



**VISUALIZAÇÃO EXPERIMENTAL DO ESCOAMENTO EM TURBINAS
HYDROCINÉTICAS DE EIXO HORIZONTAL**

Christian Carlos Araújo Moura

**Orientador: Antônio Brasil C. Pinho Júnior
Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas**

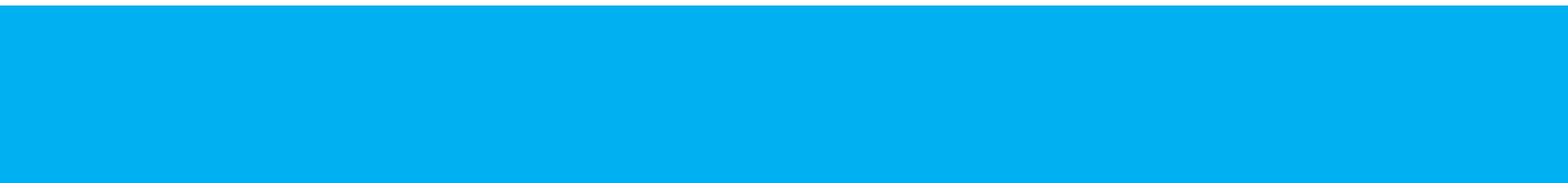
Publicação: ENM-DM 296/2018

Brasília-DF: AGOSTO/2018

Universidade de Brasília

Faculdade de Tecnologia

Departamento de Engenharia Mecânica



**VISUALIZAÇÃO EXPERIMENTAL DO ESCOAMENTO EM TURBINAS
HYDROCINÉTICAS DE EIXO HORIZONTAL**

Christian Carlos Araújo Moura

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
MECÂNICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE
DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE *MESTRE EM CIÊNCIAS
MECÂNICAS*.**

Aprovada por:

Antônio Brasil C. Pinho Júnior, Prof. Dr., UnB

Taygoara Felamingo de Oliveira, Prof. Dr., UnB

Cláudio José Cavalcante Blanco, Prof. Dr., UFPA

BRASÍLIA – DF, AGOSTO 2018.

FICHA CATALOGRÁFICA

Christian Carlos Araújo Moura

VISUALIZAÇÃO EXPERIMENTAL DO ESCOAMENTO EM TURBINAS HYDROCINÉTICAS DE EIXO HORIZONTAL / Christian Carlos Araújo Moura. 97 p.: il. (algumas color.); 30 cm.

Orientador: Antônio Brasil C. Pinho Júnior

Dissertação (mestrado) – Universidade de Brasília – UnB

Faculdade de Tecnologia

Programa de Pós-Graduação em Ciências Mecânicas, 2018.

1. Vorticidade. 2. Técnicas de visualização de escoamento. I. Orientador. II.

Universidade de Brasília. III. Faculdade de Tecnologia. IV. Visualização experimental do escoamento em turbinas hidrocínéticas de eixo horizontal

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MOURA, C. C. A. (2018). VISUALIZAÇÃO EXPERIMENTAL DO ESCOAMENTO EM TURBINAS HYDROCINÉTICAS DE EIXO HORIZONTAL. Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas. Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade de Brasília, Brasília-DF. 97 págs.

CESSÃO DE DIREITOS

Autor: Christian Carlos Araújo Moura

Título da dissertação de mestrado: VISUALIZAÇÃO EXPERIMENTAL DO ESCOAMENTO EM TURBINAS HYDROCINÉTICAS DE EIXO HORIZONTAL.

Grau/Ano: Mestre/2018

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos.

Christian Carlos Araújo Moura

Brasília-DF, Brasil

christiamoura@hotmail.com

christianengmec@gmail.com

AGRADECIMENTOS

A busca pelo conhecimento nos remete a muitos desafios, e estes precisam ser suplantados, já que o apoio recebido de pessoas incríveis que convivem ao nosso lado é primordial para se almejar o sucesso.

Primeiramente agradeço a Deus, Todo Poderoso, e ao quanto é presente a Sua fidelidade em todo o tempo.

Agradeço muito o apoio e a paciência do meu orientador Antônio Brasil; por todo conhecimento repassado diante de sua sabedoria. Ao Professor Taygoara Felamingo por todos detalhes e discussões em prol do conhecimento.

Sou muito grato ao doutorando Rafael Mendes, pois possui ele uma enorme contribuição na minha vida de mestrando, até mesmo quando esteve no “controle” diante dos desafios encontrados; por ter se tornado, ao longo do tempo, um grande amigo.

Aos colegas Vinícius Brito, Marianela, Lucas, Wesley, João Gabriel, Ana Rafaela, Maurício Jesus, Sizelizio e ao professor Clodoaldo Valverde, por todas as conversas e todo o apoio; ao Felipe e o Eurípedes, pela colaboração operacional.

A todos os meus amigos, sou agradecido; em especial ao Igo Guarino, Ednilza, Tatiane, Thiaguinho e Washington, por todo apoio em Brasília.

Deixo meus agradecimentos aos compadres Danilo Moura, Ednilton Costa e Sammuel Henrique.

Seria difícil a luta pelo conhecimento sem o incentivo, apoio e controle emocional fornecido pelos os meus irmãos Ivo Araújo e Laércio Moura, também pela minha mãe, Francisca, e meu pai, Kaká, além de toda a família Arthur e Moura.

À minha namorada, Brena Talissa, sou muito agradecido: por toda paciência e delicadeza diante das dificuldades sentidas e vivenciadas ao longo do mestrado.

Resumo

Este trabalho tem como objetivo a visualização experimental do escoamento em turbinas de eixo horizontal do tipo hidrocínética para um modelo em escala de diâmetro de 230 mm. Modelo este em que se variou o quantitativo de pás, com ensaios para rotores de duas pás, três pás e quatro pás; ainda, foram verificadas as estruturas de escoamento, variando a velocidade do rotor da turbina. Os experimentos foram realizados no túnel de vento com seção de teste em medidas de 2x1x1 m, cuja velocidade de escoamento era de 5 m/s e número de Reynolds $Re = 7,9 \times 10^4$. Na metodologia, foram empregados dois mecanismos de visualização por fumaça (1. fio de fumaça; 2. Injeção direta por gerador de fumaça). Foram analisadas as propriedades qualitativas referentes ao escoamento na região percebida pela turbina, a partir da utilização de um sistema de controle do túnel de vento e do sistema de aquisição de imagens para posterior observação. Com os resultados obtidos, foram percebidas na esteira próxima, estruturas coerentes e passíveis de caracterização de vórtices de ponta de pá, estes muito bem definidos nos resultados obtidos por imagens a partir do arranjo experimental robusto.

Palavras-chave: visualização de escoamento, turbinas, método de fio de fumaça, método de injeção direta, estruturas coerentes, vórtices.

Abstract

The objective of this work is the experimental visualization of flow in turbines of horizontal axis from the hydrokinetic type for a model with a diameter scale of 230 mm. This model, which was varied the quantitative of blades, performed tests for rotors of two, three and four blades, and also verified the flow structures varying the rotor speed of the turbine. The experiments were carried out in the wind tunnel with a test section measuring 2x1x1 m, with flow velocity of 5 m/s and Reynolds's number $Re = 7,9 \times 10^4$; in the methodology two methods of visualization by smoke (smoke wire and direct injection by smoke generator) were used. The qualitative properties related to the flow in the region perceived by the turbine were analyzed using a wind tunnel control system and an image acquisition system for further observation. With the results obtained, a coherent structure was observed, capable of characterizing vortices of blade tip, these very well defined in the results obtained by images from the robust experimental arrangement.

Key-words: flow visualization. turbines. smoke wire method. direct injection method. coherent structures. vortices.

Lista de ilustrações

Figura 1.1 - Evolução da capacidade energética instalada (SIN 2014-2024).	14
Figura 1.2 - Turbinas eólicas de eixo horizontal.	15
Figura 1.3 - Turbina hidrocínética de eixo horizontal.....	15
Figura 1.4 - Turbina hidrocínética geração I.....	15
Figura 1.5 - Duas turbinas com visualização de fumaça..	16
Figura 2.1 - Tubo de corrente na região de influência da turbina.	22
Figura 2.2 - Formação da esteira a jusante do rotor com influência de ponta de pá.	24
Figura 2.3 - Visualização de fumaça em campo aberto e campo fechado	25
Figura 2.4 - Formação de vórtices em perfil aerodinâmico.....	26
Figura 3.1 - Injeção direta de fumaça em turbina de duas pás.....	30
Figura 4.1 - Variação da velocidade do obturador.....	33
Figura 5.1 - Dimensões do túnel de vento LEA-UnB.	34
Figura 5.2 - Foto do túnel de vento.	35
Figura 5.3 - Seção de teste do tunel de vento.....	36
Figura 5.4 - Turbina de quatro pás.....	37
Figura 5.5 - Turbina hidrocínética modelo em escala	38
Figura 5.6 - Turbina em tamanho real.....	34
Figura 5.7 - Foto da instalação de turbinas de tamanho real.....	39
Figura 5.8 - Turbinas instaladas.....	39
Figura 5.9 - Tubo de Pitot..	40
Figura 5.10 - Manômetro de coluna	40
Figura 5.11 - Computadores controladores do túnel de vento.....	41
Figura 5.12 - Esquema do método com gerador de fumaça.....	42
Figura 5.13 - Gerador de fumaça.....	43
Figura 5.14 - Haste de fumaça utilizada pelor gerador.....	44
Figura 5.15 - Compressor de ar	46
Figura 5.16 - Esquema do método de fio de fumaça.....	47
Figura 5.17 - Fonte de alimentação..	50
Figura 5.18 - Câmera <i>flir</i> utilizada nos ensaios	51
Figura 6.1 - Visualização inicial do escoamento para turbina de quatro pás	55
Figura 6.2 - Visualização inicial do escoamento para turbina de três pás	56
Figura 6.3 - Expansão da esteira com método de injeção direta com gerador de fumaça....	57
Figura 6.4 - Seção de teste com fio de fumaça na vertical.....	59
Figura 6.5 - Formação de vórtices de ponta de pá para turbina de quatro pás	62
Figura 6.6 - Formação de vórtices de ponta de pá para turbina de três pás.....	65-68
Figura 6.7 - Interação da pá e da nacele com fluxo para turbina de duas pás.....	69-70
Figura 6.8 - Visualização de escoamento para turbina de duas pás com vórtices	71-74
Figura 6.9 - Seção de teste com método de fio de fumaça na horizontal	75
Figura 6.10 - Turbina de quatro pás com método de fio de fumaça na horizontal	77
Figura 6.11 - Turbina de quatro pás com método de fio de fumaça na horizontal	77
Figura 6.12 - Visualização de escoamento turbina de quatro pás..	78
Figura 6.13 - Visualização para turbina de quatro pás com fio de fumaça na horizontal	79
Figura 6.14 - Turbina de três pás com fio de fumaça na horizontal	80
Figura 6.15 - Turbina de duas pás com fio de fumaça na horizontal	81
Figura 6.16 - Seção de teste com método de injeção direta.....	82
Figura 6.17 - Turbina de quatro pás com método de injeção direta.....	83
Figura 6.18 - Turbina de três pás com método de injeção direta.....	84-86

Figura 6.19 - Turbina de duas pás com método de injeção direta.....	87
Figura 6.20 - Duas turbinas com método de fio de fumaça.....	88
Figura 6.21 - Duas turbinas com método de fio de fumaça.....	89

Lista de tabelas

Tabela 5.1 - Características da turbina	37
Tabela 5.2 - Dados e condições de operação das turbinas em escala e em tamanho real. .	43
Tabela 5.3 - Características do gerador de fumaça.....	43
Tabela 5.4 - Características do polietileno glicol	48
Tabela 5.5 - Características do compressor de ar.....	45
Tabela 5.6 - Testes com fios para geração de fumaça	49
Tabela 5.7 - Características da caneta laser.....	50
Tabela 6.1 - Configurações experimentais dos resultados iniciais.	54
Tabela 6.2 - Configuração experimental para técnica fio de fumaça	48
Tabela 6.3 - Configuração experimental para técnica injeção direta com gerador	82

Lista de siglas e símbolos

Siglas

PDE - Plano Decenal de Expansão

HAWT - Turbinas Axiais de Eixo Horizontal

NACA - Comitê Consultivo Nacional da Aeronáutica

LSV - Visualização de Plano Laser

NREL - Laboratório Nacional de Energias Renováveis

CFD - Dinâmica dos Fluidos Computacional

PIV - Velocimetria por Imagens de Partículas

Re - Número de Reynolds

ABL - Camada Limite Atmosférica

EPI - Equipamento de Proteção Individual

MDF - Medium Density Fiberboard

PID - Proporcional-Integral-Derivativo

PNG - Portable Network Graphics

Símbolos

qps - quadros por segundos (qps)

fps - frame per second

W - Watts

mm - milímetro

s - segundo

HP - Horse Power

CV - Cavalo vapor

m - comprimento

P - potência máxima da turbina [W]

C_p - coeficiente de potência

A - área da secção transversal do rotor da turbina (m²)

ρ - densidade do fluido de trabalho

V - velocidade do fluido (m/s)

ω - rotação (rpm)

rpm - rotação por minuto

psi - pound force per square inch
°C - Temperatura em graus Celsius
min - minutos
ml - mililitros
L - litro
A - Ampere
LED - Diodo Emissor de Luz
g - grama
mPa.s – viscosidade dinâmica
y - eixo vertical
D - diâmetro do rotor
x - eixo horizontal
t₀ - tempo inicial
t - tempo posterior qualquer
z - terceiro eixo de posição

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1 Contextualização	13
1.2 Turbinas eólicas e hydrocinéticas de eixo horizontal.....	14
1.3 Revisão Bibliográfica.....	17
1.3 Objetivos	21
1.3.1 Objetivo geral	21
1.3.2 Objetivos específicos	21
2. AERODINÂMICA DE TURBINAS DE EIXO HORIZONTAL.....	22
2.1 Número de Reynolds	22
2.2 Esteira.....	22
2.3 Vórtices	25
2.4 Potência disponível extraída pela turbina.....	26
3. TÉCNICAS DE VISUALIZAÇÃO DE ESCOAMENTO	28
3.1 Técnica de visualização de escoamento por fumaça.....	28
3.1.1 Técnica de injeção direta de fumaça	28
3.1.2 Técnica de fio de fumaça	30
4. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE IMAGENS	32
4.1 Fotografia	32
4.1 Câmera	32
4.1.1 Velocidade do obturador.....	33
4.1.2 Quadros por segundo	33
5. METODOLOGIA	35
5.1 CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL.....	35
5.1.1 Túnel de vento	35
5.1.2 Turbina de eixo horizontal.....	37
5.1.3 Instrumentação	40
5.1.3.1 Medição de velocidade do escoamento no interior do túnel de vento	40
5.1.3.2 Sistema controlador do túnel de vento	41
5.1.4 Sistemas geradores de fumaça.....	42
5.1.4.1 Sistema de Injeção Direta	42
5.1.4.1.1 Gerador de fumaça.....	43

5.1.4.1.2 Haste de fumaça.....	44
5.1.4.1.3 Polietilenoglicol	45
5.1.4.1.4 Compressor	46
5.1.4.2 Sistema Fio de Fumaça	47
5.1.4.2.1 Determinação do líquido gerador de fumaça	48
5.1.4.2.2 Determinação do fio de fumaça	49
5.1.5 Sistema de iluminação e aquisição de imagens	50
5.1.5.1 Caneta laser	50
5.1.5.2 Câmera.....	51
5.1.5.3 Tratamento de imagens.....	51
5.1.5.4 <i>Software</i> para aquisição de imagens	52

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES53

6.2 Resultados iniciais 53

6.2.1 Resultados iniciais de visualização de escoamento com fio de fumaça	54
6.2.1.1 Resultado inicial para turbina de quatro pás.....	54
6.2.1.2 Resultado inicial com turbina de três pás.....	55

6.3 Resultados iniciais de visualização de escoamento com gerador de fumaça 56

6.3.1 Resultado inicial para turbina de três pás	56
--	----

6.3 Resultados II 58

6.3.1 Resultados com método de fio de fumaça na vertical	58
6.3.1.1 Resultados para turbina de quatro pás	60
6.3.1.2 Resultados para turbina de três pás	63
6.3.1.3 Resultados para turbina de duas pás.....	68
6.3.2 Resultados com método de fio de fumaça na horizontal.....	75
6.3.2.1 Resultados para turbina de quatro pás	76
6.3.2.2 Resultados para turbina de três pás	80
6.3.2.3 Resultados para turbina de duas pás.....	80
6.3.3 Resultados com método de injeção direta com gerador de fumaça.....	81
6.3.3.1 Resultado para turbina de quatro pás	83
6.3.3.2 Resultado para turbina de três pás.....	84
6.3.3.3 Resultado para turbina de duas pás	86
6.3.4 Resultados para arranjo de duas turbinas com método de fio de fumaça	88

7. CONCLUSÕES90

REFERÊNCIAS.....92

APÊNDICE A – DEFINIÇÃO DO LÍQUIDO GERADOR DE FUMAÇA..96

ANEXO A – PROPRIEDADES DO ÓLEO INDUSTRIAL *SINGER*98

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A utilização de energia elétrica é fundamental para o crescimento econômico e a melhoria na qualidade de vida das pessoas, mas as consequências do consumo de energia em larga escala proveniente dos combustíveis fósseis são perceptíveis e provocam efeitos nocivos ao meio ambiente. Em virtude disso, é necessário o crescimento da produção de energia renovável, com intuito de reduzir os impactos provocados pelos combustíveis não renováveis e, ainda, aumentar a oferta de energia por meio de tecnologias renováveis.

O déficit de energia não produzida no país, associado ao baixo volume hídrico de reservas e barragens para produção de energia elétrica, reflete-se na utilização de usinas termelétricas provenientes de energias não renováveis. Novos conceitos e conhecimentos para melhorar a eficiência da produção de energia foram desenvolvidos ao longo dos anos.

Para isso, medidas necessárias devem ser tomadas, dentre estas: as fontes de energias renováveis representam extrema relevância para meio ambiente e ainda não prejudicam as próximas gerações, tais como energia solar, eólica e hidrocínética (BEHROUZI; MAIMUN; NAKISA, 2014).

O Brasil apresenta problemas de fornecimento de energia elétrica. Em regiões de difícil acesso, por exemplo, muitas comunidades isoladas dos grandes centros e moradores ribeirinhos não têm acesso à energia elétrica, pois o alto custo dos projetos e linhas de transmissões extensas tornam-nas inviáveis e, com isso, é necessária uma fonte de energia para suprir as necessidades dos ribeirinhos e atividades rurais de comunidades isoladas. Portanto, as turbinas hidrocínéticas representam uma fonte alternativa e viável ao desenvolvimento da matriz energética brasileira.

A energia eólica representou um aumento significativo no quesito produção energética nos últimos anos. De acordo com Ministério de Minas e Energia, no ano de 2016 a produção de energia eólica atingiu 5,3% da matriz energética brasileira. A energia eólica, que consiste basicamente na conversão da energia cinética do vento em energia elétrica, contribui para o aumento significativo da matriz renovável.

A figura 1.1 mostra a evolução da capacidade instalada (SIN 2014-2024). Com base no gráfico, é notável o crescimento das fontes levantadas, logo, o consumo energético cresce com aumento da população e com crescimento econômico, mas o Plano Decenal de Expansão (PDE 2024) prioriza a participação das fontes renováveis para contribuir com aumento da produção de energia.

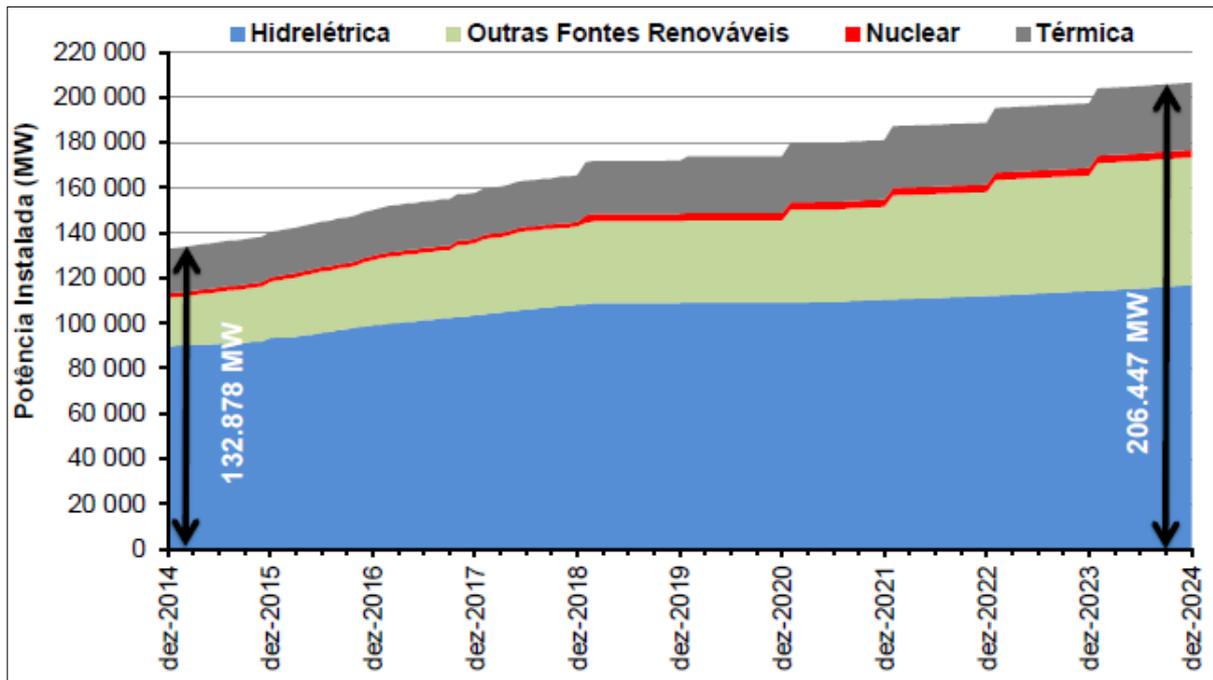


Figura 1.1 - Evolução da capacidade energética instalada (SIN 2014-2024).
Fonte: (EPE, 2015)

1.2 Turbinas eólicas e hidrocínéticas de eixo horizontal

A energia produzida por turbinas hidrocínéticas usam turbinas submersas nos fluxos de água de rios, córregos ou marés. As turbinas do tipo eólica são capazes de converter energia do vento em eletricidade (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS, 2009).

As Turbinas Axiais de Eixo Horizontal (HAWT, do inglês Horizontal Axis Wind Turbines) possui o eixo de rotação paralelo ao fluxo do fluido, logo, são mais utilizadas que a de eixo vertical, e a justificativa é por apresentar características construtivas mais simples e com maior eficiência. A figura 2 mostra turbinas eólicas de eixo horizontal, já a figura 3, turbinas hidrocínéticas de eixo horizontal.



Figura 1.1 - Turbinas eólicas de eixo horizontal.
Fonte: EMEOP (2017).

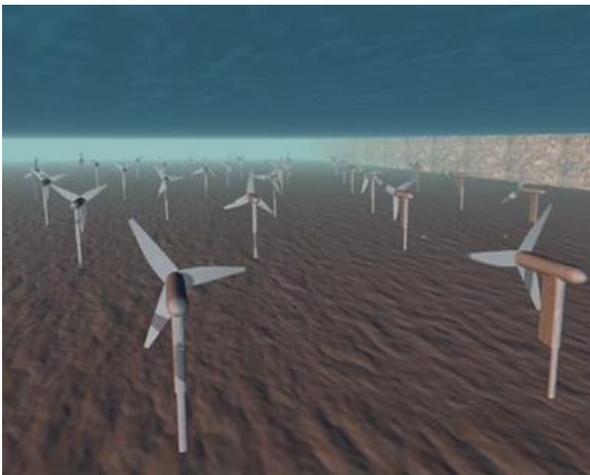


Figura 1.3 - Turbina hidrocínética de eixo horizontal. Fonte: SOLAR FEEDS (2017).



Figura 1.4 - Turbina hidrocínética geração I. Fonte: BRASIL Jr.(2009).

O desenvolvimento de turbinas hidrocínéticas no Brasil iniciou-se na década de 80, com poucas aplicações, representando uma fonte de energia alternativa.

A Universidade de Brasília (UnB) é uma das pioneiras no desenvolvimento de turbinas hidrocínéticas. No ano de 1995, foi instalada uma turbina geração I, no município de Correntina, na Bahia, para fornecimento de energia para unidade de saúde. Lá, a turbina operou por um período de 10 anos (BRASIL Jr.; POSSAMAI; GONÇALVES, 2009).

Com avanço tecnológico, e de novos conceitos e mudanças de projetos atribuídos a novas gerações das turbinas hidrocínéticas, foi possível desenvolver turbinas hidrocínética de geração II e de geração III, com objetivo de melhorar a eficiência e a estrutura.

Pesquisas realizadas por empresas e por universidades contribuíram de forma significativa ao desenvolvimento de novas tecnologias e melhorias dos sistemas para produção de energia renovável. A busca por soluções energéticas e tecnologias alternativas fomentou a pesquisa e o conhecimento com o intuito de aumentar a eficiência e a produção energética.

O estudo experimental de turbinas hidrocínéticas de eixo horizontal foi baseado no estudo de turbinas eólicas de eixo horizontal, basicamente; os experimentos foram realizados em um túnel de vento. A busca pelo conhecimento na compreensão dos efeitos aerodinâmicos, confiabilidade estrutural e a capacidade de conversão de energia de dispositivos hidrocínéticos estão diretamente relacionados à eficiência da turbina (KANG et al., 2012).

Este trabalho apresenta um estudo aerodinâmico de turbinas de eixo horizontal com aplicação hidrocínética com utilização do método de visualização de fumaça.

Um exemplo de trabalho com método de visualização de fumaça foi realizado por Yen et al. (2017), com turbinas de eixo horizontal, dispostas em diferentes arranjos: apenas uma turbina, duas turbinas lado a lado e duas turbinas uma atrás da outra, a fim de estudar as características de velocidade, camada limite e a formação de vórtices – utilizando a técnica de visualização de fumaça em túnel de vento. A figura 1.4 mostra a influência de uma turbina em relação a outra.

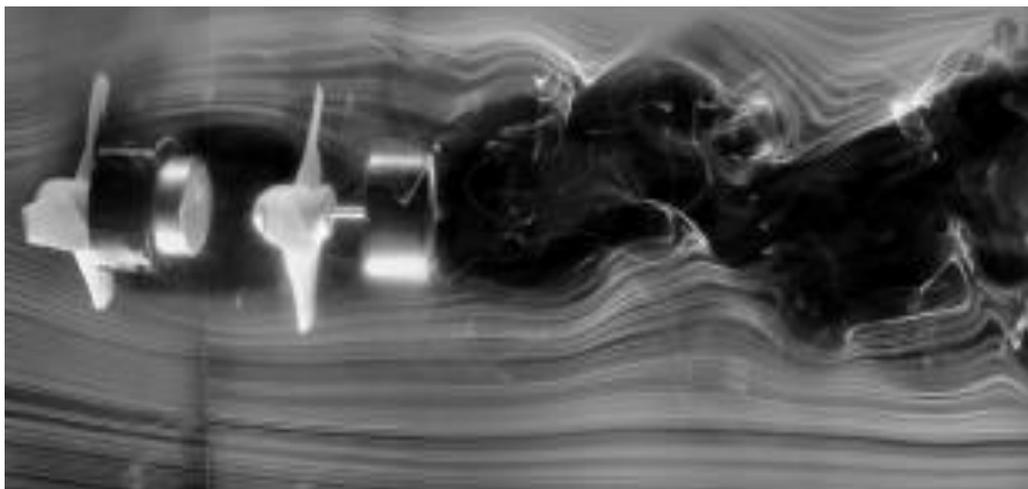


Figura 1.6 - Duas turbinas com visualização de fumaça.
Fonte: YEN et al., (2016, p. 7).

1.3 Revisão Bibliográfica

Existem muitos trabalhos experimentais, e também de natureza numérica, que objetivam a determinação das propriedades qualitativas e quantitativas do escoamento em perfis aerodinâmicos, turbinas, aeronaves, veículos e entre outros, com objetivo de investigar os fenômenos de escoamento e verificar as influências nos componentes que estão sujeitos ao trabalho dos fluidos.

Leonardo da Vinci (1459-1519) contribuiu para visualização do escoamento ao representar, por meio de esboços, o movimento dos fluidos (esteira, vórtices, ondas de superfície). Já Osborne Reynolds (1842-1919), estudou escoamento laminar e turbulento.

Ludwig Prandtl (1875-1953) foi outro estudioso do escoamento e estabeleceu o conceito de *camada limite*. Theodor von Kármán (1881-1963), com a visualização do escoamento, conseguiu observar a esteira de vórtices a jusante de cilindros.

Em Viena (1893), o trabalho de Ludwig Mach, pois observou-se, com seção de teste reduzida e utilizando um ventilador centrifugo que produzia velocidade de fluxo de 10 m/s, o escoamento através da fumaça, quando ao passar por uma placa plana (MUELLER, 1983).

No ano de 1899, na França, E.J Marey dedicava-se a fotografar movimento do ar. Com base no trabalho de Mach, usou túnel de vento vertical com seção maior e fumaça produzida a partir da queima resíduos de madeira. Ele conseguira boas fotos com excelente fluxo.

Em 1911, o Laboratório de Física Nacional da Inglaterra realizou alguns experimentos com fumaça. Por volta de 1921, a Fábrica de Armas Navais dos EUA utilizou fumaça para observar fluxo de ar nos navios. No ano de 1933, K.W. Clark usou fumaça produzida a partir de cloreto de estanho para visualização do escoamento em várias asas.

O Comitê Consultivo Nacional da Aeronáutica (NACA), na década de 1930, construiu dois túneis de vento utilizando fumaça para demonstrações do escoamento. A partir dos anos de 1940, outras técnicas e melhorias nos equipamentos foram desenvolvidas. A.M Lippisch na Alemanha obteve muitas fotos com qualidade de visualização em torno de placas, cilindros e aerofólios e desenvolveu um sistema intermitente de fornecimento de fumaça.

David Hazen, no ano de 1950, na Universidade de Princeton, construiu um túnel de vento composto por uma seção de teste, ventilador, difusor e uma câmara de telas para laminação do fluido com o objetivo de visualizar o escoamento do ar com injeção de fumaça.

O trabalho elaborado por Brown e Roshko (1974) permitiu conhecer os escoamentos cisalhantes livres, contribuindo para o desenvolvimento de novas técnicas de investigação da turbulência nos fluidos.

Em 1977, Hunt et al. realizou um estudo cinemático dos fluxos em torno de obstáculos para a visualização de fluxo. Utilizou-se da técnica de Filme de Óleo, com objetivo de obter altas resoluções de linhas de escoamento.

No ano de 1980, Graziani et al. estudaram experimentalmente a transferência de calor de uma pá de turbina com análise do comportamento do fluido, indicando as variações de transferência de calor associadas às instabilidades e observações dos regimes de escoamento.

Van Dyke, em 1982, contribuiu à comunidade acadêmica com a edição de um livro possuidor de imagens num álbum denominado "*An Album Of Fluid Motion*", no qual apresenta imagens de visualizações de escoamento para vários tipos de componentes, variando as técnicas de visualização, velocidade do escoamento, tipos de escoamento e verificação dos fenômenos aerodinâmicos.

Um estudo experimental com respeito à formação de vórtices de um perfil (pá) de uma turbina com utilização de emissão de vapor de querosene, com fotografias transversais ao fluxo, a fim de qualificar e quantificar os fenômenos de escoamento (SONODA, 1985).

As técnicas de visualização de escoamento são métodos capazes de analisar experimentalmente a interação fluido-componente com utilização de técnicas e instrumentos. Os desenvolvimentos de novas técnicas nessa área são fundamentais no progresso da investigação do comportamento da mecânica dos fluidos (MERZKIRCH, 1987).

Em 1995, Wang et al. realizaram experimentos de visualização de fluxo de uma pá de turbina de alto desempenho, nos quais utilizaram-se de vários filetes de fumaça, plano de luz do tipo laser dispostas em várias seções transversais e câmeras para registro dos fenômenos de escoamento (vórtices ferradura, descolamento da camada limite).

No trabalho do Grant et al., em 1999, foi analisada uma esteira dinâmica de turbina eólica de eixo horizontal, verificando o comportamento dos vórtices a partir das pás da turbina com utilização da técnica de visualização de plano laser (LSV).

Corten G. e Veldkamp H. utilizaram uma técnica de visualização de fluxo denominada “*stall flag*” para identificar a separação de fluxo sobre as lâminas das turbinas eólicas relacionando-as com a potência (2001).

Outro trabalho relevante foi realizado em 2001 por Simms et al., no qual procederam com testes experimentais aerodinâmicos numa turbina eólica do Laboratório Nacional de Energias Renováveis (National Renewable Energy Laboratory - NREL), com intuito de investigar fenômenos aerodinâmicos, como: verificação da pressão na superfície das lâminas da turbina, visualização de fluxo de esteira e vórtices de ponta.

Em 2003, Vermeer et al. estudaram o fluxo através do rotor de uma turbina eólica de eixo horizontal e, ainda, cita no seu trabalho as técnicas utilizadas, como visualização de fumaça, tufo, dinâmica dos fluidos computacionais (CFD) e alguns trabalhos referentes ao estudo aerodinâmico de turbinas. Além do ensaio experimental realizado, que visava a verificar a influência da esteira sobre a turbina. Por fim, os efeitos aerodinâmicos foram estudados numericamente e foram realizadas simulações através de um *software* CFD.

Ristic (2005) publicou um artigo referente aos métodos ópticos de visualização: sombra, *schlieren* e interferometria holográfica para visualização de fluxo em túnel de vento. O artigo demonstra os três métodos ópticos experimentais realizados no túnel de vento do MTI (Instituto Técnico Militar Belgrade) e apresenta as características de cada método utilizado na busca das propriedades qualitativas e quantitativas com relação ao escoamento.

Em 2007, Ristic publicou um outro artigo referente às técnicas de visualização de fluxo (não ópticos) mais utilizadas em componentes aerodinâmicos, para túnel de vento e túnel de água, tais como: injeção direta (fumaça e corante), bolhas de gás e hidrogênio, visualização por tufo, óleo e tintas sensíveis a pressão.

Yan Li e Tagawa (2010) utilizaram um modelo de turbina de eixo vertical (SB-VAWT) em seus experimentos, com a utilização da técnica de fio de fumaça para visualização das características do fluxo variando com ângulo do rotor da turbina. Além disso, realizaram cálculos numéricos para efeito de comparação com o experimental.

O trabalho experimental e numérico realizado por Chamorro e Porté-Agel (2010) buscou estudar uma turbina eólica de eixo horizontal em um túnel de vento, designando as características de turbulência e também com medições de velocidades e temperatura para determinar velocidade média, a intensidade de turbulência e esteiras aerodinâmicas. No ano seguinte, novamente eles realizaram experimentos no túnel de vento para analisar os efeitos da camada limite com várias turbinas, formando um parque eólico, no qual foram verificados os efeitos da turbulência sobre o desempenho das turbinas e os vórtices formados, e observados, ainda, o fluxo, a intensidade de turbulência, os vórtices dependem do modelo de parque eólico e também a disposição das turbinas entre si.

Singh et al. (2011) estudaram um perfil aerodinâmico, com aplicação em turbinas eólicas em um túnel de vento com variação do número de Reynolds, e obtiveram alguns resultados provenientes desse estudo experimental (arrasto, elevação, distribuição de pressão). Além disso, realizarem uma análise CFD (Dinâmica dos Fluidos Computacional), estudo por PIV (Velocimetria por Imagens de Partículas) e, por fim, visualização do fluxo por fumaça.

O estudo dos fenômenos aerodinâmicos que ocorrem em estruturas de rotor, como as hélices, turbinas eólicas e hidrocinéticas são importantes em várias aplicações da engenharia, pois há uma relação direta entre as vibrações, os ruídos, a estrutura e o desempenho.

Alguns modelos teóricos e experimentais avançados foram desenvolvidos quanto à complexidade do fluxo, para resolver alguns fenômenos aerodinâmicos, porém, a revisão feita por Felli et al. (2011) mostra alguns problemas e uma série de desafios em aberto, como: instabilidade na transição da esteira aerodinâmica em um rotor e a dinâmica dos vórtices.

Vários experimentos foram realizados por McTavish et al. (2013) com estudo dos efeitos da variação do número de Reynolds na expansão da esteira aerodinâmica a jusante do rotor de uma turbina eólica de eixo horizontal em um canal de água. Na mesma linha de interesse, Hans et al. (2005) realizaram testes em túnel de vento com uma turbina de duas lâminas com método de injeção de fumaça a montante do rotor para investigação dos vórtices.

Em 2017, Leweke et al. realizaram estudos numéricos e experimentais para verificação das instabilidades de vórtices em turbina de eixo horizontal, com a utilização de um canal de água com corante para visualização experimental.

Yen et al. (2017) estudaram os efeitos aerodinâmicos caracterizados por injeção de fumaça com diferentes configurações da posição de turbinas de eixo horizontal, variando o número de Reynolds. Utilizaram turbinas dispostas em dois tipos de configurações: uma atrás da outra e dispostas lado a lado. O comportamento do fluido com injeção de fumaça foi observado em diferentes partes das turbinas, e também verificou-se a influência de uma em relação a outra, indicando os fenômenos qualitativamente a partir do método de visualização de fumaça.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo o estudo experimental da visualização do escoamento de turbinas de eixo horizontal, com utilização de túnel de vento e aplicação de metodologias com injeção de fumaça.

1.3.2 Objetivos específicos

- Visualização experimental de turbinas de eixo horizontal;
- Localizar a melhor posição da turbina no túnel de vento para se estudar os fenômenos de escoamento;
- Aplicar e comparar as metodologias de visualização de escoamento;
- Visualizar o escoamento e caracterizar propriedades qualitativas;
- Identificar e conhecer os fenômenos de escoamento que influenciam na aerodinâmica das turbinas;
- Analisar a esteira próxima a jusante da turbina.

2. AERODINÂMICA DE TURBINAS DE EIXO HORIZONTAL

A busca pelo conhecimento dos fenômenos aerodinâmicos vem crescendo ao longo dos últimos anos, desde pesquisas científicas até centros de pesquisas de empresas visando melhores produtos e uma eficiência capaz de satisfazer a necessidade de energia do país. Tudo isso com intuito de diminuir os custos operacionais e, ainda, contribuir com a configuração energética limpa.

2.1 Número de Reynolds

Com surgimento de novos sistemas de engenharia, o estudo em escala reduzida, como turbinas eólicas e hidrocinéticas, aumentou o interesse pela aerodinâmica com valores de Reynolds baixos. Estes sistemas com escalas menores dependem de perfis que trabalhem com Reynolds relativamente baixos, de $2000 < Re < 500000$ (KIRK, 2017).

2.2 Esteira

Na medida que o escoamento passa pela turbina, a esteira é formada em uma região a jusante do rotor que apresenta uma redução da velocidade do escoamento e uma queda de pressão. O tubo de corrente ilustrado na figura 2.1 demonstra uma região de influência da turbina.

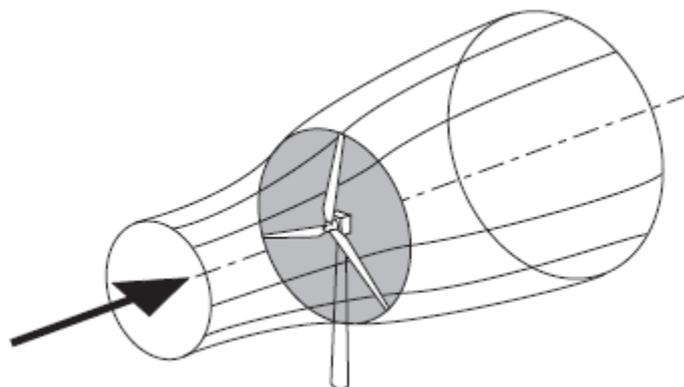


Figura 2.1 - Tubo de corrente na região de influência da turbina.

(BURTON et al., pg. 42, 2001).

A figura 2.1 mostra a expansão da esteira, a partir da passagem do fluido pelo rotor.

A esteira é uma estrutura formada a partir da energia extraída do escoamento pelas lâminas da turbina, na qual origina uma região com escoamento perturbado a jusante do rotor. (CHAMORRO, PORTE-AGEL, 2009).

Uma das consequências é a perda de energia da turbina, causada pelo déficit da velocidade quando o fluido passa pela turbina. Ao mesmo tempo, em um parque hidrocínético ou eólico, deve-se considerar a influência de uma turbina em relação a outra, pois os níveis de turbulência formados por uma podem afetar o fluxo em outras turbinas.

O conhecimento das propriedades turbulentas com intuito de aumentar a produção de energia da turbina e, por conseguinte, maximizar a vida útil estrutural reflete a busca por novos estudos.

Na figura 2.2, ao passo que o fluido fica mais próximo da turbina, a pressão aumenta e a velocidade diminui. Mas, quando o fluido passa pela turbina, a pressão diminui rapidamente (GOMES-ELVIRA et al.). O escoamento atrás da turbina é dividido em 1) esteira próxima e 2) esteira distante.

A esteira próxima encontra-se imediatamente atrás da turbina e pode prolongar em até três vezes o diâmetro a jusante da turbina. A esteira distante ocorre logo após a região de transição, esta que acontece de dois a cinco vezes o diâmetro do rotor. A esteira distante pode se estender até a sua extinção ou à presença de outra turbina. As turbinas de eixo horizontal, além de gerarem turbulência no fluxo, nelas podem também ocorrer vórtices provenientes de ponta de pá da turbina; a figura 2.2 mostra esquema dessa formação de vórtices.

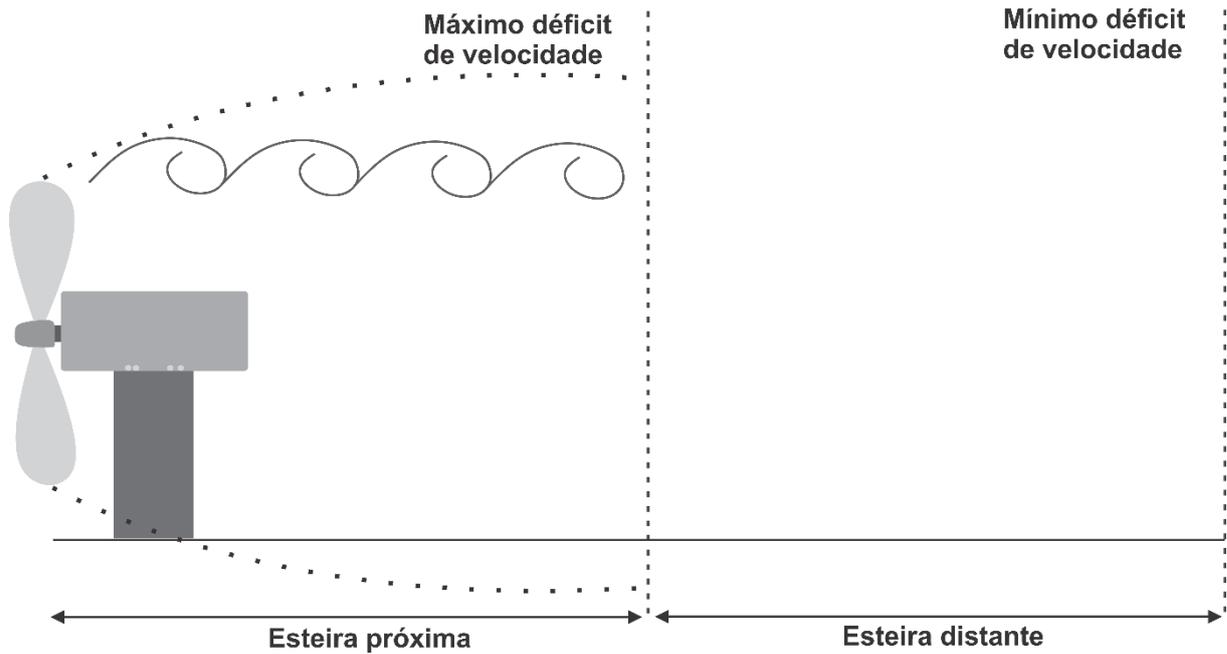


Figura 2.2: Formação da esteira a jusante do rotor, com influência da ponta da pá da turbina.

Vermeer et al., 2003 demonstraram alguns resultados em que as maiores cargas dinâmicas ocorrem quando as turbinas estão próximas ou inseridas na esteira de outra, ou seja, as cargas são menores quando as turbinas estão em linha.

As dimensões da turbina para trabalhar dentro do túnel de vento devem ser suficientemente pequenas para evitar o efeito de bloqueio do túnel de vento.

Neustadter e Spera (1985), concluíram que houve uma redução de 10% na potência de três turbinas distantes em até sete vezes do diâmetro do rotor.

As turbinas eólicas operam na camada limite atmosférica, que vem do inglês ABL (*Atmospheric Boundary Layer*), por apresentarem um sistema complexo devido a diversas variações (temperatura, condições climáticas, local) que influenciam na produção dos ventos, é necessário um túnel com características controladas para estudo do escoamento. Através da visualização por fumaça, a figura 2.3a mostra a instabilidade gerada por uma turbina no campo e a figura 2.3b apresenta uma turbina instalada dentro do túnel de vento com condições controladas.

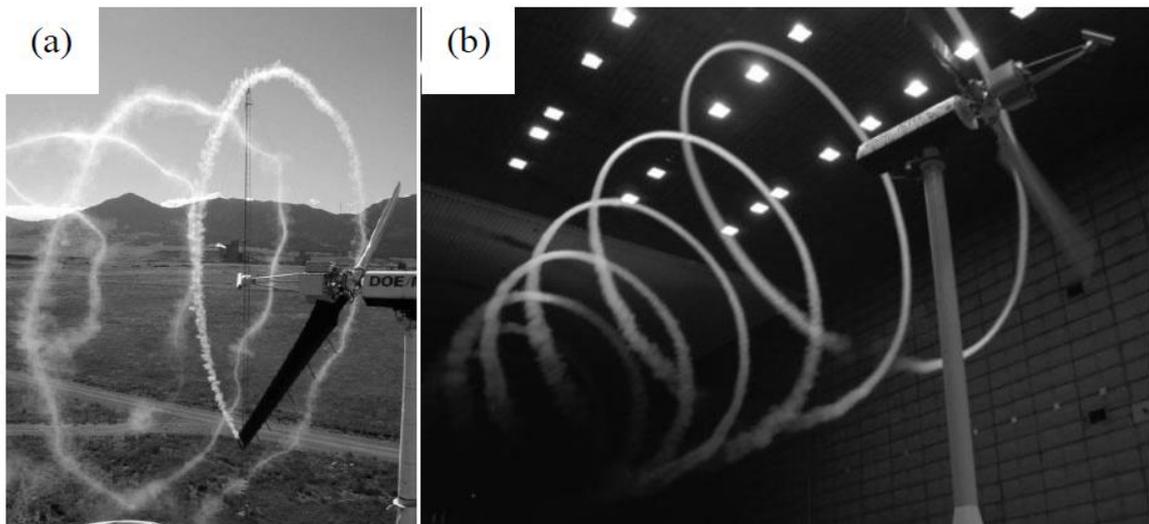


Figura 2.3: a – Visualização de fumaça aplicada a uma turbina em campo aberto. b – Visualização de fumaça aplicada a uma turbina em túnel de vento. (SCHERECK, 2002).

A figura 2.3b mostra uma turbina de eixo horizontal da *Grumman Corp.* em escala real (10m de diâmetro), no Laboratório Nacional de Energia Renovável (NREL), no túnel de vento da NASA com seção de teste de 24 m x 36 m. Nota-se a esteira helicoidal formada a partir das pás da turbina, com a utilização do método de Visualização por Fumaça (WHITE, 2007).

O desempenho aerodinâmico para conversão de energia cinética (turbinas eólicas e hidrocínéticas) foi influenciado pela esteira formada a jusante do rotor e ainda por vórtices de ponta de pá.

Sorensen (2011) atribui algumas perdas de eficiência da turbina à esteira, arrasto, desprendimento de camada limite e outras condições inerentes a instabilidade do fluxo.

2.3 Vórtices

De forma geral, os vórtices são definidos como fenômenos instáveis relacionado à rotação do fluido em torno de uma região central (JIANG, 2005). Porém, segundo Robinson (1991), os vórtices são estruturas que se apresentam em linhas de corrente instantâneas mapeadas em um plano ao núcleo do vórtice, no qual demonstram um padrão circular (espiral), quando vistas de um determinado referencial.

Os vórtices gerados por turbinas eólicas, hidrocínéticas e até mesmo rotores de helicópteros influenciam diretamente no desempenho e potência, gera vibrações, e ainda problemas de ruído e estruturais, e estes fenômenos precisam ser investigados com intenção de reduzir instabilidades das máquinas.

A figura 2.4 ilustra que na região de esteira turbulenta ocorre a formação de vórtices em um perfil aerodinâmico, o mesmo ocorre em turbinas hidrocínéticas na ponta de pá, mas isso ainda é um dos grandes desafios ao caracterizar precisamente os fenômenos turbulentos.

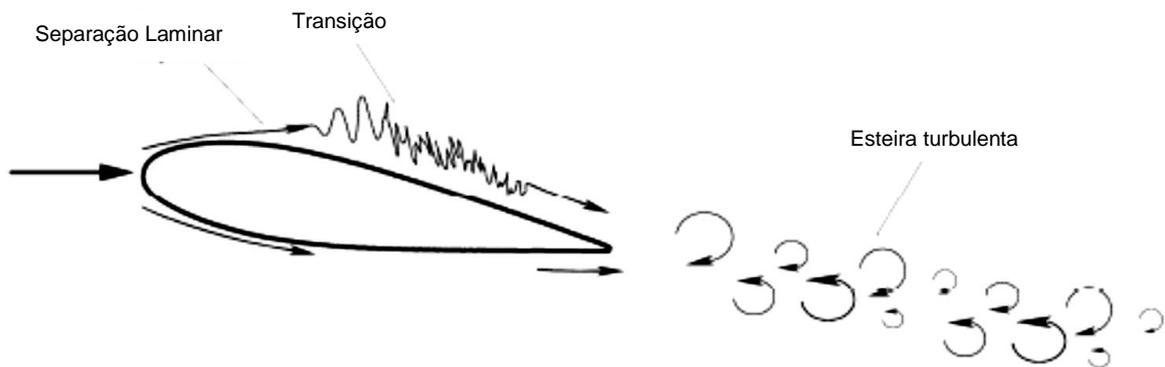


Figura 2.4 - Formação de vórtices em um perfil aerodinâmico

2.4 Potência disponível extraída pela turbina

A potência de saída, P , de uma turbina de eixo horizontal, de acordo com Burton et al. (2001) é expressa pela equação clássica:

$$P = \frac{1}{2} C_p A \rho V^3$$

Onde:

- P é a potência máxima que a turbina pode disponibilizar [W];
- C_p é coeficiente de potência;
- A é a área da secção transversal do rotor da turbina (m²);
- ρ é a massa específica (kg/m³);
- V é a velocidade do fluido (m/s)

O C_p é o coeficiente de potência de *Betz*, cuja potência é proveniente do trabalho realizado pela força exercida pelo fluido (ar para eólica e água para hidrocínética) na área varrida pela hélice de uma turbina, por unidade de tempo sobre

a potência do fluxo antes da hélice. *Betz* determinou valor máximo C_p de $16/27$ de uma turbina, denominado de *limite de Betz*.

De acordo com Glauert (1935), os estudiosos Rankine em 1865 e R. Froude em 1889 formularam a teoria do Disco Atuador para determinação do comportamento de uma turbina eólica. A teoria consiste na extração de energia em turbinas a partir do vento, produzindo uma diminuição da pressão logo após o fluido passar pela área abrangida pelo rotor.

A pesquisa aerodinâmica com turbinas de eixo horizontal tem contribuído para obtenção de energia de forma eficiente e alternativa. As regras gerais de engenharia têm uma aplicabilidade limitada, com isso é fundamental analisar caso a caso. Essa é uma das razões pelas quais a pesquisa aerodinâmica mundial sobre a energia proveniente de turbinas hidrocínéticas e eólicas mostra uma mudança para uma abordagem mais fundamental.

As técnicas de visualização de fumaça se destacam como uma das principais ferramentas de análise de escoamento por traçar o comportamento real da máquina e, assim, verificar os fenômenos inerentes ao dispositivo imerso no fluido, tanto qualitativo, quanto quantitativo.

3. TÉCNICAS DE VISUALIZAÇÃO DE ESCOAMENTO

Existem vários tipos de técnicas de visualização de escoamento, algumas com intuito de obter resultados qualitativos e outras quantitativos, ou ambos. A visualização do escoamento através de fumaça foi desenvolvida há muitos anos e, ao passar do tempo, melhorias nas técnicas existentes e novas metodologias foram surgindo. Atualmente, técnicas avançadas como a Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV, do inglês *Particle Image Velocimetry*) vem sendo utilizada. Esse método possibilita a medição do campo de velocidade a partir de partículas traçadoras e processos de correlação de imagens, porém, a técnica por fumaça não perdeu utilização, pelo contrário, novas metodologias surgiram, a fim de aprimorá-la.

3.1 Técnica de visualização de escoamento por fumaça

A visualização de escoamento por fumaça é uma das técnicas mais antigas e uma das mais utilizadas para verificação do comportamento do fluido.

A análise dos fenômenos dos fluidos por meio da visualização por fumaça continua sendo uma mistura de ciência e arte (YARUSEVYCH, p. 1592, 2009).

Cabe ao pesquisador ou profissional definir a melhor metodologia a partir dos instrumentos disponíveis para análise do escoamento. Neste trabalho foram utilizadas as técnicas por **injeção direta de fumaça** e **fio de fumaça**.

3.1.1 Técnica de injeção direta de fumaça

A técnica de visualização por injeção direta de fumaça considera o método cuja fumaça é produzida por um equipamento gerador de fumaça e, em seguida, é introduzida no interior da seção de teste do túnel a montante do modelo analisado. A técnica consiste em introduzir uma haste, tubo ou um pente (divisor), a fim de direcionar e laminar a fumaça e não interferir no fluxo em torno do modelo de teste. Para não haver interferência no fluxo livre na seção de teste, é necessário que as partículas de fumaça injetada apresentem pequenos tamanhos para acompanhamento do fluxo. Nesse caso, é imprescindível a utilização de um óleo específico para a produção de fumaça.

A densidade em quantidade de partículas de fumaça é tão alta na injeção direta que as partículas únicas perdem sua caracterização na observação e, assim, nota-se um conjunto de partículas contínuas do fluido nítido – que são responsáveis pela formação da raia de fumaça ou linha de fumaça (MERZKIRCH, 1987).

O termo “fumaça”, apesar de remeter a um produto tóxico, as características devem apresentar propriedades que facilitem a sua utilização, como:

- Máximo possível neutro (depende do óleo ou sólido utilizado);
- Não tóxico;
- Baixas taxas de mistura com fluxo livre.

Em alguns experimentos utilizam substâncias capazes de produzir efeitos nocivos ao ambiente e à saúde do experimentalista, tais como: queima de madeira pouco umedecida e tetracloreto de titânio.

Ao longo dos anos, foram realizados experimentos com outros óleos e substâncias existentes, a fim de buscar uma melhor qualidade na fumaça quanto aos aspectos de visualização. Apesar de diminuir os efeitos nocivos com os novos tipos de óleos, foi recomendado a utilização de EPI's e, se possível, o descarte da fumaça ao sair do difusor para um ambiente externo de circulação de ar.

O polietileno glicol e a glicerina diluída em água são produtos bastantes disseminados nos atuais campos de pesquisa com visualização de fumaça. Outro produto à base de álcoois e glicerina que possuem aromas não são nocivos quando utilizados em suas condições normais.

A figura 3.1 mostra quatro vórtices de ponta de pá formados com utilização da injeção direta de fumaça a montante da turbina de duas pás com diâmetro de rotor de 0,20 metro, o experimento foi realizado na Universidade Técnica de Delft na Holanda (VEEMER, 2001).



Figura 3.1: Injeção direta de fumaça, nota-se duas revoluções de vórtices de ponta de pá com rotor de duas lâminas (Vermeer, 2001).

3.1.2 Técnica de fio de fumaça

A técnica Fio de Fumaça, do inglês *Smoke-wire*, no qual o fluxo do ar na seção de teste é visualizado por meio da evaporação de um líquido, capaz de gerar fumaça através de um fio fino aquecido eletricamente (YARUSEVYCH, 2009).

Raspet e Moore, no início da década de 1950, desenvolveram a técnica de fio de fumaça e melhoraram-na em 1960, com interesse de produzir fumaça com filamentos finos capazes de detalhar o comportamento do fluxo. A utilização e melhoria do método de visualização de escoamento por fio de fumaça foi proposta por Mueller (2000) com objetivo de produzir filamentos de fumaça mais discretos e com capacidade precisa de acompanhamento do fluxo, sem provocar interferência.

A utilização do fio de fumaça exige muita técnica para obtenção de bons resultados, muitos fatores podem interferir diretamente na produção da fumaça, tais como: tipo de óleo, tipo de fio metálico, fonte de energia elétrica mínima para geração da fumaça, condutividade térmica do fio metálico que interfere na transferência de calor do fio.

Yarusevych (2009) utilizou a técnica fio de fumaça em seus experimentos realizados em um perfil aerodinâmico com observação da evolução do escoamento de laminar para turbulento. Observa-se, ainda na figura 3.2, o desprendimento da camada limite.

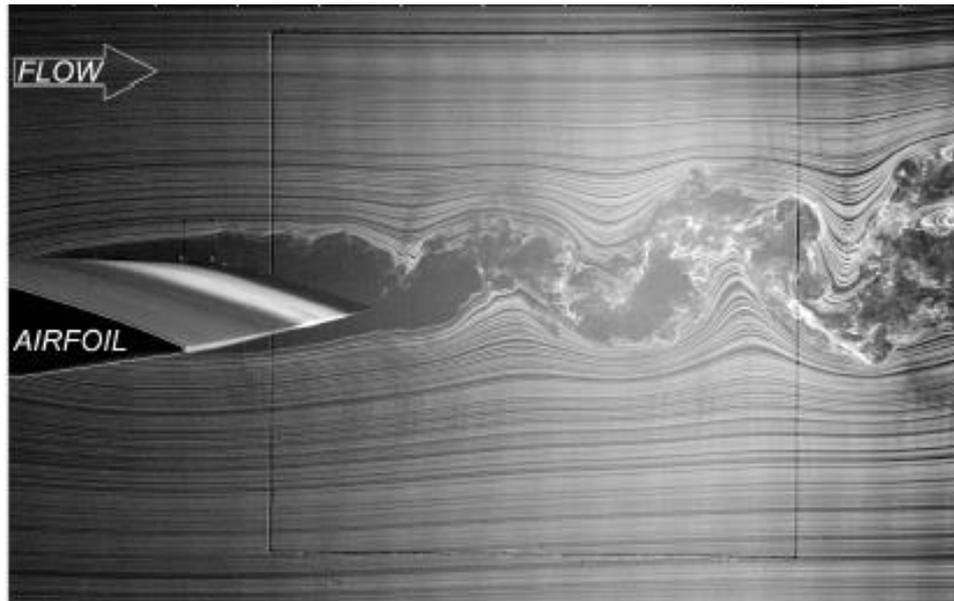


Fig. 3.2 – Perfil aerodinâmico com método de visualização por fio de fumaça. (Yarusevych, 2009).

Um das principais qualidades dessa técnica é que ao proceder adequadamente na configuração do arranjo experimental, a evaporação do fluido gerador de fumaça não provoca distúrbios no fluxo estudado. Outro ponto relevante é a relação custo x benefício, além de não onerar os custos com essa técnica, é possível obter resultados satisfatórios.

4. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE IMAGENS

A inter-relação de texto com a imagem contribui indiscutivelmente para a busca pelo conhecimento da ciência, e ambos estão em plena harmonia para traçar dados e resultados.

O uso de imagens não implica diretamente na formação de resultados, ou seja, é necessária uma investigação, alterações de variáveis, experimentos e investimento de tempo para conseguir o entendimento científico de um determinado fenômeno.

O sistema de aquisição de imagens é composto por vários componentes e propriedades que desempenham funções específicas com a finalidade de obter uma comunicação visual, pois utiliza-se de elementos visuais para indicar alguma representação (FLUSSER, 2002).

4.1 Fotógrafo

A fotografia depende imprescindivelmente do fotógrafo. Ela está ligada ao senso do fotógrafo e aos recursos técnicos oferecidos pela câmera e por outros componentes pertencentes ao sistema de aquisição (TAVARES, 2006).

O ato de fotografar um determinado objeto ou campo com intenção científica não é apenas disparar a câmera. Antes de mais nada, é necessária a percepção e experimentação.

A fotografia, por representar uma arte sensível, requer muita experimentação para obtenção de resultados positivos (GOLDSTEIN, 1996).

4.1 Câmera

A câmera é o principal elemento de aquisição de imagem, pois o aprimoramento da foto depende da máquina utilizada, de muitos fenômenos que ocorrem sem a percepção humana, por conta da brevidade ou velocidade do acontecimento. Dessa forma, a necessidade de se observar imagens é fundamental no campo da pesquisa, por existirem programas de computadores possuem recursos que auxiliam em tal tarefa, até mesmo no tratamento de imagens com objetivo de melhorar a qualidade da foto.

4.1.1 Velocidade do obturador

A velocidade do obturador em segundos (s) corresponde à luz processada durante um intervalo de tempo – ela tem como sinônimo “tempo de exposição”. Quanto aos aspectos para fotografar fenômenos muito rápidos e com qualidade de imagem, são necessários vários testes, logo, as características do ambiente interferem diretamente na fotografia. A figura 3.3 mostra os aspectos de influência da velocidade do obturador. Percebe-se que, para imagens adquiridas com velocidade de obturador baixo, é possível caracterizar bem o objeto, enquanto que com velocidades com valores altos a imagem tende a ficar “borrada”, o que dificulta a caracterização.

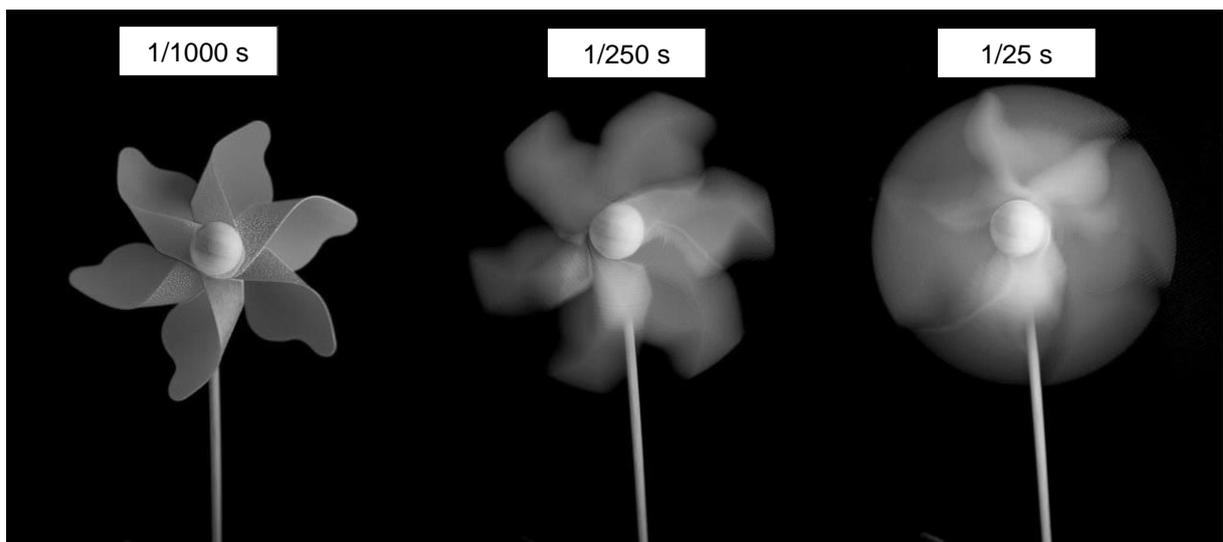


Figura 4.1 – Variação da velocidade de obturador da câmera. (Acesso em março de 2018. Fonte: <https://emania.com.br/erro-velocidade-do-obturador/>).

4.1.2 Quadros por segundo

Basicamente quadros por segundos (qps) ou fotogramas por segundo, em inglês *frames per second* (abreviado como fps) indica a quantidade de imagens que o dispositivo registra na aquisição da imagem por segundo. A gravação de vídeos de câmeras usuais hoje em dia, são utilizados de 24 a 240 qps ou fps.

A recomendação da maioria dos especialistas em fotografias e dos fabricantes de câmera recomendam no mínimo o dobro do valor do denominador da fração da

velocidade do obturador quando comparado com valor do qps, ou seja, ao utilizar uma câmera de 24 qps, seria necessário velocidade de obturador de 1/50 s.

5 METODOLOGIA

5.1 CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL

Os ensaios experimentais são capazes de demonstrar o comportamento e funcionamento da turbina. Para estudo das turbinas de eixo horizontal, são necessários instrumentos, equipamentos e técnicas desenvolvidas ao longo dos anos.

A técnica de visualização de fumaça é muito utilizada para estudo do fluxo, de modo que o fluxo é visualizado por meio da evaporação de um líquido que gera fumaça.

5.1.1 Túnel de vento

Neste trabalho foi utilizado um túnel de vento exaustor subsônico de circuito aberto para ensaios de visualização de escoamento de uma turbina de eixo horizontal. Os ensaios experimentais foram realizados no Laboratório de Energia e Ambiente do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília (UnB). O túnel de vento é constituído por um ventilador na saída do túnel acionado por um motor elétrico (*WEG W22*) de 10 HP e a sua velocidade é controlada por um inversor (*CFW-09 Vectrue Inverter*) de 10 A e 3 CV. A velocidade do ar no interior do túnel de vento pode ir de 0 a 20 m/s. As dimensões da seção de teste são de 1,2 m de largura, 1,2 m de altura e 2 m de comprimento, com fator de redução de área do bocal para seção de teste de 3,4:1,2. Outro fator importante para visualização de fumaça é a intensidade de turbulência do túnel de vento que está em torno de 1%. A figura 5.1 mostra as dimensões em metro do túnel de vento e a figura 5.2 é uma foto real do túnel de vento.

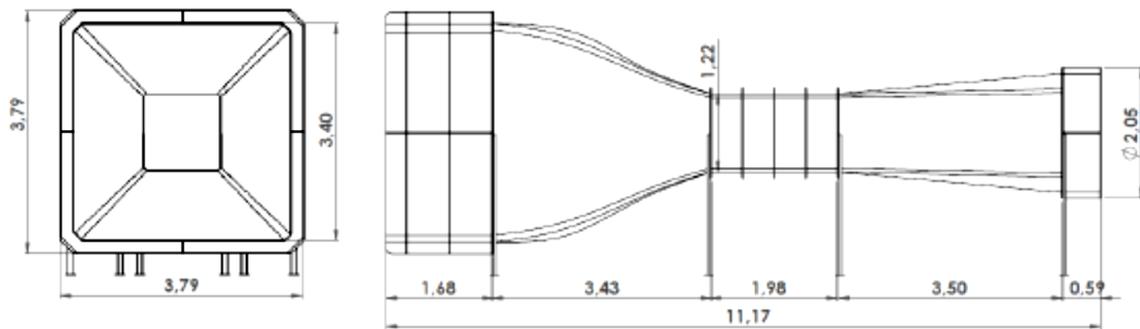


Figura 5.1 – Dimensões do túnel de vento do Laboratório de Energia e Ambiente – LEA UnB, (MACIAS, 2016).



Figura 5.2 – Foto do Túnel de vento do Laboratório de Energia e Ambiente (UnB).

No interior da seção de teste (fig. 5.3) foram instalados planos de fundo de material MDF (do inglês *Medium Density Fiberboard*) placa de fibra média densidade de cor preto fosco para contrastar a visualização de fumaça nos ensaios de escoamento na turbina. Os planos foram dispostos de tal maneira que a câmera visualizasse a presença do plano no fundo, atribuindo o contraste à medida que a fumaça fosse injetada. Os planos também contribuíram para diminuir os reflexos provocados pela seção de teste, que é feito de policarbonato.

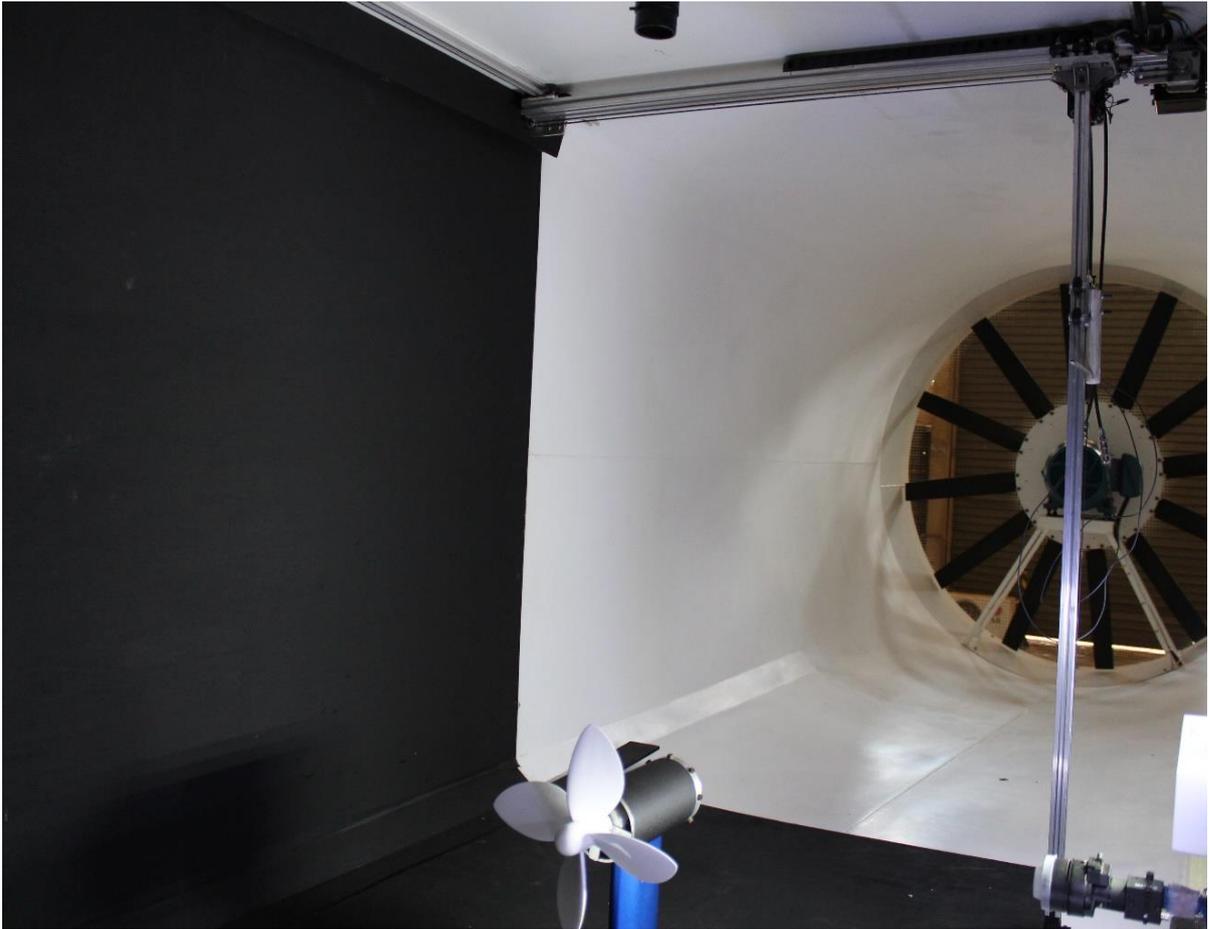


Figura 5.3 – Seção de teste do túnel de vento do Laboratório de Energia e Ambiente da Universidade de Brasília.

5.1.2 Turbina de eixo horizontal

No presente trabalho foi utilizado um modelo de uma turbina em escala de 1/10 de uma turbina hidrocínética *Hydro-K* com potência nominal de 10 kW, desenvolvida pela parceria do Laboratório de Energia e Ambiente (UnB) e Aeroalcool Tecnologia Ltda. Na figura 5.4, é mostrado o modelo da turbina em escala e a tabela 5.1 apresenta as características técnicas.

A turbina, com diâmetro de 230 mm, possui modelos de perfis NACA 4415 de duas pás, três pás e quatro pás. Tem instalado um sensor reflexivo TCRT 5000 na nacele, responsável por captar a rotação do rotor; a figura 5.5 apresenta o desenho e medições da turbina utilizada.

Na figura 5.6 mostra a turbina hidrocínética com tamanho real (2,20 m de diâmetro) instalada na cidade de Bariri, no estado de São Paulo, para produção de

energia; a figura 5.7 mostra três turbinas hidrocinéticas de quatro pás (cada) na etapa de instalação; a figura 5.8 mostra o rio e as turbinas instaladas em operação.



Figura 5.4 – Turbina de quatro pás utilizada nos ensaios

Tabela 5.1 – Características da turbina

Turbina	Eixo horizontal
Quantidade de pás	4
Diâmetro do rotor	230 mm
Perfil das pás	NACA 4415
Sensor ótico reflexivo (rotação do rotor)	TCRT 5000

A turbina possui também um sistema de frenagem controlado por PID (do inglês *Proportional-Integral-Derivative*), Proporcional-Integral-Derivativo, para o controle da rotação.

A tabela 5.2 apresenta dados geométricos e condição de operação do modelo em escala e da turbina em tamanho real.

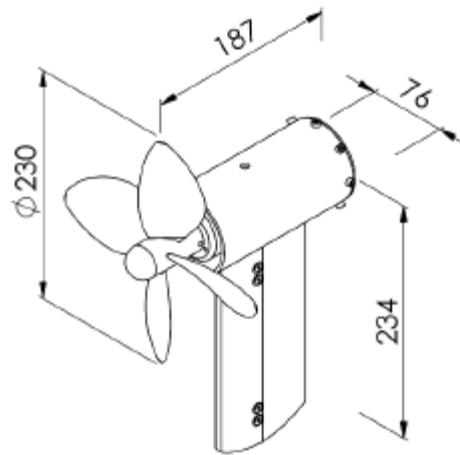


Figura 5.5 – Turbina hidrocínética modelo em escala [medidas em mm].

Fonte: RÊGO, 2018.

Tabela 5.2 – Dados e condições de operação das turbinas (em escala e tamanho real)

Dados	Modelo em escala	Turbina tamanho real
Raio	0,115 m	1,1
ω	1100	35
Re	$5,4 \cdot 10^6$	$2,5 \cdot 10^6$

Fonte: RÊGO, 2018.



Figura 5.6 – Turbina de tamanho real



Figura 5.7 – Instalação de turbinas em tamanho real em Bariri-SP



Figura 5.8 – Turbinas instaladas em Bariri-SP

5.1.3 Instrumentação

5.1.3.1 Medição de velocidade do escoamento no interior do túnel de vento

Para medição de velocidade, foi utilizado tubo de *Pitot* (fig. 5.9) a partir da medição da pressão conectado a um manômetro de coluna inclinada (fig. 5.10), o *tubo de Pitot* está localizado na parte superior do túnel à 200 mm da entrada da seção de testes, 150 mm da parede lateral e 100 da parede superior. O erro na medida de velocidade do escoamento livre no interior do túnel é de 0,3%.

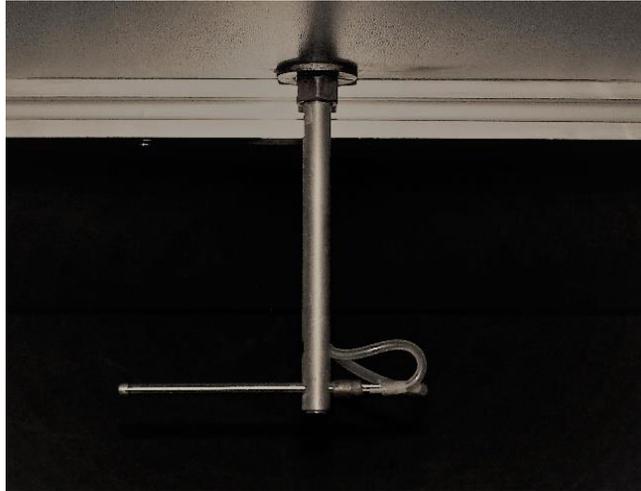


Figura 5.9 – *Tubo de Pitot* no interior do túnel de vento

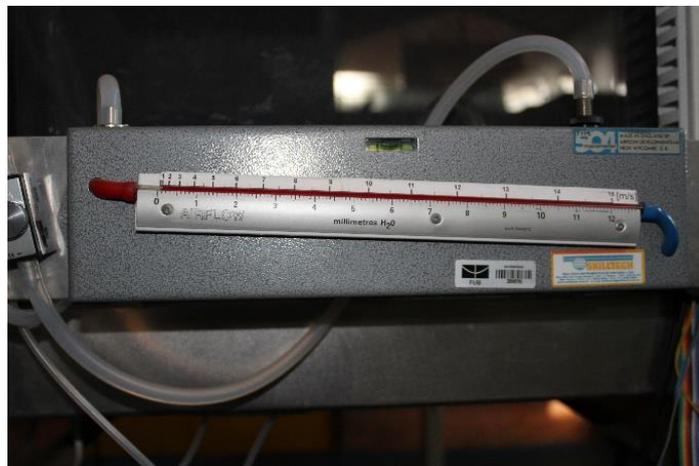


Figura 5.10 – Manômetro de coluna

5.1.3.2 Sistema controlador do túnel de vento

O túnel de vento possui um sistema supervisor controlador capaz de gerenciar as atividades operacionais do equipamento, com objetivo real de monitorar, regular a velocidade do fluido e emitir relatórios automáticos do sistema controlador. Possui também um outro computador em conjunto com Arduino, que controla a rotação da turbina e, com a utilização de um *software Spinview*, gerencia o funcionamento das câmeras. A figura 5.11 mostra duas telas referentes aos computadores que gerenciam o túnel de vento; a tela, à esquerda, mostra o programa responsável pelas câmeras e a tela, à direita, é responsável pelo supervisor.

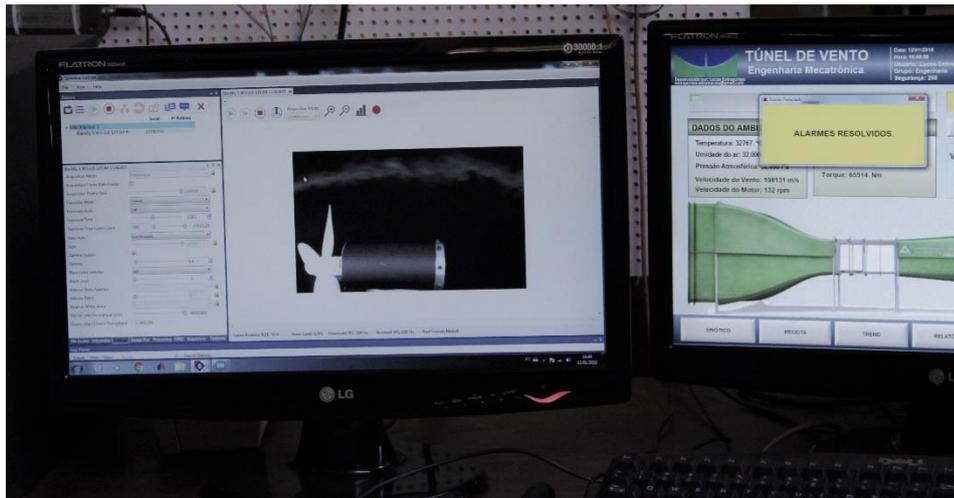


Figura 5.11 – Computadores controladores do túnel de vento

5.1.4 Sistemas geradores de fumaça

Foram utilizados dois sistemas de geração de fumaça para ensaios de visualização de escoamento, do tipo Injeção Direta, que utiliza uma máquina capaz de gerar fumaça contínua e outro sistema do tipo Fio de Fumaça que utiliza uma fonte para aquecimento de um fio para geração de fios de fumaça.

5.1.4.1 Sistema de Injeção Direta

O sistema de injeção direta é formado por componentes que operam na produção de fumaça – basicamente composto por um gerador de fumaça, um compressor de ar e uma haste de fumaça. Na figura 5.12, apresenta-se o esquema do método de injeção de fumaça utilizado no presente trabalho.

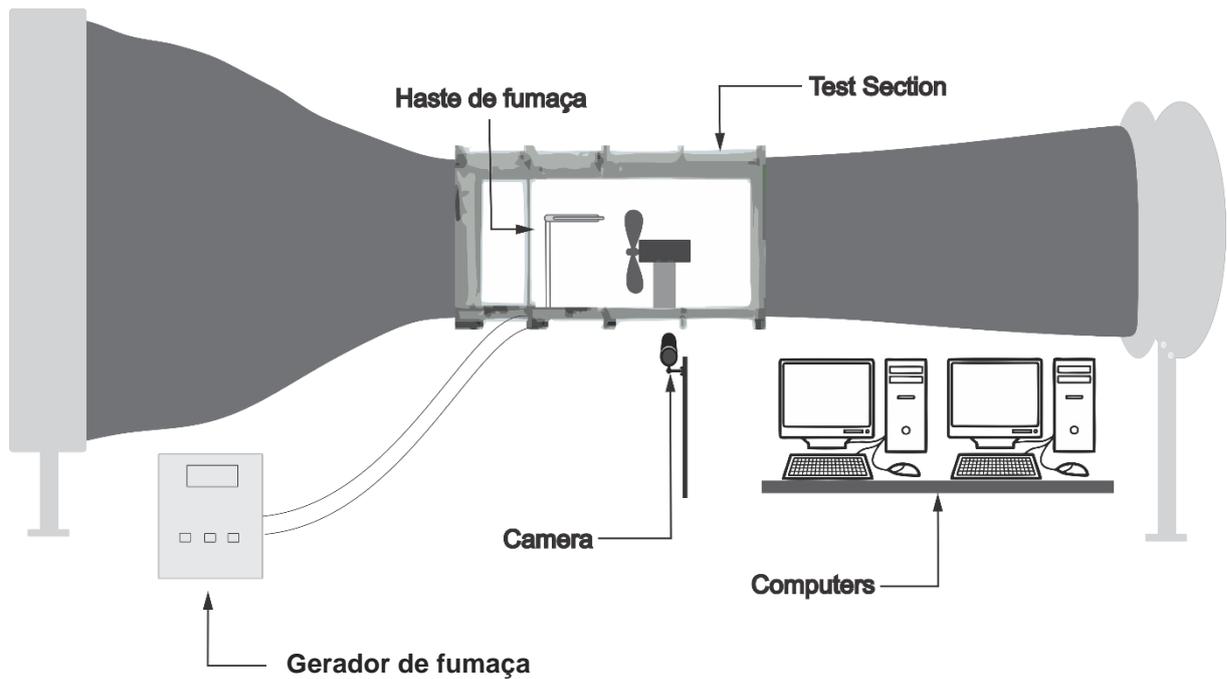


Figura 5.12 – Esquema do método com gerador de fumaça

5.1.4.1.1 Gerador de fumaça

Equipamento (fig. 5.13) que utiliza um fluido (polietileno glicol), no qual é bombeado para haste de fumaça. Esta possui uma resistência que aquece o fluido, até a temperatura de ebulição; em seguida, injeta fumaça no local proposto por meio de um orifício na saída da haste.

O gerador de fumaça utilizada nos experimentos apresenta características técnicas que facilitam a operação de algumas grandezas (temperatura, pressão e vazão) possibilitando alterações no escoamento da fumaça no momento dos ensaios.

O gerador de fumaça é ligado a um compressor, pois a máquina de fumaça necessita de uma fonte de ar comprimido de aproximadamente 25 psi. A linha de ar é conectada por engate rápido de mangueira PU (8 mm).

Na estrutura do gerador, há um controle de temperatura junto com um *display* para auxiliar no momento dos ensaios; possui ainda um regular de vazão de ar, óleo e pressão.



Figura 5.13 – Gerador de Fumaça

Tabela 5.3 – Características do gerador de fumaça

Fabricante	Aeroacool Tec. Ltda
Modelo	AA-TVEG
Tensão	220 V
Massa	5 kg
Potência	1400 W
Capacidade do reservatório	1000 ml
Líquido de evaporação	Polietileno Glicol

5.1.4.1.2 Haste de fumaça

A haste é responsável por acomodar a resistência de aquecimento do óleo e por direcionar a fumaça. Ela foi instalada no túnel de vento para visualização do escoamento na turbina em escala.

Foi instalada, na saída da haste de fumaça, uma agulha metálica de 0,20 mm de diâmetro com objetivo de estabelecer menor turbulência na saída da fumaça – em busca da linha de emissão de fumaça uniforme e espessura menor.

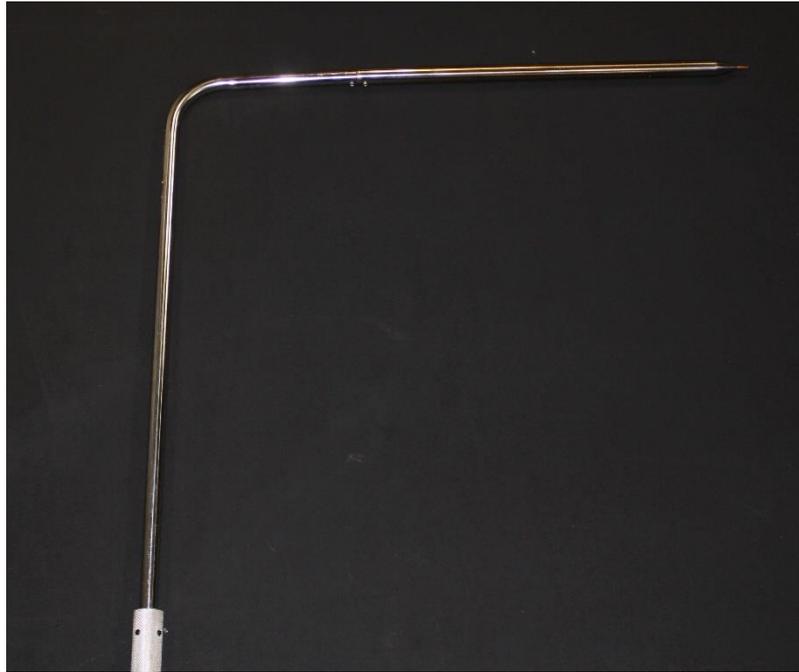


Figura 5.14 – Haste de fumaça utilizada pelo gerador

5.1.4.1.3 Polietilenoglicol

O tipo de fluido utilizado para produção de fumaça foi o polietileno glicol, com fórmula molecular $\text{HO}(\text{C}_2\text{H}_4\text{O})_n\text{H}$. A fumaça produzida pelo polietileno glicol apresenta coloração branca, sendo recomendado o uso de EPI's para manuseio do polietilenoglicol. Principalmente quando ocorre formação de fumaça, é recomendado usar proteção respiratória do tipo A, sugerida para gases e vapores orgânicos com ponto de fusão acima de 65 °C.

Tabela 5.4 – Características do polietileno glicol

Fornecedor	Aeroalcool
Tipo	PEG 400
Estado físico	Líquido
Cor	Incolor
Ponto de fusão	>250 °C
Inflamabilidade	Não relevante
Densidade	1,12 g/cm ³
Viscosidade dinâmica	105 – 140 mPa.s a 20° C

5.1.4.1.4 Compressor

A figura 5.15 mostra o compressor utilizado para ensaios na metodologia de injeção direta. O equipamento manuseado foi a fonte de ar comprimido geradora de fumaça.

Tabela 5.5 – Características do compressor de ar

Fabricante	Ferrari
Modelo	C-6L
Motor	1 HP
Rotação	3400 rpm
Tensão nominal	127/220 V
Pressão máxima	8,3 bar
Vazão	155 L/min
Reservatório	6 litros
Reservatório do óleo	400 ml
Dimensões	510x 240x 465 mm



Figura 5.15 – Compressor de ar *Mega Air*. (RRMÁQUINAS, 2018).

5.1.4.2 Sistema Fio de Fumaça

O sistema de fio de fumaça (*smoke-wire*), ilustrado na figura 5.14, foi utilizado por nortear-se nos trabalhos do Veermer (2001) e do Yarusevych (2009). De acordo com esse, a técnica de fio de fumaça está limitada geralmente à velocidade de 5 m/s em fluxo livre.

O fio de fumaça de material alumel (material utilizado em vários tipos de termopares) foi instalado verticalmente dentro da seção de teste por meio de orifícios de 2 mm de diâmetro nas seções superior e inferior do túnel de vento. Os fios elétricos que saem da fonte para alimentação do fio foram dispostos fora da seção de teste para evitar interferências no fluxo.

De acordo com Yarusevych (2009), o fio deve apresentar diâmetro suficiente pequeno para que o fio não influencie no fluxo em observação, portanto é fundamental essa característica do fio para fluxos de transição laminar turbulenta. Contudo, o fio deve apresentar diâmetro considerável para acomodação de uma quantidade de líquido capaz de gerar de fumaça. A recomendação para técnica de fio de fumaça é que o número de Reynolds com base no diâmetro do fio deve ser menor que 49. Com velocidade do fluxo em torno de 5 m/s, o fio deve apresentar diâmetro máximo de 0,15 mm. A tabela 5.6 apresenta alguns fios utilizados, bem como o material, diâmetro, manipulação do fio e resultado.

O método utilizado neste trabalho é composto por um fio (diâmetro de 0,25 mm) aquecido eletricamente por meio de uma fonte de alimentação *Agilent E3633A* (fig. 5.16) e, com uso de um óleo capaz de gerar fumaça com intuito de obter linhas de fumaça, a montante do corpo observado.

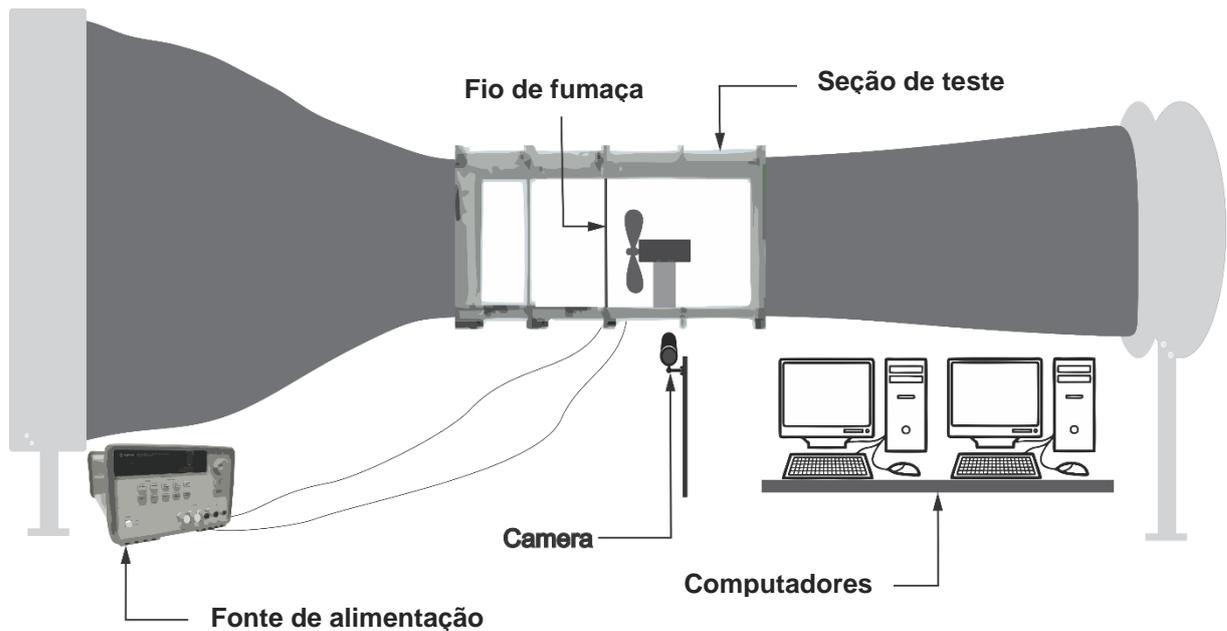


Figura 5.16 – Esquema experimental do método de fio de fumaça

5.1.4.2.1 Determinação do líquido gerador de fumaça

Foram avaliados vários tipos de líquidos neste trabalho, dos quais todos foram capazes de formar fumaça, mas alguns apresentaram menos eficiência e outros mais eficiência de geração. Os líquidos avaliados foram a glicerina, óleo de soja, azeite de oliva, polietileno glicol, óleo lubrificante de motor, óleo lubrificante industrial *singer*, óleo de bebê. O objetivo era verificar o tipo de líquido que atenderia aos aspectos de formação, densidade e visualização de fumaça. Líquidos com densidade e viscosidade mais baixas, como glicerina, polietileno glicol, azeite de oliva e óleo de bebê geraram filamentos de fumaças de curta duração às velocidades do fluxo em estudo. No estudo realizado por Yarusevych (2009), o óleo com densidade maior, como óleo de motor, apresentou boa formação de fumaça, mas exigiram maior quantidade de calor para geração de fumaça para baixas velocidades de fluxo no túnel de vento, mas para altas velocidades de fluxo, o calor gerado foi ainda maior, causando a falha do fio de fumaça. Portanto, no seu trabalho, foram utilizados líquidos à base de glicerol, pois os mesmos apresentaram resultados mais eficazes na geração de fumaça. Já no trabalho do Yen (2017), utilizou-se óleo fraxinus (freixo), cujas propriedades são próximas à do azeite de oliva e apresentou eficiência na produção de fumaça.

Entretanto, no presente trabalho foi utilizado o óleo lubrificante industrial *Singer*, lubrificante mineral do tipo naftênico, por apresentar melhor geração, densidade e duração de fumaça – quando comparado aos testes com óleo lubrificante de motor, glicerina, polietileno glicol, óleo de soja, azeite de oliva e óleo de bebê (apêndice A).

5.1.4.2.2 Determinação do fio de fumaça

Na determinação do fio de fumaça, foram necessários vários testes para produção de fumaça. Os fios experimentados foram: fio de cobre, fio de aço SAE 1050, fio de níquel cromo e fio de níquel alumínio (alumel). Fios muito finos são frágeis, difíceis de manusear e incapazes de reter uma quantidade que permita a geração de fumaça. É sabido que o fio revestido com líquido gerador de fumaça apresenta diâmetro efetivo maior que o diâmetro nominal do fio e, dependendo do líquido utilizado na geração de fumaça, deve ser levado em consideração.

A tabela a seguir representa algumas características dos testes feitos com alguns tipos de fios. Os diversos tipos de fios utilizados foram baseados na visualização de formação de fumaça. Todos os testes realizados apresentaram as mesmas condições de configuração experimental (velocidade do túnel, configurações da fonte de alimentação, comprimento do fio e visualização). A fonte de alimentação foi configurada para tensão de 20V e corrente de 7 A, com objetivo de atingir temperatura acima de 180 °C, correspondente a formação de névoa do líquido gerador de fumaça.

Tabela 5.6 – Testes com fios para geração de fumaça

Material	Diâmetro	Manuseio	Geração de fumaça
Aço 1050	0,25 mm	Bom	Média formação de fumaça e vida útil do fio condutor baixo
Níquel Cromo	0,50 mm	Bom	Formação de fumaça e dispersão rápida
Níquel Cromo	0,30 mm	Regular	Pouca formação de fumaça
Níquel Cromo	0,20 mm	Difícil	Não houve formação de fumaça
Níquel Cromo	0,10 mm	Difícil	Não houve formação de fumaça
Alumel	0,25 mm	Ótima	Ótima formação de fumaça
Cobre	0,40 mm	Ótima	Pouca formação de fumaça

No presente trabalho, foi utilizado fio de alumel, com diâmetro de 0,25 mm, que proporcionou uma formação e densidade de fumaça para a visualização de escoamento.

5.1.5 Sistema de iluminação e aquisição de imagens

Para adquirir os dados referente aos ensaios de visualização de fumaça, foram utilizados alguns equipamentos, alguns citados anteriormente (tubo de *Pitot*, sensor de rotação da turbina). O sistema conta também com conjunto Arduino para controlar a rotação da turbina por frenagem em algoritmo PID.

O sistema de aquisição de imagens é formado por câmeras, laser *pointer* (caneta laser), computador para controle do *software* responsável por gerenciar a câmera e iluminação por LED (do inglês *Light Emitting Diode*), Diodo Emissor de Luz.

5.1.5.1 Caneta laser

A utilização da caneta laser é para a formação de um plano não pulsante a partir de uma lente. Por apresentar a característica de emissão de radiação Laser facilita-se por intermédio dela a visualização de fumaça, a partir da iluminação das partículas de fumaça. O plano formado pelo laser foi posicionado perpendicularmente ao plano de gravação da câmera para contrastar com a fumaça.

Uma fonte de alimentação modelo E3633A da fabricante Agilent (fig. 5.17) foi utilizada para alimentação direta (3,7 V) do laser, a fim de se obter um plano sempre constante, ao invés de utilizar bateria, pois não permite mais do que 1 hora de ensaio. A tabela 5.7 exhibe as características do laser utilizado nos ensaios.

Tabela 5.7 – Características da caneta laser

Modelo	WP Laser 303
Potência	98.000 mW
Recarregável	12 V
Cor	Verde
Comprimento de onda	532 nm
Massa	90 g



Figura 5.17 – Fonte de alimentação Agilent E3633A

5.1.5.2 Câmera

A câmera utilizada nos ensaios de visualização é da fabricante *Flir*, modelo *Blackfly S BFS-U3-13Y3M via USB 3.0 (Universal Serial Bus)* que utiliza uma lente *Fujinon Lens C-Mount Vari-Focal Lens 1:1.4/3.8-13mm 1/2"*. A figura 5.18 mostra conjunto câmera-lente.



Figura 5.18 – Câmera *Flir* utilizada nos ensaios

5.1.5.3 Tratamento de imagens

O *software Corel Photo* foi utilizado para tratar as imagens com finalidade de melhorar a qualidade das fotos adquiridas, ou seja, é um processo pós-ensaio de visualização de escoamento.

O roteiro geral de tratamento de imagens empregado foi dividido nas etapas a seguir.

- Corte da imagem para resolução padrão de foto de acordo com ambiente de ensaio;
- Ajuste de brilho, contraste e intensidade de acordo com a foto adquirida;
- Aplicação de efeito desfocagem *Gaussiano* para criar efeito de profundidade com intenção de dar nitidez ao plano do fundo (plano de fumaça/laser);

O fato da câmera utilizada (*Flir Blackfly S BFS-U3 13Y3M*) no trabalho apresentar detalhes de propriedades e passíveis de alterações em tempo real de gravação por meio do software *SpinView* permitiu adquirir imagens com definição e caracterização nítidas, ou seja, foram necessários apenas alguns passos básicos no tratamento de imagens.

5.1.5.4 Software para aquisição de imagens

O software *SpinView* (versão *spinaker 1.8.0.64*) apresenta uma interface totalmente capaz de controlar e adquirir imagens com precisão. A câmera Flir integrada ao software permite um controle em tempo real dos FPS (Frames por segundo), do gama, do tipo de aquisição, da velocidade do obturador (tempo de exposição), do tempo ou quantidade de gravação.

Nota-se a importância de alteração de propriedades que interferem diretamente na qualidade da imagem na realização dos ensaios, ademais, permite-se o controle em pouco espaço de tempo, ou seja, refletindo diretamente no tempo de ensaio, afinal, não é preciso terminar todo ensaio para ter uma noção de qualidade de como as fotos ou vídeos dos ensaios se apresentaram.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A maioria dos resultados encontrados nos experimentos de visualização de fumaça são característicos de propriedades qualitativas, mas podem ser também quantitativos. Os trabalhos realizados com utilização dessa técnica visam obter os padrões de escoamento em perfis aerodinâmicos, cubos, círculos e turbinas com caracterização dos vórtices, esteiras, camada limite com variação do número de Reynolds ou da velocidade do escoamento.

O presente trabalho tem como objetivo estudar qualitativamente o escoamento sobre uma turbina de eixo horizontal.

Os resultados neste trabalho foram obtidos a partir da injeção direta com gerador de fumaça e com a técnica Fio de Fumaça com estudo do comportamento do fluxo na turbina de modelo de eixo horizontal. As características do escoamento foram observadas com a turbina de modelo em escala para: quatro pás, três pás e duas pás.

O presente capítulo é composto por duas etapas temporais de casos de visualização de escoamento. A primeira etapa foi composta por ensaios e resultados iniciais foram aqui propostos com justificativa de evolução dos métodos de visualização. Esses serviram de base para observação dos fenômenos existentes, pois, a partir dos ensaios iniciais, percebeu-se a presença desses fenômenos inerentes ao escoamento na turbina, mas a visualização que dependia da configuração experimental, necessitou de ajustes e melhorias no esquema experimental para melhor caracterizá-los. Os resultados (II) são partes da configuração experimental robusta e com implementações realizadas ao longo dos ensaios.

6.2 Resultados iniciais

Os resultados iniciais presentes neste trabalho demonstram a importância do controle de muitas variáveis que podem interferir no método de visualização de escoamento para obtenção de resultados qualitativos. Ao longo dos experimentos, foram verificados diversos pontos que podem interferir na qualidade de visualização. A busca por imagens qualitativas capazes de caracterizar os fenômenos de fluxo aerodinâmico dependem de parâmetros e de equipamentos que interferem

diretamente no campo das propriedades qualitativas do escoamento, desde a montagem experimental até tratamento final de imagens adquiridas.

A análise é realizada na posição $\frac{y}{D}$, onde D representa o diâmetro do rotor do modelo da turbina em escala e y é coordenada vertical.

6.2.1 Resultados iniciais de visualização de escoamento com fio de fumaça

Os resultados iniciais com fio de fumaça foram obtidos com uma configuração experimental preliminar, ou seja, são resultados iniciais que serviram de embasamento para evolução dos métodos de visualização de fumaça. A tabela 6.1 mostra a configuração experimental utilizada para obtenção dos resultados iniciais.

A posição do fio de fumaça encontra-se na vertical, com distância de 100 mm da turbina.

Tabela 6.1 – Configuração experimental para obtenção dos resultados iniciais

Método de visualização de escoamento	Fio de fumaça
Sistema de iluminação	LED (5w)
Câmera	Sansumg modelo SM-G825i
FPS	30
Formato de imagem	JPEG
Velocidade do obturador (s)	1/200
Gama	Não houve controle
Tratamento de imagem	Tratamento de contraste e brilho

6.2.1.1 Resultado inicial para turbina de quatro pás

O resultado do ensaio inicial da visualização do escoamento para turbina de quatro pás está representado por meio de uma imagem para uma velocidade de escoamento do túnel de vento de 5 m/s e para rotação da turbina de ω de 500 rpm (rotações por minuto).

A figura 6.1 mostra a turbina de quatro pás posicionada na seção de teste do túnel de vento. A montante da turbina se observa o escoamento bem distribuído das linhas de fumaça sem interferência no fluxo, logo, a jusante da turbina o fluxo é

perturbado ao passar pela turbina, o que ocasiona turbulência e se percebe fenômenos não muito bem definidos, e seguidos (indicados por setas).

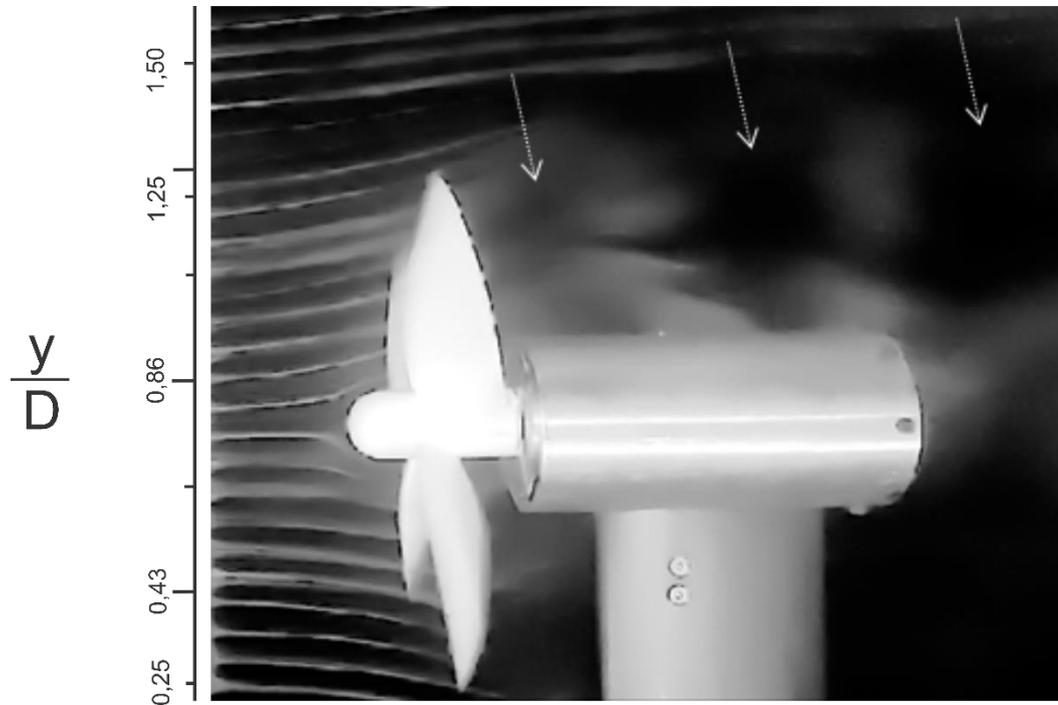


Figura 6.1 – Visualização do escoamento turbina de quatro pás, $\omega = 500$ rpm.

5.2.1.2 Resultado inicial com turbina de três pás

A configuração utilizada para experimentos com turbinas de três pás foi a mesma utilizada com a turbina de quatro pás (tabela 6.1), mas com velocidade de escoamento do túnel de 5 m/s e para rotação ω de 30 rpm.

A figura 6.2 apresenta uma turbina de três pás situada na seção de teste do túnel de vento. A montante da turbina percebe-se as linhas de fumaça formadas por fio de fumaça com característica laminar, mas ao passar pelas pás das turbinas ocorre turbulência, e ainda há presença de fenômenos não muito definidos (indicado pelas setas). Esses não apresentam características definidas por causa das câmara, iluminação e fumaça. Percebe-se que um fio de fumaça acima dos fenômenos de turbulência (a jusante da turbina) apresenta uma característica laminar no início e na posição intermediária do fio, e que é possível notar a sensibilidade do fio quanto à turbulência.

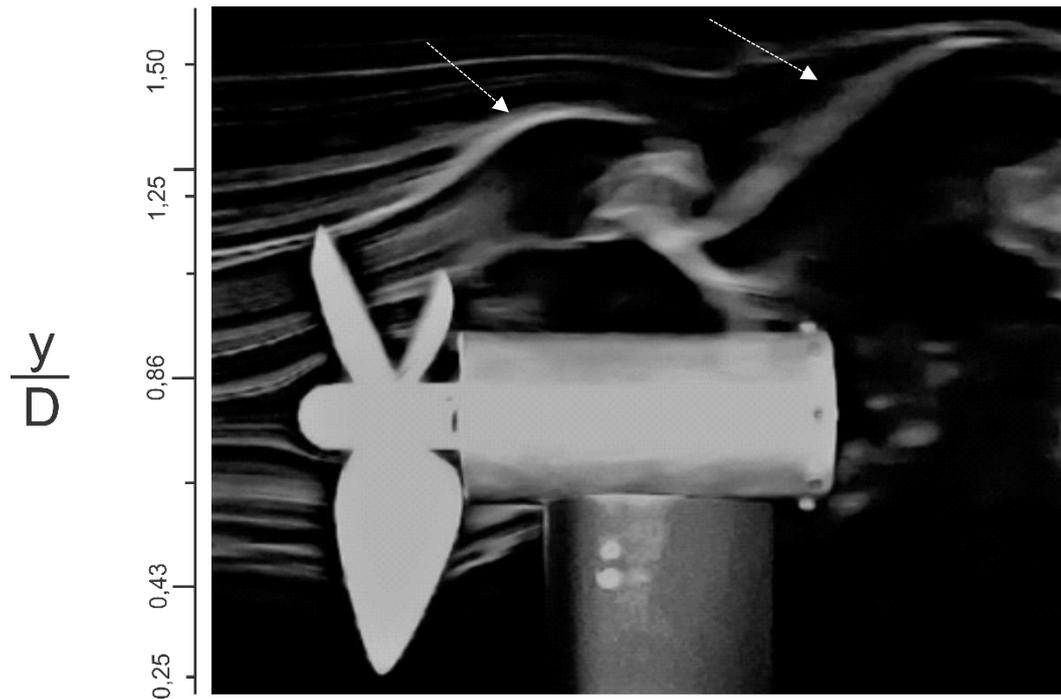


Figura 6.2 – Visualização de escoamento para turbina de três pás. $\omega= 30$ rpm.

A partir dos resultados iniciais, verificou-se a necessidade de implementações nos arranjos experimentais para uma caracterização mais precisa dos fenômenos de escoamento.

6.3 Resultados iniciais de visualização de escoamento com gerador de fumaça

Os resultados iniciais utilizando o gerador com utilização de uma haste para saída da fumaça são apresentados por imagens com a mesma configuração inicial do fio de fumaça (tabela 6.1), porém, com outro método de visualização e velocidade do túnel de 5 m/s.

6.3.1 Resultado inicial para turbina de três pás

A figura 6.3 mostra a visualização de escoamento em uma turbina de três pás utilizando gerador de fumaça e ainda uma haste com pente de injeção que direciona a fumaça para a turbina. A imagem apresenta linhas de fumaça e se percebe a expansão da esteira a jusante da turbina. Antes das linhas de fumaça tocarem a turbina, não há expansão, logo, ao tocar as lâminas, percebe-se notadamente a “abertura” das linhas de fumaça.

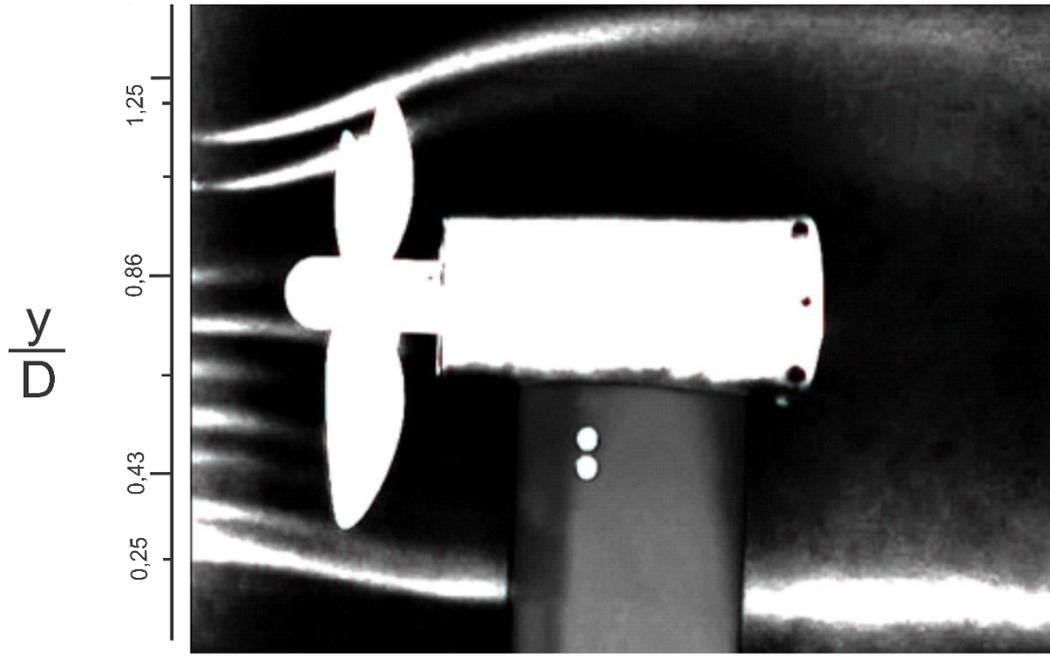


Figura 6.3 – Expansão da esteira com método de visualização de escoamento com injeção direta com gerador de fumaça (haste e pente de injeção).

6.3 Resultados II

Os resultados II apresentados da visualização de escoamento dependeram inicialmente da posição do fio na seção de teste para método de fio de fumaça e da posição da haste de fumaça para método de gerador de fumaça, e da posição da câmera e do sistema de iluminação, ademais é necessário obedecer às regras de visualização de escoamento quanto à configuração experimental.

As configurações aqui apresentadas demandaram vários testes iniciais para definição de um arranjo experimental robusto, ou seja, foram necessários experimentar alterações do sistema de visualização de escoamento com objetivo de determinar uma configuração capaz de caracterizar qualitativamente os ensaios.

6.3.1 Resultados com método de fio de fumaça na vertical

Os resultados obtidos com método de visualização de fumaça a partir do fio de fumaça foram qualitativamente observados, o controle do método a partir da técnica utilizada é fundamental para caracterização dos fenômenos aerodinâmicos inerentes a turbina.

O perfil NACA 4415 aerodinâmico é utilizado para todos ensaios das configurações das turbinas (quatro, três e duas pás).

A figura 6.4 e a tabela 6.2 mostra o esquema da configuração experimental utilizada no método de visualização por fio de fumaça com fio na vertical.

O método de fio de fumaça na vertical tem a gravidade como auxílio, esta apresenta uma característica muito intrínseca quando comparado ao fio na posição horizontal. Na alimentação do fio que aquece para produzir fumaça, o mesmo é embebido com óleo *singer ISO VG15*, a partir do acúmulo de gotas de óleo observa-se que as gotas acumuladas percorrem o fio por conta da gravidade, ou seja, a gravidade contribui para a alimentação do fio na vertical. No resultado (fig. 6.5) para turbina de quatro pás é possível verificar tais condições atribuídas do percurso que óleo faz no fio por conta da gravidade com intervalo de tempo entre imagens.

A análise é realizada na posição $\frac{y}{D}$, onde D representa o diâmetro do rotor do modelo da turbina em escala e y é coordenada vertical, o eixo x apresenta unidade

em mm, servindo de base para comparação de distanciamento e comprimento dos fenômenos aerodinâmicos.

Alguns resultados apresentam instantes referente a aquisição das imagens, onde t_0 representa o instante inicial, ou seja, a primeira foto do ensaio, e t representa o tempo com variações dos instantes na aquisição de imagens com base no fps (frame per second) ou quadros por segundo (qps).

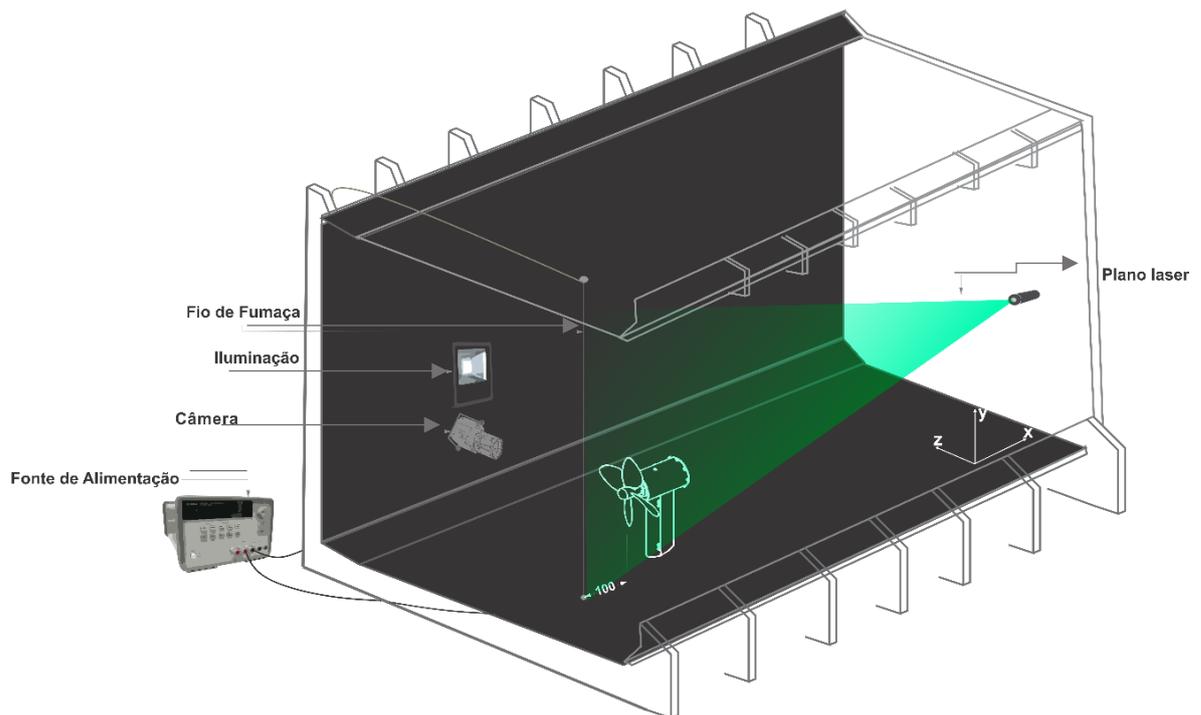


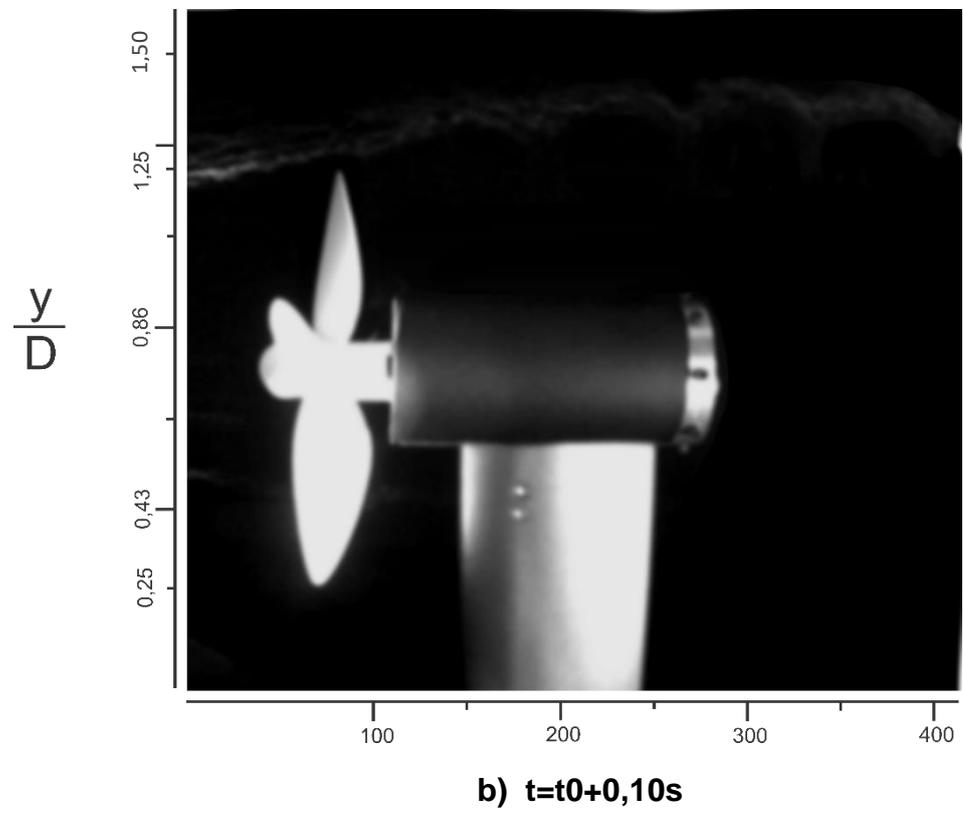
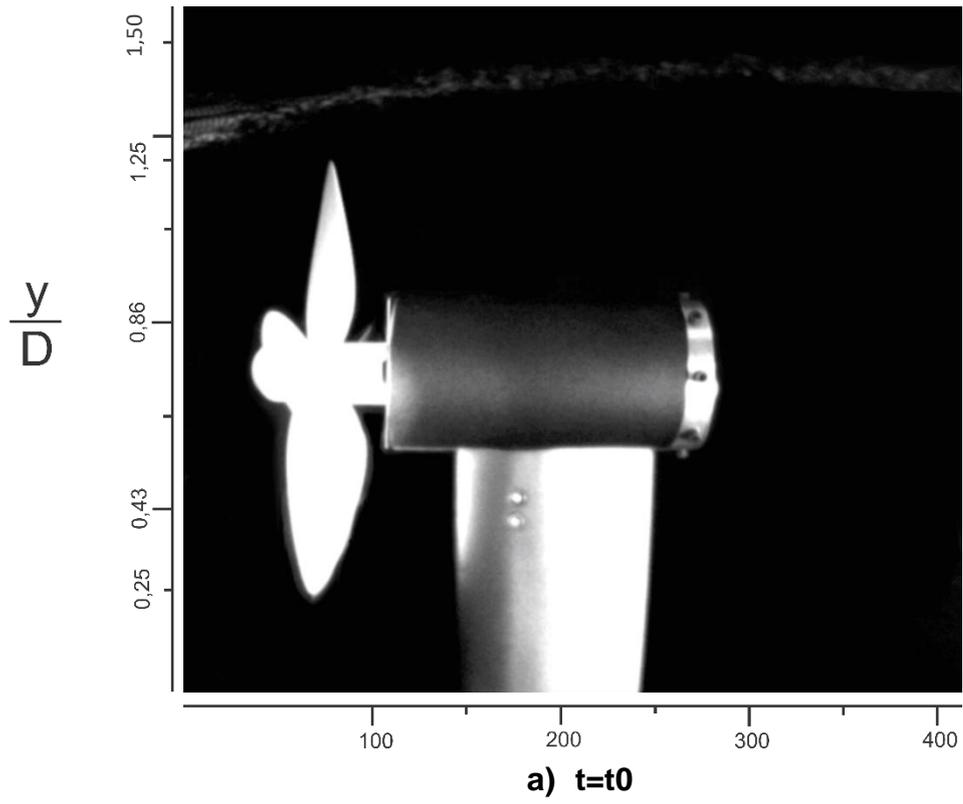
Figura 6.4 – Seção de teste com arranjo experimental do fio de fumaça na vertical

Tabela 6.2 – Configuração experimental para técnica de fio fumaça

Método de visualização de escoamento	Fio de fumaça
Diâmetro do fio	0,25 mm
Material do fio	Liga níquel alumínio
Distância do fio de fumaça até turbina	100 mm
Nº de Reynolds (com base no diâmetro do fio)	57
Sistema de iluminação	Refletor 25000 Lúmens
Câmera	Flir Blackfly S BFS-U3 13Y3M
Distância da câmera com relação a turbina	385 mm
FPS	200
Formato de imagem	PNG
Velocidade do obturador (s)	1/2000 a 1/4000
Gama	1,0 a 3,0
Ganho de imagem	17,97 dB
Modo de aquisição de imagem	Contínuo
Tratamento de imagens	Controle do brilho, contraste, intensidade e ruído

6.3.1.1 Resultados para turbina de quatro pás

Os resultados apresentados são para velocidade de escoamento do túnel de 5 m/s com método de visualização com fio de fumaça na vertical. Os resultados a seguir são demonstrados utilizando uma escala em tempo para identificar e caracterizar os fenômenos aerodinâmicos presentes.



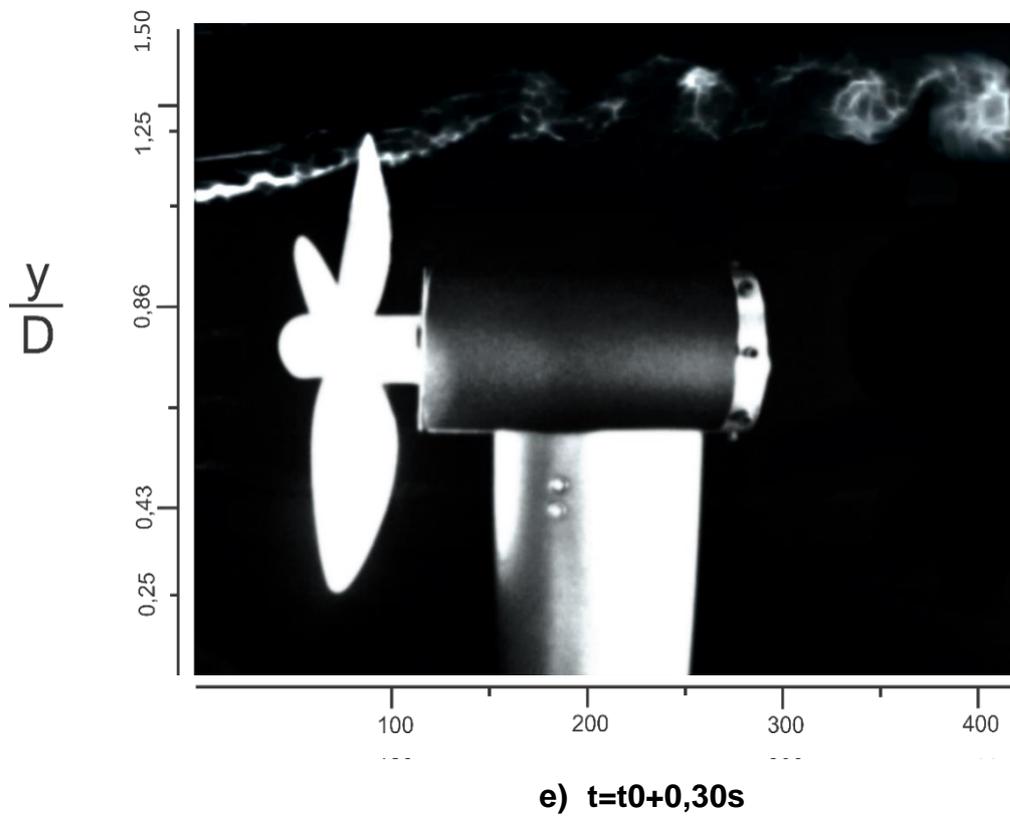
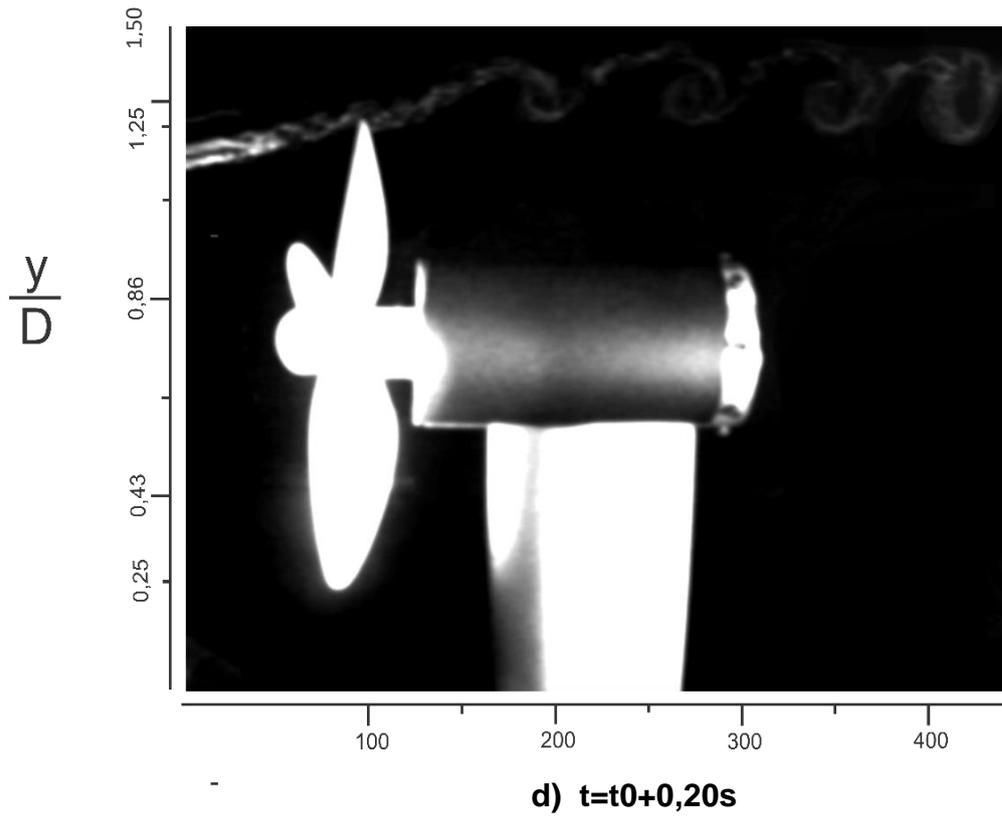


Figura 6.5 – Formação de vórtices de ponta de pá para turbina de quatro pás com rotação do rotor de 850 rpm. [medidas do eixo x em mm].

A figura 6.5 mostra imagens de visualização de fluxo de forma consecutiva, as imagens adquiridas de forma contínua e num intervalo de tempo muito pequeno, em torno de 0,10s para posição da pá determinada são essenciais para análise do fluxo instável. O resultado (fig. 6.5a) mostra a raia de fumaça livre e sem possíveis interferência de fluxo na posição entre $\frac{y}{D} = 1,25$ e $\frac{y}{D} = 1,50$. Na figura 6.5b, observa-se o alcance característico da turbulência do fluxo na raia de fumaça, nota-se a que a linha de fumaça sofreu alterações de fluxo quando comparado a fig. 6.5a, ou seja, é antecedência de algum fenômeno turbulento.

Já o resultado das figuras 6.5a e 6.5b revelam estruturas coerentes, observa-se na visualização de escoamento por fio de fumaça a presença de vórtices de ponta de pá, os mesmos formam-se a jusante da ponta da pá da turbina e evoluem a jusante da pá numa posição entre $\frac{y}{D} = 1,20$ e $\frac{y}{D} = 1,40$. Os vórtices de ponta de pá são influenciados unicamente pela ponta da pá da turbina, as figuras 6.5c e 6.5d apresentam vários vórtices do tipo espiral ocasionado pelo movimento circular das lâminas e como consequência prática desse fenômeno são os efeitos significativos no desempenho do gerador e a presença de ruídos.

A presença de quatro vórtices nítidos na figura 6.5c no campo de visualização da imagem indica quatro passagens de pás, ou seja, $\frac{1}{4}$ da rotação do rotor da turbina para cada vórtice, ainda é perceptível que os quatro vórtices indicam valor ligeiramente maior do que 230 mm de comprimento do núcleo do primeiro vórtice até o quarto, ou seja, o comprimento em linha reta do primeiro ao quarto vórtice está próximo do diâmetro do rotor da turbina modelo em escala de 230 mm de diâmetro.

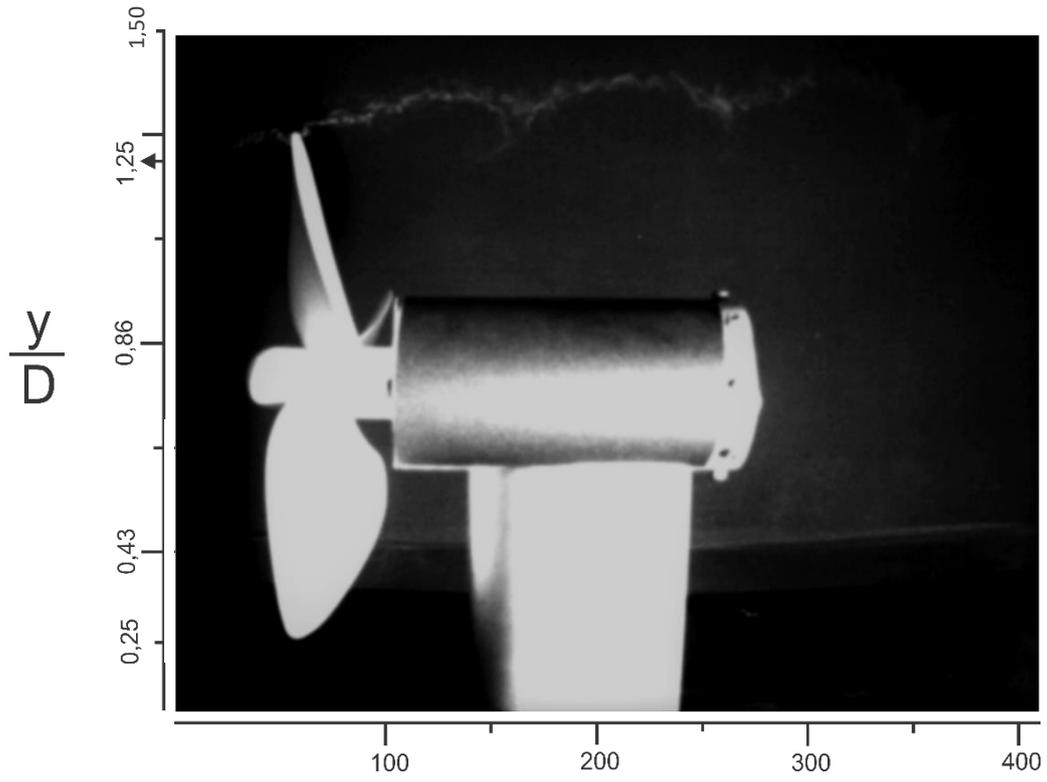
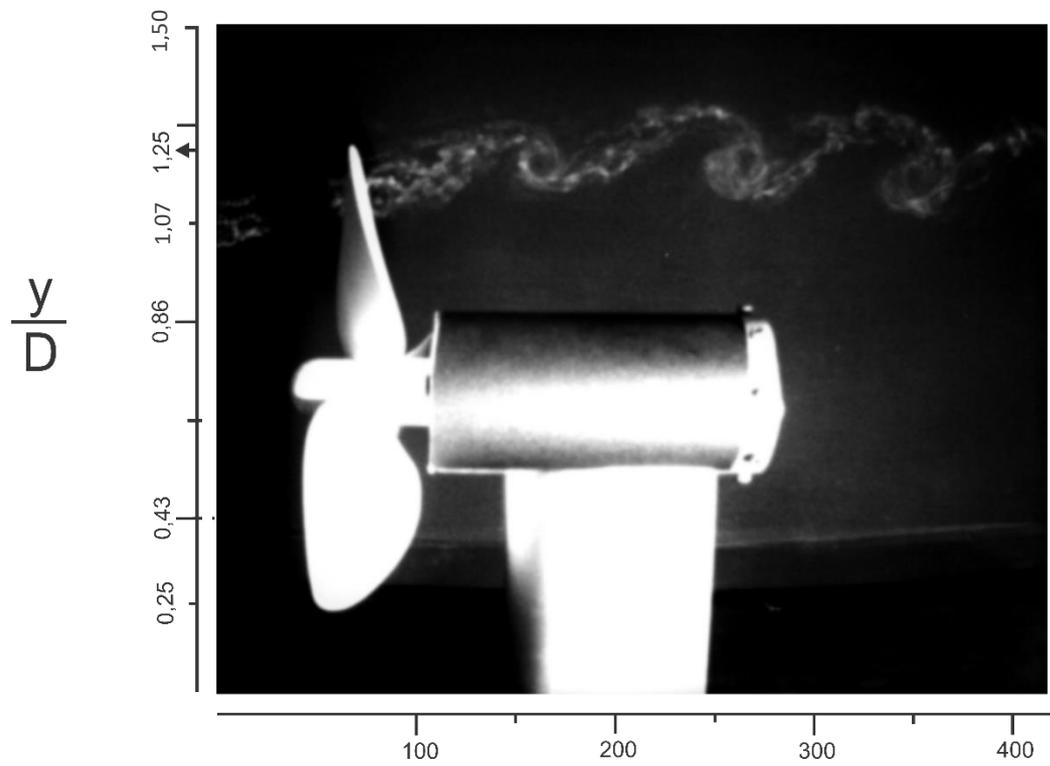
6.3.1.2 Resultados para turbina de três pás

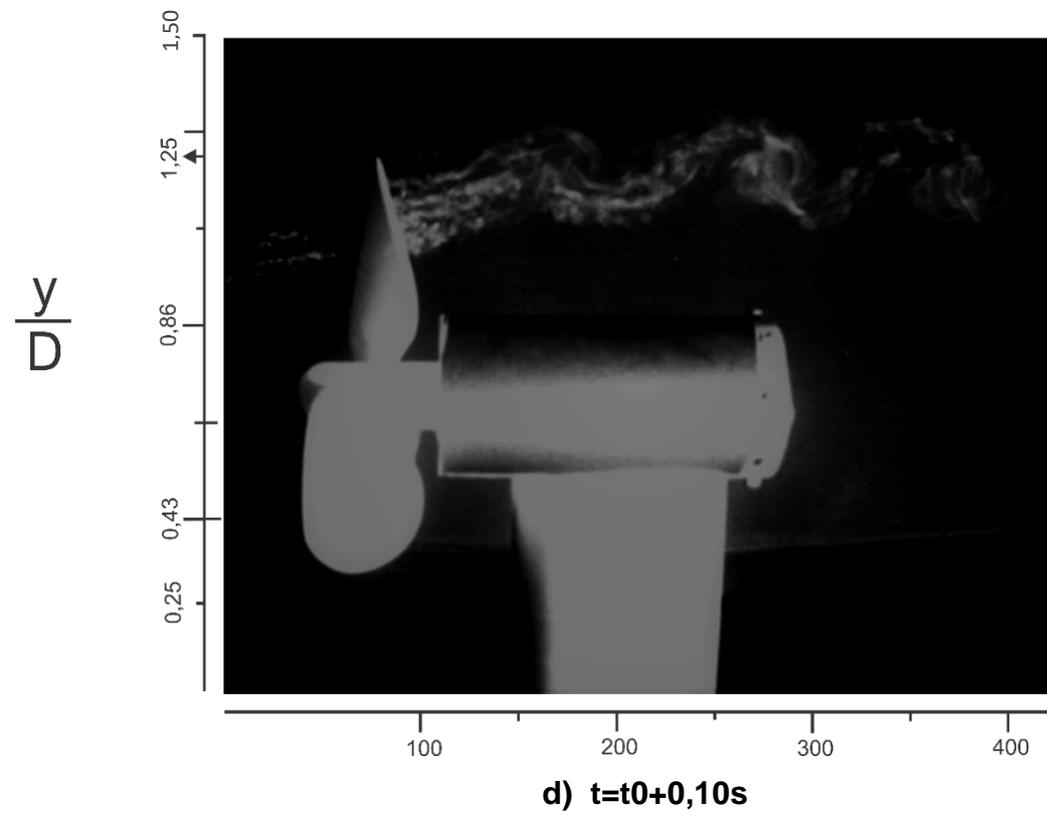
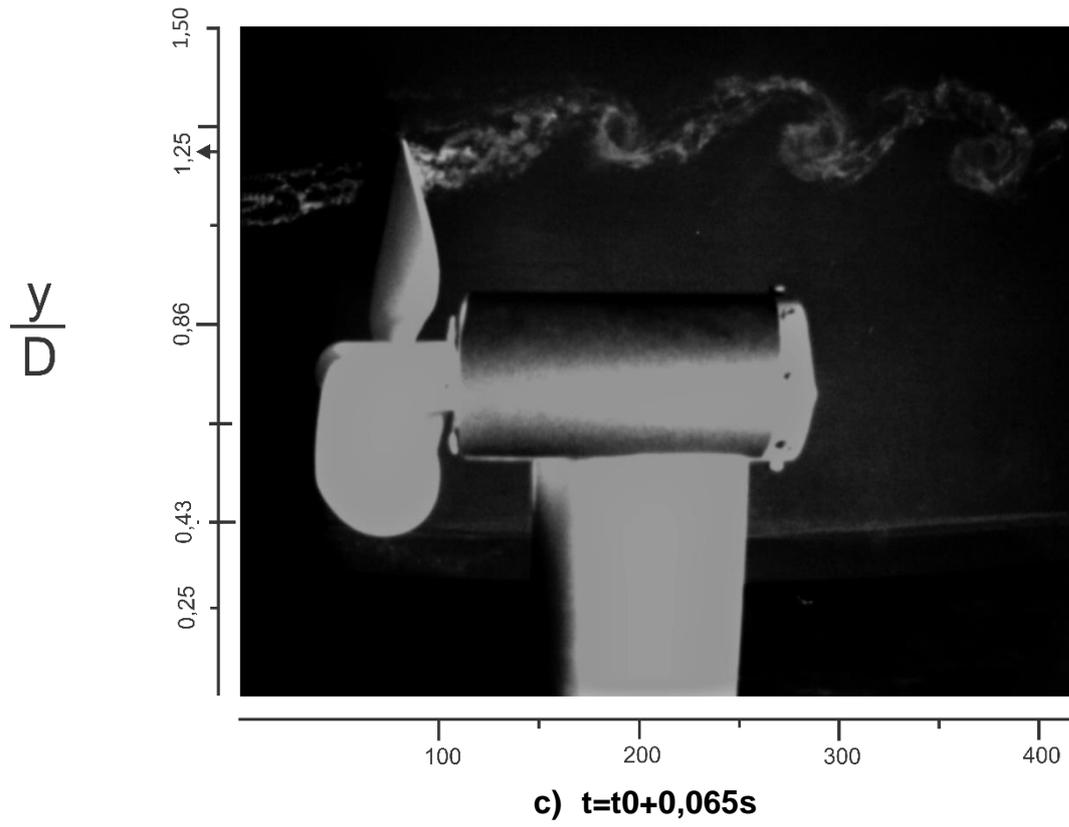
A velocidade de escoamento para ensaios da turbina de três pás também foi de 5 m/s e com as mesmas configurações experimentais (tab. 6.2) da turbina de quatro pás, porém com velocidade de obturador cerca 10% maior, por conta da visibilidade da fumaça no ambiente da câmera.

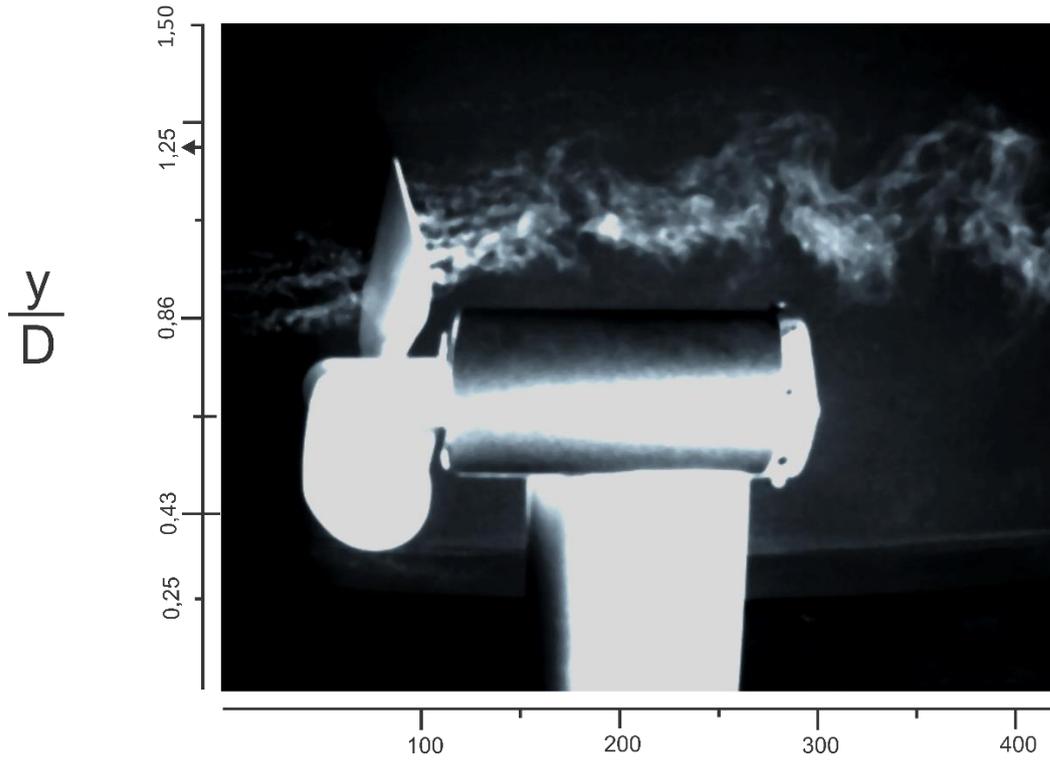
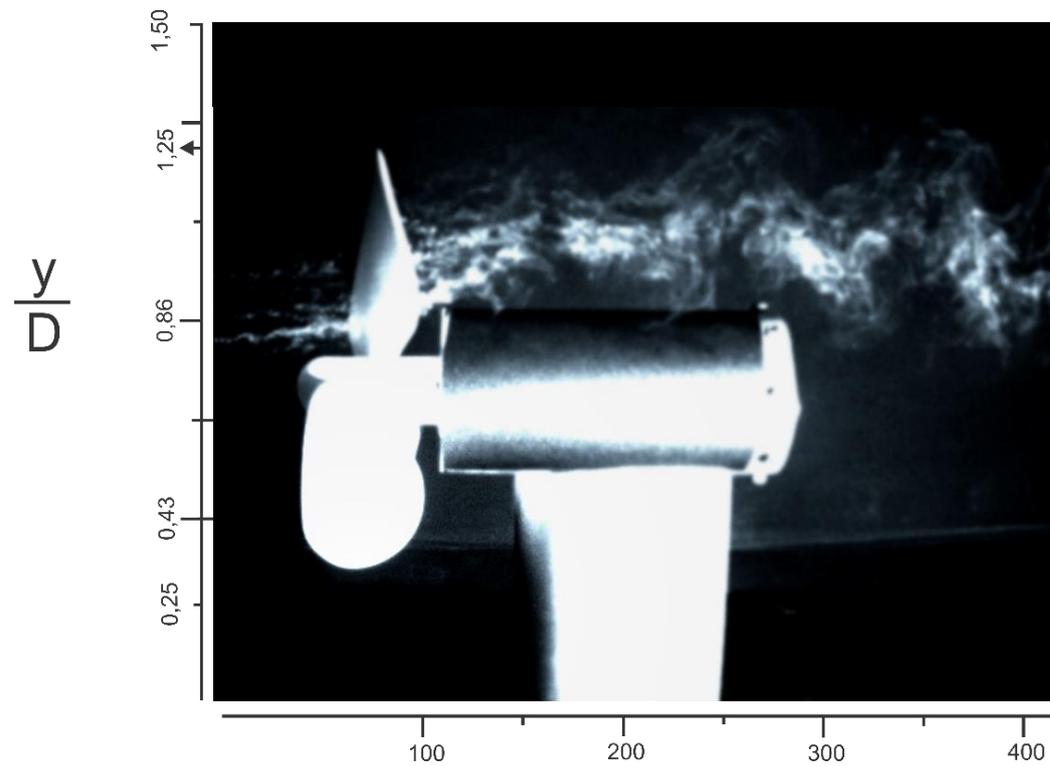
Observando a figura 6.6a, a raia de fumaça que está numa posição aproximada de $\frac{y}{D} = 1,25$, indica a posição inicial de formação de vórtices de ponta de pá, ao passar do instante de apenas 0,060 s, nota-se os vórtices formados por várias raias de fumaça (figura 6.6b), ou seja, ocorre a união das raias de fumaça ao sair do fio

aquecido, logo é conhecido que cada gotícula do óleo gerador de fumaça forma uma raia de fumaça. Assim, as várias raias formam vórtices que, unidos, formam um outro com largura maior na posição entre $\frac{y}{D} = 1,07$ e $\frac{y}{D} = 1,40$. É válido comparar com a figura 6.5c que apresenta vórtices com camada menos espessa, pois as raias que perceberam os vórtices de ponta de pá estão em quantidade inferior. Para turbina de três pás o mesmo acontece a relação próxima do comprimento dos três vórtices e diâmetro do rotor, os três fenômenos indicam a passagem das pás, ou seja, uma rotação completa do rotor ($1/3$ da rotação da turbina para cada vórtice), ademais, cada passagem de pá indica a formação de um vórtice no plano de visualização da imagem.

Ao resultado da figura 6.6e, percebe-se o escoamento com visualização da fumaça na posição entre $\frac{y}{D} = 0,86$ e $\frac{y}{D} = 1,29$ e no instante de $t=t_0+0,225s$ de aquisição de imagem, nota-se que os fenômenos de ponta de pá não são tão característicos, ou seja, os vórtices vão perdendo sua formação com base na posição de incidência do fluxo visualizado, incidência esta que se encontra na metade da pá. Nota-se que nesta posição não há influência da nacele da turbina, o mesmo acontece nas figuras 6.6 (a,b,c e d). Porém, à medida que o fluxo se move para instante $t=t_0+0,265s$ (figura 6.6f), observa-se na posição inferior a $\frac{y}{D} = 0,86$ as raias de fumaça incidindo na nacele, acarretando o efeito de interação na estrutura do fluxo ao passar pela nacele, características de escoamento de um corpo rombudo. A figura 6.6g ($t=t_0+0,320s$) apresenta ainda mais evidências quanto à influência interativa da nacele no fluxo.

a) $t=t_0$ b) $t=t_0+0,060s$



e) $t=t_0+0,225s$ f) $t=t_0+0,265s$

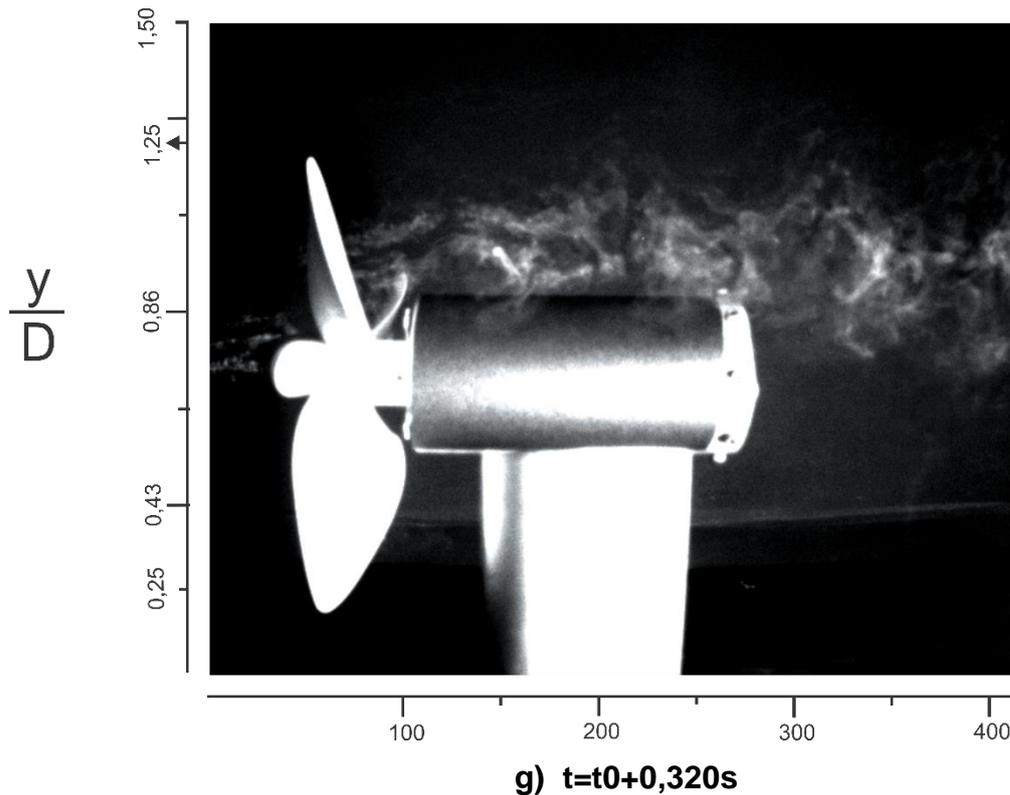
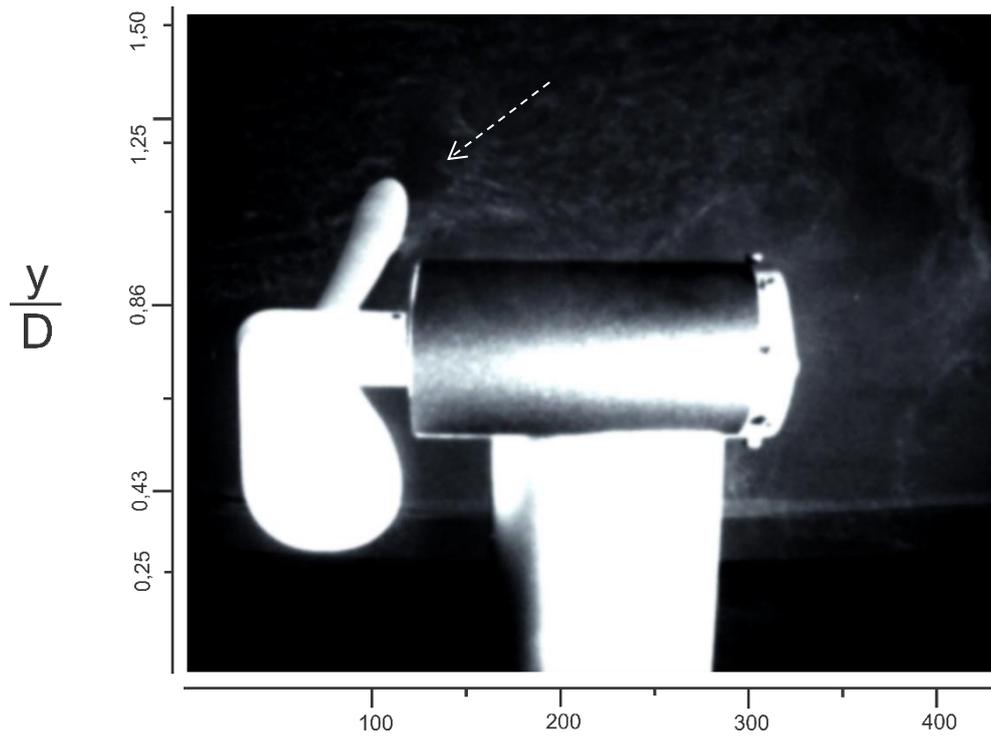
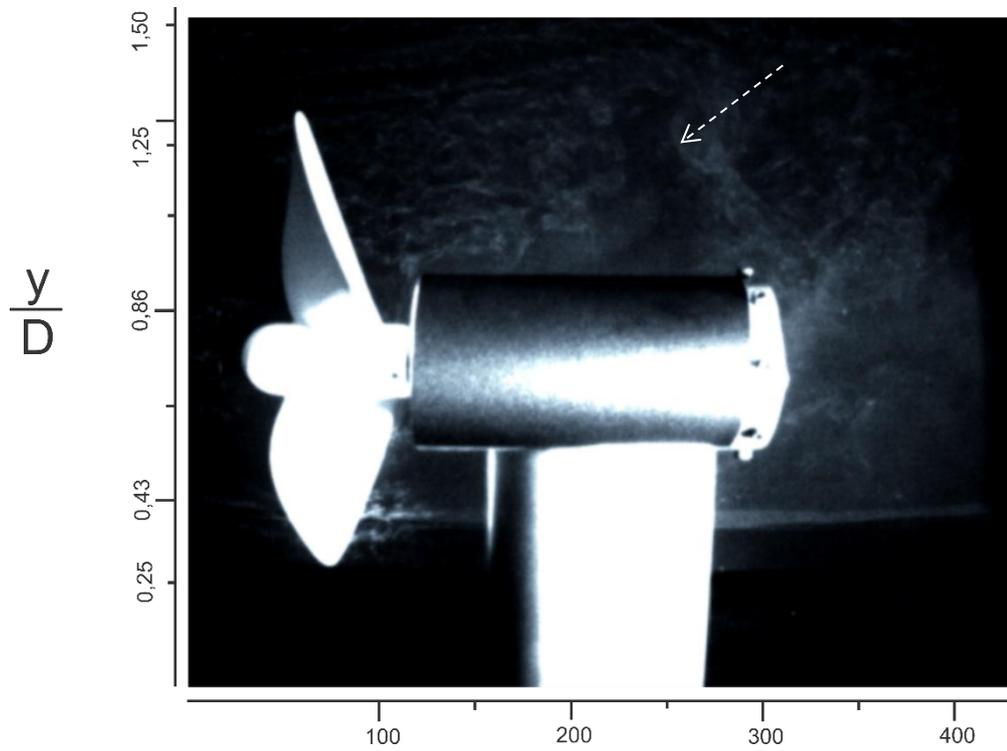


Figura 6.6 – Formação dos vórtices de ponta de pá para turbina de três pás com rotação de 800 rpm. [medidas do eixo x em mm]

6.3.1.3 Resultados para turbina de duas pás

Os ensaios da turbina de duas pás foram realizados com velocidade de escoamento de 5 m/s na seção de teste e com características de acordo com a tabela 6.2, mas com velocidade do obturador da câmera de 1/4000 s. Na figura 6.7 é possível verificar a influência da pá e da nacele no fluxo, a figura 6.7a mostra inicialmente a passagem pá, esta que é responsável unicamente pela estrutura coerente observada, com deslocamento do fluxo e com intervalo de 0,025 s, tanto a pá quanto a nacele são responsáveis pelo tamanho da estrutura indicada, esta que representa uma interação maior (figura 6.7b), ao analisar a figura 6.7c a interação é ainda maior representando a soma da influência da nacele e propagação do fluxo ao passar pela pá.

a) $t=t_0$ b) $t=t_0+0,025s$

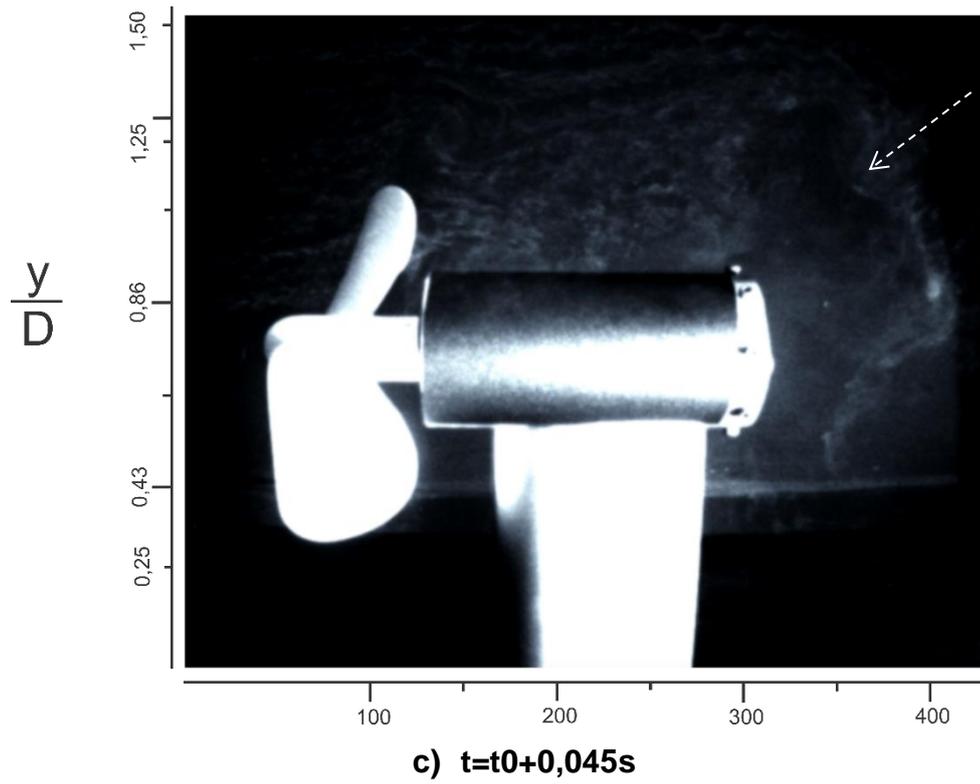
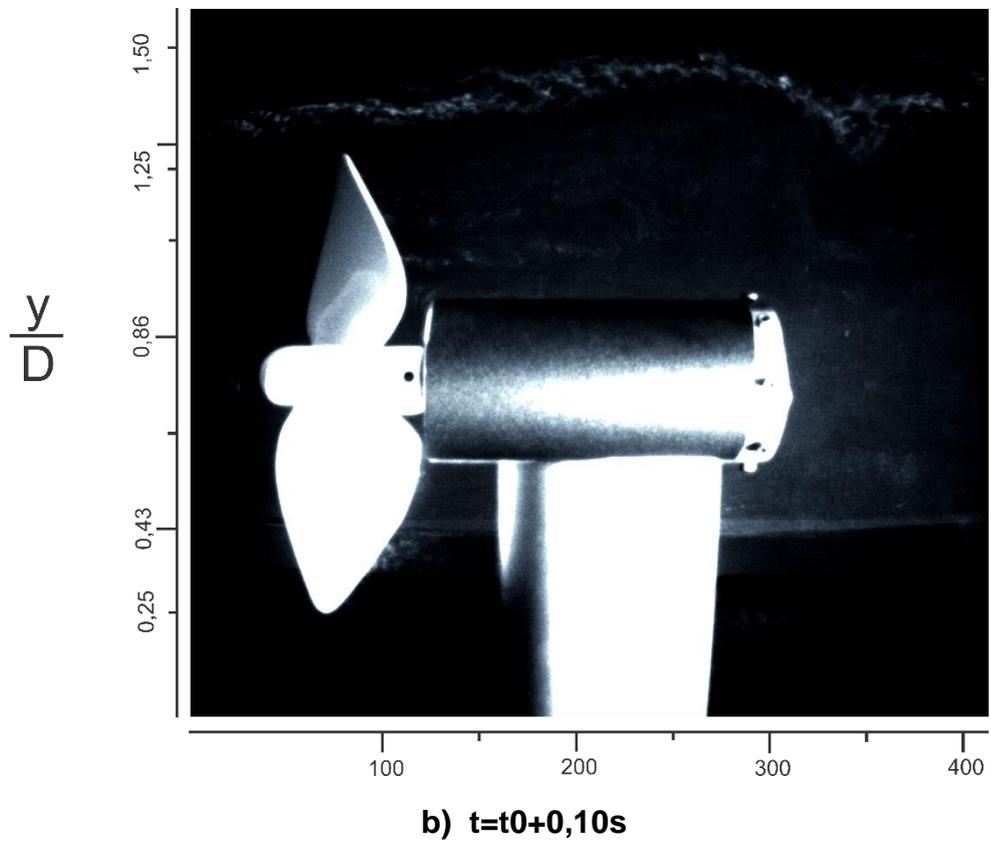
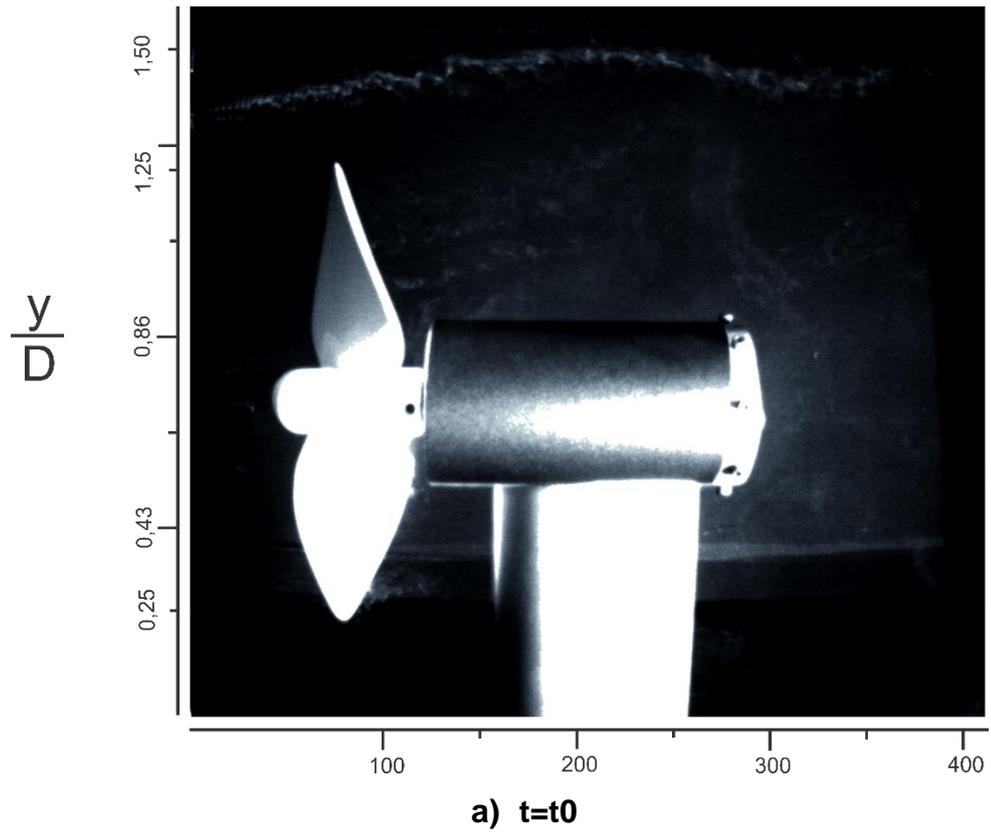
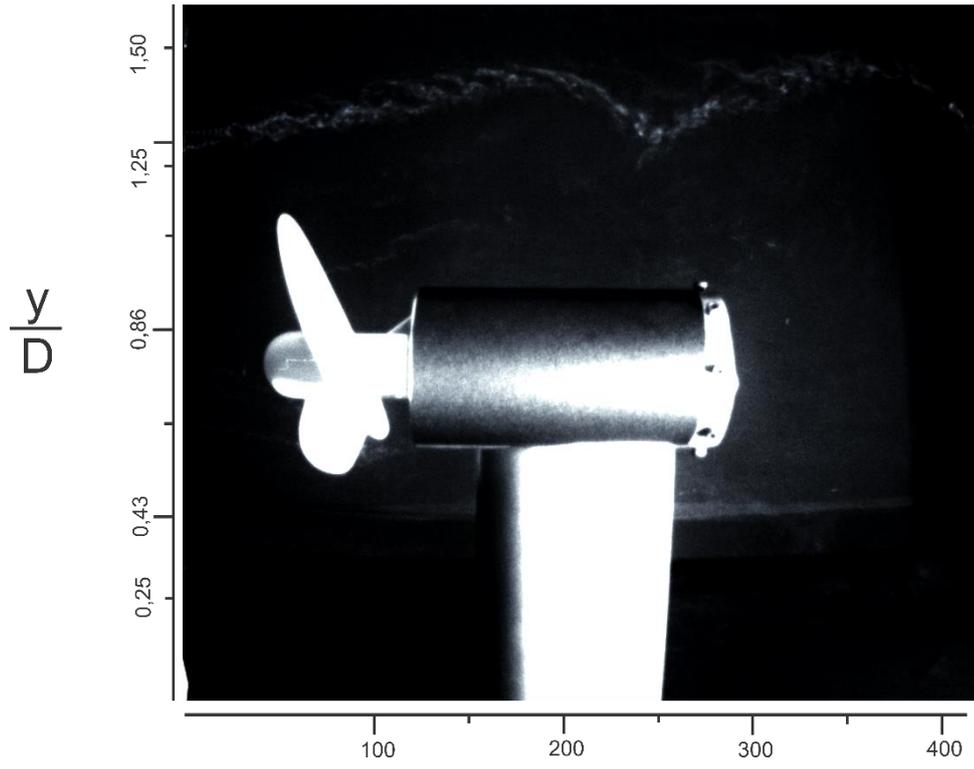
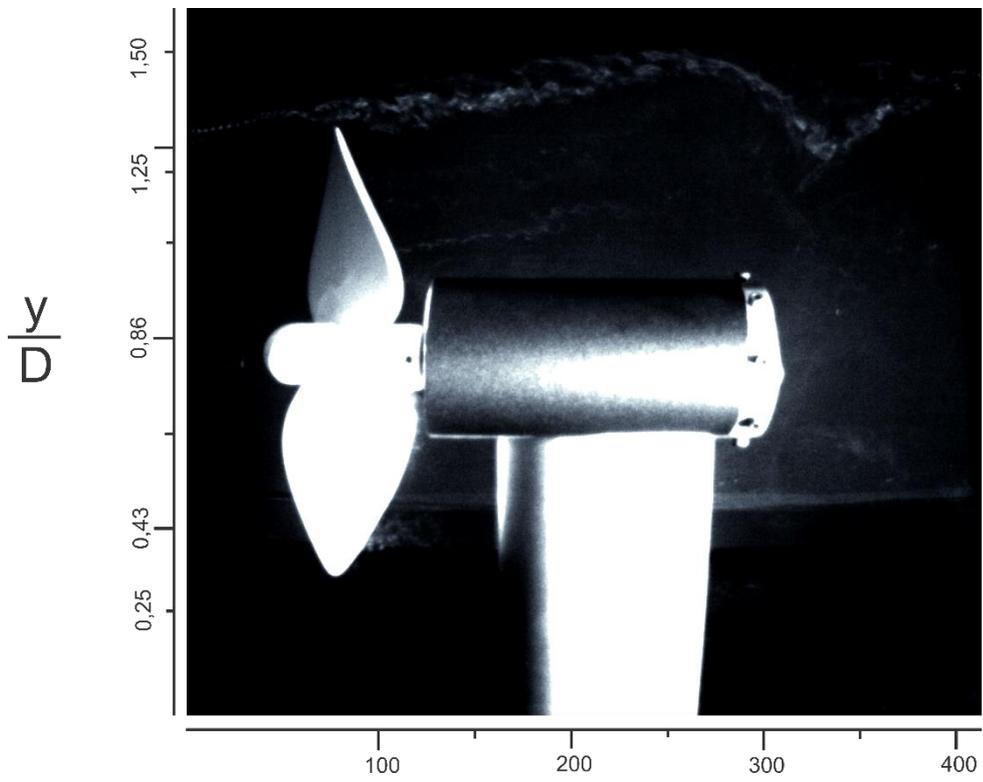


Figura 6.7 – interação da pá e da nacele com o fluxo para turbina de duas pás com rotação de 350 rpm. [medidas do eixo x em mm]

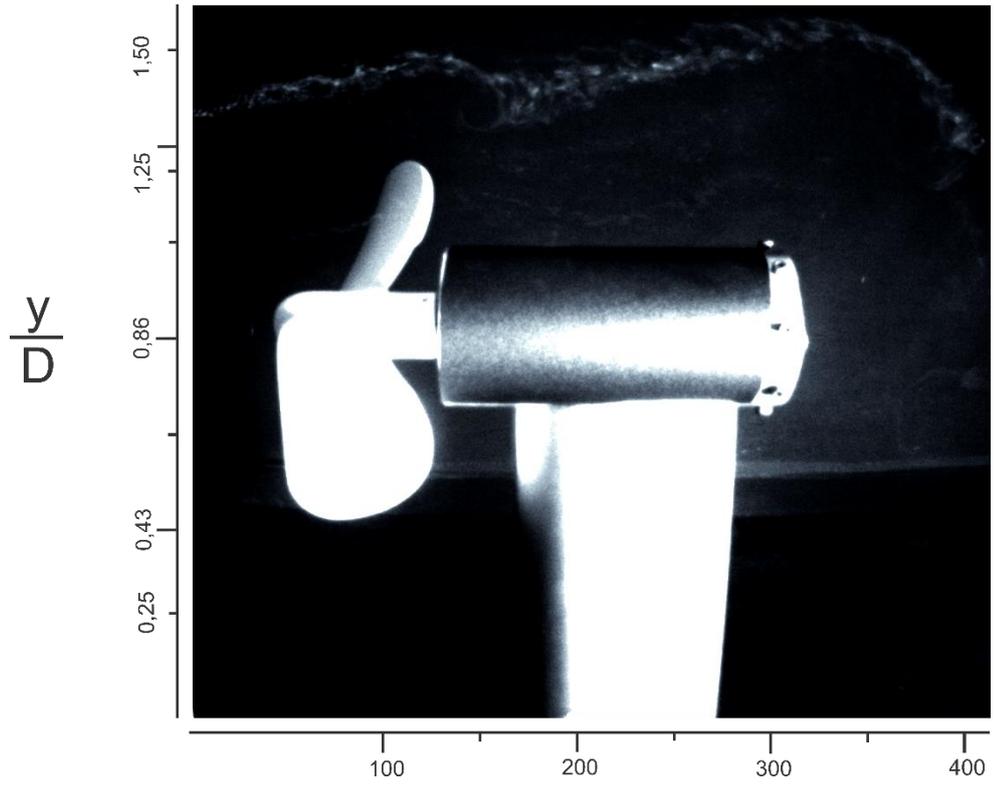
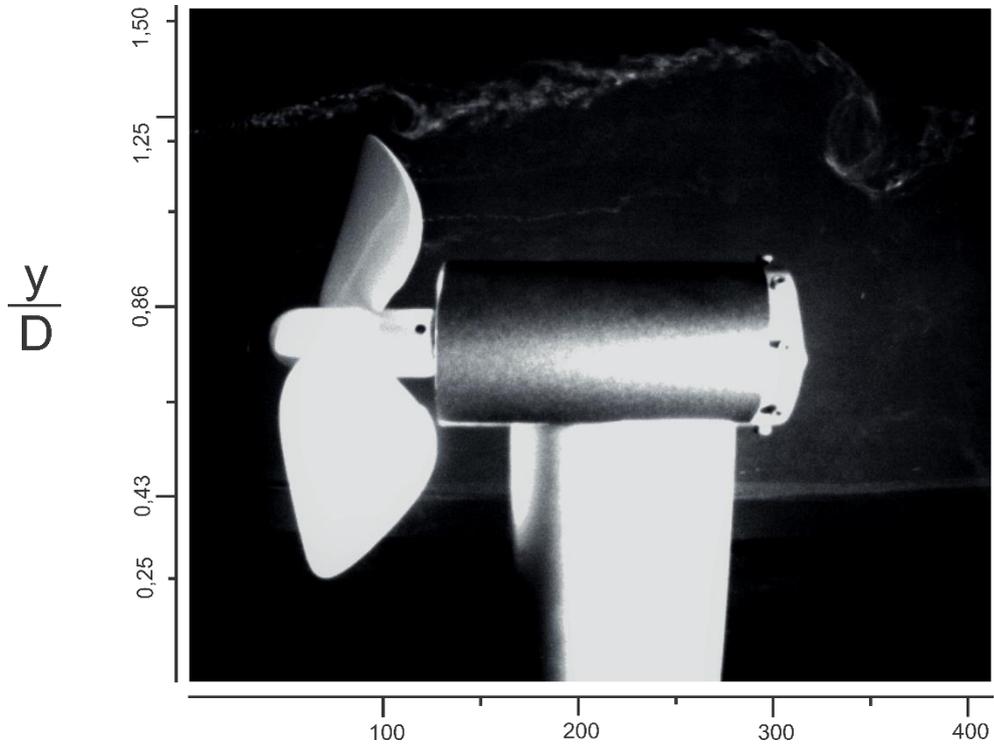




c) $t=t_0+0,13s$



d) $t=t_0+0,15s$

**e) $t=t_0+0,16s$** **f) $t=t_0+0,20s$**

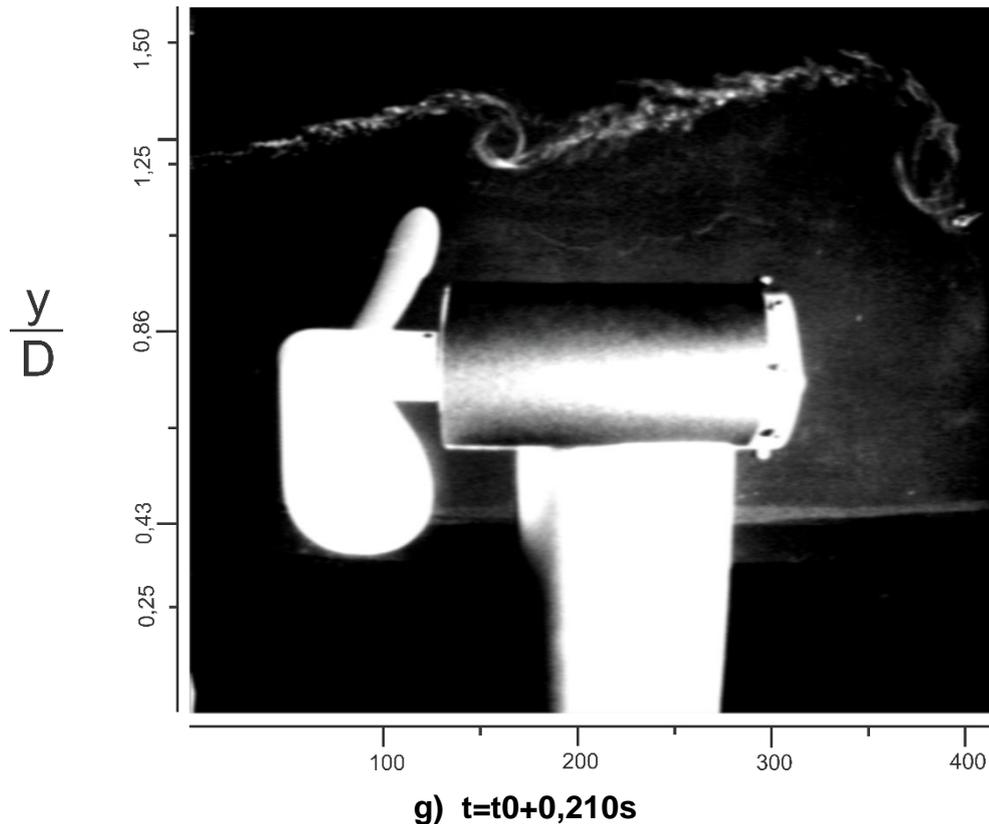


Figura 6.8 – Visualização de escoamento para turbina de duas pás com formação de vórtices de ponta de pá; rotação de 350 rpm. [medidas do eixo x em mm].

O intervalo representado pelas figuras 6.8a e 6.8b indica uma rotação completa (ciclo) do rotor, percebe-se que a influência da pá no fluxo visualizado pela raia de fumaça na posição próxima de $\frac{y}{D} = 1,50$ é quase desprezível, à medida que o líquido (gotas) percorre o fio por ação da gravidade, a fumaça gerada ao acompanhar o fluxo ocorre uma interação ocasionada pela ponta da lâmina da turbina para posições abaixo de $\frac{y}{D} = 1,40$ (figuras 6.8c, 6.8d, 6.8e, 6.8f). Ademais, os fenômenos observados nas figuras 6.8c e 6.8d não caracterizam com muita definição estruturas coerentes. Mas, os vórtices de ponta de pá são muito bem definidos nas figuras 6.8e, 6.8f e 6.8g.

Ao comparar com as turbinas de quatro e três pás, os vórtices apresentam características dimensionais diferentes. Na turbina de quatro pás os fenômenos estão bem mais próximos, o que indica que espaço entre as pás são menores. Para turbina de três pás o espaço entre vórtices aumenta, logo, a turbina possui apenas três pás

equidistantes para mesmo diâmetro do rotor, o mesmo acontece para turbina de duas pás, no qual apresenta os vórtices com tamanho maior e distantes entre si.

6.3.2 Resultados com método de fio de fumaça na horizontal

A configuração experimental utilizada no método de fio de fumaça na horizontal é a mesma utilizada na posição vertical, o que muda basicamente é a posição do fio, da câmera e da iluminação. A configuração aplicada está de acordo com a tabela 6.2. Assim como no método do fio de fumaça na horizontal, foi variado a quantidade de pás para turbina em escala. A figura 6.9 apresenta a seção de teste com relação a posição do fio. A câmera e refletor foram instalados na parte superior da seção de teste, o fio de fumaça instalado a uma distância de 100 mm da turbina, enquanto que a câmera a 550 mm da turbina.

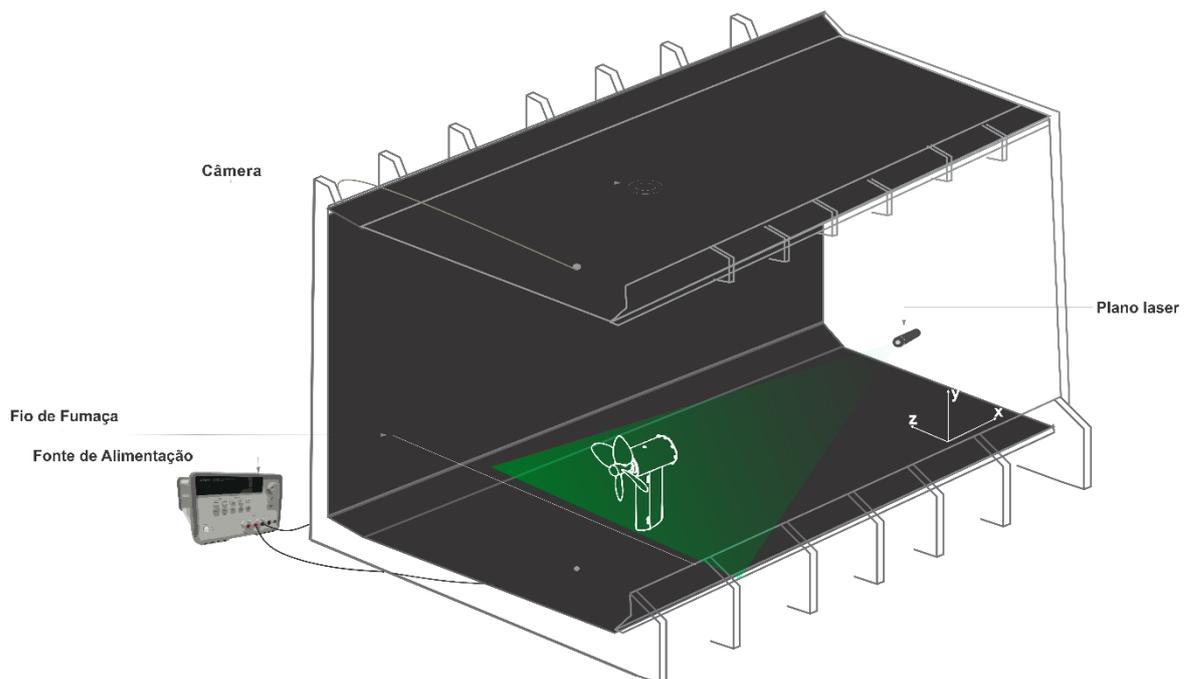


Figura 6.9 – Seção de teste do túnel de vento para método de fio de fumaça na horizontal.

6.3.2.1 Resultados para turbina de quatro pás

Os resultados para turbina de quatro pás com método de fio de fumaça na horizontal foram obtidos com velocidade de escoamento de 5 m/s e com configuração experimental de acordo com a tabela 6.2, mas com distância 550 mm da câmera com relação a turbina, sendo necessário alterar o foco da câmera e ainda algumas propriedades com relação ao sistema de aquisição de imagem, como o valor da velocidade do obturador da câmera de 1/3000 s e gama de 2,5.

Na figura 6.10 é possível analisar que os vórtices de ponta de pá acontecem aproximadamente na posição de $\frac{z}{D} = 1,25$, mas para posições inferiores a $\frac{z}{D} = 0,25$ na outra extremidade do rotor, nota-se a interação a jusante da pá com o fluido (raia de fumaça), porém os vórtices não são caracterizados, pois há uma distância entre a raia de fumaça até a ponta da pá. Na figura 6.11 é conclusiva com relação a essa distância, agora com a raia de fumaça na posição acima $\frac{z}{D} = 0,25$ de tal maneira que o contato da raia é na ponta da lâmina da turbina percebe-se a formação de vórtices bem caracterizados, enquanto que na outra extremidade na posição acima de $\frac{z}{D} = 1,25$ há influência do rotor da turbina, mas não tipificando os vórtices.

A turbina (fig. 6.11) indica vários vórtices com relação a passagem da pá pelo fluido com fumaça ($\frac{z}{D} = 0,25$ e $0,43$), há a presença de sete vórtices, ou seja, corresponde a $1\frac{3}{4}$ de ciclo do rotor, nota-se ainda que a lâmina para geração de um novo vórtice está em contato com a raia indicando mais uma passagem de pá, que nesse caso completaria duas revoluções completas.

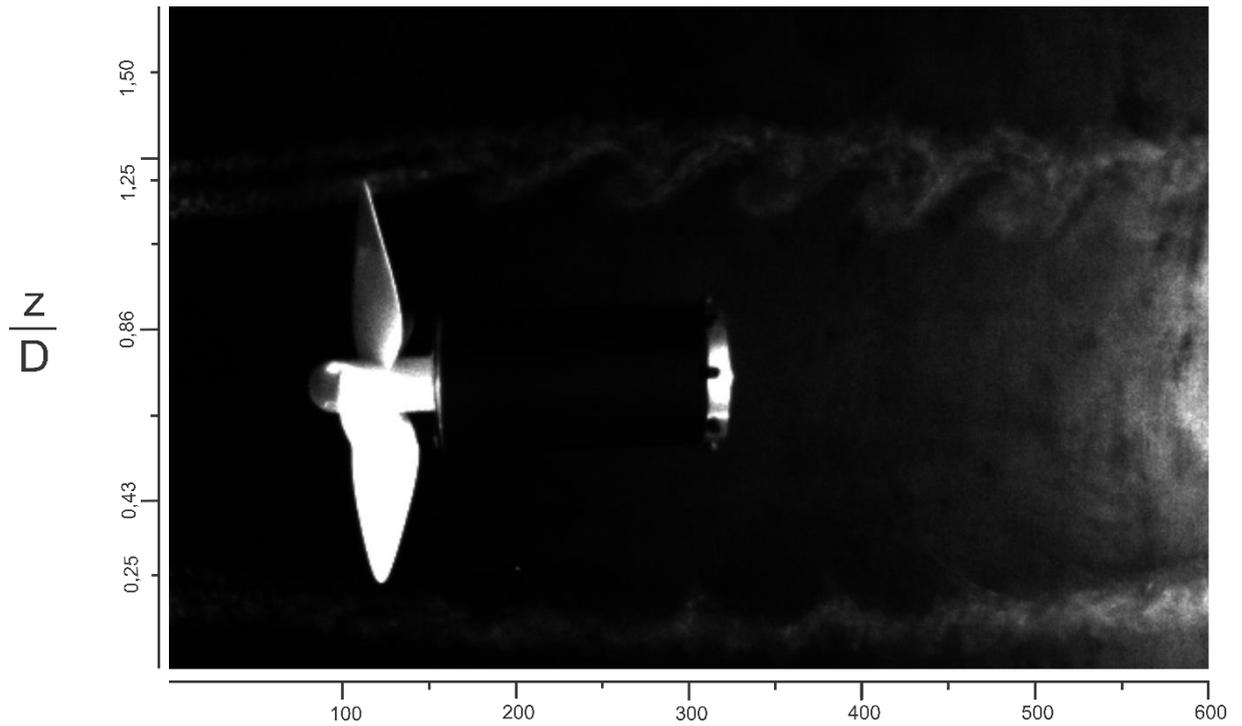


Figura 6.10 – Turbina de quatro pás com método de fio de fumaça na horizontal; rotação de 850 rpm. [medidas do eixo x em mm].

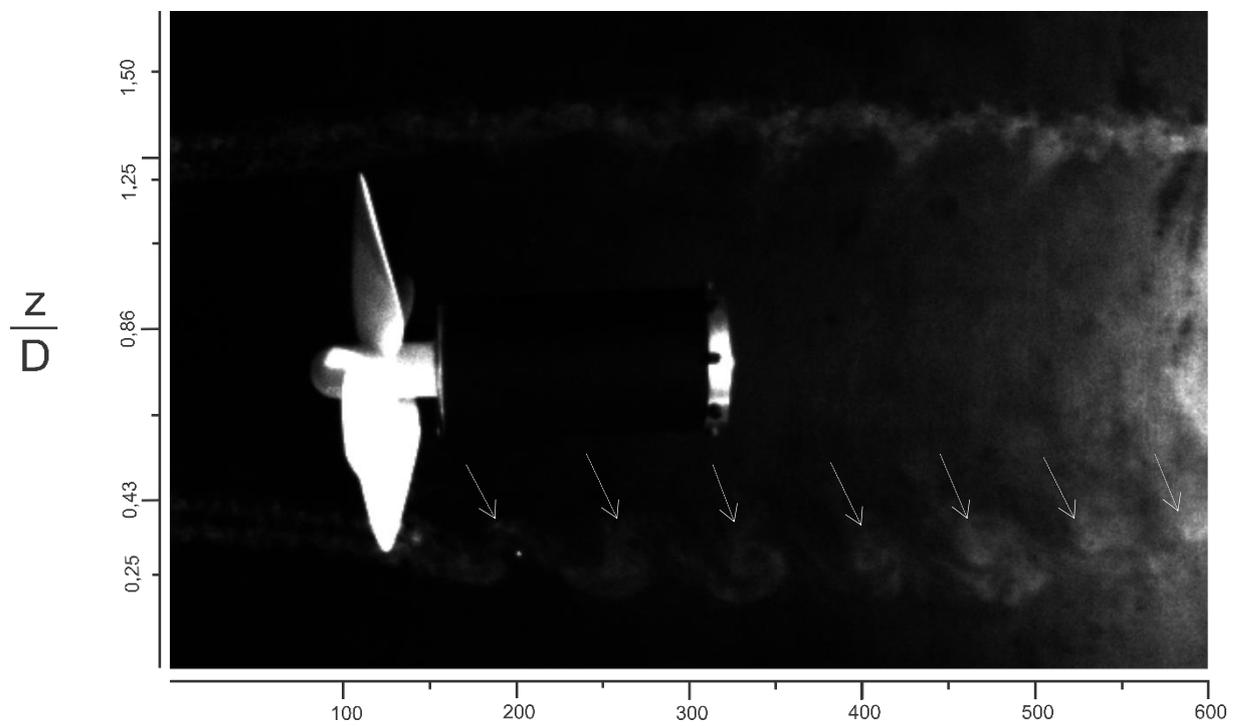


Figura 6.11 – Turbina de quatro pás com método de fio de fumaça na horizontal; rotação de 850 rpm. [medidas do eixo x em mm].

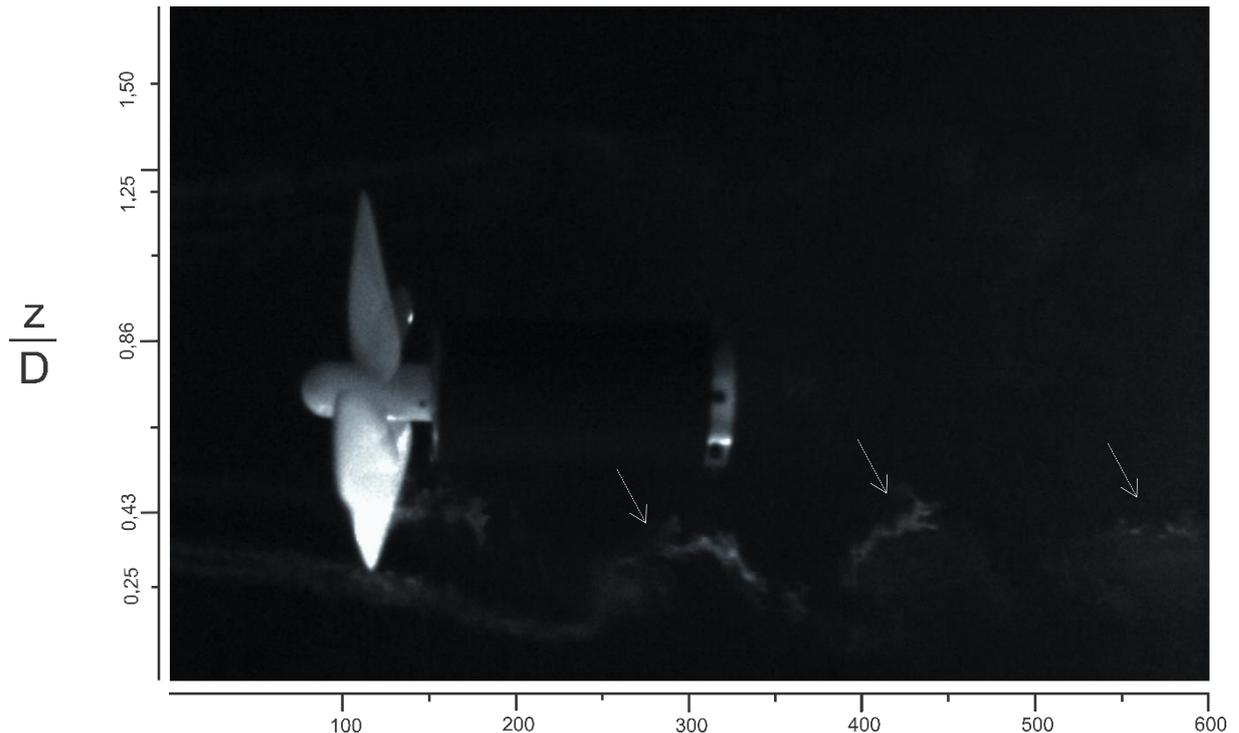


Figura 6.12 – Turbina de quatro pás com método de fio de fumaça na horizontal; rotação de 400 rpm. [medidas do eixo x em mm].

Nota-se na figura acima para uma rotação de 400 rpm, que indica cerca de 0,47 da rotação representada na figura 6.11, ou seja, ligeiramente abaixo da metade da rotação, com velocidade de escoamento de 5 m/s a disposição de três vórtices a jusante; a posição da “quarta” pá em contato com raia de fumaça formará o quarto vórtice, indicando um ciclo do rotor. É possível ainda, perceber que os vórtices formados ocupam em linha (eixo x) aproximadamente 350 mm, enquanto que na figura 6.11 três vórtices iniciais formados ocupam cerca de 170 mm, ou seja, aproximadamente a metade do indicado na figura 6.12, o que assinala que a rotação do rotor tem ligação direta com os vórtices de ponta de pá.

Na figura 6.13, a rotação é de 100 rpm e com mesma velocidade de escoamento de 5 m/s; observa-se que não há caracterização definida dos vórtices de ponta de pá, mas o fluido marcado pelas raias de fumaça ao passar pelo rotor apresenta instabilidade, e à medida que aquele avança nota-se uma região ainda mais turbulenta com bastante influência da nacele e das passagens das pás, uma região instável traçada a jusante da nacele é muito evidenciada pela fumaça.

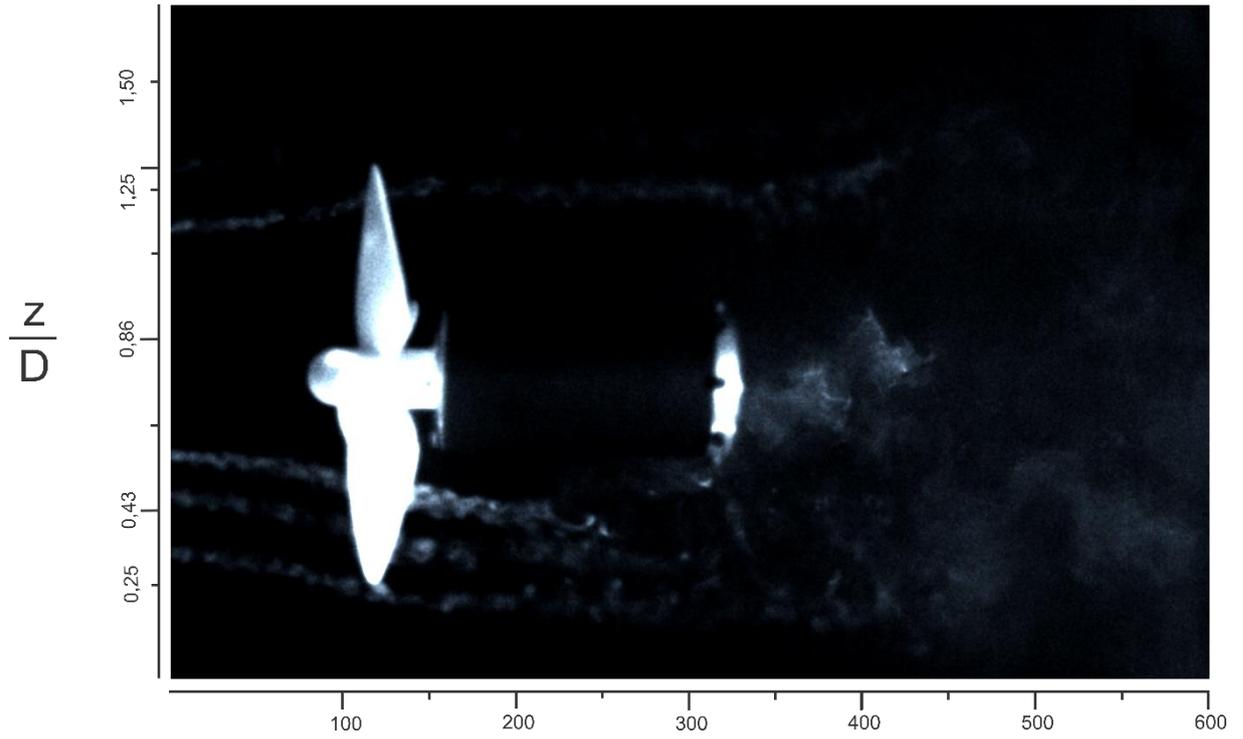


Figura 6.13 – Turbina de quatro pás com método de fio de fumaça na horizontal; rotação de 100 rpm. [medidas do eixo x em mm].

6.3.2.2 Resultados para turbina de três pás

A figura 6.14 apresenta a formação de vórtices de ponta de pá com uma estrutura de rotacionalidade muito bem definida, resultados não tão diferentes quando comparados para turbina de quatro pás, ademais, sendo possível analisar o quantitativo de seis vórtices, o que indica duas revoluções completas do rotor.

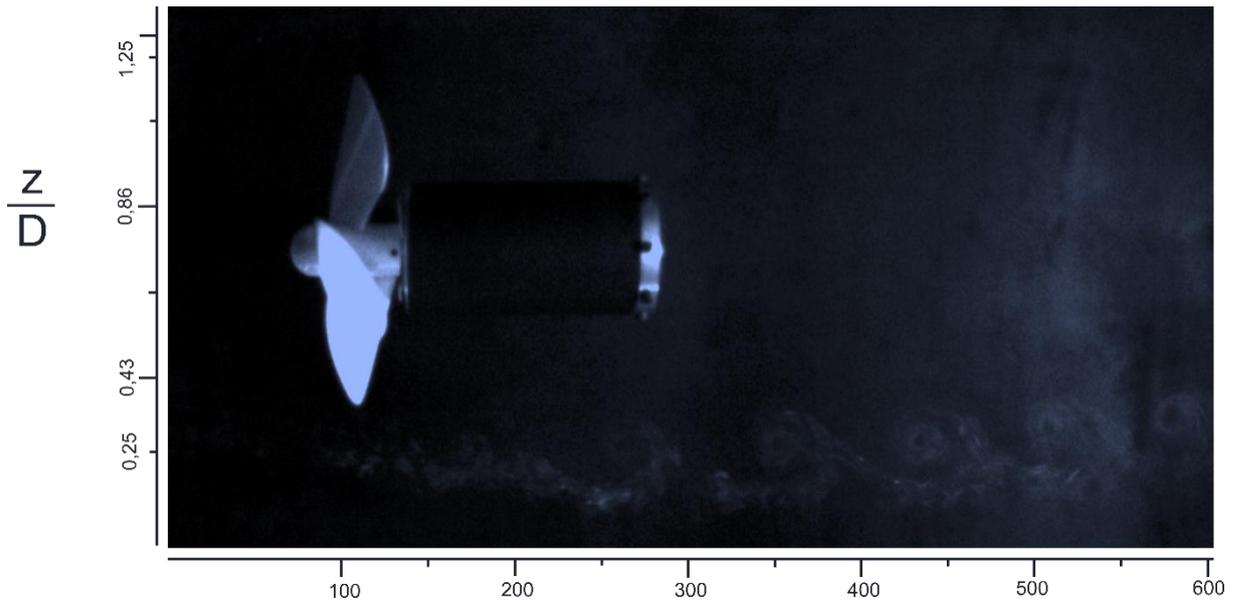


Figura 6.14 - Turbina de três pás com método de fio de fumaça na horizontal; rotação de 850 rpm. [medidas do eixo x em mm].

6.3.2.3 Resultados para turbina de duas pás

O ensaio para turbina de duas pás com fio de fumaça na horizontal foi realizado com rotação do rotor de 350 rpm e velocidade de escoamento de 5 m/s. Vale notar que a figura 6.15 apresenta par de vórtices tanto na parte inferior como na parte superior da imagem, é possível perceber que os vórtices apresentam tamanhos “alongados” e muito distantes entre si, pois a quantidade de rotores está intrinsecamente ligado aos fenômenos de escoamento. Ademais, os “pares” de vórtices indica o quantitativo de um ciclo de rotação, o que se denota que cada passagem de pá representa um vórtice.

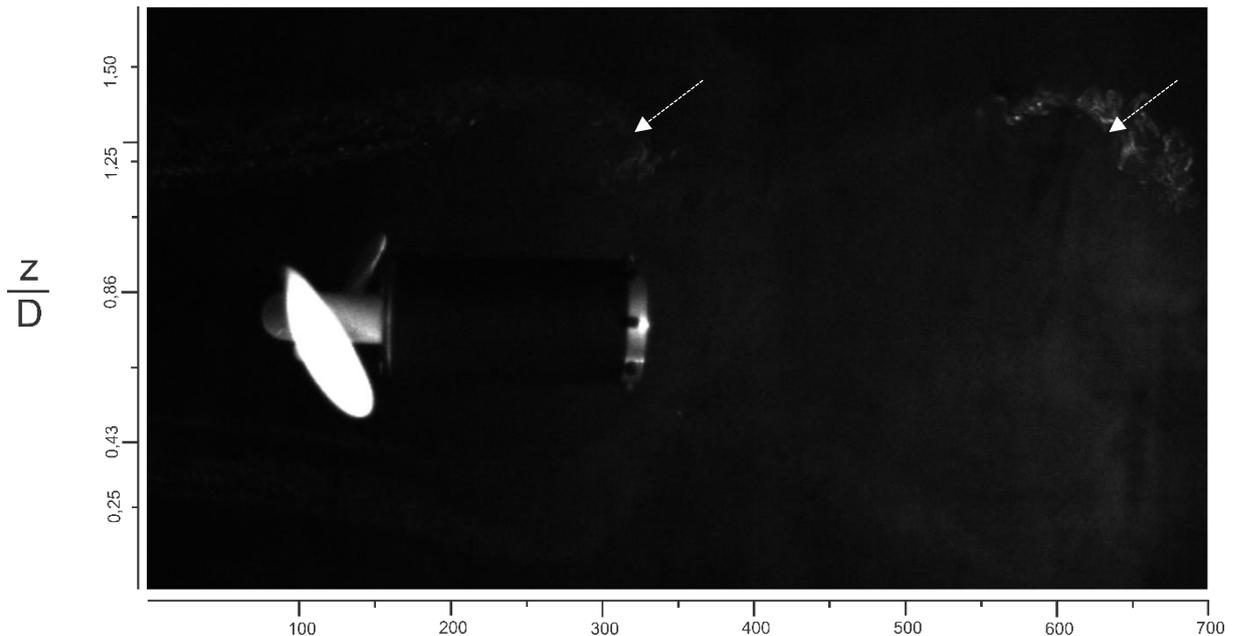


Figura 6.15 - Turbina de duas pás com método de fio de fumaça na horizontal; rotação de 350 rpm. [medidas do eixo x em mm].

6.3.3 Resultados com método de injeção direta com gerador de fumaça

Os resultados apresentados utilizando o gerador de fumaça para visualização do escoamento foram qualitativamente analisados. O gerador de fumaça dispõe de uma haste de fumaça, esta que possui uma resistência elétrica e uma saída para disponibilização de fumaça, a mesma foi instalada dentro da seção de teste a montante da turbina de perfil NACA 4415. São apresentados resultados para duas, três e quatro pás.

A figura 6.15 e a tabela 6.5 mostra a configuração experimental utilizada no método de visualização.

A análise é realizada na posição $\frac{z}{D}$, onde D representa o diâmetro do rotor do modelo da turbina em escala e z é coordenada vertical, o eixo x apresenta unidade em mm, servindo de base para comparação de distanciamento, dimensão e posição dos fenômenos aerodinâmicos.

Alguns resultados apresentam instantes referente a aquisição das imagens, onde t_0 representa o instante inicial, ou seja, a foto inicial do ensaio analisado, e t representa o tempo com variações dos instantes na aquisição de imagens com base no FPS (frame per second), quadros por segundo.

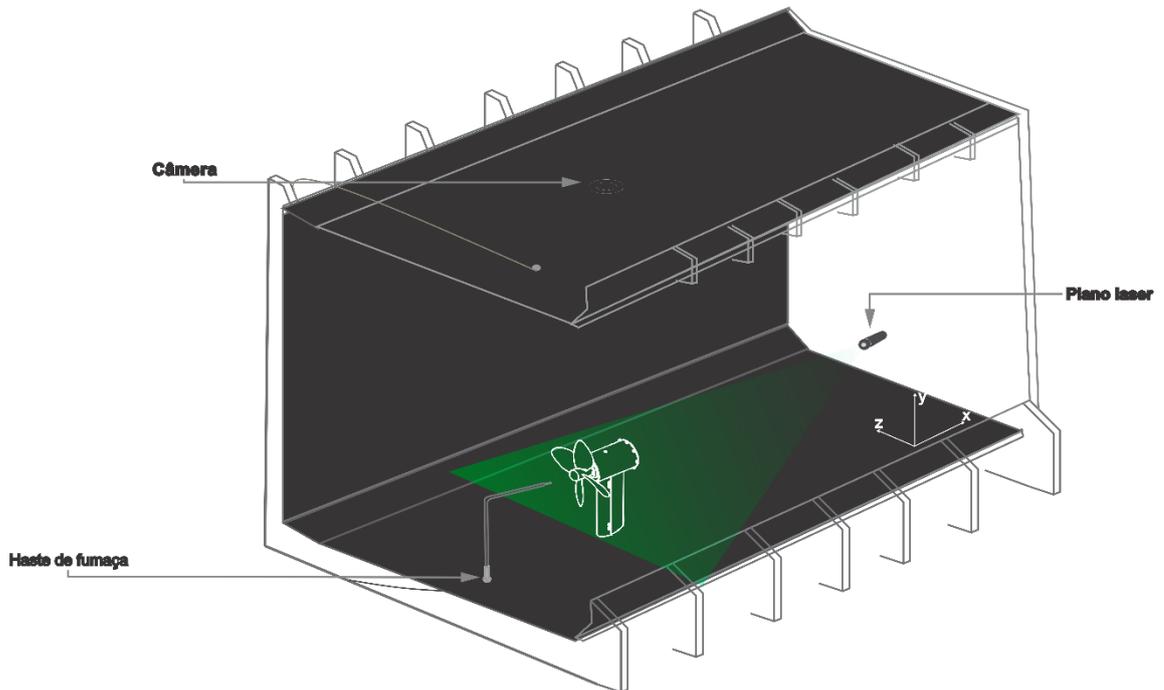


Figura 6.16 – Seção de ensaios para método de injeção direta (gerador de fumaça)

Tabela 6.3 – Configuração experimental para técnica de injeção direta (gerador de fumaça)

Diâmetro de saída da haste de fumaça	0,30 mm
Líquido gerador de fumaça	Polietileno glicol
Distância da haste até a turbina	100 mm
Nº de Reynolds (com base no diâmetro de saída da haste de fumaça)	102
Sistema de iluminação	LED (1000 lúmens)
Câmera	Flir Blackfly S BFS-U3 13Y3M
Distância da câmera com relação a turbina	550 mm
FPS	200
Formato de imagem	PNG
Velocidade do obturador (s)	1/2000 a 1/4000
Gama	1,0 a 3,0
Ganho de imagem	17,97 dB
Modo de aquisição de imagem	Contínuo
Tratamento de imagens	Controle do brilho, contraste, intensidade e ruído

O sistema de iluminação utilizado para no método de injeção de fumaça pelo gerador de fumaça apenas os *leds* foram suficientes, pois a densidade e disponibilidade de fumaça gerada é muito superior ao do método de fio fumaça.

6.3.3.1 Resultado para turbina de quatro pás

O resultado apresentado na figura 6.16 mostra os vórtices de ponta pá na parte inferior da imagem, é possível quantificar a presença de oito vórtices, indicando oito passagens de pá, na qual cada pá realizou duas passagens. É notável a diferença quanto ao aspecto característico visual da foto quando comparado o resultado com método de fio de fumaça na horizontal, pois a disponibilidade contínua de fumaça e a densidade a partir do fornecimento contínuo do gerador de fumaça implica numa melhor visibilidade do escoamento traçado. Do posto de vista dimensional, ao comparar a distância dos três vórtices iniciais (do primeiro ao terceiro) é muito próximo do diâmetro do rotor.

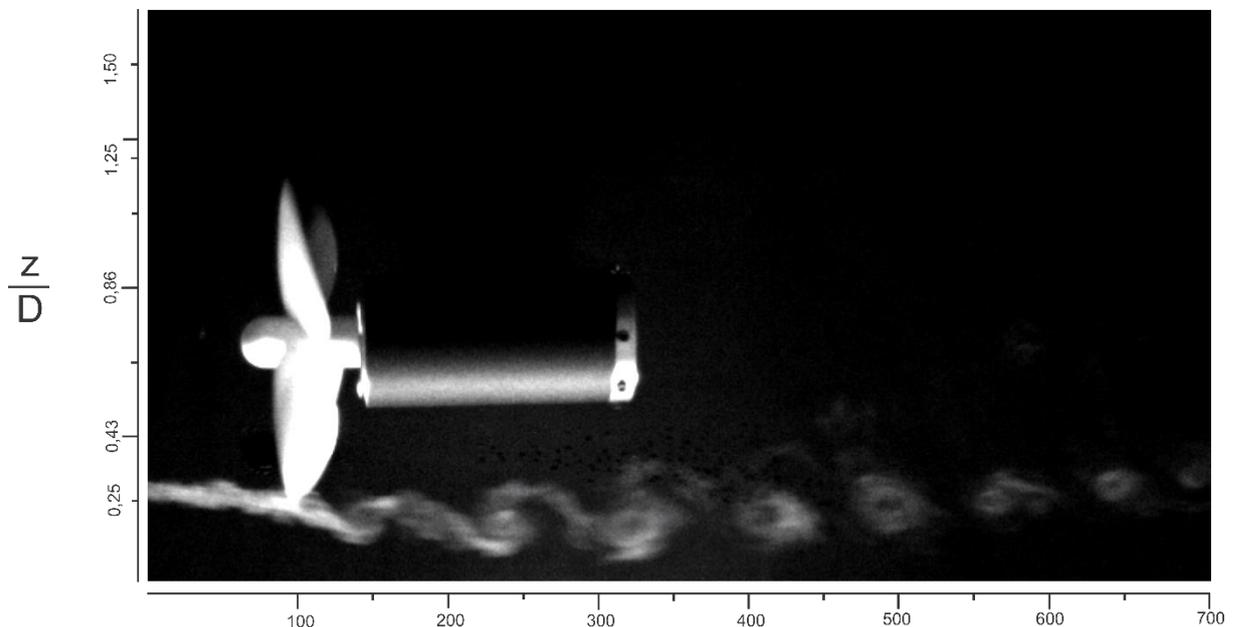
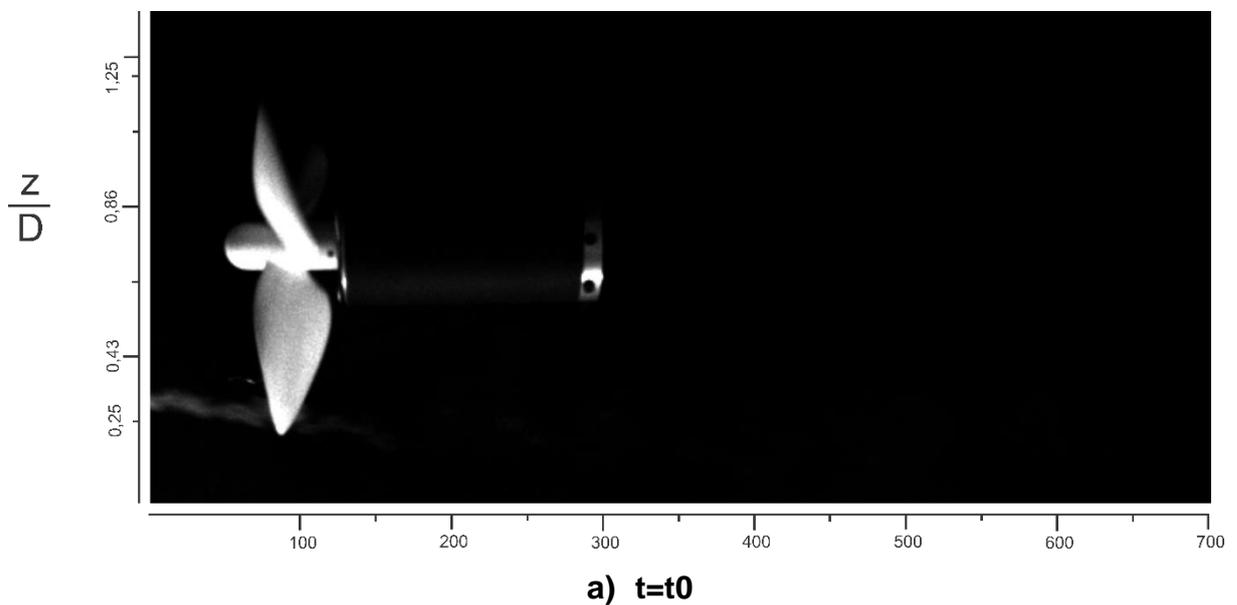
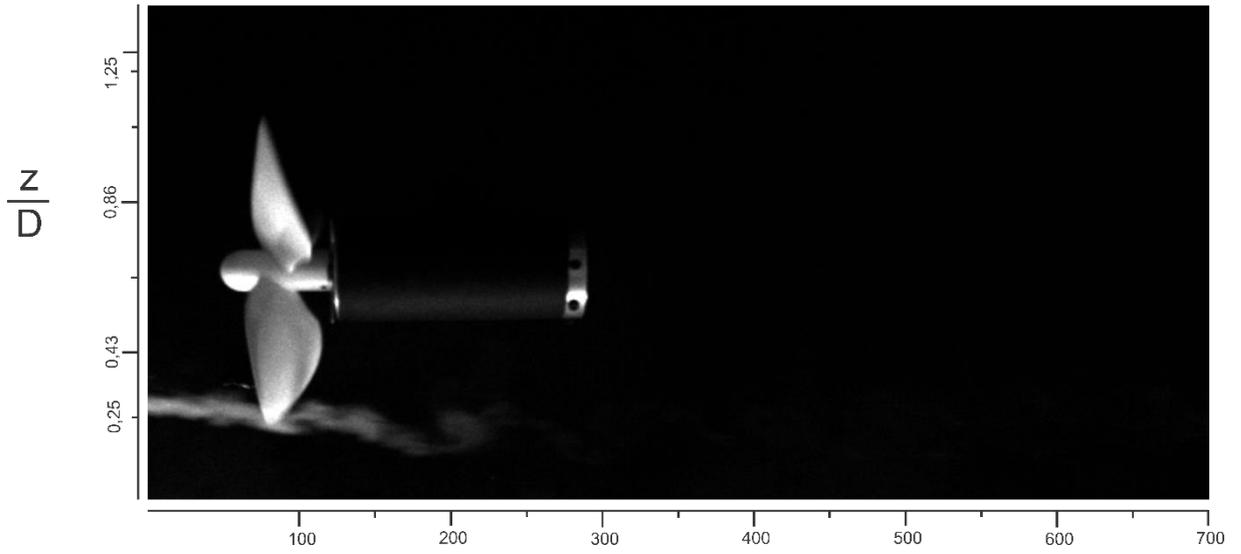
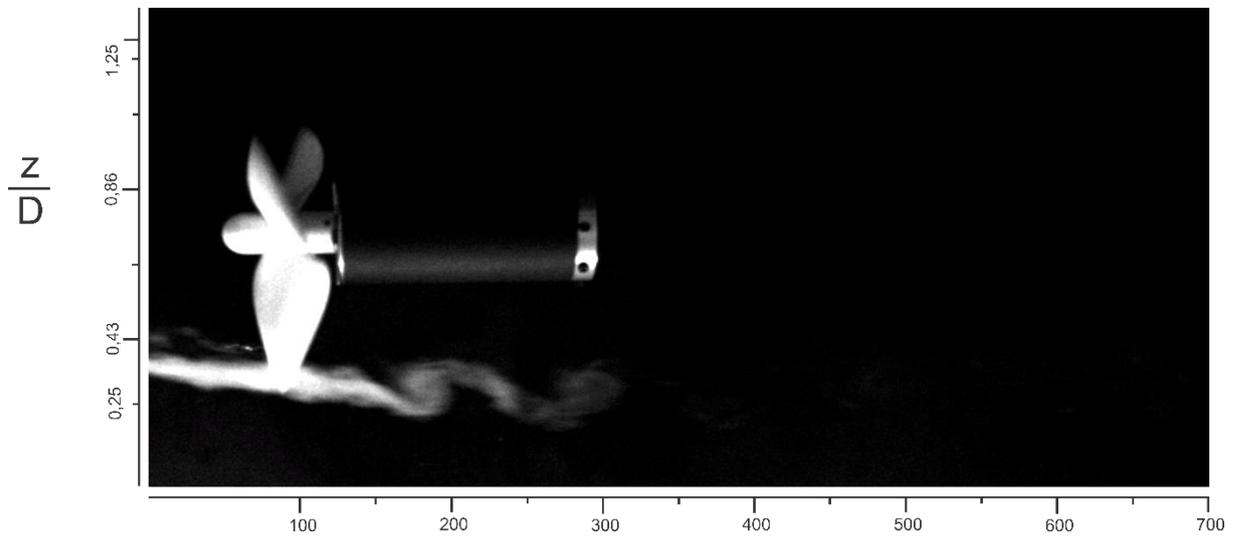
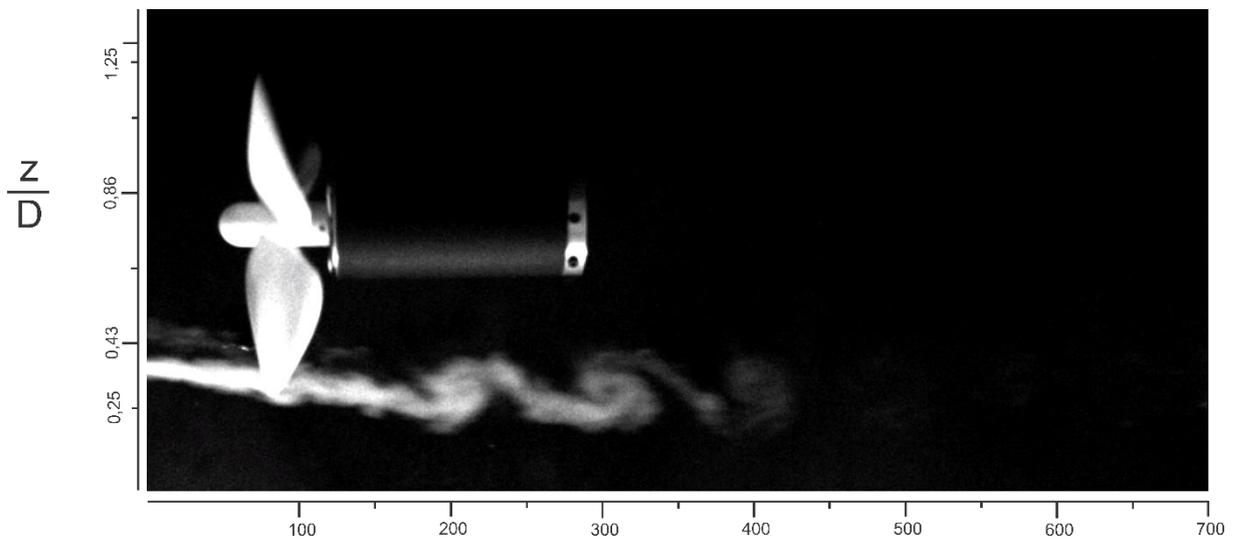


Figura 6.17 - Turbina de quatro pás com método injeção direta (gerador de fumaça); rotação de 850 rpm. [medidas do eixo x em mm].

6.3.3.2 Resultado para turbina de três pás

Os resultados para turbina de três pás para método de injeção direta estão apresentados em intervalos de tempo, no qual demonstra a evolução do fluido traçado por fumaça a jusante do rotor com influência unicamente da ponta da lâmina da turbina; na figura 6.15a é notória a incidência inicial da raia de fumaça na ponta da lâmina, mas sem a presença de estrutura coerente, pois ainda não ocorreu a passagem da raia pela pá. Enquanto que na figura 6.15b (após 0,025s com relação a figura para $t=0$) é perceptível uma estrutura coerente formada, o que se denota a presença do vórtice de ponta de pá, indicando uma única passagem da lâmina do conjunto de três pás do rotor analisado. Na figura 6.15c ($t=t_0+0,050s$) dois vórtices são percebidos, sinalizando a passagem de duas pás do rotor, e para completar o ciclo do rotor (três passagens de pás) a figura 6.15d ($t=t_0+0,070s$) mostra a formação tripla de vórtices de ponta de pá. Além disso, para figura 6.15e ($t=t_0+0,15s$) contabiliza-se $2 \frac{1}{3}$ de ciclos realizados pelo rotor, o que caracteriza sete vórtices.



**b) $t=t_0+0,025\text{s}$** **c) $t=t_0+0,050\text{s}$** **d) $t=t_0+0,070\text{s}$**

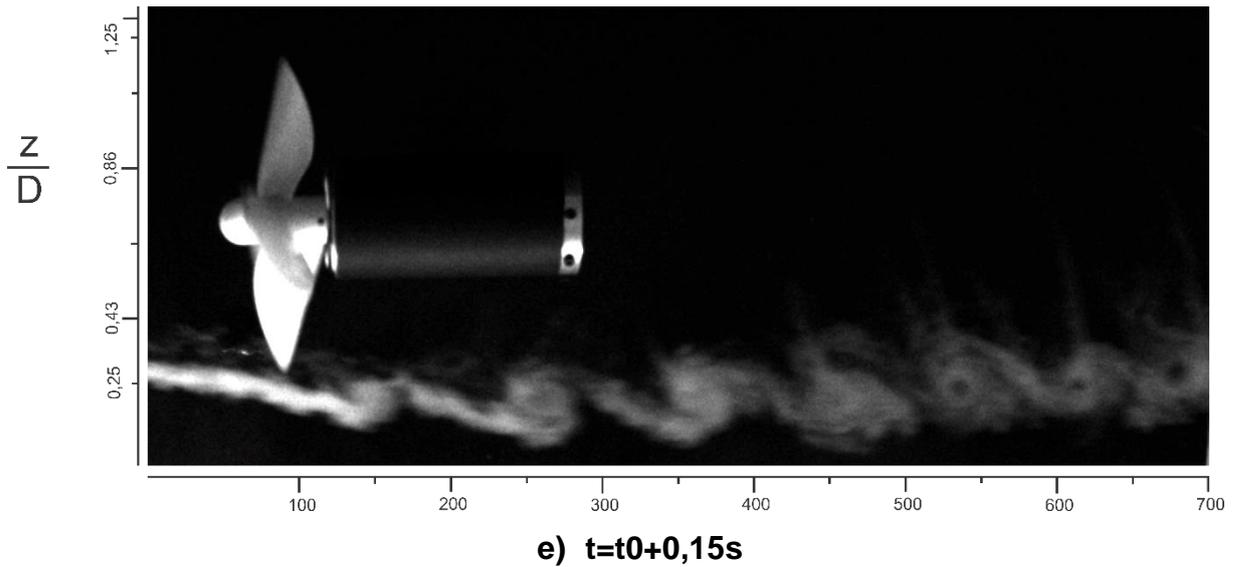


Figura 6.18 - Turbina de três pás com método injeção direta (gerador de fumaça); rotação de 850 rpm. [medidas do eixo x em mm].

6.3.3.3 Resultado para turbina de duas pás

O resultado para turbina de duas pás com método de injeção direta é próximo dos demais arranjos (três e quatro pás) com relação a influência da ponta da pá da lâmina da turbina; basicamente, a variação está no tamanho dos vórtices e a posição entre si, nota-se tais variações na figura 6.16, no qual é possível também verificar dois ciclos do rotor a partir do fenômeno de vorticidade.

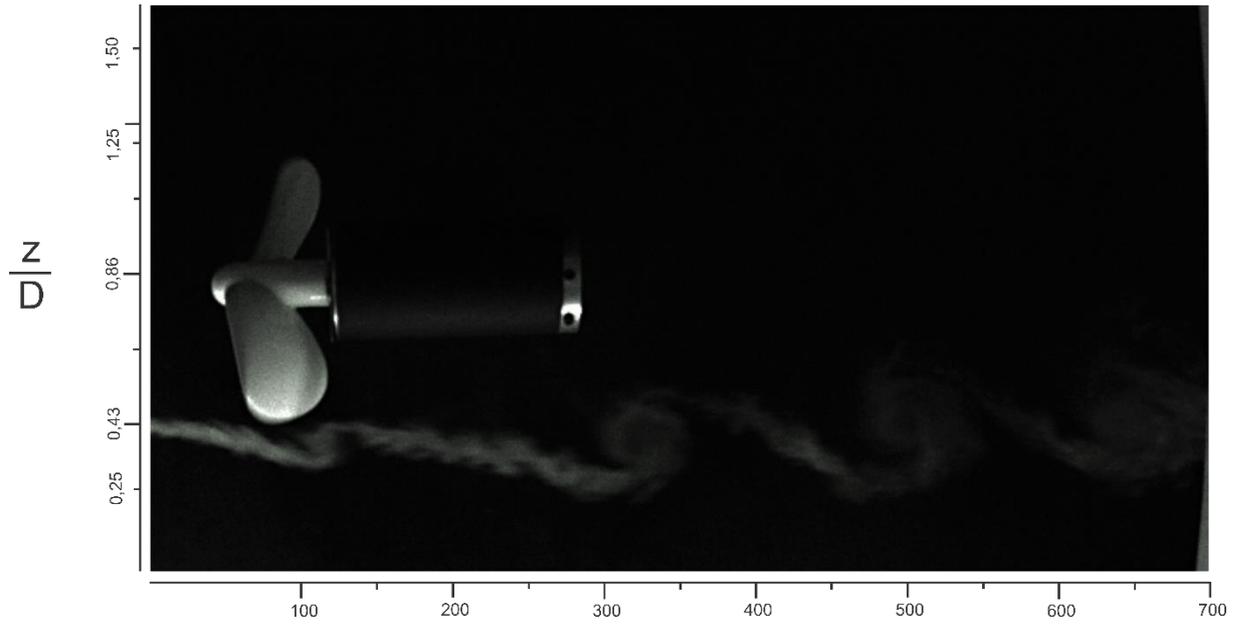


Figura 6.19 - Turbina de duas pás com método injeção direta (gerador de fumaça); rotação de 600 rpm. [medidas do eixo x em mm].

6.3.4 Resultados para arranjo de duas turbinas com método de fio de fumaça

Os ensaios para arranjo de duas turbinas (rotor de quatro pás) foram realizados com método de visualização com fio de fumaça, foi utilizado mesmo sistema de aquisição de imagens e condições muito próximas para única turbina; seguindo as mesmas especificações da tabela 6.2 e com velocidade de escoamento de 5 m/s. São apresentados dois resultados, o primeiro com uma distância entre turbinas relativamente maior, de 2,27 do diâmetro do rotor (D), valor este com referência ao trabalho realizado por Brasil Jr. et al (2016) o que mostra pouca ou desprezível a influência de uma turbina na outra e o segundo resultado a uma distância de 0,5 com relação ao diâmetro do rotor (entre turbinas).

Nota-se na figura 6.16 que não há influência direta de uma turbina na outra, ou seja, a distância entre turbinas é suficientemente ideal para instalação possível de uma terceira turbina a jusante equidistante das duas em análise, sem que perceba efeitos do escoamento ao passar pelas turbinas dispostas lado a lado.

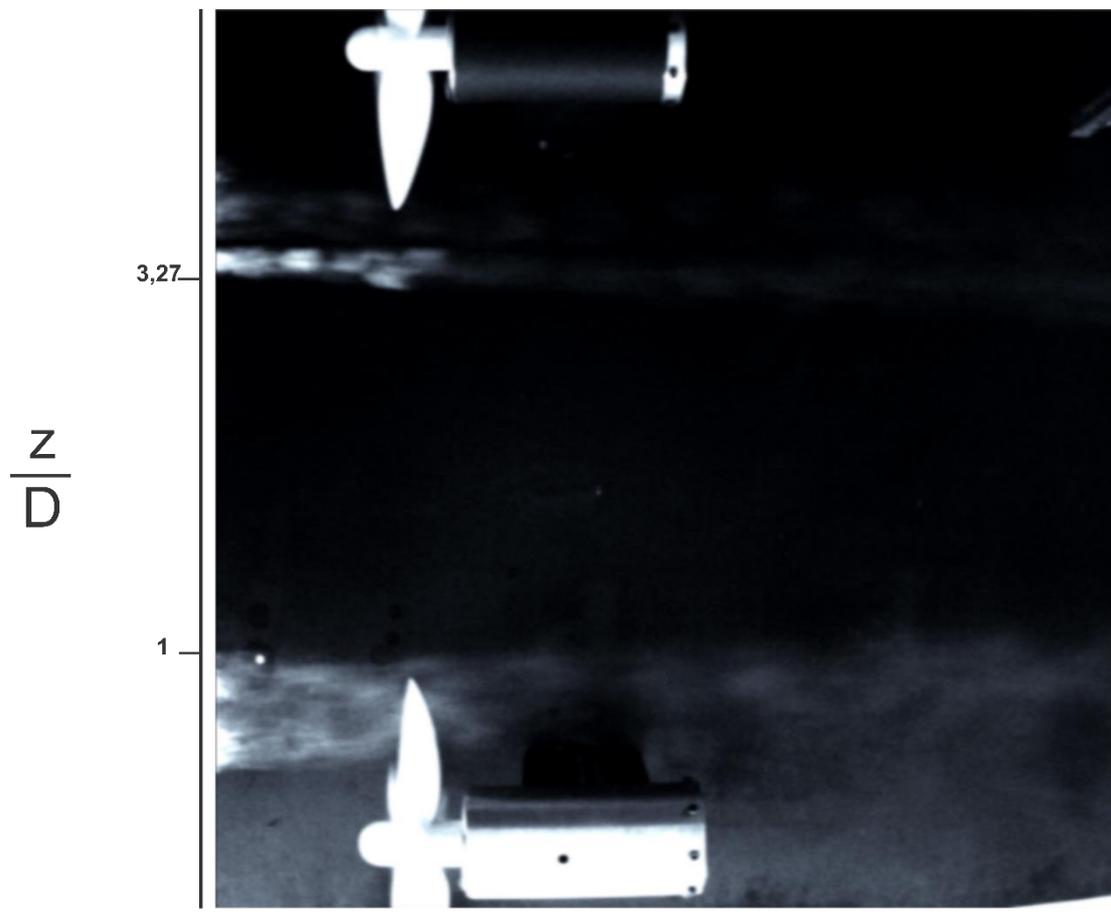


Figura 6.20 – Duas turbinas com método de fio de fumaça (2,27D). $\omega=850$ rpm

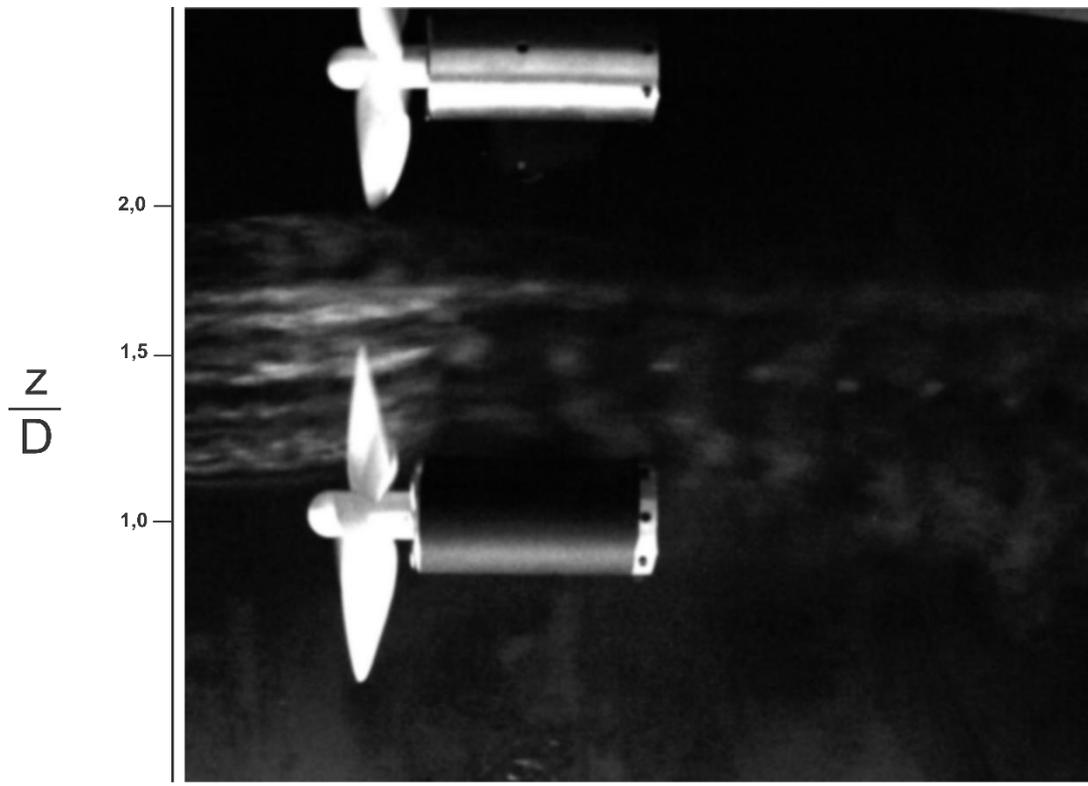


Figura 6.21 – Duas turbinas com método de fio de fumaça (0,5D). $\omega=850$ rpm

A figura 6.16 é possível analisar a interação do escoamento provocado pelas duas turbinas, o escoamento no intervalo entre as duas há influência muito maior quando comparado no caso da figura 6.15, nesse caso é notável que a distância entre turbinas não é recomendada, e a jusante os efeitos de turbulência são ainda maiores justamente na região entre as duas turbinas.

7 CONCLUSÕES

Os resultados foram obtidos a partir de dois métodos de visualização de fumaça (fio de fumaça e método de injeção direta com gerador de fumaça), com objetivo de caracterizar o escoamento na turbina do tipo hidrocínética.

A utilização de duas metodologias de visualização de escoamento foi importante para melhor determinar as estruturas coerentes, tais quais os vórtices foram bem definidos nos resultados, assim como o princípio de formação, por isso, afirma-se que fenômenos estão intimamente ligados ao desempenho da turbina. Observou-se bem, a partir do método de visualização de escoamento, as propriedades qualitativas com variação do número de pás e da rotação do rotor.

Quanto ao método de fio fumaça baseado nos trabalhos do Veermer (2001) e do Yarusevych (2009), no qual eles recomendam número de Reynolds de 50 baseado no diâmetro do fio de fumaça para visualização de estruturas coerentes; o presente trabalho apresentou número de Reynolds em torno de 100, ou seja, duas vezes mais, porém foi possível obter resultados passíveis de caracterização e ainda com velocidade de escoamento de 5 m/s, sendo que Yarusevych (2009) trabalhou com velocidade de escoamento pouco maior que 1 m/s.

O método de fio de fumaça na posição vertical apresentou resultados mais satisfatórios quando comparado ao método de injeção direta com câmera na lateral, enquanto que o método de injeção direta com gerador de fumaça com câmera superior denotou visualização de escoamento mais definidos do que fio de fumaça na horizontal, tais comparações e diferenças estão ligados a densidade e dispersão da fumaça, distância da câmera e ainda outros fatores ligados a turbulência.

Ademais, o método de Injeção Direta (ID) proporcionou fumaça com maior densidade, o que auxiliou o sistema de aquisição de imagens, porém, no aspecto de escoamento da fumaça obtida pelo método (ID), resultou-se num comportamento menos laminar, já o método de fio fumaça apresentou densidade menor, dispersão mais rápida, além do escoamento laminar – o que contribui para caracterização de fenômenos inerentes ao escoamento na região da turbina.

Vale ressaltar que método de Fio de Fumaça é um sistema que apresenta uma relação custo x benefício excelente, pois a geração de fumaça é obtida com uso

apenas de um fio condutor, este alimentado por uma fonte, e também pelo uso de líquido gerador de fumaça, que é extremamente menor.

Os resultados aqui apresentados foram totalmente dependentes do sistema de aquisição de imagens. A câmera de alta velocidade e os ajustes das configurações, principalmente os itens, quadros por segundo (qps, inglês *frame per second - fps*) e a velocidade do obturador, conduziram-se à consecução dos resultados e, assim, representando a linha de separação (diferença) entre resultados iniciais e os resultados em II.

Para trabalhos futuros, é sugerido variar o número de Reynolds do escoamento na seção de teste com intuito de visualizar alterações do escoamento na região de esteira próxima da turbina. Outro trabalho, seria quantificar a frequência de vórtices e relacionar com um determinado ponto ou região a jusante da turbina. Seria possível ainda o estudo de um modelo matemático capaz de relacionar a expansão da esteira ou estruturas coerentes a jusante na esteira próxima a partir de variações de velocidade, número de Reynolds, rotação do rotor.

Melhorias nas metodologias poderiam ser feitas quanto a potência do laser utilizado e um sistema alimentador automático de líquido gerador do fio de fumaça.

REFERÊNCIAS

BEHROUZI F., MAIMUN A., NIKASA M. Designs and Development in Hydropower Turbines. *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, vol.8, 2014.

BRASIL, A. Jr. P. et al. Turbina Hidrocinética Geração 3. Departamento de engenharia mecânica – UnB, Brasília – DF, 2007.

TOLMASQUIM, M. T. Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica – EPE: Rio de Janeiro, 2016.

S KANG et al. Flow structure interaction around an axial-flow hydrokinetic turbine: Experiments and CFD simulations. *The Science of Making Torque from Wind*. IOP Publishing. *Journal of Physics: Conference Serie*, 2012.

MANWELL, J. F., MCGOWAN J. G., ROGERS A.L. *Wind Energy Explained (theory, design and application*. 2nd ed. Wiley,EUA, 2009.

MUELLER, T. J. *An Historical Sketch: Smoke Visualization in Wind Tunnels*. Notre Dame University, 1983.

HUNT, J. C. R. et al. Kinematical studies of the flows around free or surface-mounted obstacles; applying topology to flow visualization. *Journal of Fluid Mechanics*, 86(1) 179-200. doi:10.1017/S0022112078001068, 1978.

GRAZIANI, R. A. et al. An Experimental Study Of Endwall and Airfoil Surface Heat Transfer in a Large Scale Turbine Blade Cascade. *ASME J. Eng. Power*. 102(2):257-267. doi: 10.1115/1.3230246, 1980.

VAN DYKE, M. *An Album of Fluid Motion*. Department of Mechanical Engineering. The Parabolic Press, Inc.; 14th edition, Stanford, California, 1982.

SONODA, T. Experimental Investigation on Spatial Development of Streamwise Vortices in a Turbine Inlet Guide Vane Cascade. *ASME. Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, Volume 1: Aircraft Engine; Marine; Turbomachinery; Microturbines and Small Turbomachinery* ():V001T03A010. doi:10.1115/85-GT-20, 1985.

WANG, P. et al. Flow Visualization in a Linear Turbine Cascade of High Performance Turbine Blades. *Journal of Turbomachinery-transactions of The Asme - J TURBOMACH-T ASME*, 1997.

GRANT, I. An experimental and numerical study of the vortex filaments in the wake of an operational, horizontal-axis, wind turbine, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Volume 85, Issue 2, 2000, Pages 177-189, ISSN 0167-6105, [https://doi.org/10.1016/S0167-6105\(99\)00139-7](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(99)00139-7).

SIMMS, D. et al. Wind tunnel testing of NREL's Unsteady Aerodynamics Experiment. ASME Wind Energy Symposium, Aerospace Sciences Meetings. 10.2514/6.2001-35, 2001.

VERMEER, L.J., SØRENSEN J.N., CRESPO A. Wind turbine wake aerodynamics, Progress in Aerospace Sciences, Volume 39, Issues 6–7, Pages 467-510, ISSN 0376-0421, [https://doi.org/10.1016/S0376-0421\(03\)00078-2](https://doi.org/10.1016/S0376-0421(03)00078-2), 2003.

RISTIĆ, S. Optical methods in wind tunnel flow visualization Ratka Risanovića 1, 11000 Belgrade 35, Serbia, 2005.

RISTIĆ, S. Flow Visualization Techniques in Wind Tunnels. Part I – Non optical Methods. Scientific Technical Review LVII, 2007.

LI, Y., TAGAWA, K. Visualization Study on the Static Flow Field around a Straight-bladed Vertical Axis Wind Turbine. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 10.1117/12.852692, 2009.

CHAMORRO, L. P., PORTÉ-AGEL, F. Effects of Thermal Stability and Incoming Boundary-Layer Flow Characteristics on Wind-Turbine Wakes: A Wind-Tunnel Study. Springer Science+Business Media B.V., 2010.

CHAMORRO, L. P., & PORTÉ-AGEL, F. Turbulent Flow Inside and Above a wind Farm: A Wind-Tunnel Study. *Energies*, 4(11), 1916-1936. DOI: 10.3390/EN4111916, 2011.

SINGH R. K. et al. Design of a low Reynolds number airfoil for small horizontal axis wind turbines, Renewable Energy, Volume 42, Pages 66-76, ISSN 0960-1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.09.014>, 2012.

FELLI, M., CAMUSSI, R., & DI FELICE, F. Mechanisms of evolution of the propeller wake in the transition and far fields. *Journal of Fluid Mechanics*, 682, 5-53. doi:10.1017/jfm.2011.150, 2011.

MCTAVISH, S., FESZTY, D., NITZSCHE, F. Evaluating Reynolds number effects in small-scale wind turbine experiments, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 120, ISSN 0167-6105, <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2013.07.006>, 2013.

LEWEKE, T. Long- and short-wave instabilities in helical vortices. Journal of Physics: Conference Series, Vol. 524, 2014.

YEN, S. C., HUANG, J. X., SAN, K. C., Wind farm characteristics of side-by-side and tandem configurations, Ocean Engineering, Vol.137, ISSN 0029-8018, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.03.056>, National Taiwan Ocean University, Keelung 202, Taiwan, 2017

MERZKIRCH W., Techniques of flow visualization. Universitat Essen Federal Republic of Germany, 1987.

MUELLER, T.J., 2000. Flow visualization by direct injection. In: Goldstein, R.J. (Ed.), *Fluid Mechanics Measurements*, 2nd ed. Taylor & Francis, Washington DC, 367–450.

CHAMORRO, L. P.; PORTÉ-AGEL, F. A wind-tunnel investigation of wind-turbine wakes: boundary layer turbulence effects: *Boundary-Layer Meteorology*, Volume 132, Issue 1, pp 129–149, 2009.

GÓMEZ-ELVIRA R. et al., Anisotropy of turbulence in wind turbine wakes. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Volume 93, Issue 10, Pages 797-814, ISSN 0167-6105, <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2005.08.001>, 2005.

SANDERSE, B., *Aerodynamics of Wind Turbine Wakes: Literature Review*, Volume 9, Issue 16 of ECN.: E-series. Publisher, ECN, 2009.

NEUSTADTER, H.E., SPERA, D.A. Method for evaluating wind turbine wake effects on wind farm performance. *Journal of Solar Energy Engineering*, 107:240–243, 1985.

SCHERECK, S. The NREL full-scale wind tunnel experiment (special issue). *Wind Energy*. 5. 77 - 84. 10.1002/we.72, 2002.

WHITE, F. M. *Fluid mechanics*, 6th edition. ISBN 0072938447/9780072938449. The McGraw-Hill Companies, Inc., New York, NY, 2007.

SØRENSEN, J. N. Aerodynamic Aspects of Wind Energy Conversion, *Annual Review of Fluid Mechanics* 43:1, 427-448, 2011.

JIANG, M., MACHIRAJU, R., THOMPSON, D. Detection and Visualization of Vortices. *The visual handbook*. 10.1016/B978-012387582-2/50016-2, 2005.

ROBINSON, S. K. Coherent Motions In The Turbulent Boundary Layer. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 23. 10.1146/annurev.fl.23.010191.003125, 1991.

KIRK, T. M., YARUSEVYCH, S. Vortex shedding within laminar separation bubbles forming over an airfoil. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2017.

BURTON, T. et al. *Wind Energy Handbook*. [S.l.]: John Wiley & Sons, England. ISBN 9780471489979, 2001.

VAN ELS, R. H. et al., Hidrokinetic turbine for isolated villages. X. ELPAN – Encontro Latinoamericano E Do Caribe Em Pequenos Aproveitamentos Hidroenergéticos, Poços de Caldas, p.268-272; 2003.

GLAUERT, H. *Airplane propellers*, em: W. F. Durand (Ed.), *Aerodynamic Theory*, Volume IV, Divisão L. Peter Smith Pub., Gloucester, Massachusetts, 1976.

YARUSEVYCH, S., SULLIVAN P. E., KAWALL J. G. Smoke-Wire Flow Visualization in Separated Flows at Relatively High Velocities", *AIAA Journal*, Vol. 47, No. 6, pp. 1592-1595. <https://doi.org/10.2514/1.43539>, 2009.

FLUSSER, V. Filosofia da caixa preta: Ensaio para uma futura filosofia da fotografia. Rio de Janeiro: Relume Dumará, 2002.

TAVARES, F. d. M. B. Fotografia e Linguagem: Para Pensar a Comunicação. 2006. Disponível em: Acesso em: <http://www.fumec.br/revistas/mediacao/article/view/255>. 10 set. 2014.

GOLDSTEIN, R. Fluid Mechanics Measurements, Second Edition, by CRC Press Reference - 600 Pages. ISBN 9781560323068 - CAT# GS851. (1996).

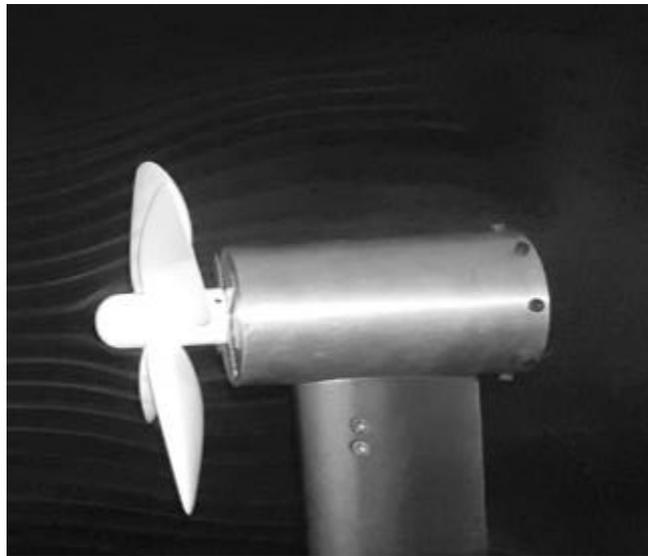
VERMEER L.J. A review of wind turbine wake research at TUDelft. In: A Collection of the 2001 ASME Wind Energy Symposium Technical Papers. New York: ASME, p. 103–13, 2001.

BRASIL JR. et al., (2016). On the hydrodynamics of a row arrangement of hydrokinetic propeller turbines. American Journal of Hydropower, Water and Environment Systems. 3. 19-24. 10.14268/ajhwes.2016.00032.

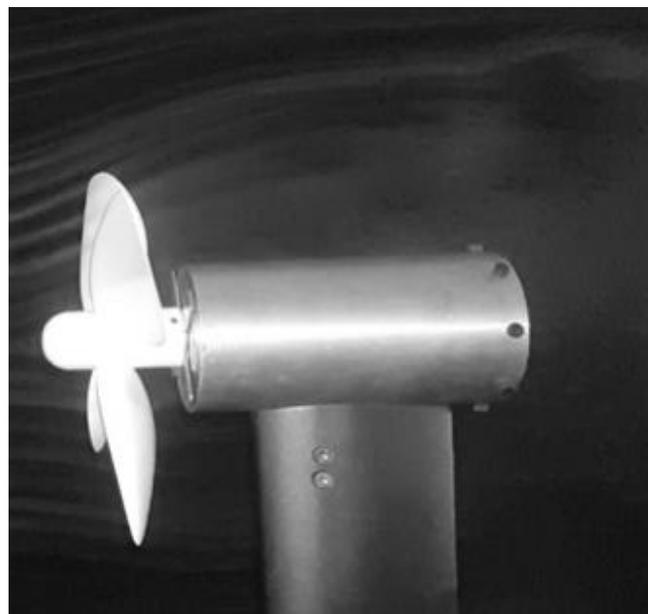
APÊNDICE A – Definição do líquido gerador de fumaça para método de fio de fumaça

Os testes foram realizados com velocidade de escoamento de 5 m/s, a temperatura ambiente de 25 °C e com variação dos tipos de líquidos com objetivo de verificar a partir de imagens a melhor formação de fumaça.

A1 – Glicerina



A2 – Lubrificante 20w50



A3 – Óleo lubrificante industrial *singer*



A4 – Óleo de freio *dot 4*



ANEXO A – Propriedades do óleo industrial *singer*

Óleo Singer 100ml

Lubrificante multiuso, sem aditivos, derivado de petróleo



Utilizado na lubrificação de:

- Máquinas de costura domésticas.
- Dobradiças em geral.
- Fechaduras.
- Bicicletas.
- Armas de fogo.
- Aparelhos mecânicos articulados em geral.



Características técnicas:

- | | |
|---|---------------------------------|
| • Densidade (20/4 °C) – ASTM D 287 | 0,850 a 0,860 g/cm ³ |
| • Cor – ASTM D1500 | 0,5 a 1,0 Lb |
| • Ponto de Fulgor – ASTM D 92 | 160°C mínimo |
| • Viscosidade cinemática a 40°C – ASTM D 445 | 9 a 11 Cst |
| • Viscosidade cinemática a 100°C – ASTM D 445 | 2 a 4 Cst |
| • Ponto de combustão | 180°C mínimo |

Medidas de controle de engenharia:

Manipular o produto em local com boa ventilação natural ou mecânica, de forma a manter a concentração de vapores inferior ao Limite de Tolerância.

Parâmetros de Controle

- Limites de exposição ocupacional
- Valor limite (Brasil, Portaria MTb 3214/78, NR 15 - Anexo 11):
- Valor Limite (EUA, ACGIH):

Não estabelecido.

Névoa de Óleo: TLV/TWA: 5 mg/m³.

TLV/STEL: 10 mg/m³.

Equipamento de Proteção Individual

- Proteção respiratória:

Em baixas concentrações, usar respirador com filtro químico para vapores