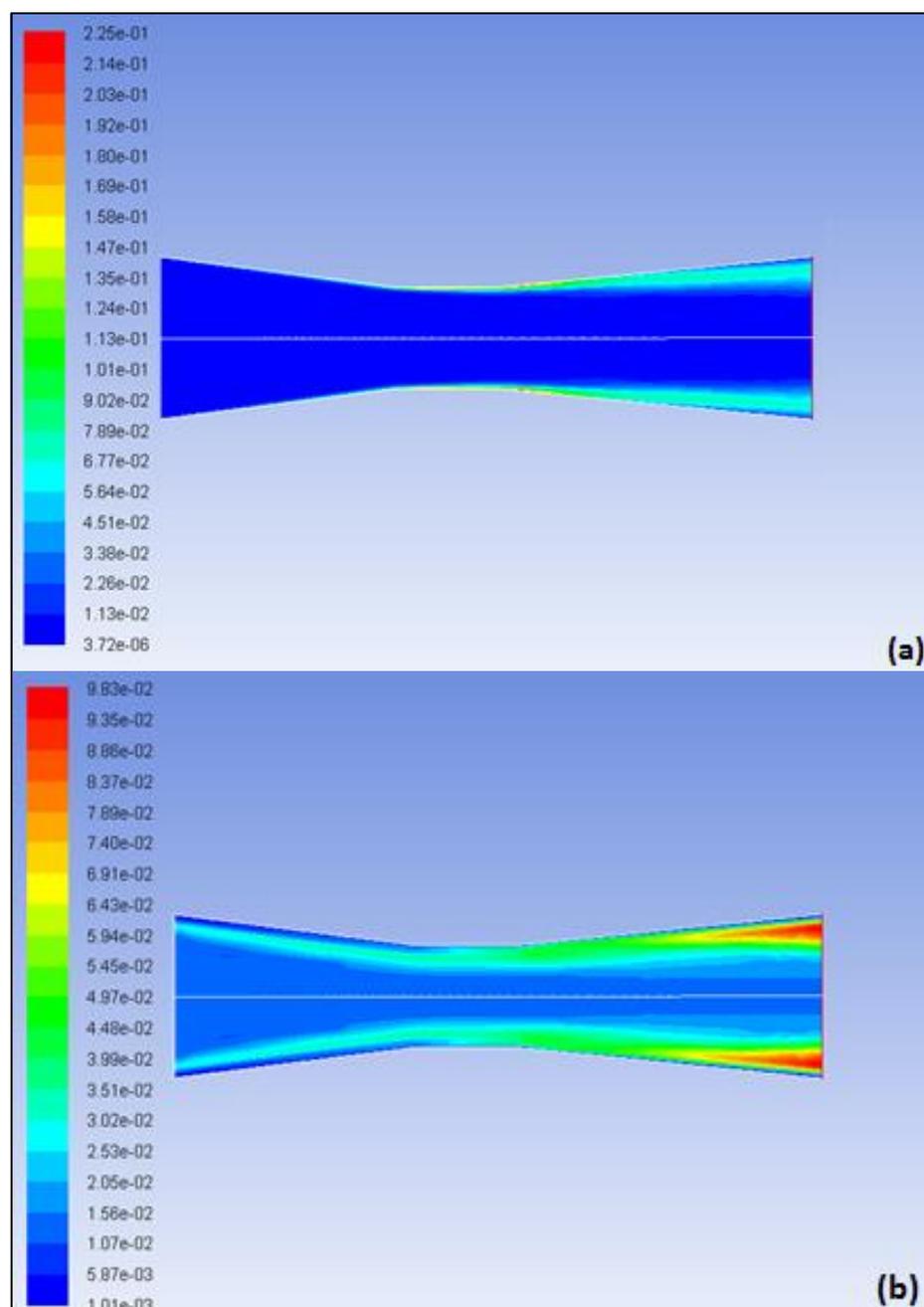


Figura 20 – Campos de distribuição da energia cinética turbulenta  $k$  (a) e dissipação de energia cinética turbulenta  $\varepsilon$  (b).  
Fonte: Autoria própria.

O comportamento da dissipação da energia cinética turbulenta,  $\varepsilon$ , ocorre de maneira análoga à distribuição da energia cinética, conforme observado na Figura 20. A partir da região da garganta que a energia cinética é distribuída às adjacências da área turbulenta do escoamento, chegando a seu ápice no final do difusor.

## 6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

No presente trabalho foi realizada uma análise numérica do escoamento ao longo de um Venturi, com a finalidade de observar da ocorrência de alguns fenômenos descritos na literatura, permitindo um melhor entendimento das condições nas quais ocorrem estes fenômenos, bem como a visualização das distribuições de propriedades ao longo do Venturi.

A modelagem computacional foi desenvolvida no software CDF Ansys/Fluent versão 14.5, através da utilização das equações de Navier-Stokes com médias de Reynolds (RANS), em conjunto com as equações do modelo de turbulência  $k - \varepsilon$  e suas variantes para determinação das tensões de Reynolds do escoamento turbulento. Os resultados numéricos tiveram uma boa convergência com os dados experimentais de pressão absoluta, com cerca de 1% de desvio relativo para as três variantes do modelo  $k - \varepsilon$  utilizadas.

Foi observado nos resultados das simulações que a seção divergente no Venturi apresenta uma turbulência elevada. Esta característica tem grande importância em injetores, pois proporciona uma maior mistura dos fluidos. Para o transporte de partículas, como no caso de transporte de grãos entre silos, esta característica turbulenta também se apresenta como uma vantagem da utilização do Venturi, visto que a manutenção dos equipamentos que utilizam o princípio de Venturi em seu funcionamento é relativamente baixa.

Com as simulações computacionais realizadas neste trabalho, foi possível observar o comportamento de um fluido escoando em um Venturi e também verificar a ocorrência de alguns fenômenos físicos neste tipo de dispositivo. Os principais resultados obtidos destas observações foram aceitos para publicação na forma de um artigo, intitulado *Numerical Analysis of Turbulent Flow Characteristics of an Incompressible Fluid in a Venturi-Type Device*, no XXI Congress on Numerical Methods and their Applications (ENIEF 2014).

Como sugestão para trabalhos futuros o modelo computacional utilizado neste trabalho pode ser empregado para análise de fenômenos mais complexos ocorrendo num Venturi, como por exemplo: injeção gás-sólido, cavitação e escoamentos multifásicos. Além de observar as condições de contorno em todos os casos de simulação de escoamentos turbulentos, torna-se necessário uma análise crítica sobre quais modelos de turbulência se aplicam melhor a cada caso, pois os

modelos de turbulência têm limitações conhecidas a depender da complexidade dos fenômenos e da geometria a ser analisada.

## REFERÊNCIAS

AHMADVAND, F.; TALAIE, M. R. CFD modeling of droplet dispersion in a Venturi scrubber. **Chemical Engineering Journal**. Isfahan, p. 423-431. mar. 2010.

ANSYS INCORPORATION, *Guia do Usuário – Fluent/Academic Version 14.5*, 2014.

AZAD, Ram C. Turbulent Flow in a Conical Diffuser: A Review. **Experimental Thermal and Fluid Science**, New York, n. 13, p.318-337, 1996.

BAYLAR, Ahmet et al. Numerical Modeling of Venturi flows for determining air injection rates using fluent v6.2. **Mathematical and Computational Applications**, Manisa, p. 97-108. jan. 2009.

DOMINGUES, Rogério Bolchi. **Injeção de Partículas de FCC usando Injetores Gás-Sólido tipo Venturi**. 2006. 127 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

EDIBON. **Catálogo – FMDU**. Disponível em: <<http://www.edibon.com/products/catalogues/pt/units/fluidmechanicsaerodynamics/fluidmechanicsgeneral/FMDU.pdf>>. Acesso em: 27 ago. 2013.

EDIBON. **Practical Exercises Manual – FMDU**. 1 ed., ago. 2012.

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; An experimental investigation of incompressible flow in conical diffusers. **International Journal of Mechanical Sciences**, UK, v. 8, n. 2, p.125-130, fev. 1966.

FOX, Robert W.; PRITCHARD, Philip J.; MCDONALD, Alan T. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos, 2010.

GUERRA, Andressa Pinheiro et al. Film Fraction in a Vertical Circular Venturi Scrubber. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, Rio de Janeiro, p. 233-236. jan. 2011.

INDAC. **Características do Acrílico**. Disponível em: <<http://www.indac.org.br/caracteristicas-do-acrilico.php>>. Acesso em: 03 jun. 2014.

ISHIMITO, Jun; KAMIJO, Kenjiro. Numerical simulation of cavitating flow of liquid helium in Venturi channel. **Cryogenics**, Tohoku, v. 43, p.9-17, 30 out. 2002.

ISO. **ISO 9300: 2005**. Disponível em: <<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:9300:ed-2:v1:en>>. Acesso em: 14 ago. 2014.

KENT, Walter G. **An Appreciation of two Great Workers in Hydraulics**. Londres: BladesEast&Blades, 1912.

LAMBERTH, C. **The solution – Dewatering with hydraulic jet pumps**. Lift Tech & J.J. Tech, 2013.

LAUNDER, B. E.; SPALDING, D. B. **The numerical computation of turbulent flows**. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, UK, v. 3, n. 2, p. 269–289, mar. 1974.

LAVANTE, E. VON; *et al.* Numerical and experimental investigation of unsteady effects in critical Venturi nozzles. **Flow Measurement and Instrumentation**, Essen, v. 11, p.257-264, 3 mar. 2000.

MIRANDA, W. R.; NASCIMENTO JR., E. D.; REZENDE, A. L. T. **Simulação Numérica de uma Bolha de Separação em Bordo Arredondando Utilizando Equações Médias de Reynolds**. In: XI Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente. Fortaleza, out. 2013.

MORAN, M.J. E SHAPIRO, H.N. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**. 4 ed. Rio de Janeiro: LTC. 2002.

NASCIMENTO, Marco Antonio Couto. **Parte I – Força dinâmica e força de sustentação**. Disponível em: <<http://dc356.4shared.com/doc/mu5emEeD/preview.html>>. Acesso em: 6 ago. 2014.

NORONHA, Francisco de Assis Ferreira. **Bombeamento Hidráulico a Jato com Sucção Bifásica**. 1995. 127 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1995.

OLIVEIRA, E. F. et al. ANÁLISE HIDRÁULICA DE HIDRO-EJETORES. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 53, p.2-3, maio 1996.

PARKER, G. J.; CHEONG, K. C.. Air-water tests on a Venturi for entraining liquid films. **International Journal of Mechanical Sciences**, UK, v. 15, n. 8, p.633-641, ago. 1973.

PUENTES, N. A. G. et al. Droplet Dispersion Angle Measurements on a Pease-Antony Venturi Scrubber. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, São Carlos, p. 99-106. jan. 2012.

SAMPAIO, Luiz Eduardo Bittencourt. **Simulação de Grandes Escalas da Bolha de Separação em Placas Finas a Pequeno Angulo de Incidência**. 2008. 129 f. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2008. Cap. 3.

SIMEPAR, **Tecnologia e informações ambientais – Ponta Grossa/PR**. Disponível em: <<http://www.simepar.br/site/internas/conteudo/meteorologia/tempo.shtml?id=4119905>>. Acesso em: 5 mai. 2014.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics – The Finite Volume Method**. 2. ed. Pearson Education Limited, 2007.