

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

VISUALIZAÇÃO DE ESCOAMENTO EM CANAL HIDRÁULICO DE DIRECIONADORES DE  
ESCOAMENTO APLICADOS A TURBINAS EÓLICAS

por

Fernando Knak

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, julho de 2016.



Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia

Departamento de Engenharia Mecânica

VISUALIZAÇÃO DE ESCOAMENTO EM CANAL HIDRÁULICO DE DIRECIONADORES DE  
ESCOAMENTO APLICADOS A TURBINAS EÓLICAS

por

Fernando Knak

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Alcy Rodolfo dos Santos Carrara  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Ciências Térmicas**

Orientador: Prof. Alexandre Vagtinski de Paula

Comissão de Avaliação:

Prof<sup>o</sup>. Fernando Marcelo Pereira

Prof<sup>o</sup>. Luiz Alberto Oliveira Rocha

Prof<sup>a</sup>. Thamy Cristina Hayashi

Porto Alegre, 6 de julho de 2016.

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família, com todo o meu respeito e admiração. Ao meu pai John Igor que nunca deixou que faltasse nada na minha vida e que sempre me apoiou e me aconselhou dentro dos princípios da ética e da moral. À minha mãe Arlete Maria que com o seu amor incondicional, dedica todo o seu tempo para me ver feliz. Ao meu irmão Alex, que mesmo com brigas e discussões, foi sempre meu melhor amigo e sempre lutou pelo meu bem. A minha irmã Micheli que sempre esteve pronta para me ajudar quando precisei. A todos vocês o meu muito obrigado pelo carinho e compreensão a mim dedicados nesta caminhada especial de minha vida pessoal e profissional.

## AGRADECIMENTOS

Ao Professor Alexandre Vagtinski de Paula, pela orientação e toda atenção que me foi dedicada durante a realização do presente trabalho.

Ao Bruno Volkmer Destefani, no qual dividiu comigo a tarefa da construção do canal hidráulico.

Ao funcionário João Batista da Rosa pelo apoio técnico na elaboração do canal.

Ao meus amigos Ricardo Trevizan, Lucas Kaiser e Renata que me apoiaram na realização deste trabalho com incentivos e com a amizade durante toda a universidade.

À Daniele que me apoiou e me ajudou quando eu mais precisei.

Ao CEMEC, com seus novos integrantes e antigos, no qual foi algo muito especial na faculdade.

À Atlética da Engenharia da UFRGS e todos os amigos que conheci através dela, que com ela passei por vários momentos felizes da minha vida acadêmica e amigos nos quais irei levar pelo resto de minha vida.

Aos amigos e colegas de curso que fizeram parte desta grande etapa da minha vida.

KNAK, F. **Visualização de escoamento em canal hidráulico de direcionadores de escoamento aplicados a turbinas eólicas**. 2016. 26 p. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

## RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo realizado em testes experimentais em um dispositivo que melhora a eficiência de turbinas eólicas de eixo vertical em topo de edificações. Para a realização do experimento, foi projetado e construído um canal hidráulico de circuito fechado de água. Também foram confeccionados dois protótipos deste dispositivo em uma impressora 3D que foram testados dentro deste canal hidráulico. Os protótipos estavam localizados acima de bases retangulares que simulam um meio urbano. Foram analisadas as linhas de corrente no canal com a presença de dois direcionadores de escoamento: um apresentado na literatura (Chong *et al.*, 2013) e outro proposto no presente trabalho. As linhas de corrente que adentram os direcionadores foram comparadas e analisadas por meio de uma técnica de injeção de tinta nanquim em três compartimentos com três cores diferentes. As tintas eram injetadas por meio de agulhas que estavam posicionadas a montante dos dispositivos dentro deste canal hidráulico. Foram utilizadas duas câmeras simultaneamente para captar as imagens do experimento. Para a análise quantitativa das imagens foi utilizado o *software* Tracker (2016) para rastrear as posições variadas das tintas presentes na cena. O experimento foi realizado com Reynolds  $a$ , aproximadamente, 300 e velocidade média de escoamento de 4,7 mm/s. Os resultados mostram que dependendo do percurso das linhas de corrente ao se aproximar do direcionador em três diferentes regiões, estas percorrem o interior do dispositivo com padrões distintos de escoamento. Com o *software* de visualização também foi possível obter dados das posições das linhas de corrente que adentravam os direcionadores sobre o escoamento. As linhas de corrente que entravam pela região central foram comparadas e se constatou um aumento de aproximadamente 10% na velocidade comparando com o observado pelo proposto pela literatura. Através da análise de diversas filmagens em ambos os direcionadores, não foi possível detectar regiões de recirculação no seu interior. Este fato se deve possivelmente pela velocidade de escoamento reduzida utilizada durante os experimentos, o que foi necessário para que as linhas de corrente não se difundissem na presença dos direcionadores. Com maiores vazões, não foi possível obter uma conformidade das linhas de corrente e uma conseqüente análise nesta vazão volumétrica.

**PALAVRAS-CHAVE:** Canal hidráulico, Visualização de escoamento, Turbinas eólicas de eixo vertical, Direcionadores de escoamento.

KNAK, F. **Visualization of a flow in a hydraulic channel of guide vanes applied to wind turbine.** 2016. 26 p. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

## ABSTRACT

This paper presents a study that was done with experimental tests on a device that improves efficiency of a vertical axis wind turbine on top of buildings. For the experiment, it was designed and built a closed-circuit hydraulic channel of water. It was also made two prototypes of this device in a 3D printer that were tested in this hydraulic channel. The prototypes were located above rectangular bases that simulate an urban environment. Streamlines were analyzed in the channel with the presence of two guide vanes: one presented in the literature (Chong *et al*, 2013) and another proposed in this paper. The streamlines that enter in guide vanes were compared and analyzed by an ink injection technique into three compartments with three different colors. The inks were injected by needles which were positioned upstream of the devices in this channel. Two cameras were used simultaneously to capture images of the experiment. For quantitative analysis of the videos, the software Tracker (2016) was used to track the various positions of the ink presents on the scene. The experiment was performed with Reynolds number approximately equals to 300 and average flow velocity of 4,7 mm/s. The results show that depending on the path of the streamline when approaching the guide vane, it will run with different flow patterns inside of the device. With the visualization software was possible to obtain data of the positions of the streamlines that entered the guide vanes. The streamlines that entered in the central region were compared and it was found an increase of approximately 10% in speed compared to that was observed for the one proposed in the literature. Through analysis of several shots in both guide vanes, it was not possible to detect flow recirculation regions inside the device. This fact is probably due to the reduced flow rate used during the experiments, which was necessary for the streamlines not to diffuse in the presence of the guide vanes. With higher flow rates, it was no possible to obtain conformity of the streamlines and a consequent analysis in this volume flow.

**KEYWORDS:** Hydraulic channel, Flow visualization, Vertical axis wind turbine, Guide vanes.

## ÍNDICE

RESUMO .....	v
ABSTRACT .....	vi
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. Motivação.....	1
1.2. Justificativa .....	1
1.3. Objetivos .....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	2
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	3
3.1. Direcionador de escoamento.....	3
3.2. Turbinas eólicas de eixo vertical.....	4
3.3. Canal hidráulico .....	4
3.4. Número de Reynolds.....	5
3.5. Técnica de visualização de escoamento com injeção de tinta.....	5
4. METODOLOGIA .....	5
4.1. Construção do Canal Hidráulico.....	5
4.2. Construção do protótipo do direcionador de escoamento.....	6
4.3. Montagem do experimento.....	7
4.4. <i>Software</i> de visualização.....	8
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	9
6. CONCLUSÕES .....	13
6.1. Sugestões de trabalhos futuros.....	14
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	15
APÊNDICE A - ANÁLISE DE INCERTEZA EXPERIMENTAL .....	16
APÊNDICE B – CANAL HIDRÁULICO .....	18
APÊNDICE C – BANCADA .....	19

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. Motivação

O desenvolvimento de um país está diretamente relacionado com a quantidade de energia consumida. Com a indevida exploração de energias que agredem o meio ambiente outras fontes de energia alternativa estão sendo estudadas e aplicadas para atender a demanda de consumo energético em nível mundial. São os casos das energias geradas como a eólica, a solar, de marés e geotérmica, entre outras. Em comum, elas têm a característica de serem renováveis e corretas sob o ponto de vista ambiental. Estas outras fontes permitem uma redução da dependência de combustíveis fósseis, responsável pela grande parte da emissão dos gases que provocam o efeito estufa.

A energia eólica é hoje em dia vista como uma das mais promissoras fontes de energia renováveis. As turbinas eólicas já são um elemento habitual da paisagem de muitos países europeus como a Alemanha, Dinamarca, Holanda e mais recentemente, o Reino Unido e a Espanha (Castro, 2009). No Brasil, a energia eólica é favorecida pela enorme costa atlântica, que otimiza a captação de ventos, e pela topografia de um terreno relativamente plano nas regiões litorâneas [Pessoa e Pinheiro, 2010].

Edificações com turbinas eólicas integradas estão ganhando mais atenção para geração de energia local. É desejável colocar turbinas eólicas em regiões de ventos com alta velocidade e baixa turbulência para aperfeiçoar a *performance* quanto à produção de energia de forma sustentável, principalmente em espaços abertos. Segundo Chong *et al.*, 2013, em áreas urbanas geralmente as condições são adversas para a implantação desse tipo de sistema. Por isso é recomendável a utilização de turbinas de eixo vertical, que trabalham com escoamentos de baixa velocidade, altamente turbulentos e, ao contrário das de eixo horizontal, captam ventos de qualquer direção.

No estudo desenvolvido por Chong *et al.*, 2013, foi elaborado um dispositivo com a função de direcionar o escoamento para as pás da turbina eólica de eixo vertical, no qual é integrado a turbina instalada no topo de edificações. Este direcionador tem como objetivo minimizar o torque negativo e melhorar a auto partida, assim melhorando a eficiência da turbina.

### 1.2. Justificativa

Testar o direcionador proposto pela literatura de Chong *et al.*, 2013, e propor um dispositivo no presente trabalho, para buscar uma maior eficiência por meio de uma técnica de visualização de escoamento.

### 1.3. Objetivos

Este trabalho tem como objetivo realizar um teste experimental de direcionadores de escoamento, como o dispositivo desenvolvido por Chong *et al.*, 2013. Serão analisadas linhas



de corrente que passam por estes dispositivos, por meio de uma técnica de injeção de tinta, posicionados dentro de um canal hidráulico. Como resultado, espera-se obter filmagens do escoamento ao redor e através dos direcionadores, identificando regiões de recirculação e o comportamento das linhas. Também serão analisadas, de maneira quantitativa, as filmagens do experimento por meio do *software* Tracker (2016).

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O Brasil é um dos países mais ricos em recursos naturais e vem aproveitando essa vantagem para a exploração desta energia sustentável. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a produção de eletricidade a partir da fonte eólica alcançou 12.210 GWh em 2014, que representou um aumento de 85,6% se comparado ao ano anterior no qual havia atingido 6.578 GWh [EPE, 2015]. Na Tabela 2.1, podemos ver a evolução da energia eólica no Brasil ao longo dos últimos anos.

Tabela 2.1 – Oferta de energia eólica no Brasil (Fonte: Balanço Energético Nacional, 2015).

Fluxo	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
<b>Geração Total (GWh)</b>	93	237	663	1.183	1.238	2.177	2.705	5.050	6.576	12.210

Estudos apontam que para a utilização em áreas urbanas, as turbinas eólicas de eixo vertical se mostram mais adequadas, pois possuem uma melhor resposta em condições de vento turbulento, que são encontrados em áreas edificadas. Espera-se que os sistemas com base na força de arrasto sejam menos sensíveis aos efeitos turbulentos como mostrado por Dayan, 2006. De acordo com Toja-Silva *et al.*, 2013, o uso de turbinas eólicas de eixo vertical em ambientes urbanos é vantajoso sob condições de vento multidirecional, sendo estas as condições reais que as turbinas estão sujeitas em grandes cidades.

Chong *et al.*, 2011, desenvolveram um sistema híbrido de energia renovável para ser aplicado no topo de edificações, que consistia de uma turbina eólica de eixo vertical, painéis solares, coletores de água da chuva e um direcionador de escoamento para a turbina. Este dispositivo garante que ocorra uma maior velocidade de ventos na turbina. Também, que o escoamento seja direcionado para a região das pás de avanço da turbina e que haja uma redução na velocidade de vento necessária para o auto acionamento. Além da interação com a turbina, o direcionador serve como base para a instalação de painéis solares e coletores de água. Esse direcionador de escoamento necessita de uma direção preferencial de vento e por isso possui um sistema que rotaciona suas pás no sentido de ventos mais rápidos. Foi relatado um aumento da velocidade do vento de 1,7 vezes e um aumento de geração de energia elétrica de 327% com o direcionador, utilizando no experimento uma turbina eólica H-Darrieus de 4 pás.

Chong *et al.*, 2012, conduziram experimentos em uma turbina com 3 pás com e sem um novo modelo de direcionador proposto. Neste estudo, também foram realizadas simulações numéricas para entender o comportamento do escoamento nos experimentos e foram encontradas melhorias semelhantes ao estudo anterior, onde ocorreu aumento da potência elétrica produzida, rotação e torque da turbina.

Chong *et al.*, 2013, visando uma redução de custos no direcionador, os autores propuseram um novo modelo composto por 4 pares de pás com diferentes ângulos, como mostrado na Figura 2.1. Este novo direcionador não possuía o sistema de posicionamento de acordo com a direção preferencial do vento. Tal dispositivo foi testado experimentalmente e por simulação computacional. Novamente foi visto uma melhora no desempenho da turbina em relação a velocidade do vento, rotação e torque máximo e potência elétrica gerada.

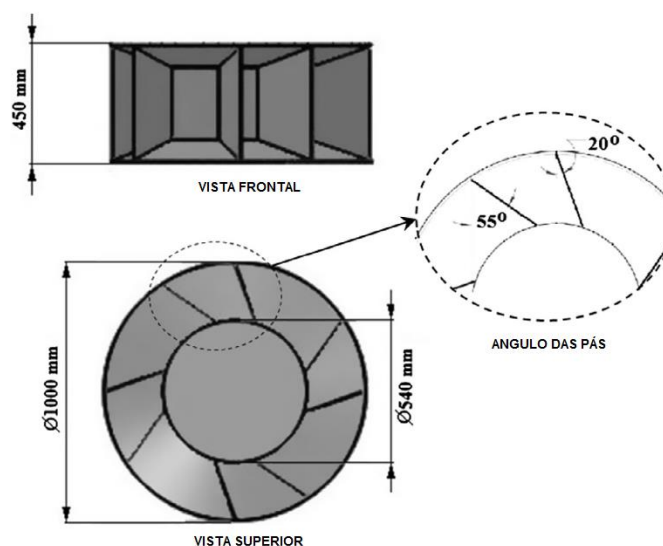


Figura 2.1– Direcionador de escoamento proposto por Chong *et al.*, 2013. (Fonte: Chong *et al.*, 2013).

Tedesco, 2015, construiu e testou dois modelos de direcionadores em escala reduzida no túnel aerodinâmico do Laboratório de Mecânica dos Fluidos da UFRGS. Foi construído um protótipo do dispositivo proposto por Chong *et al.*, 2013, e um protótipo proposto pelo próprio autor. O direcionador proposto por Tedesco, 2015, apresentou um melhor desempenho em relação ao modelo proposto por Chong *et al.*, 2013, com um aumento de 68% da velocidade angular e 47% da potência gerada. Também foi comprovado que o direcionador de fato melhora a eficiência da turbina. A utilização do direcionador facilitou a partida da turbina eólica, possibilitando o auto acionamento. A eficiência da turbina aumentou com o uso dos direcionadores, tanto para a velocidade rotacional, quanto para a potência gerada.

### 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1. Direcionador de escoamento

O direcionador de escoamento tem como objetivo aumentar a velocidade do escoamento para as regiões de pás de avanço da turbina eólica. Também busca reduzir o torque negativo causado na região das pás de retorno. Outra característica é a redução da turbulência e da flutuação de velocidade rotacional, o que influencia na vida útil dos componentes da turbina. Chong *et al.*, 2013, demonstrou que este dispositivo é capaz de melhorar a performance das turbinas em relação à energia elétrica gerada, à velocidade rotacional e ao comportamento de auto acionamento. Também foram mostradas melhorias nas

questões que envolvem ruído e segurança pública. Na **Erro! Autoreferência de indicador não válida.** são mostrados os resultados da utilização do direcionador integrado à turbina em comparação com o experimento somente com a turbina.

Tabela 3.1– Resumo do desempenho de uma turbina de eixo vertical com e sem direcionador.  
(Fonte: Chong *et al.*, 2013.)

Parâmetros	Turbina sem direcionador	Turbina com direcionador integrado	Razão de aumento
Torque máximo	11,25mN.m	23,64 mN.m	2,1
Velocidade angular	77,4 rpm	144,4 rpm	1,87
Energia gerada	0,1252 W	0,4352 W	3,48

### 3.2. Turbinas eólicas de eixo vertical

Atualmente, as turbinas eólicas em operação comercial possuem um rotor em forma de hélice com eixo horizontal. Turbinas deste modelo utilizam o mesmo princípio básico das modernas turbinas hídricas, onde o escoamento é paralelo ao eixo de rotação das pás da turbina. As turbinas de eixo vertical tem como vantagens a sua simplicidade de concepção, a capacidade de receber o escoamento de todas as direções e a possibilidade de instalação do equipamento junto ao solo, o que reduz o custo de instalação e manutenção. Como desvantagens, apresentam baixas velocidades do vento junto à base, menor desempenho comparado com uma turbina eólica de eixo horizontal, a sua dificuldade de arrancar automaticamente (auto partida) e uma necessidade de suporte para esforços dinâmicos [Castro, 2009].

### 3.3. Canal hidráulico

O canal hidráulico de circulação de água propicia uma seção de teste controlada para realização de experimentos. Geralmente, um escoamento com velocidade constante é desejável, mas alguns experimentos envolvem diferentes condições de seções de teste. Essas instalações experimentais podem ser classificadas como túneis de circuito-fechado ou circuito-aberto. Em um estudo com a água como fluido de trabalho, um túnel de circuito-fechado seria uma opção natural e adequada. Essa alternativa proporciona um bom controle em métodos de visualização do fluido e técnicas de visualização do escoamento aplicadas à técnicas de velocimetria [Ássi, 2005].

### 3.4. Número de Reynolds

O número de Reynolds é definido por

$$Re = \frac{Vd}{\nu} \quad (3.1)$$

em que  $Re$  é o número de Reynolds, parâmetro adimensional,  $V$  é a velocidade média do escoamento,  $d$  o comprimento característico e  $\nu$  é a viscosidade cinemática do fluido [Fox *et al.*, 2012].

### 3.5. Técnica de visualização de escoamento com injeção de tinta

A verificação visual de um experimento constitui numa análise eficaz e rápida, sendo possível a observação de inúmeras informações num curto intervalo de tempo. A imagem comunica e transmite mensagens e com isso o seu uso é de grande interesse em trabalhos que atuam na área de mecânica dos fluidos, onde existem diversos mecanismos que necessitam da visão para analisar os escoamentos. A injeção de tinta diretamente no escoamento principal é de fácil implementação e, conseqüentemente, baixo custo. No presente trabalho é desejável a menor perturbação possível no escoamento. Em vista disso, a velocidade e a pressão de injeção de tinta devem ser controladas e fixadas em valores próximos àqueles encontrados no fluido, com o intuito do filete pigmentado manter-se nítido e consistente [Mansur e Vieira, 2004].

## 4. METODOLOGIA

Nesta seção serão relatados os passos para a realização do experimento, como a construção do canal hidráulico, dos direcionadores, o uso do software de visualização e a montagem da bancada.

### 4.1. Construção do Canal Hidráulico

Para a realização dos experimentos de visualização do presente trabalho, projetou-se e construiu-se um canal hidráulico de circuito fechado de circulação de água à temperatura ambiente, propulsionado por uma bomba centrífuga de 0,37 kW, com uma vazão máxima de 0,943 L/s. O canal foi construído no Laboratório de Ensaios Térmicos e Aerodinâmicos (LETA) da UFRGS, com chapas de alumínio de 0,8 mm de espessura, chapas acrílicas de 10 mm de espessura e tubulações de PVC. Utilizou-se como modelo a bancada projetada por Ássi *et al.*, 2005, no Núcleo de Dinâmica e Fluidos da Universidade de São Paulo em uma escala menor (aproximadamente 3,6 vezes menor na largura do canal e 6,2 vezes menor na altura) e adaptada para os parâmetros necessários para o atual experimento. As chapas foram cortadas e moldadas para depois serem presas com rebites e cola (PU). A seção de testes apresenta dimensões de 193 mm x 146 mm x 1034 mm (largura, altura e comprimento, respectivamente) e foi construída em acrílico para permitir a observação dos experimentos. Todos os cantos foram vedados com cola silicone para evitar vazamentos. Na Figura 4.1, pode-se observar um modelo confeccionado em CAD 3D do canal hidráulico construído para o presente trabalho e no Apêndice B estão detalhadas as suas dimensões.

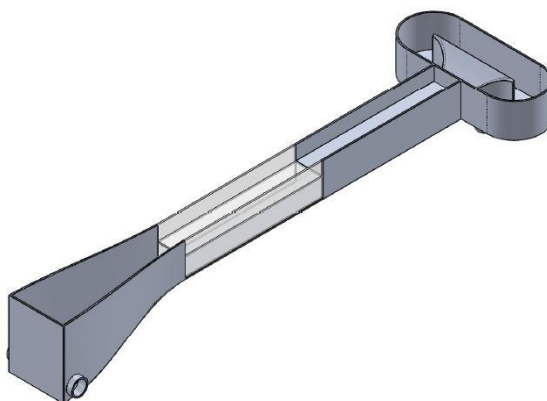


Figura 4.1 – Canal hidráulico modelado em CAD 3D.

#### 4.2. Construção do protótipo do direcionador de escoamento

Para a visualização do escoamento, o direcionador proposto por Chong *et al.*, 2013, foi construído em escala reduzida de aproximadamente 15 vezes, para poder adequar-se as dimensões do canal. Para as dimensões do direcionador, calculou-se a área do modelo para que a relação desta área com a área de teste (razão de bloqueio) do canal ficasse menor que 30%, com o intuito de obter os dados com menores interferências. Construiu-se também outro direcionador, proposto no presente trabalho, com as mesmas dimensões, mas com uma modificação nas pás do direcionador visando torná-las mais aerodinâmicas. Busca-se o efeito de bocal com essa mudança na geometria aumentando a velocidade do escoamento em relação ao direcionador anterior. Este efeito de bocal também é encontrado devido à diferença de altura entre o diâmetro externo e diâmetro interno do direcionador, de forma semelhante ao presente na literatura. Os modelos em CAD 3D e as dimensões principais dos direcionadores confeccionados estão ilustrados na

Figura 4.2.

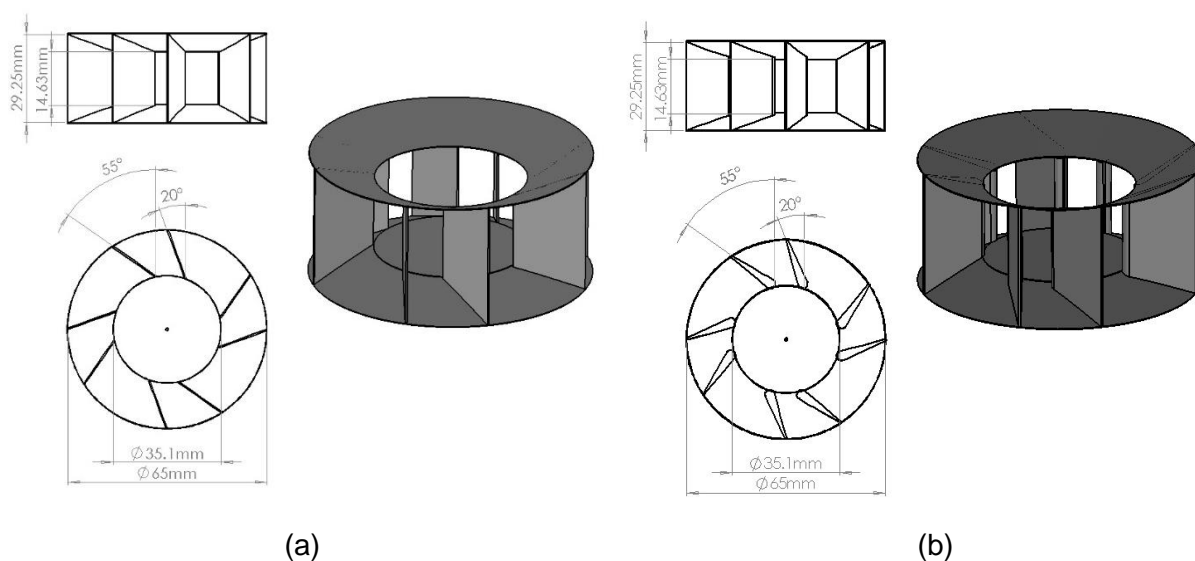


Figura 4.2 – Direcionadores de escoamento modelados em CAD 3D. Em (a) Direcionador proposto por Chong et al, 2013. Em (b) Direcionador proposto pelo presente trabalho.

Através de uma impressora 3D foram confeccionados os protótipos em peças únicas, visto que os direcionadores projetados são relativamente pequenos, permitindo, assim, uma maior precisão. A confecção das peças foi realizada no Laboratório de Inovação e Fabricação Digital da Escola de Engenharia da UFRGS. O material usado na confecção foi acrilonitrila butadieno estireno (ABS), material este bastante rígido e resistente a impactos. Foram produzidas também bases retangulares para instalar os direcionadores sobre a mesma, no intuito de simular um topo de uma edificação. Na Figura 4.3 estão os direcionadores de escoamento sobre estas bases retangulares.

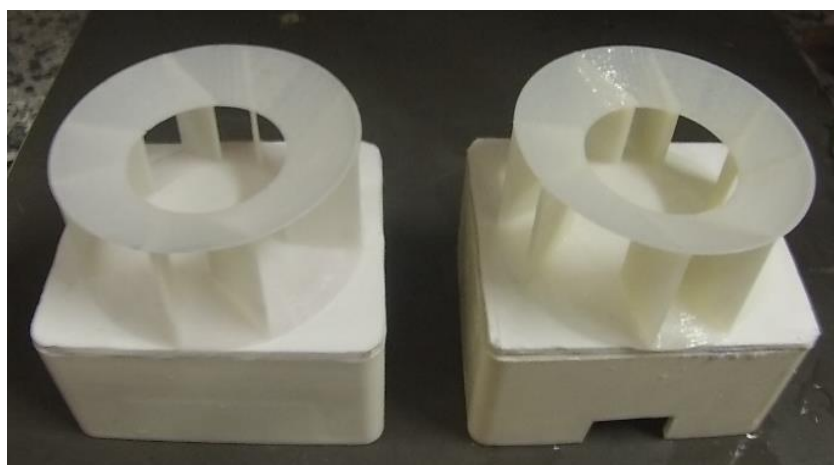


Figura 4.3 – Protótipos dos direcionadores de escoamento.

#### 4.3. Montagem do experimento

Para a visualização de escoamentos foi utilizado o canal hidráulico projetado e construído do Laboratório de Aplicações em Energia e Fenômenos de Transporte. Instalou-se um duto na entrada do canal no qual uma bomba hidráulica bombeava água do tanque ao canal. No final do canal, ligou-se outro duto no qual se levava água de volta ao tanque, assim mantendo um escoamento contínuo. Para a visualização do escoamento foram instalados três compartimentos com tinta nanquim: um azul, um vermelho e um verde, que são injetados no escoamento do canal por meio de agulhas de 1 mm de diâmetro instaladas a montante do direcionador. As agulhas foram ligadas ao compartimento de tinta através de mangueiras com vazões controladas por meio de suas respectivas válvulas. Foram utilizadas duas câmeras simultaneamente para captar as imagens do experimento, uma com um tripé a frente da seção de testes (vista lateral dos experimentos) e outra localizada acima da tampa de acrílico da seção de testes (vista superior dos experimentos). Na Figura 4.4 é possível ver o desenho esquemático da bancada montada.

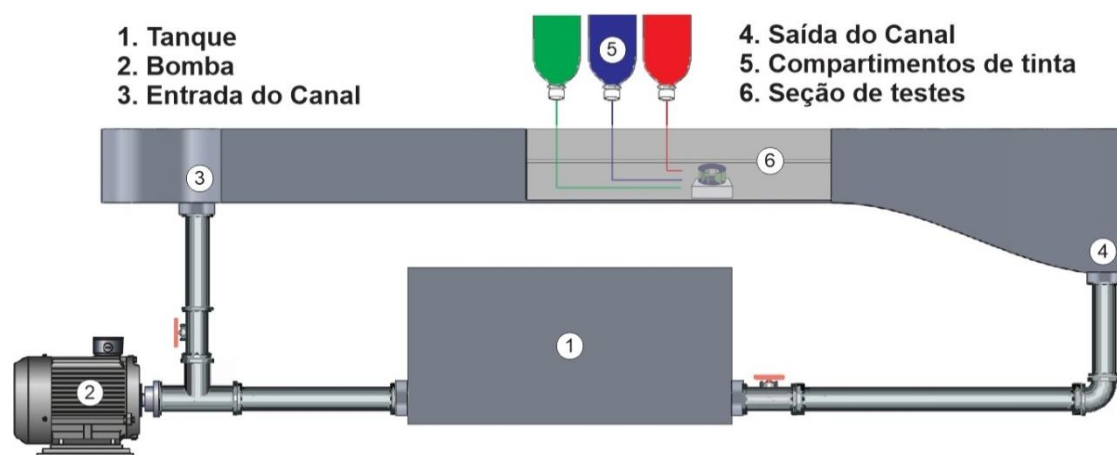


Figura 4.4 - Desenho esquemático da bancada.

Para iniciar o experimento, primeiramente foi preciso ajustar a vazão do canal hidráulico, na entrada e saída, e a das tintas. Para isto, um teste sem a presença do direcionador de escoamento foi realizado. Após se obter linhas paralelas no escoamento, o direcionador foi posicionado dentro do canal na seção de testes sobre uma superfície que simula o topo de uma edificação. Posterior a isso, o canal foi fechado através de uma tampa de acrílico na área de testes para manter um escoamento de canal fechado. Depois de estabilizado o escoamento se iniciaram as filmagens do experimento.

#### 4.4. Software de visualização

Para a análise quantitativa das filmagens foi utilizado o *software* Tracker (2016), um programa gratuito que analisa vídeos e imagens quadro a quadro. Através dele foi possível rastrear posições variadas das tintas presentes na cena. Para testar a influência do novo perfil das pás do direcionador proposto, foram analisadas as filmagens nas quais a linha de corrente verde (inferior) adentra os direcionadores. Rastream-se, simultaneamente, posições de avanço de uma linha de corrente, por meio de duas vistas (uma superior e uma lateral) e, assim, obtiveram-se as velocidades instantâneas para cada eixo analisado. Para calibrar o programa, o *software* permite usar como referência medidas já conhecidas. Neste caso, foram usadas as próprias medidas do direcionador. O rastreamento foi realizado a cada 0,33 s.. As Figuras 4.5 e 4.6 apresentam o rastreamento realizado nestas linhas de corrente.

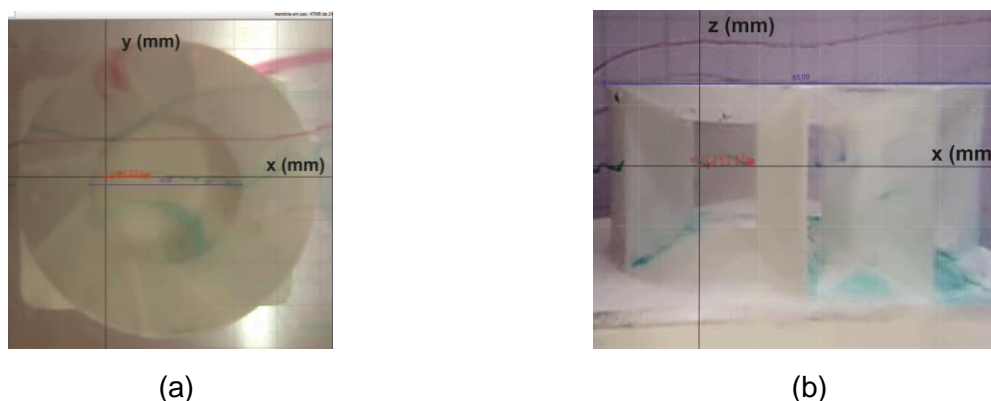


Figura 4.5 – Rastreamento pelo *software* da linha de corrente que entra no direcionador proposto pela literatura. (a) Vista superior com os eixos x-y. (b) Vista lateral com os eixos x-z.

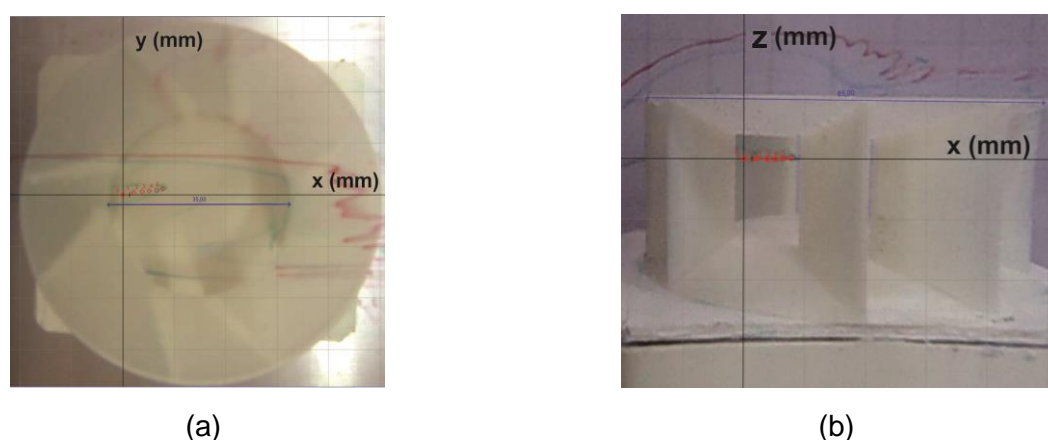


Figura 4.6 – Rastreamento pelo *software* da linha de corrente que entra no direcionador proposto pelo presente trabalho. (a) Vista superior com os eixos x-y. (b) Vista lateral com os eixos x-z.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A bancada construída é propícia para experimentos de visualização de escoamento, como a construída por Ássi *et al.*, 2005, tomando certos cuidados como o controle de vazão da entrada do canal, da saída do canal e da saída de cada compartimento de tinta. Com o controle devido de vazão, foi possível obter linhas de correntes paralelas (Figura 5.1). Os experimentos foram realizados com número de Reynolds de 301,25, considerando como comprimento característico o diâmetro externo dos direcionadores que é igual a 65 mm, tendo uma velocidade média no canal de 4,7 mm/s. A análise de incertezas na determinação de Reynolds é apresentada no Apêndice A.

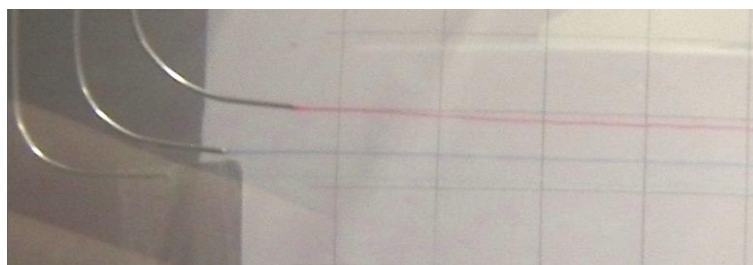


Figura 5.1– Linhas de corrente do escoamento sem o direcionador.



Na Figura 5.2 é observada a deflexão das linhas de corrente que se aproximam da base que simula a edificação, contornando o obstáculo, semelhantemente ao observado por Toja-Silva *et al.*, 2013. A linha vermelha e a azul passam por cima do direcionador com esta deflexão. A linha verde sofre deflexão também, mas como a agulha é posicionada em uma posição inferior, ela adentra o direcionador, passando pelo seu bocal de entrada. É possível observar na Figura 5.2 que a linha vermelha, após passar pelo direcionador, apresenta ligeiras perturbações. Já a linha azul (entre a verde e a vermelha) apresenta uma recirculação ao contornar o dispositivo.

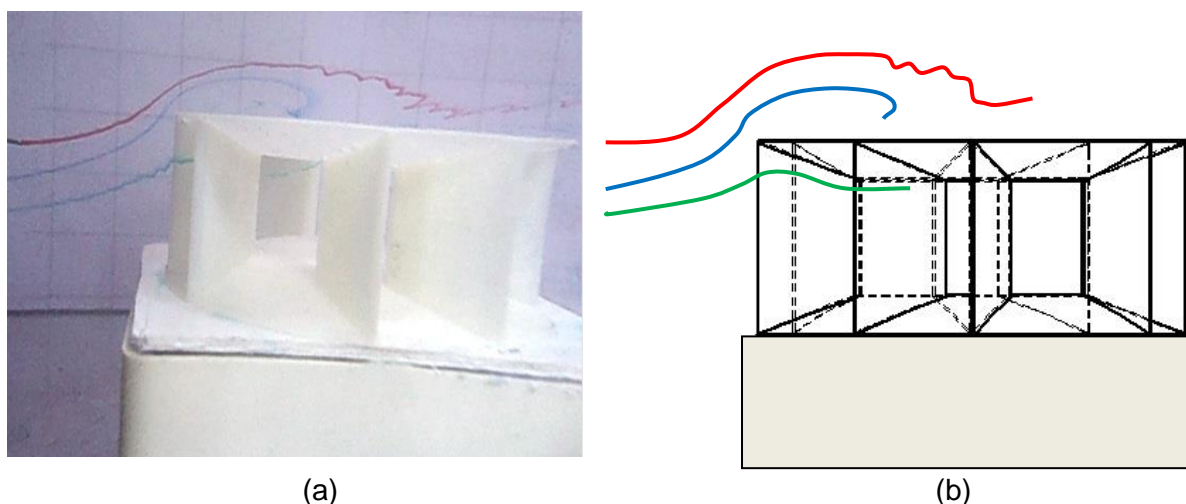


Figura 5.2 - (a) Linhas de corrente contornando o obstáculo juntamente com seu (b) desenho esquemático.

Como o escoamento acontece da esquerda para a direita, se houvesse uma turbina eólica instalada em seu interior, as pás girariam no sentido horário. Assim, para avaliar o comportamento das linhas de corrente que passam pelo direcionador, foi analisada a entrada da linha de cor verde, tendo em vista que a linha vermelha e azul passavam acima deste. O posicionamento das agulhas foi realizado manualmente, movendo o conjunto ou para a esquerda ou para a direita em relação à seção de testes. Isso possibilitou que as linhas de corrente passassem pelo interior dos direcionadores por 3 regiões distintas: I, II e III, conforme ilustra a Figura 5.3.

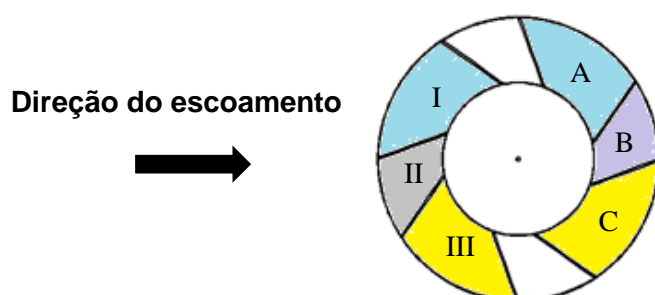


Figura 5.3 – Regiões de entrada das linhas de corrente que se aproximam do direcionadores.

Através das Figuras 5.4a e 5.4b, é possível observar a entrada da linha de corrente pela região I do direcionador proposto neste trabalho e proposto pela literatura, respectivamente, formando o padrão de escoamento ilustrado na Figura 5.5a. Para uma entrada pela região II (Figura 5.4c e 5.4d), o padrão de escoamento formado é ilustrado na Figura 5.5b. Para a região III (Figura 5.4e e 5.4f), o padrão é ilustrado na Figura 5.5c.

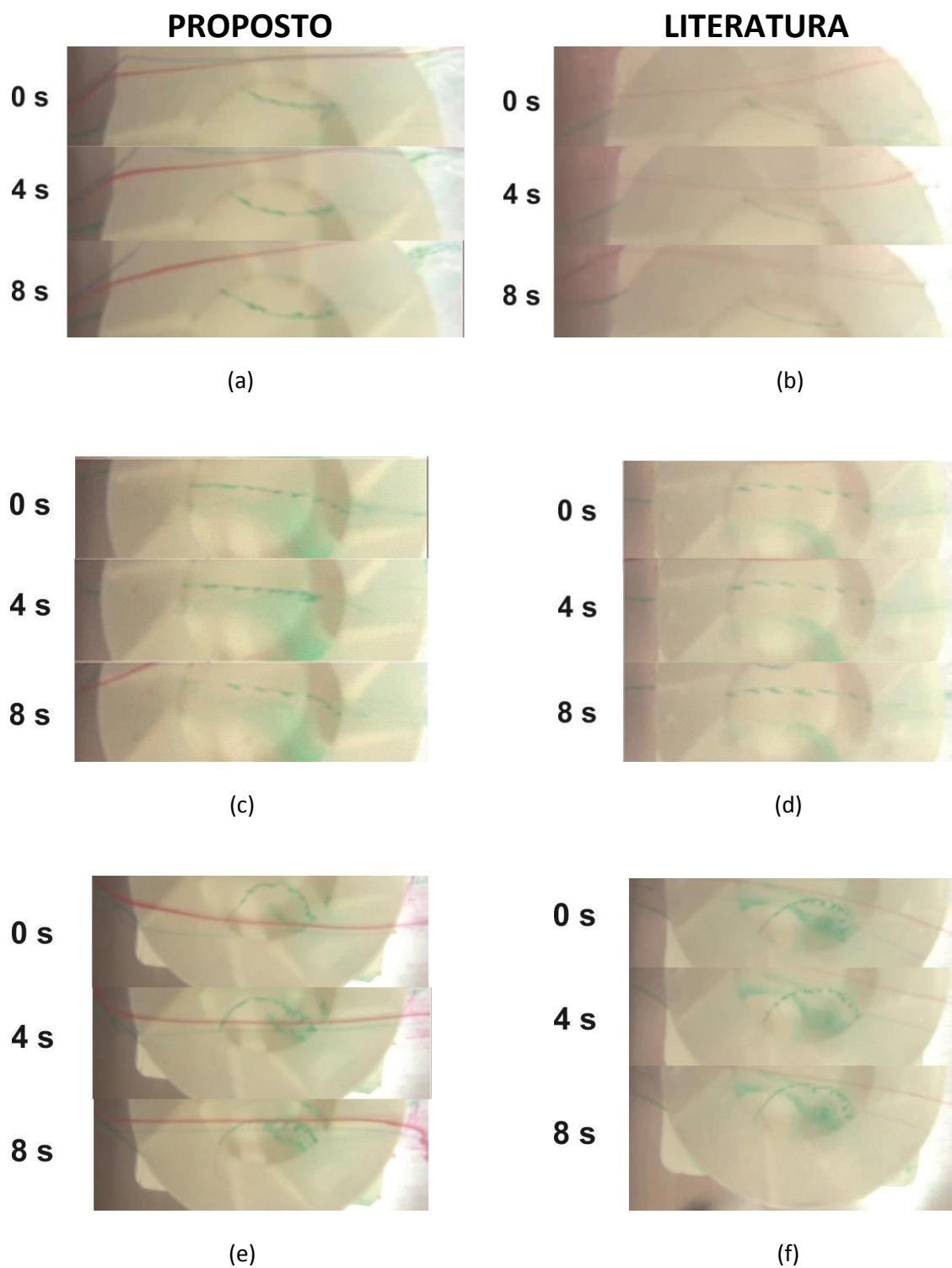


Figura 5.4 – Resultados das visualizações de escoamento em intervalos de 4 segundos. Para a entrada pela região I, (a) modelo proposto e (b) modelo da literatura. Para a entrada pela região II, (c) modelo proposto e (d) modelo da literatura. Para a entrada pela região III, (e) modelo proposto e (f) modelo da literatura.

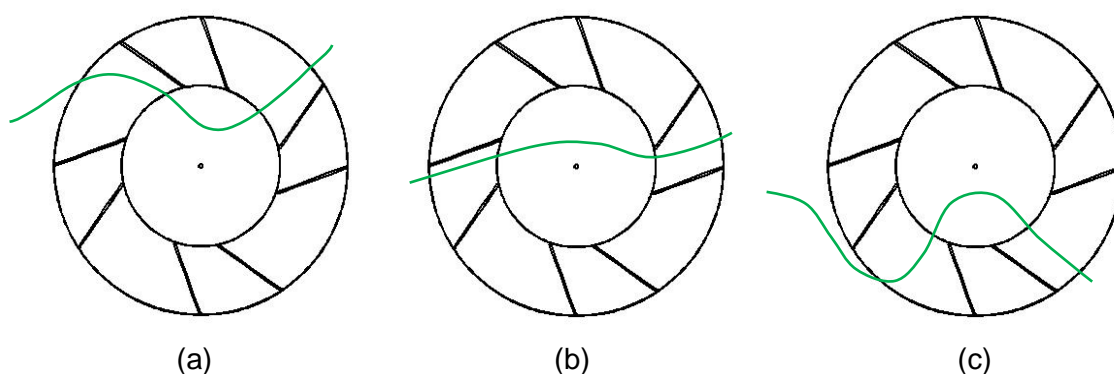


Figura 5.5 – Desenhos esquemáticos do padrão da linha de corrente que entra nos direcionadores propostos. Em (a) pela região I, em (b) pela região II e em (c) pela região III.

Observa-se que quando o escoamento adentra o direcionador pela região I, ele sai pela região A. Como o rotor da turbina giraria no sentido horário no interior do direcionador, tal fato favoreceria o aumento da eficiência da máquina. Ao entrar pela região II, a linha de corrente sai pela região B, percorrendo a região central do direcionador, mantendo um caminho no sentido horário do centro direcionador, caminho que beneficiaria o giro do rotor. Ao entrar pela região III, a linha de corrente muda sua direção para o centro do direcionador, em um ângulo de aproximadamente  $90^\circ$  no sentido anti-horário, mudando em seguida mais uma vez a sua direção devido a uma possível zona de baixa pressão, agora no sentido horário, saindo pela região C, afastando-se ligeiramente do centro do direcionador. Este caminho pode causar um torque positivo logo que entra no direcionador devido ao contato do escoamento no sentido da rotação da pá da turbina. Em seguida, um torque negativo quando sai, devido o contato do escoamento no sentido contrário a rotação da pá. É importante ressaltar que esta análise foi realizada sem a presença de uma turbina eólica, pois é um estudo simplificado dos direcionadores reduzidos. Com a presença de uma turbina, os caminhos das linhas de correntes poderiam sofrer alterações. Também foi observado durante a análise dos vídeos que quando o escoamento passava pelo interior dos direcionadores, havia um aumento de velocidade e uma ligeira perturbação das linhas de corrente.

Foi observada nas filmagens uma maior velocidade das linhas de corrente que adentram o direcionador proposto no presente trabalho comparado com o da literatura, valor este mais significativo quando a linha de corrente passava pela região I. Para quantificar a influência das pás do dispositivo na velocidade do escoamento, foi analisada por meio do *software* Tracker a linha de corrente que adentrava o direcionador pela região II, visto que nesta região é possível rastrear a linha por meio de duas câmeras simultâneas. Na Figura 5.6 podem-se ver as velocidades instantâneas calculadas, em intervalos de 0,33 segundos, da linha de corrente que entra no direcionador proposto pela literatura, e, na Figura 5.7, no direcionador proposto nesse trabalho. Nas Tabelas 5.1 e 5.2 apresentam-se os respectivos valores e suas médias. As Figuras 5.6 e 5.7 apresentam de forma ampliada as Figuras 4.5 e 4.6 no interior do direcionador.

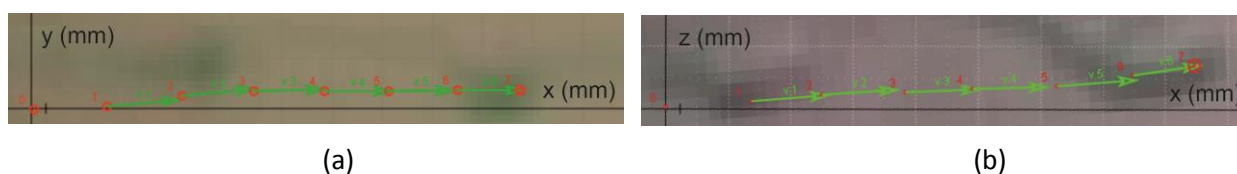


Figura 5.6 – Vetores das velocidades instantâneas da linha de corrente que adentra o direcionador proposto pela literatura pela região II. (a) Vista superior com os eixos x e y. (b) Vista lateral com os eixos x e z.

Tabela 5.1– Velocidades instantâneas e velocidade média da linha de corrente que passa pela região II do direcionador proposto pela literatura.

t (s)	V <sub>x</sub> (mm/s)	V <sub>y</sub> (mm/s)	V <sub>z</sub> (mm/s)	V (mm/s)	$\bar{V}$ (mm/s)
0,33	4,42	0,41	0,29	4,44	4,19
0,67	4,40	0,46	0,23	4,43	
1,00	4,27	0,13	0,13	4,27	
1,33	4,02	0,02	0,13	4,02	
1,67	3,97	0,03	0,34	3,99	
2,00	3,93	0,01	0,51	3,96	

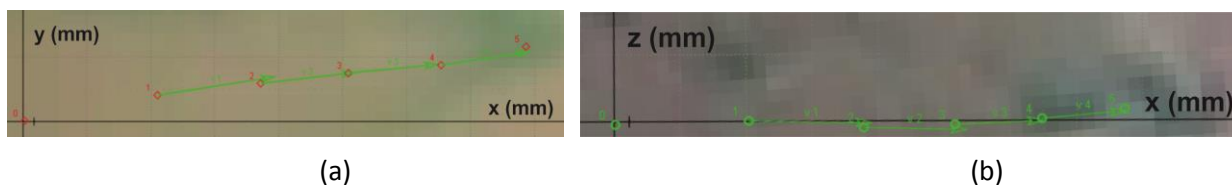


Figura 5.7 – Vetores das velocidades instantâneas da linha de corrente que adentra o direcionador proposto pelo presente trabalho pela região II. (a) Vista superior com os eixos x e y. (b) Vista lateral com os eixos x e z.

Tabela 5.2– Velocidades instantâneas e velocidade média da linha de corrente que passa pela região II do direcionador proposto no presente trabalho.

t (s)	V <sub>x</sub> (mm/s)	V <sub>y</sub> (mm/s)	V <sub>z</sub> (mm/s)	V (mm/s)	$\bar{V}$ (mm/s)
0,33	5,61	0,43	0,08	5,63	4,73
0,67	4,72	0,45	0,30	4,75	
1,00	4,52	0,41	0,15	4,54	
1,33	4,45	0,38	0,09	4,46	
1,67	4,25	0,39	0,16	4,27	

A análise de incerteza para a determinação da velocidade média do escoamento dentro do direcionador se encontra no apêndice A.2.

## 6. CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta um estudo experimental de direcionadores de escoamento voltados a turbinas eólicas de eixo vertical instaladas no topo de edificações para uso em ambiente urbano. Para os ensaios foi projetado e construído um canal hidráulico de circuito fechado no qual os experimentos de visualização de escoamento foram realizados. O canal construído permitiu a correta visualização e análise das linhas de corrente.

Foram analisadas as linhas de corrente no canal com a presença de dois direcionadores de escoamento: um apresentado na literatura (Chong *et al.*, 2013) e outro proposto no presente trabalho. As linhas de corrente que passavam pelos direcionadores foram comparadas e analisadas.

Os resultados mostram que o percurso das linhas de corrente que se aproximam do direcionador em três regiões distintas percorrem o interior do dispositivo formando padrões distintos e, inclusive, saindo por regiões também distintas. Constatou-se uma maior velocidade das linhas de corrente que passavam no interior do direcionador proposto no presente trabalho, comparado ao da literatura. Tal análise foi possível de se realizar ao observar simultaneamente vídeos da lateral e do topo da edificação, permitindo, assim, a decomposição do vetor velocidade para a obtenção da velocidade axial.

O *software* Tracker permitiu uma análise quantitativa das imagens. Com ele foi possível obter dados de rastreabilidade das posições das linhas de corrente que adentravam os direcionadores, assim, podendo se obter dados sobre o escoamento. As linhas de corrente que entravam pela região II foram comparadas e se constatou um aumento de velocidade de 11,41% daquele observado no direcionador proposto pela literatura.

Através da análise de diversas visualizações em ambos os direcionadores, não foi possível detectar regiões de recirculação no seu interior. Tal fato possivelmente deve-se a velocidade de escoamento reduzida que foi utilizada durante os experimentos (baixo número de Reynolds), o que foi necessário para que as linhas de corrente não se difundissem na presença dos direcionadores. Com maiores vazões, não foi possível obter uma conformidade das linhas de corrente e uma conseqüente análise nesta vazão volumétrica.

A técnica de visualização de escoamento com injeção de tinta na bancada existente do LAEFT tem um limite de tempo de uso, visto que quanto maior é o tempo das filmagens, mais escura fica a água do experimento. Assim, a qualidade das imagens da câmera vai diminuindo ao longo do experimento.

#### 6.1. Sugestões de trabalhos futuros

Como sugestão para trabalhos futuros, sugere-se montar um direcionador transparente para observar melhor o escoamento em seu interior.

Mais agulhas podem ser instaladas em diferentes posições e uma exata descrição destas posições utilizadas dentro do canal deve ser realizada. Deste modo, mais linhas de corrente podem ser visualizadas e comparadas com resultados de trabalhos realizados por meio de dinâmica dos fluidos computacionais.

Uma melhoria no sistema de medição de vazão volumétrica do escoamento deve ser realizada tanto para a água do sistema de bombeamento quanto para a injeção das tintas, visto que qualquer problema nestes pontos compromete o experimento, pois as linhas de corrente não permanecem paralelas quando tais valores não são idênticos.

Também como sugestão, tem-se a montagem de um protótipo de uma turbina eólica vertical dentro do direcionador, permitindo a análise do comportamento das linhas de corrente com a presença desta.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ássi, G.R.S., Meneghini, J.R., Aranha, J.A.P. e Coletto, W.G.P. **“Design, assembling and verification of a circulating water channel facility for fluid dynamics experiments”**, 18<sup>th</sup> International Congress of Mechanical Engineering, 2005.

Castro, Rui M.G. **“Introdução à Energia Eólica”**, Instituto Superior Técnico, 4 a edição, Março 2009.

Chong, W.T., Naghavi, M.S., Poh S.C, Mahlia, T.M.I, Pan, K.C. **“Techno-economic analysis of a wind-solar hybrid renewable energy system with rainwater collection feature for urban high-rise application”**, Applied Energy, vol 88, 4067-4077p, 2011.

Chong, W.T, Pan K.C, Poh, S.C, Fazlizan, A, Oon, C.S, Badaruin, A, Nik-Ghazali, N. **“Performance investigation of a power augmented vertical axis wind turbine for urban high-rise application”**, Renewable Energy, vol 51, 388-397p, 2012.

Chong, W.T, Fazlizan, A, Poh, S.C, Pan, K.C, Hew, W.P, Hsiao, F.B. **“The design, simulation and testing of an urban vertical axis wind turbine with the omni-direction-guide-vane”**, Applied Energy, vol 112. 601-609p, 2013.

Dayan, E. **“Wind energy in buildings: power generation from wind in the urban environment – where it is needed most”**, Refocus, March/April, p: 33-38, 2006.

Empresa de Pesquisa Energética – EPE. **“Balanço Energético Nacional 2015, Ano base 2014”** – Rio de Janeiro, 2015.

Fox, R. W.; Pritchard, P. J.; McDonald, A. T. **“Introdução à Mecânica dos Fluidos”**, LTC, Brasil, 7<sup>a</sup> edição, 2012.

Mansur, S.S. e Vieira, E.D.R. **“Visualização experimental de escoamentos”**, ABCM, Rio de Janeiro, pp. 33-71. 2004.

Pinheiro, V. S.; Pinheiro, J. Q. **“Do que Você Lembra quando Pensa em Energia do Vento?” Um Estudo sobre o Conhecimento da Energia Eólica**, Revista Interamericana de Psicología/Interamerican Journal of Psychology, Vol. 44, Num. 2, pp. 361-367, 2010.

Tedesco, H. T. **“Estudo de diferentes direcionadores de escoamento na otimização da potência convertida de uma turbina eólica de eixo vertical”**, Trabalho de conclusão de curso, UFRGS, Porto Alegre, 2015.

Toja-silva, F.; Colmenar-Santos, A. e Castro-Gil, M. **“Urban Wind energy exploitation systems: behaviour under multidirectional flow conditions – opportunities and challenges, Renewable and Sustainable Energy Reviews”**, Vo. 24, p. 364-378. 2013.

Tracker – Video Analysis and Modeling Tool. **Open Source Physics**, versão 4.92 de 23 de janeiro de 2016, disponível em [physlets.org/tracker](http://physlets.org/tracker), 2016.

## APÊNDICE A - ANÁLISE DE INCERTEZA EXPERIMENTAL

### A.1. Incerteza no Número de Reynolds:

Segundo Fox *et. al.*, 2012, a incerteza experimental é o estudo das incertezas nas medições e dos seus efeitos nos resultados globais.

Para o cálculo do número de Reynolds utilizamos a Equação 3.1, e para o cálculo da incerteza no numero de Reynolds utilizamos a Equação A.1 retirada de Fox *et al.*, 2012.

$$u_{R_i} = \frac{x_i}{R} \cdot \frac{\delta R}{\delta x_i} \cdot u_{x_i} \quad (\text{A.1})$$

onde  $u_{R_i}$  é o intervalo de incerteza relativa,  $x_i$  é a variável independente,  $R$  é o resultado a ser medido e  $u_{x_i}$  é a incerteza relativa da variável independente.

A incerteza da velocidade considerada é de  $\pm 0,2$  já que a incerteza relativa da vazão é de  $\pm 0,2$  devido ao cálculo do tempo que foi levado para calcular esta,  $6,8 \pm 0,2$ . Dado retirado enchendo uma garrafa de 900 ml e calculando o tempo que demorava.

Utilizando um paquímetro para medir o diâmetro externo do direcionador ( $d$ ), temos uma resolução de 0,1mm. Sendo assim, a incerteza relativa no diâmetro é estimada como

$$u_d = \pm \frac{0,05mm}{65,00mm} = \pm 0,0007692$$

A viscosidade da água depende da temperatura. Esta é estimada como  $T = 20 \pm 0,5^\circ\text{C}$ . Segundo Fox *et al.*, 2012, um modo de estimar a incerteza relativa na temperatura seria assim:

$$u_{\mu(T)} = \pm \frac{\delta\mu}{\mu} = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{d\mu}{dT} (\pm\delta T) \quad (\text{A.2})$$

onde  $T$  é a temperatura.

A derivada pode ser estimada a partir de dados tabulados de viscosidade perto da temperatura nominal considerada de  $20^\circ\text{C}$ . Assim temos:

$$\frac{d\mu}{dT} \approx \frac{\Delta\mu}{\Delta T} = \frac{\mu(21^\circ\text{C}) - \mu(19^\circ\text{C})}{(21-19)^\circ\text{C}} = (0,000979 - 0,001028) \frac{Ns}{m^2} \times \frac{1}{2^\circ\text{C}}$$

$$\frac{d\mu}{dT} = -2,45 \times 10^{-5} Ns / (m^2 \cdot ^\circ\text{C})$$

Segue-se, da Equação A.2, que a incerteza na viscosidade devida à temperatura é

$$u_{\mu(T)} = \frac{1}{0,001003 Ns} \times -2,45 \times 10^{-5} \frac{Ns}{m^2 \cdot ^\circ\text{C}} \times (\pm 0,5^\circ\text{C})$$

$$u_{\mu(T)} = \pm 0,0122$$

Os próprios dados tabulados de viscosidade também têm alguma incerteza, segundo Fox *et al.*, 2012, ela pode ser de  $\pm 1,0\%$ , então uma estimativa para a incerteza relativa resultante na viscosidade será:

$$u_{\mu(T)} = \pm [(\pm 0,01)^2 + (\pm 0,0122)^2]^{1/2} = \pm 0,0158$$

As incertezas na velocidade, diâmetro do direcionador e viscosidade, necessárias para calcular o número de Reynolds, são agora conhecidas. As derivadas parciais requeridas, determinadas a partir da Equação 3.1, são:

$$\frac{v}{\text{Re}} \frac{\delta \text{Re}}{\delta v} = \frac{v}{\text{Re}} \frac{d}{\mu} = \frac{\text{Re}}{\text{Re}} = 1$$

$$\frac{\mu}{\text{Re}} \frac{\delta \text{Re}}{\delta \mu} = (-1) \frac{\mu}{\text{Re}} \frac{vd}{\mu^2} = -\frac{\text{Re}}{\text{Re}} = -1$$

$$\frac{d}{\text{Re}} \frac{\delta \text{Re}}{\delta d} = \frac{d}{\text{Re}} \frac{v}{\mu} = \frac{\text{Re}}{\text{Re}} = 1$$

Substituindo na Equação A.1, obtém-se

$$u_{\text{Re}} = \pm \left\{ \left[ \frac{v}{\text{Re}} \frac{\delta \text{Re}}{\delta v} u_v \right]^2 + \left[ \frac{\mu}{\text{Re}} \frac{\delta \text{Re}}{\delta \mu} u_\mu \right]^2 + \left[ \frac{d}{\text{Re}} \frac{\delta \text{Re}}{\delta d} u_d \right]^2 \right\}^{1/2}$$

$$u_{\text{Re}} = \pm 0,03$$

Então, a incerteza associada à medição do número de Reynolds utilizado neste trabalho possui um valor de  $\pm 0,03$  ou  $\pm 3\%$ .

## A.2. Incerteza da velocidade:

A incerteza da determinação de cada posição de cada ponto inserido no *software* Tracker está relacionada com a resolução dos vídeos. Para cada frame, tem-se uma incerteza associada ao tempo de  $u_t = 0,33s$  e para cada pixel posicionado, tem-se as seguintes incertezas associadas às posições: ( $u_x = 0,015mm$ ,  $u_y = 0,016mm$  e  $u_z = 0,023mm$ ). Contudo, há uma dificuldade no posicionamento ou marcação dos pontos nos vídeos. Devido a este fato, serão assumidos valores de até 5 vezes estas incertezas, ou seja,  $u_x = 5(0,015mm) = 0,075mm$ ,  $u_y = 5(0,016mm) = 0,08mm$  e  $u_z = 5(0,023mm) = 0,115mm$ .

Assim as incertezas na determinação das componentes de velocidade de escoamento são de  $u_{v_x} = 0,225mm/s$ ,  $u_{v_y} = 0,242mm/s$  e  $u_{v_z} = 0,345mm/s$ . Para calcular a incerteza da resultante, parte-se da equação A.3 e A.4.

$$\bar{V} = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2} \quad (\text{A.3})$$

$$u_{\bar{V}} = \pm \left\{ \left[ \frac{\delta \bar{V}}{\delta V_x} u_{v_x} \right]^2 + \left[ \frac{\delta \bar{V}}{\delta V_y} u_{v_y} \right]^2 + \left[ \frac{\delta \bar{V}}{\delta V_z} u_{v_z} \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (\text{A.4})$$

Na determinação da velocidade media do escoamento dentro do direcionador a incerteza para a velocidade é de  $0,477 mm/s$ .



APÊNDICE B – CANAL HIDRÁULICO

A Fig. B.1 ilustra a planta do projeto do canal hidráulico construído no presente trabalho.

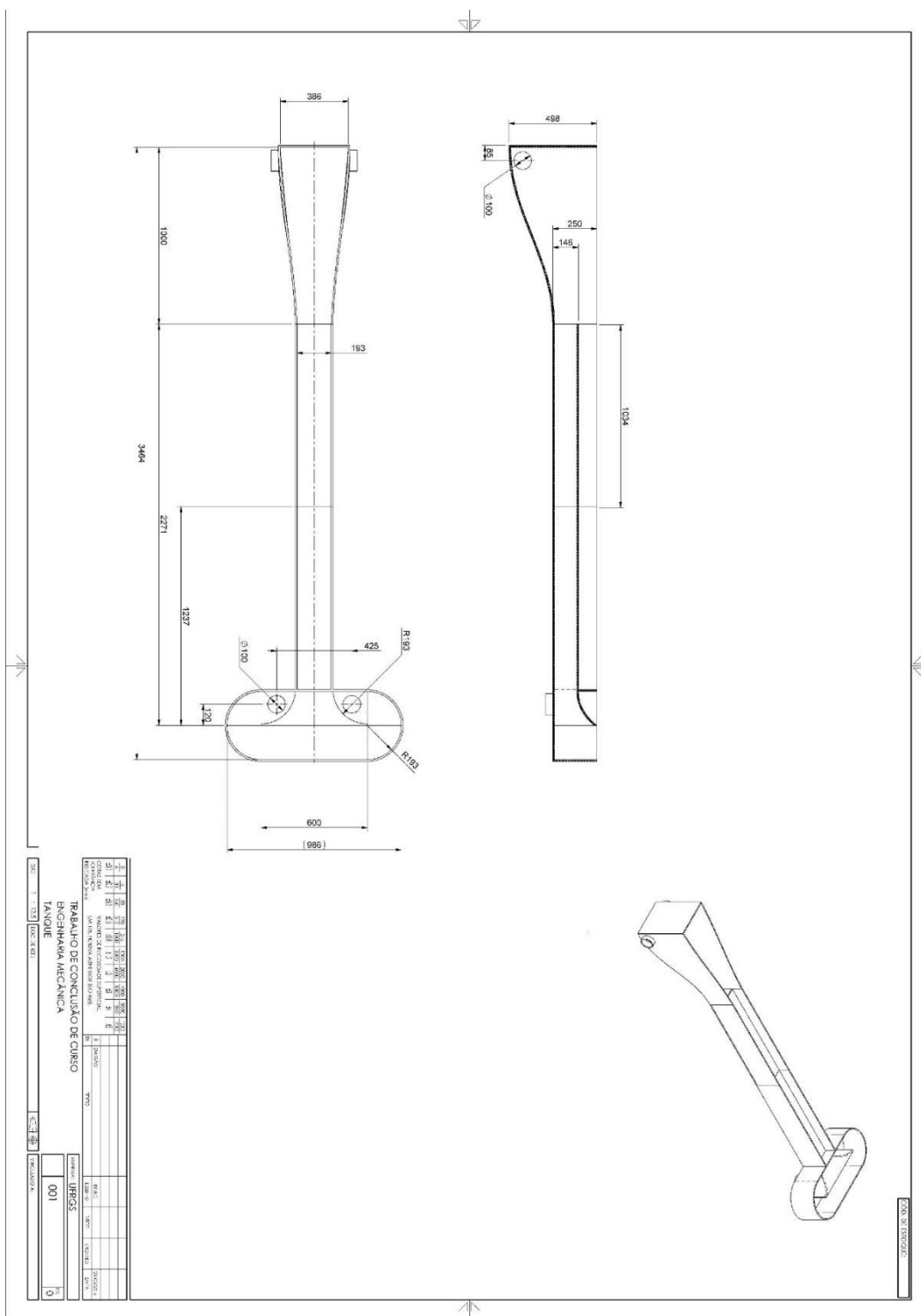


Figura B.1 – Desenho técnico do canal hidráulico.

## APÊNDICE C – BANCADA

Na Figura C.1 é mostrada uma foto da bancada usada neste trabalho.



Figura C.1 – Bancada montada para a realização do experimento