UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

CESAR ROBERTO DE SOUZA

**Sistema de túnel de vento aplicado no monitoramento de
pressão dinâmica**

São Paulo

2020

CESAR ROBERTO DE SOUZA

**Sistema de túnel de vento aplicado no monitoramento de
pressão dinâmica**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Mestre em Ciências.

São Paulo
2020

CESAR ROBERTO DE SOUZA

**Sistema de túnel de vento aplicado no monitoramento de
pressão dinâmica**

Versão Corrigida

(Versão original encontra-se na unidade que aloja o Programa de Pós-graduação)

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Microeletrônica

Orientador: Prof. Dr. Walter James Salcedo

São Paulo

2020

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Souza, Cesar Roberto de
Sistema de túnel de vento aplicado no monitoramento de pressão
dinâmica / C. R. Souza -- versão corr. -- São Paulo, 2020.
131 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos.

1.Túneis de vento 2.Instrumentação e medidas elétricas 3.Instrumentação
de sistemas 4.Aerodinâmica (modelagem) 5.Constrole de Sistemas
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de
Engenharia de Sistemas Eletrônicos II.t.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu pai Ademir de Souza (*in memorian*), minha mãe Maria José, minha avó Maria (*in memorian*), meu irmão Clayton, meu tio Toninho e à minha adorável esposa Fabiana.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela força que me concedeu no decorrer do presente trabalho.

À minha mãe Maria José pela paciência, pois, toda montagem do túnel foi feita em sua garagem e os testes altamente ruidosos foram efetuados durante as madrugadas, atrapalhando seu sono.

Ao meu irmão Clayton pelo incentivo e ajuda no fomento de equipamentos, além do auxílio financeiro ao longo do desenvolvimento o presente projeto.

À minha esposa Fabiana pela compreensão e paciência de tantas noites, domingos e feriados passados fora de casa, ao longo destes anos de trabalho.

Ao meu Orientador professor Walter pela dedicação e motivação para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu grande amigo Mauro pela motivação, constante ajuda e parceria ao longo de todo o projeto.

Ao meu amigo Moacir pela ajuda nos cálculos e dimensionamento do túnel.

Aos meus queridos alunos Baldasso, Maurício e Guilherme Moisés pelos auxílios e motivação no decorrer deste trabalho

Aos meus amigos Tiago Pucca e Ivan Santos da Emerson que tanto ajudaram com a instrumentação de medição do Túnel de Vento.

À supervisora da biblioteca da Engenharia Elétrica, Ana Maria, pelo auxílio na formatação final do presente trabalho.

À minha amiga Fátima que tanto me motivou nos momentos finais do desenvolvimento.

À esta universidade e aos docentes que de alguma forma contribuíram para a finalização deste trabalho.

Aos amigos e todos que contribuíram de forma direta e indireta com o presente trabalho.

“O dinheiro não representa tal valor como os homens colocaram em cima dele. Todo o meu dinheiro foi investido nas experiências com as quais eu fiz descobertas novas, permitindo a humanidade de ter uma vida um pouco mais fácil.”

(Nikola Tesla)

RESUMO

SOUZA, C.R. Sistema de túnel de vento aplicado no monitoramento de pressão dinâmica. 2020. 131p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2020.

O presente trabalho reporta os resultados do projeto e fabricação de um túnel de vento com instrumentação automatizada aplicado no monitoramento de pressão dinâmica em modelos aerodinâmicos. Com esta finalidade, primeiramente foi desenvolvido um túnel de vento equipado com instrumentos disponíveis no mercado e de precisão para caracterizar velocidade do fluxo de ar que por ele trafega. Posteriormente, foi instalado uma turbina para gerar um fluxo de ar contínuo no túnel, dessa forma, o sistema de medição instalado na seção de testes coleta as informações de velocidade. Os dados foram coletados por um sistema de aquisição baseados em um CLP (Controlador Lógico Programável), armazenados em um banco de dados *SQL Server* e apresentadas em um sistema de supervisão. As variações de pressão sobre o modelo aerodinâmico foram obtidas utilizando-se uma camada fina sensível depositada sobre a superfície do modelo aerodinâmico, técnica conhecida como *Pressure Sensitive Paint* (PSP). A camada sensível é um filme de PVC dopadas com moléculas de Octaetilporfirina de platina *PtOEP*, o sensoreamento da pressão dinâmica foi monitorado através da emissão fotoluminescente das moléculas de *PtOEP* coletadas com uma câmera com sensor CMOS obtendo-se assim imagens da distribuição da pressão dinâmica na superfície do modelo aerodinâmico. O sistema para a obtenção de imagens da pressão dinâmica foi constituído por uma fonte laser de 380 nm, utilizada para excitar o filme sensível a pressão e uma câmera CMOS com um filtro ótico passa-faixa na mesma faixa de emissão fotoluminescente das moléculas de *PtOEP* bloqueando-se assim a luz de excitação na câmera CMOS.

Palavras-chaves: Octaetilporfirina de platina. Fotoluminescente. *Pressure Sensitive Paint*. Câmera CMOS. Túnel de Vento.

ABSTRACT

SOUZA, C.R. Sistema de túnel de vento aplicado no monitoramento de pressão dinâmica. 2020. 131p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2020.

This paper reports the results of the design and manufacture of an automated instrumentation wind tunnel applied to dynamic pressure monitoring in aerodynamic models. To this end, a wind tunnel equipped with commercially available precision instruments was first developed to characterize airflow velocity through which it travels. Afterwards, a turbine was installed to generate a continuous air flow in the tunnel, so the measuring system installed in the test section collects the speed information. Data were collected by a PLC (Programmable Logic Controller) acquisition system, stored in a SQL Server database and presented in a supervision system. Pressure variations on the aerodynamic model were obtained using a sensitive thin layer deposited on the surface of the aerodynamic model, a technique known as Pressure Sensitive Paint (PSP). The sensitive layer is a PVC film doped with platinum Octaethylporphyrin *PtOEP* molecules, the dynamic pressure sensing was monitored by photoluminescent emission of the *PtOEP* molecules collected with a CMOS camera, thus images of the dynamic pressure distribution on the surface of the aerodynamic model. The system for dynamic pressure imaging consisted of a 380 nm laser source to excite the sensitive layer and the CMOS camera with an optical bandpass filter tuned to the photoluminescent emission range of the *PtOEP* molecules blocking the excitation light on CMOS camera.

Keywords: Platinum Octaethylporphyrin. Photoluminescent. Pressure Sensitive Paint. CMOS Camera. Wind Tunnel.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modelo padrão de supressão do oxigênio	22
Figura 2 – O diagrama de Jablonski demonstra os estados de excitação da molécula.	24
Figura 3 – Caracterização do PSP pela técnica de tempo de vida.	25
Figura 4 – Diagrama esquemático do arranjo experimental utilizado para os ensaios de sensibilidade dos sensores poliméricos.	26
Figura 5 – Túnel de vento de circuito fechado, o qual, o fluxo de ar recircula pelo túnel.	27
Figura 6 – Túnel de vento de circuito aberto.	29
Figura 7 – Tipos de túnel (a) <i>Design</i> do Túnel Subsônico. (b) <i>Design</i> do Túnel Supersônico.	31
Figura 8 – Velocidade em diferentes áreas de seção transversal da tubulação.	36
Figura 9 – Tubo de <i>Pitot</i> com ponta hemisférica.	38
Figura 10 – Pontos de medição de velocidade média com o tubo de <i>Pitot</i>	38
Figura 11 – Princípio de funcionamento do <i>Annubar</i>	41
Figura 12 – Topologia da rede <i>IO-Link</i>	42
Figura 13 – Pinos de conexão <i>IO-Link</i>	43
Figura 14 – Diagrama de funcionamento do CLP.	43
Figura 15 – Relação Performance x Complexidade CLP SIEMENS.	44
Figura 16 – Banco de dados em rede local.	46
Figura 17 – Simulação do túnel com seção de teste de 300x300 mm.	49
Figura 18 – Simulação do túnel com seção de teste de 200 mm.	50
Figura 19 – Simulação do túnel com seção de teste de 150 mm.	51
Figura 20 – Dimensões do túnel de vento desenvolvido em mm.	53
Figura 21 – Sistema de ventilação.	54
Figura 22 – Diagrama de blocos do controle em malha fechada.	55
Figura 23 – Diagrama P&ID da malha de controle do sistema.	56
Figura 24 – <i>Annubar</i> utilizado. a) Vista frontal; b) Vista traseira	58
Figura 25 – Tubo de <i>Pitot</i> com ponta hemisférica.	59
Figura 26 – Transmissor de pressão <i>Rosemount</i> 2051.	60
Figura 27 – Controlador Lógico Programável - S7-1500.	61

Figura 28 – Inversor de frequência CFW09.	62
Figura 29 – Dispositivos <i>IO-Link</i> utilizados.	63
Figura 30 – Sistema de supervisão.	64
Figura 31 – Topologia da rede.	66
Figura 32 – Encapsulamento do LED de 380 nm.	70
Figura 33 – Câmera NIKON D5100.	72
Figura 34 – Amostras desenvolvidas.	73
Figura 35 – Vista superior do projeto do aerofólio impresso com dimensões em mm.	75
Figura 36 – Vista lateral do projeto do aerofólio impresso com dimensões em mm.	76
Figura 37 – Modelo em formato de aerofólio desenvolvido para testes.	76
Figura 38 – Modelo com deposição de <i>PtOEP</i>	77
Figura 39 – Disposição da amostra.	78
Figura 40 – Disposição da câmera e LED emissor da excitação.	79
Figura 41 – Montagem completa do Túnel de Vento.	81
Figura 42 – Imagem com o túnel desligado e ligado a 107 km h^{-1} da Amostra 1.	86
Figura 43 – Imagens binarizadas da amostra 1.	88
Figura 44 – Imagens com o túnel desligado e ligado da amostra 2.	88
Figura 45 – Imagens binarizadas com limiar de 0,03.	91
Figura 46 – Amostras em escala cinza no interior do túnel, com o sistema desligado, a 95 km h^{-1} e a 107 km h^{-1} da primeira sequência de testes.	93
Figura 47 – Imagem binarizada do modelo na primeira sequência de testes.	96
Figura 48 – Amostras em escala cinza no interior do túnel, com o sistema desligado, a 95 km h^{-1} e a 107 km h^{-1} da segunda sequência de testes.	98
Figura 49 – Imagem binarizada do modelo na segunda sequência de testes.	100
Figura 50 – Amostras em escala cinza no interior do túnel, com o sistema desligado, a 95 km h^{-1} e a 107 km h^{-1} da terceira sequência de testes.	102
Figura 51 – Imagem binarizada do modelo na terceira sequência de testes.	104

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Tendência dos bancos de dados mais populares.	47
Gráfico 2 – Transmitância do filtro QB29 de 380 nm.	71
Gráfico 3 – Transmitância do filtro de 640 nm.	73
Gráfico 4 – Velocidade do vento no interior do túnel em relação a rotação do motor.	83
Gráfico 5 – Verificação da limiar com diminuição na velocidade do vento no interior do túnel.	83
Gráfico 6 – Testes de velocidade no interior do túnel.	85
Gráfico 7 – Histograma gerado das imagens tiradas com o túnel desligado e ligado a 107 km h^{-1}	87
Gráfico 8 – Histograma gerado das imagens tiradas com o túnel desligado e ligado a 95 km h^{-1} , 100 km h^{-1} e 107 km h^{-1}	90
Gráfico 9 – Histograma gerado das imagens tiradas com o túnel desligado, ligado a 95 km h^{-1} e 107 km h^{-1} da primeira sequência de testes.	95
Gráfico 10 – Histograma gerado das imagens tiradas com o túnel desligado, ligado a 95 km h^{-1} e 107 km h^{-1} da segunda sequência de testes.	99
Gráfico 11 – Histograma gerado das imagens tiradas com o túnel desligado, ligado a 95 km h^{-1} e 107 km h^{-1} da terceira sequência de testes.	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Pontos de medição de velocidades em tubulações em função do raio. . .	39
Tabela 2 – Pontos de medição de velocidades na seção de teste.	68
Tabela 3 – Rotações aplicadas ao motor no intervalo de 1 minuto	69
Tabela 4 – Velocidade média na seção de testes	82

LISTA DE SIGLAS

CCD	<i>Charge-coupled device</i>
CLP	Controlador Lógico Programável
CM	<i>Communication Module</i>
CMOS	<i>Complementary Metal Oxide Semiconductor</i>
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
DB	<i>Database</i>
FB	<i>Function Block</i>
FC	<i>Function</i>
GB	<i>Gigabyte</i>
IHM	Interface Homem-Máquina
ISA	<i>International Society of Automation</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
LME	Laboratório de Microeletrônica
NoSQL	<i>Not only Structured Query Language</i>
NPL	<i>National Physical Laboratory</i>
ODBC	<i>Open Database Connectivity</i>
P&ID	Piping and Instrumentation Diagram
PSP	<i>Pressure Sensitive Paint</i>
PT100	<i>Platinum resistance temperature sensors</i>
PtOEP	Octaetilporfirina de Platina
SQL	<i>Structured Query Language</i>
rpm	Rotações por minuto

RT	<i>Runtime</i>
RTD	<i>Resistance Temperature Detector</i>
SCL	Structured Control Language
THF	Tetrahidrofurano
TIA Portal	<i>Totally Integrated Automation Portal</i>
uPSP	<i>unsteady Pressure Sensitive Paint</i>
UV	Ultra-violeta

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ	Densidade
ΔP	Diferencial de pressão
ΔT	Diferencial de temperatura
Pa	Pascal
h	Altura referencial
A_1	Área 1
A_2	Área 2
V_1	Velocidade do fluido de entrada do túnel
V_2	Velocidade do fluido na saída do túnel de contração
V_3	Velocidade do fluido na saída do túnel
P_1	Pressão na A_1 da tubulação
P_2	Pressão na A_2 da tubulação
S_0	Estado fundamental da molécula
S_1	Estado de excitação 1 da molécula
S_2	Estado de excitação 2 da molécula
1O_2	Oxigênio singleto
3O_2	Oxigênio tripleto
O_2	Oxigênio
V_{Pitot}	Média de velocidade do Tubo de <i>Pitot</i>
V_{Annubar}	Velocidade medida pelo <i>Annubar</i>
cv	Cavalo-vapor
mbar	Milibar

mm	Milímetros
nm	Nanômetros
g	Aceleração da gravidade
m s^{-2}	Metros por segundo ao quadrado
m s^{-1}	Metros por segundo
km h^{-1}	Quilômetros por hora
kg m^{-3}	Quilogramas por metro cúbico
N_2	Nitrogênio
Ma	Número Mach
Q	Vazão
K	Fator de correção da vazão
L+	Alimentação positiva
L-	Alimentação negativa
C/Q	Informações de entrada/saída e pacotes de rede <i>IO-Link</i>
d	Distância do raio
r_{tunel}	Raio
n_n	Fator n de acordo com método de cálculo da velocidade média no interior do túnel
ST	<i>Speed Transmitter</i>
SE	<i>Speed Sensor</i>
TT	<i>Temperature Transmitter</i>
TE	<i>Temperature Sensor</i>
SZ	<i>Speed Actuator</i>

M	<i>Motor</i>
UIR	<i>Multivariable Indicator and Register</i>
UC	<i>Multivariable Controller</i>

Sumário

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	Caracterização dos esforços por PSP	21
1.1.1	Técnica PSP obtida por Intensidade	23
1.1.2	Técnica PSP obtida por tempo de vida	23
1.2	Túnel de vento	27
1.2.1	Túnel de vento em circuito fechado	27
1.2.2	Túnel de vento em circuito aberto	28
1.2.3	<i>Design</i> do Túnel de Vento	30
2	OBJETIVO	33
2.1	Objetivos específicos	33
3	JUSTIFICATIVAS	34
4	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	35
4.1	Medição de vazão	35
4.1.1	Equação da continuidade	35
4.1.2	Lei de Bernoulli	35
4.2	Tubo de <i>Pitot</i>	37
4.2.1	Velocidade média no interior da tubulação	39
4.3	Tubo de Pitot de média	40
4.3.1	<i>Annubar</i>	40
4.4	Interface <i>IO-Link</i>	41
4.4.1	Conexão	42
4.5	Controlador Lógico Programável	43
4.6	Banco de dados	45
4.6.1	Banco de dados Relacional	45
4.6.2	Banco de dados não relacional	46
4.6.3	Banco de dados existentes	47
5	MATERIAIS E MÉTODOS	48
5.1	Componentes do túnel de vento	48

5.1.1	Simulações	48
5.1.2	Montagem do túnel	51
5.1.2.1	Túnel de contração	51
5.1.2.2	Seção de Teste	52
5.1.2.3	Montagem	52
5.1.3	Sistema de medição e controle	54
5.1.4	Instrumentação selecionada	57
5.1.4.1	<i>Annubar</i>	57
5.1.4.2	Tubo de <i>Pitot</i>	59
5.1.4.3	Transmissor de Pressão	59
5.1.4.4	Controlador Lógico Programável	60
5.1.4.5	Inversor de frequência	61
5.1.4.6	Dispositivos <i>IO-Link</i>	62
5.2	Sistema de supervisão	64
5.3	Topologia da rede	65
5.4	Coleta de dados	66
5.4.1	Armazenamento de dados	66
5.4.2	Calibração do <i>Annubar</i>	67
5.4.3	Definição da rotação do motor	68
5.5	Captação de imagens	69
5.5.1	Excitação da molécula	70
5.5.2	Medição da resposta da molécula	71
5.6	Filme PSP	73
5.6.1	Superfícies utilizadas	74
5.6.1.1	Deposição em lâminas de microscopia	74
5.6.2	Modelo	75
5.7	Testes no interior do túnel	78
5.7.1	Análise das imagens	79
6	RESULTADOS	80
6.1	Túnel desenvolvido	80
6.1.1	Montagem do Túnel	80
6.1.2	Fator de correção do <i>Annubar</i>	81

6.1.3	Dados coletados	82
6.2	Filme PSP	85
6.2.1	Testes com amostra depositada nas lâminas	85
6.2.2	Teste no modelo	91
6.2.3	Primeira sequência de testes	92
6.2.4	Segunda sequência de testes	96
6.2.5	Terceira sequência de testes	101
7	CONCLUSÕES	105
	REFERÊNCIAS	107
	APÊNDICES	111
	Apêndice A – Lógica de Controle	112
	Apêndice B – Script de integração no <i>SQL Server</i> . .	121
	Apêndice C – Estrutura da tabela criada no SQL . .	123
	Apêndice D – Algoritmo que gera histograma no MA- TLAB	125
	Apêndice E – Algoritmo de binarização de imagem no MATLAB	127
	ANEXOS	129
	Anexo A – Especificações Técnicas da câmera NIKON D5100	130

1 INTRODUÇÃO

Os estudos de *Pressure Sensitive Paint* (PSP) se iniciaram no final da década de 70 no Instituto Central de Aero-Hidrodinâmica, na União Soviética. Em 1981 Pervushin e Nevsky desenvolveram o primeiro revestimento sensível a pressão (KOSE, 2005). Desde então, diversos estudos voltados para determinar a pressão fazendo uso da técnica de PSP vem sendo conduzidos por centros de pesquisa localizadas nos Estados Unidos e Europa.

A aplicação de uma camada de tinta sensível a pressão pode auxiliar a determinar os esforços sofridos por um modelo fazendo uso de dispositivos para testes aerodinâmicos como, por exemplo, um túnel de vento (ENGLER; CHR, 2000).

As técnicas de medições tradicionais de pressão são feitas por meio de matrizes de sensores distribuídas pela superfície do modelo, porém, essa técnica leva a grandes esforços e muito tempo, que o torna um processo com altos custos. Além disso, como a distribuição dos sensores segue de forma discreta, possui baixa resolução espacial (JAHANMIRI, 2011).

A PSP é basicamente um dispositivo sensor que se baseia na concentração de oxigênio no interior dos filmes poliméricos e reflete a pressão parcial do oxigênio sobre o filme (MATOS, 2011), ou seja, é uma técnica especial e de aplicação adequada para sistemas óticos. Com isso, valores de pressão sobre a superfície de modelos podem ser determinados utilizando sistemas óticos e de processamento de imagem quando este for analisado em uma ferramenta de teste, no caso, um túnel de vento (CHR. et al., 2005).

A determinação da pressão em um modelo pode ser obtida por técnicas distintas de PSP, dentre elas, por intensidade e tempo de vida da molécula (KOSE, 2005).

Pelo método de intensidade, a intensidade luminescente no modelo depende da pressão a qual o corpo é submetido, ou seja, quanto maior a pressão a qual o corpo é submetido, maior a supressão de oxigênio, conseqüentemente menor a intensidade fotoluminescente sobre modelo (BRAGA, 2016).

A instrumentação utilizada para o método de intensidade envolve diodo emissor de luz (LED) de alta intensidade e alta estabilidade de iluminação, a fotoluminescência coletada por meio de uma câmera científica *Charge-coupled device* (CCD) ou *Complementary Metal Oxide Semiconductor* (CMOS) (GREGORY. et al., 2014) (YORITA et al., 2019). Infelizmente não é apenas a luminescência que a câmera capta, a temperatura do

meio deve ser medida e levada em consideração para fins de compensação na medição (MERBARKI, 2000).

Pelo método de tempo de vida a pressão é determinada pelo tempo de vida da molécula excitada. Na qual, as moléculas permanecem em seu estado fundamental, quando a molécula é excitada por uma fonte de luz externa, ela deixa seu nível fundamental e vai para um nível superior, porém, não permanece em estado excitado por muito tempo e quando retorna ao seu estado fundamental emite um fóton, por um processo de radiação, o qual, é chamado de luminescência (GREGORY et al., 2008).

Para que essa caracterização possa ser efetuada é necessário a utilização de uma estrutura tubular, em que o fluxo de ar possa fluir de maneira que testes aerodinâmicos possam ser efetuados.

O Túnel de vento é uma estrutura tubular, onde, é gerado um fluxo de ar contínuo, normalmente por um grande ventilador, para que testes aerodinâmicos sejam efetuados (HALL, 2015f).

Além disso, tuneis de vento auxiliam os engenheiros e cientistas a efetuarem testes de performance e, dessa forma, eliminar possíveis erros de projeto (HALL, 2015f).

Os testes aerodinâmicos, por muitos anos, tem sido o método primário para verificação aerodinâmica de modelos. Essa verificação é extremamente importante para engenharia e desenvolvimento de aeronaves modernas, dinâmica de automóveis e construções. Dessa forma, o túnel de vento possibilita determinar os esforços aerodinâmicos sofridos por determinadas estruturas. Com isso, é possível trabalhar geometricamente nos objetos para reduzir a intensidade do fluxo de energia no seu entorno (MAGRYTA, 2013).

Porém, muitos destes testes são efetuados utilizando sensores distribuídos pelos objetos, conforme mencionado no início deste capítulo. Esse tipo de caracterização além de determinar os esforços pontuais nos objetos é altamente custoso, pois, pequenos sensores devem ser espalhados pela geometria do corpo para que se tenha eficácia na determinação dos esforços sofridos pela aerodinâmica do modelo.

1.1 Caracterização dos esforços por PSP

Na figura 1 é possível verificar como ocorre a supressão do oxigênio quando um corpo com uma fina camada de um filme sensível a pressão é submetido a variações de

pressão. Quando um corpo é submetido a esforços aerodinâmicos um fóton proveniente de uma fonte luminosa irá excitar os elétrons de valência, o que fará com que eles permaneçam por um curto período de tempo em um estado excitado, quando retornam ao seu estado natural, ele emite uma fotoluminescência, porém, a intensidade pode ser maior ou menor, depende da pressão sofrida naquele ponto.

Dessa forma, com a excitação de uma fonte luminosa incidente sobre o filme de PSP ocorre a luminescência inversamente proporcional a pressão aplicada ao corpo. Quanto maior a pressão sobre o objeto maior a supressão de oxigênio resultando em uma menor intensidade luminescente e, quanto menor a supressão do oxigênio, maior a intensidade da luminescência (BRAGA, 2016) (GREGORY. et al., 2014) (KOSE, 2005).

Figura 1 – Modelo padrão de supressão de oxigênio.

Fonte: Adaptação, tradução do autor dos itens de identificação da figura (JAHANMIRI, 2011)

Recentemente, novas abordagens vem sendo desenvolvidas para medir pressões aerodinâmicas induzidas por flutuações em modelos aerodinâmicos utilizando tinta sensível a pressão instável (uPSP). Essas tintas possuem respostas rápidas para medição de pressão instável em relação técnicas convencionais de PSP. Essa resposta é importante, pois, veículos aeroespaciais experimentam fortes cargas aerodinâmicas que são difíceis de medir (HOFFPAUIR, 2017).

Dentre as técnicas disponíveis para determinação da pressão em um modelo, fazendo uso do PSP, existem: intensidade e tempo de vida (KOSE, 2005).

1.1.1 Técnica PSP obtida por Intensidade

Pelo método de intensidade, a intensidade luminescente no modelo é inversamente proporcional a pressão sob o mesmo, ou seja, quanto maior a intensidade luminescente menor a pressão em determinado ponto do modelo. Essa intensidade é captada por uma câmera científica CCD OU CMOS (GREGORY. et al., 2014) (MERBARKI, 2000) (YORITA et al., 2019).

Para utilizar o método de intensidade é necessário uma câmera científica, receptores óticos, dispositivos de excitação luminosa, dispositivos óticos de saída, sistema de aquisição de dados com um sistema externo de calibração (ENGLER; CHR, 2000). Para se obter bons resultados ENGLER e Chr (2000) utilizaram uma câmera de CCD de laboratório de 16 bits instalada em um túnel de vento disponível. Essa técnica também conhecida como *Wind on* e *Wind off*, na qual, uma imagem de referência é tomada com o túnel desligado e outra com o túnel ligado para analisar os esforços aerodinâmicos sofridos pelo corpo. Além disso, diversos tipos de fontes luminosas tem sido empregado em estudos de túnel de vento, porém, os tipos mais comuns utilizados são lasers pulsantes e ondas contínuas (KOSE, 2005).

A emissão captada pela câmera científica não dependerá somente da pressão de ar sofrida pelo objeto, a temperatura do ambiente deve ser levada em consideração para a determinação dos esforços aerodinâmicos sofridos pelo corpo (MERBARKI, 2000).

1.1.2 Técnica PSP obtida por tempo de vida

Pelo método de tempo de vida a pressão é determinada pelo tempo de vida da molécula excitada que pode ser descrita pelo diagrama de *Jablonski* na figura 2.

Figura 2 – O diagrama de Jablonski demonstra os estados de excitação da molécula.

Fonte: Adaptação, tradução do autor dos itens de identificação da figura (GREGORY et al., 2008)

Conforme pode ser analisado na figura 2 as moléculas permanecem em seu estado fundamental, porém, quando é excitada por uma fonte de luz, ela deixa seu estado fundamental e é elevada para um nível superior, contudo, não permanece em estado excitado por muito tempo e quando retorna a seu estado fundamental emite um fóton, por um processo de radiação, o qual, é chamado de luminescência (GREGORY et al., 2008).

Dessa forma, o método de intensidade do tempo de vida explora o tempo de decaimento da molécula que utiliza-se desse tempo para verificar a pressão sofrida pelo corpo. Com isso, o objeto deve ser excitado por um *flash* ou uma fonte de luz modulada. Como o tempo de vida é uma propriedade intrínseca do luminóforo utilizado no objeto. Neste caso, não há a necessidade de uma imagem de referência (KOSE, 2005), como visto na seção 1.1.1.

Existem duas possibilidades distintas para caracterização do PSP pelo método do tempo de vida: *pulsed lifetime imaging* e *phase shift imaging* (KOSE, 2005). Por isso, a câmera deve ser capaz de operar com um tempo de integração de pelo menos mil vezes mais rápido que câmeras CCD científicas convencionais, devido ao tempo de decaimento da ordem de μ s. A figura 3 apresenta um exemplo de funcionamento de como efetuar a medição por tempo de vida de duas imagens durante o tempo de decaimento da molécula.

Figura 3 – Caracterização do PSP pela técnica de tempo de vida.

Fonte: Adaptação, tradução do autor dos itens de identificação da figura (KOSE, 2005)

No método de tempo de vida câmeras científicas são utilizadas, o intensificador age como um disparo ultra rápido para controlar o tempo de exposição do CCD ou CMOS. Dessa forma, após a excitação pelo *flash* duas imagens são coletadas em intervalos iguais e a razão das imagens adquiridas durante o processo podem ser relacionadas ao *luminophore* a determinada pressão e temperatura (KOSE, 2005) (YORITA et al., 2019).

Conforme citado anteriormente os testes aerodinâmicos em objetos normalmente é efetuado em um túnel de vento, pois, dessa forma, é possível controlar as variáveis a qual o corpo está sujeito. Como por exemplo, manter velocidades constantes (CHR. et al., 2005) e, dessa forma, permitir que cientistas e engenheiros analisem como o modelo responderá aos esforços sofridos (HITT, 2008).

Assim sendo, o modelo é alocado no túnel e o fluxo de ar que passa sobre ele faz com que sofra os mesmos esforços de um ambiente real. Não importa se o objeto é um modelo completo contendo todas as suas partes ou apenas partes do mesmo, desde que este esteja com os dispositivos necessários para se determinar os esforços sofridos por ele (HITT, 2008) que no caso seria o filme PSP.

Porém, para efetuar o teste do filme, não é fundamental o uso de um túnel de vento. Em laboratório podem ser efetuados ensaios em uma câmara de ensaio conforme apresentado na figura 4.

Figura 4 – Diagrama esquemático do arranjo experimental utilizado para os ensaios de sensibilidade dos sensores poliméricos.

Fonte: Adaptação (MATOS, 2011)

Segundo MATOS (2011) para obter o espectro de fotoluminescência dos sensores, foi utilizado um fluorímetro. Ainda no teste a temperatura da amostra foi controlada à cerca de 25°C. Além disso, a concentração de oxigênio no gás de carga (nitrogênio) foi controlada com o uso de rotâmetros. Com essa câmara ele pode validar o sensor desenvolvido, pois, utilizou uma fonte excitadora de luz e um fotodetector para verificar a fotoluminescência, ou seja, controlando a pressão e oxigênio na câmara ele pode validar o filme sensível a pressão.

Este sensor foi desenvolvido na escola politécnica da USP em São Paulo e como não havia disponível um túnel de vento no laboratório LME da USP para caracterização aerodinâmica de objetos, todos os testes foram efetuados em uma câmara de teste em laboratório (MATOS, 2011).

No presente trabalho foi utilizada a molécula Octaetilporfirina de Platina (PtOEP) desenvolvida por Braga e Salcedo (2018). Essa molécula, segundo o autor é ativada por uma excitação luminosa na região de 380 nm, que corresponde a região de máxima absorção da molécula PtOEP. A região de máxima emissão fotoluminescente da molécula foi de 644 nm (BRAGA; SALCEDO, 2018).

1.2 Túnel de vento

O túnel de vento é utilizado para que engenheiros possam estudar os esforços aerodinâmicos que determinados objetos estão sujeitos, sejam eles, aéreos ou terrestres.

Existem 2 tipos de túnel de vento, que podem ser construídos: Túnel de circuito aberto e Túnel de circuito fechado.

1.2.1 Túnel de vento em circuito fechado

É um túnel de grandes dimensões e custos elevados para ser construído, porém, possibilita um maior controle sobre o fluxo de ar que circula por ele. Dessa forma, produz os resultados de maneira mais precisa e eficiente quando os modelos são testados nesse tipo de túnel (SPAHN; STEELMAN, 2015) (BENSON, 2014). Na figura 5 é possível ver uma representação construtiva desse tipo de túnel de vento.

Figura 5 – Túnel de vento de circuito fechado, o qual, o fluxo de ar recircula pelo túnel.

Fonte: Adaptação, tradução do autor dos itens de identificação da figura (HALL, 2015a)

Conforme pode-se visualizar na figura 5 o ar fica circulando de maneira permanente pelo túnel. Esse tipo de túnel também é chamado de *Prandtl tunnel* ou *Gottingen Tunnel*, pois, foi desenvolvido primeiramente na Alemanha. Nesse túnel o ar é conduzido desde

a seção de teste (local este onde o modelo é alocado) até o ventilador por uma série de palhetas. Na saída do ventilador o ar percorre até o túnel de contração, que aumenta a velocidade do ar, e de lá para a seção de teste. Ao passar pelo difusor a velocidade é diminuída (HALL, 2015a). Com esse tipo de estrutura o ar circula de maneira contínua pelo túnel, fazendo com o que o ventilador funcione apenas para compensar as perdas durante a recirculação de ar.

A função das palhetas é para manter a circulação do ar de maneira uniforme e evitar os choques com as paredes do túnel, gerando turbulência, portanto, mantém o fluxo laminar no interior do túnel.

Esse túnel pode operar a uma velocidade subsônica ou supersônica. Sendo que no caso de supersônica alguns cuidados a mais devem ser tomados devido a condensação na seção de teste devido à baixa pressão. Possui vantagens e desvantagens (HALL, 2015a):

- Vantagens:
 - qualidade superior no controle da vazão de ar na seção de teste;
 - baixos custos de operação, pois, o motor é ligado somente para compensar as perdas de carga;
 - operação silenciosa se comparada ao túnel de circuito aberto.
- Desvantagens:
 - alto custo de construção devido suas dimensões;
 - *design* inferior para testes de propulsão e visualização da vazão de fumaça no túnel;
 - deve empregar altos trocadores de calor devido as altas temperaturas que estes ficam submetidos.

1.2.2 Túnel de vento em circuito aberto

Este tipo de túnel é mais parecido com um tubo, pois, é aberto em ambas as extremidades (SPAHN; STEELMAN, 2015). Seu formato não permite que se tenha um controle completo da vazão de ar, pois, o ar circula pelo local onde este túnel estiver alocado.

Na figura 6 é possível verificar um diagrama de funcionamento do túnel em circuito aberto.

Figura 6 – Túnel de vento de circuito aberto.

Fonte: Adaptação, tradução do autor dos itens de identificação da figura (HALL, 2015c)

Esse tipo de túnel também é chamado de *Eiffel Tunnel* ou *NPL tunnel* pois, foi primeiramente utilizado em um laboratório inglês e desenvolvido por um engenheiro francês (HALL, 2015c).

Neste tipo de túnel o ar que passa pela seção de teste é sugado da sala em que o túnel está localizado. Na figura 6 é possível verificar o sentido da vazão de ar.

Alguns questionamentos que podem ser levantados nesse tipo de túnel é o motivo do ventilador estar na parte de trás do túnel e não na frente. Esse é atualmente o melhor local para se dispor o ventilador, pois, ele vai puxar o ar para dentro do túnel soprando-o para fora dele (HALL, 2015c). Puxar o ar do túnel é melhor do que soprar o ar para dentro do túnel, pois, minimiza a incidência de turbulência no interior da seção de testes (SPAHN; STEELMAN, 2015). Assim como o túnel de circuito fechado, também possui vantagens e desvantagens:

- Vantagens:
 - baixo custo de construção;
 - excelente *design* para testes de propulsão e visualização de fumaça.
- Desvantagens
 - baixa qualidade da vazão de ar na seção de teste, devido a recirculação no local;

- altos custos operacionais, pois, o motor deve ficar em operação, em quanto os testes forem necessários;
- alto ruído no ambiente.

1.2.3 *Design* do Túnel de Vento

Para que o túnel seja desenvolvido deve-se definir o range de velocidade que o modelo será submetido no túnel, pois, a velocidade na seção de teste do túnel é determinada pelo *design* do túnel (HALL, 2015d). Ou seja, a velocidade da seção de teste altera o *design* do túnel.

Dessa forma, para velocidades subsônicas a densidade do ar permanece aproximadamente constante e diminuindo a seção de cruzamento faz com que haja um aumento na velocidade do ar e uma diminuição da pressão na seção de teste. Da mesma forma, caso haja aumento na seção de cruzamento haverá diminuição na velocidade do túnel e aumento na pressão. Em um túnel subsônico a seção de teste é disposta logo após o tubo de contração e antes da montante do difusor (HALL, 2015d). A equação 1 demonstra essa situação (HALL, 2015e).

$$(1 - Ma^2) \times \frac{dV}{V} = -\frac{dA}{A} \quad (1)$$

Com isso, verificamos que com fluxo subsônico (número *Mach* < 1), e com o aumento na área, aumentará o valor negativo na velocidade, ou seja, um decréscimo da velocidade; da mesma forma, se houver uma diminuição na área, haverá um acréscimo de velocidade.

A figura 7 apresenta a relação de aumento e diminuição da velocidade de acordo com o tipo de túnel de vento utilizado: subsônico e supersônico.

Figura 7 – Tipos de túnel (a) *Design* do Túnel Subsônico. (b) *Design* do Túnel Supersônico.

Fonte: Adaptação, tradução do autor dos itens de identificação da figura (HALL, 2015d)

Na figura 7 a) é possível verificar um diagrama demonstrando as alterações no número *Mach*, velocidade e pressão para uma velocidade subsônica (HALL, 2015d). Quando a vazão de ar chega à seção de teste a velocidade é maior que a velocidade de entrada e a pressão é menor que a pressão de entrada.

Para velocidades o termo $(1 - Ma^2)$ se altera e se torna negativo, ou seja, $1 - Ma^2 < 0$. Portanto, um aumento na área provoca um aumento na velocidade (HALL, 2015e). Isso ocorre, devido a densidade do ar se alterar pelo princípio da compressibilidade (HALL, 2015e). Dessa forma, tanto a velocidade quanto a densidade se alteram enquanto a área é alterada para conservar a massa.

A pressão estática é a medida da quantidade de energia potencial, a pressão dinâmica é a medida da quantidade de energia cinética, em certas condições a pressão se mantém constante, conforme descrito pela lei de *Bernoulli* (DOMMELEN, 2013).

Portanto, para velocidades subsônicas a densidade permanece aproximadamente constante, porém, para velocidades supersônicas quando a área se altera há duas alterações: a velocidade e a densidade. Conforme apresentado na equação 2.

$$-(Ma^2) \times \frac{dV}{V} = -\frac{d\rho}{\rho} \quad (2)$$

A equação 2 demonstra que a alteração da densidade é maior que a alteração na velocidade, portanto, para conservar a massa e o momento em um fluxo supersônico, a velocidade aumenta enquanto a densidade diminui quando há um aumento na área (HALL, 2015e). O Design supersônico é descrito na figura 7 b), a qual, na “garganta” após o tubo de contração representa $Mach=1$ fazendo com que a velocidade aumente quando a área do difusor aumenta, portanto, na seção de teste temos uma velocidade supersônica com $Mach>1$, dessa forma, a velocidade aumenta e a pressão diminui.

Na figura 7 a) pode-se verificar que a área é diminuída em relação ao tubo de contração, depois, o fluxo sai pelo tubo de difusão. Já na figura 7 b) o ar passa pela “garganta” do túnel onde este está a uma velocidade $Mach=1$ e deste, vai para o difusor, onde se conecta com a seção de teste já a uma velocidade supersônica. Portanto, é possível verificar a alteração explícita no *design*, a qual, a seção de teste é colocada logo após o tubo de contração quando deseja-se velocidades subsônicas e logo após o tubo de difusão quando deseja-se velocidades supersônicas.

2 OBJETIVO

O presente trabalho tem por objetivo a montagem de um túnel de vento em circuito aberto para caracterização de pressão dinâmica em modelos específicos. O túnel de vento deve ser equipado com instrumentação necessária para medição e controle de velocidade, além, do sistema para caracterização dos dispositivos do tipo PSP.

2.1 Objetivos específicos

- Desenvolver um túnel de vento em circuito aberto;
- Equipar o túnel com instrumentação de controle e medição;
- Desenvolver sistema de monitoramento e aquisição de dados;
- Implementar sistema para caracterização de modelo PSP pela técnica de intensidade.

3 JUSTIFICATIVAS

Sistemas para medição dinâmica é de extrema importância para setores aeroespacial e automotivo. Os sistemas que atualmente são utilizados para medição de pressão aerodinâmica baseados em sensores distribuídos sobre os modelos em testes possuem alto custo, tanto financeiros quanto em tempo. O desenvolvimento de pesquisas relacionadas a *PSP* (BRAGA, 2016) vem apresentando resultados relevantes para o setor, pois, ao contrário dos sensores distribuídos pelo modelo, provendo informações de forma discreta, tecnologias baseadas em *PSP* provê informações com alta resolução espacial, já que a tinta é distribuída de forma uniforme no modelo (MATOS, 2011).

Neste contexto, o presente trabalho apresenta a implementação de um túnel de vento, com instrumentação de medição e controle de uso industriais para levantamento das condições de vazão de ar e temperatura no interior do túnel. Os dispositivos de medição são de uso industrial, portanto, possuem alta confiabilidade de medição. Além disso, dados relacionados as condições da seção de teste são armazenados em banco de dados para análise. Também utiliza um modelo com sua superfície recoberta com a tinta *PSP* desenvolvida por Braga e Salcedo (2018) para análise das reações da superfície do modelo, quando submetidos a variações de velocidade no interior do túnel. Até o presente trabalho não foram desenvolvidos anteriormente testes aerodinâmicos com membranas de PVC contendo moléculas imobilizadas sensíveis de Octaetilporfirina de Platina (PtOEP).

4 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

4.1 Medição de vazão

A medição de vazão por elementos primários deprimogênicos é uma das mais empregadas no mercado industrial (DELMEE, 2003), como por exemplo o tubo de *Pitot*. Dessa forma, o elemento primário em contato com o fluido, é o primeiro elo de uma malha com o elemento a ser medido. Para completar o sistema de medição, um transmissor de pressão diferencial e um instrumento receptor, como um CLP. Com as equações da continuidade e de *Bernoulli* é possível calcular a vazão no interior da tubulação.

4.1.1 Equação da continuidade

A equação da continuidade aplica-se a fluidos incompressíveis (HALL, 2015b), que fluem e tubulações que em determinado instante a seção varia de A_1 para A_2 , conforme descrito na figura 8. Em determinado instante o produto da velocidade pela A_1 é igual ao produto da velocidade pela A_2 , essa forma, obtemos a vazão do fluido na tubulação, conforme representado na equação 3 (DELMEE, 2003).

$$V_1 A_1 = V_2 A_2 = Q \quad (3)$$

onde,

- A_1 : área na seção 1.
- V_1 : velocidade na seção 1.
- A_2 : área na seção 2.
- V_2 : velocidade na seção 2.
- Q : Vazão na tubulação.

4.1.2 Lei de Bernoulli

A equação de *Bernoulli* é válida sobre uma linha de fluxo, quando a viscosidade é desprezível, condições estáveis e quando se trata de fluidos incompressíveis (HALL, 2015b). É normalmente utilizado para calcular a velocidade do fluxo quando as pressões estáticas

e dinâmicas são conhecidas, normalmente quando utiliza-se sensores que apresentam o diferencial de pressão (DOMMELEN, 2013) (DELMEE, 2003) (LIPTAK, 2003).

Na figura 8 temos uma representação das variáveis utilizadas para realizar o cálculo da velocidade quando houver uma variação de área na passagem de um fluido por uma tubulação.

Figura 8 – Velocidade em diferentes áreas de seção transversal da tubulação.

Fonte: Autor

Onde:

- A_1 : representa a área de entrada do fluido;
- A_2 : área de saída do fluido;
- V_1 : velocidade do fluido de entrada;
- V_2 : velocidade do fluido na saída;
- P_1 : Pressão na A_1 da tubulação;
- P_2 : Pressão na A_2 da tubulação.
- h : Altura referencial.

Com base na análise representada pela figura 8, temos a equação 4, que é a equação de *Bernoulli*.

$$P_1 + \rho gh + \frac{1}{2}\rho(V_1)^2 = P_2 + \rho gh + \frac{1}{2}\rho(V_2)^2 \quad (4)$$

onde:

- P_1 : Pressão estática no nível de referência da entrada do túnel (N m^{-2});
- P_2 : Pressão estática no nível de referência da seção de teste (N m^{-2});
- ρ : densidade (kg m^{-3});
- g : aceleração da gravidade (m s^{-2});
- h : altura acima do nível de referência (m);
- V_1 : velocidade na entrada do túnel (m s^{-1});
- V_2 : velocidade na seção de teste (m s^{-1});

Se a equação 4 for trabalhada analiticamente à figura 8, podemos cortar ρgh , pois, estão no mesmo ponto referencial de altura.

$$P_1 + \cancel{\rho gh} + \frac{1}{2}\rho(V_1)^2 = P_2 + \cancel{\rho gh} + \frac{1}{2}\rho(V_2)^2 \quad (5)$$

Portanto temos a equação 6.

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho(V_1)^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho(V_2)^2 \quad (6)$$

Podemos reagrupar a equação 6 para obter a equação 7.

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2}(\rho(V_2)^2 - \rho(V_1)^2) \quad (7)$$

4.2 Tubo de *Pitot*

O tubo de *Pitot* é um dispositivo constituído de dois tubos coaxiais , formando um L. Dessa forma, na extremidade interna do tubo coloca-se de frente com a corrente do fluido, denominada região de impacto, a qual, irá receber a pressão total, enquanto a pressão estática é medida através de pequenos orifícios na parede do tubo externo. Na figura 9 temos a representação de um tubo de *Pitot* com ponta hemisférica (DELMEE, 2003) (LIPTAK, 2003) (KIRK; WEEDON; KIRK, 2006).

Figura 9 – Tubo de *Pitot* com ponta hemisférica.

Fonte: Adaptação, tradução do autor dos itens de identificação da figura (PERFECT PRIME, 2018)

Com o tubo de *Pitot* normalmente se mede a velocidade pontual no interior de uma tubulação, contudo, é possível se calcular a velocidade média em determinada seção da tubulação tomando várias velocidades na seção e dessa forma, tirar a média. Uma representação desta forma de medição é representada na figura 10 (DELMEE, 2003).

Figura 10 – Pontos de medição de velocidade média com o tubo de *Pitot* .

Fonte: Adaptação (DELMEE, 2003)

Uma das técnicas utilizadas para medição da velocidade média é o método de *Tchebycheff*.

4.2.1 Velocidade média no interior da tubulação

Existem diversos métodos de medição de velocidade média no interior de tubulação, fazendo uso de tubo de *Pitot*, sendo dois dos mais utilizados:

- **Centróides de áreas iguais:** Todas as velocidades medidas possuem pesos iguais, e o incremento das áreas de medição são espaçados de forma igual entre os pontos de medição.
- *Tchebycheff*: os pontos também são espaçados de forma igual e possuem o mesmo peso de medição, porém, esse método produz o menor erro de medição em relação aos demais métodos (DELMEE, 2003) (CARE; BONTHOUX; FONTAINE, 2014).

Na tabela 1 temos as informações para medição da velocidade média de uma tubulação fazendo uso de tubo de *Pitot*. São apresentados as distâncias do raio em relação ao número de pontos a ser medido. Dessa forma, caso se escolha $n=3$, devem ser medidos 3 pontos acima do raio e 3 pontos abaixo do raio. Esse valor deve ser em relação ao produto do valor da tabela com o raio e ser somado/ subtraído ao raio e efetuar a medida no valor calculado. Quanto maior o valor de n maior a precisão da medida (DELMEE, 2003), porém, mais difícil para efetuar as medições nos valores exatos.

Tabela 1 – Pontos de medição de velocidades em tubulações em função do raio.

Quantidade de pontos no Raio	Raio(mm)	
	Centróides de área iguais	<i>“Tchebychef”</i>
n=2	0,500	0,4597
	0,866	0,8881
n=3	0,4082	0,3827
	0,7071	0,7071
	0,9129	0,9239
n=4	0,3536	0,3203
	0,6124	0,6383
	0,7906	0,7699
	0,9354	0,9473

Fonte: Adaptação (DELMEE, 2003)

4.3 Tubo de Pitot de média

A finalidade do tubo de *Pitot* de média é tomar ao mesmo tempo as pressões dinâmicas relativas a quatro, seis ou oito velocidades ao longo do diâmetro da tubulação. Os pontos de medição no tubo são efetuados de acordo com a teoria estatística de *Tchebycheff* (DELMEE, 2003).

A equação é a mesma para o cálculo da vazão utilizado em tubulações industriais, porém, afetado por um fator K , devido apresentar um diferencial de pressão maior que um tubo de *Pitot* comum (DELMEE, 2003) (LIPTAK, 2003). A medição da vazão por um tubo de *Pitot* de média é apresentado na equação 8 (ROSEMOUNT, 2009).

$$Q = K \times \sqrt{\Delta P} \quad (8)$$

onde,

- Q : Vazão em $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$;
- K : Fator K de correção da função que pode ser tomado experimentalmente ou via manual do fabricante;
- ΔP : Pressão diferencial em Pa .

4.3.1 *Annubar*

Uma variação do tubo de *Pitot* de média foi desenvolvido pela empresa *Rosemount* e chamado de *Annubar*, seu funcionamento é representado na figura 11.

Onde:

- P_H : Pressão total;
- P_L : Pressão estática.

Figura 11 – Princípio de funcionamento do *Annubar*.

Fonte: Adaptação, tradução do autor dos itens de identificação da figura (ROSEMOUNT, 2009)

Conforme apresentado na figura 11 o *Annubar* gera uma pressão diferencial criando bloqueio no tubo e agindo como uma obstrução ao fluido. A velocidade do fluido é diminuída e para quando atinge a superfície frontal do sensor do *Annubar*, criando o impacto de alta pressão, dessa forma, o *Annubar* detecta a pressão de impacto utilizando uma fissura frontal (P_H) (ROSEMOUNT, 2009), que se abre para o alto da câmara de pressão. Esta câmara de alta pressão se conecta diretamente à tomada de pressão alta do transmissor. A referência de pressão baixa (P_L) é obtida por perfurações na região traseira do sensor e se conecta diretamente à tomada de pressão baixa do transmissor. Além disso, possui um poço para inserir o sensor de temperatura PT100 para compensar a variação de temperatura no interior da tubulação, pois, a densidade (ρ) do fluido depende da temperatura a qual é submetido (ROSEMOUNT, 2009).

4.4 Interface *IO-Link*

O *IO-Link* é um dispositivo de conexão ponto-a-ponto serial e bidirecional para transmissão de sinal e suprimento de energia sob quaisquer redes ou barramentos de *backplane* (COMMUNITY, 2013).

O *IO-link* consiste nos seguintes componentes básicos:

- Mestre *IO-Link*;
- Dispositivo *IO-Link*;
- Cabo sem blindagem de 3 ou 5 vias;

- Ferramenta de engenharia para configuração dos parâmetros de rede.

Na figura 12 temos o exemplo de uma topologia *IO-link* com 3 mestres *IO-Link* em campo e 8 dispositivos *IO-Link* trocando informações com os mestres da rede.

Figura 12 – Topologia da rede *IO-Link*.

Fonte: Adaptação, tradução do autor dos itens de identificação da figura (COMMUNITY, 2013)

4.4.1 Conexão

A conexão entre os dispositivos com essa tecnologia possui diversas possibilidades, dentre elas, via conector *M12*, pois, o sensor possui 4 terminais de ligação e atuadores possuem 5 terminais de ligação. Os mestres *IO-link* possuem um *Socket* de conexão M12 com 5 pinos para conectar os dispositivos de campo (COMMUNITY, 2013).

Na figura 13 temos uma representação geral de ligação dos dispositivos *IO-Link*, a qual, apresenta os terminais de alimentação da rede que é provida pelos canais 1 e 3, e o canal 4 provê as informações de leitura de I/O e os pacotes da rede *IO-Link*.

Figura 13 – Pinos de conexão *IO-Link*.

Fonte: Adaptação, tradução do autor dos itens de identificação da figura (COMMUNITY, 2013)

4.5 Controlador Lógico Programável

O Controlador Lógico Programável (CLP) é uma forma especial de controlador microprocessado, que utiliza uma memória de programa para armazenar instruções e implementar funções lógicas, sequenciais, temporais, contadores e aritméticas, com objetivo de controlar máquinas e processos. Na figura 14 é apresentado o diagrama de funcionamento do CLP (BOLTON, 2006).

Figura 14 – Diagrama de funcionamento do CLP.

Fonte: Adaptação, tradução do autor dos itens de identificação da figura (BOLTON, 2006)

Conforme descrito na figura 14 temos o diagrama de funcionamento do CLP, o qual (BOLTON, 2006):

- Dispositivo de Programação: Computador com sistema de programação do CLP;
- Memória de dados e de programa: Local de armazenamento das instruções do programa, o qual, o processador acessa para consultar e armazenar informações de controle;
- Interfaces de comunicação: Dispositivos integrados ao CLP para que ele possa se comunicar com periféricos, como inversores e outros CLPs.
- Dispositivos de Entrada: Sensores, IHM's, botoeiras que enviam informações ao CLP para tomadas de decisões;
- Dispositivos de saída: Sinalizações e atuadores, cujo, o sistema indica e atua de acordo com os parâmetros pré-estabelecidos.
- Processador: Responsável pelo controle, verifica as informações de entrada, processa e atua, de acordo com o controle, através dos dispositivos de saída.

O CLP deve ser selecionado de acordo com o nível de complexidade de sua aplicação (SIEMENS, 2016).

Na figura 15 é apresentado um exemplo (das linhas de CLPs da fabricante SIEMENS), que relaciona sua utilização de acordo com sua performance e nível de complexidade do sistema em que será aplicado.

Figura 15 – Relação Performance x Complexidade CLP SIEMENS.

Fonte: Adaptação, tradução do autor dos itens de identificação da figura (SIEMENS, 2016)

4.6 Banco de dados

Informações relevantes de processos são armazenados em banco de dados, que nada mais é do que um conjunto de dados que podem ser relacionados entre si. O banco de dados é formado por um conjunto de tabelas que podem se relacionar ou não, porém, torna o acesso a seus conteúdos de forma rápida e precisa, não importando a quantidade de informações armazenadas, pois, caso esteja bem estruturado o acesso a informação se torna quase que imediato (DATE, 2013) (SILBERSCHATZ; KORTH; SUDARSHAN, 2011).

4.6.1 Banco de dados Relacional

O modelo relacional é um dos principais modelos de dados para aplicativos comerciais de processamento de dados. Isso, devido sua simplicidade, que acaba por facilitar o trabalho de programadores em comparação com modelos de dados existentes até então, como o modelo de rede ou o modelo hierárquico (SILBERSCHATZ; KORTH; SUDARSHAN, 2011).

Um banco de dados relacional consiste em uma coleção de tabelas, onde são atribuídos nomes únicos. Como por exemplo uma tabela de usuário e endereços, as quais, os endereços possam se relacionar para vários usuários, por meio, de uma chave ID (SILBERSCHATZ; KORTH; SUDARSHAN, 2011).

Na figura 16 temos o exemplo de uma arquitetura de banco de dados em uma rede local, a qual, a aplicação alocada nos computadores acessam a rede para consultar, alterar e armazenar informações no banco de dados.

Figura 16 – Banco de dados em rede local.

Fonte: Adaptação, tradução do autor dos itens de identificação da figura (SILBERSCHATZ; KORTH; SUDARSHAN, 2011)

Como banco de dados relacionais podemos citar, *Microsoft SQL Server*, *Oracle*, *MySQL*, *PostgreSQL*, entre outros.

4.6.2 Banco de dados não relacional

Bancos de dados não relacionais permitem armazenar e recuperar dados não estruturados usando um esquema dinâmico. O *NoSQL* é popularmente usado por sua capacidade flexível de criar uma estrutura exclusiva e pode ser documento, gráfico, coluna ou mesmo chave organizado como uma estrutura de dados (SCALEGRID, 2019).

O *SQL* tem uma grande vantagem sobre as alternativas não relacionais há décadas, mas o *NoSQL* está rapidamente diminuindo a diferença com bancos de dados populares, como *MongoDB*, *Redis* e *Cassandra*. Embora muitas organizações optem por migrar de bancos de dados herdados, como o *Oracle*, nem todas estão migrando para o *NoSQL* (SCALEGRID, 2019).

4.6.3 Banco de dados existentes

Existem diversos tipos de bancos de dados disponíveis no mercado, sejam eles relacionais, ou não relacionais. Os bancos de dados relacionais ainda se encontram a frente dos bancos de dados não relacionais, como podemos verificar no ranking *DB-Engines*, que é um relatório de popularidade da tendência de uso de banco de dados no mercado. No gráfico 1 é apresentado o ranking de popularidade dos bancos de dados em 2019, tendo o *Oracle* como o primeiro colocado, seguido pelo *mySQL* e pelo *Microsoft SQL Server*.

Gráfico 1 – Tendência dos bancos de dados mais populares.

Fonte: Adaptação, tradução do autor dos itens de identificação do gráfico (SCALEGRID, 2019)

5 MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento do projeto ocorreu da seguinte maneira:

- Desenvolvimento e montagem do túnel de vento;
- Implementação da instrumentação de medição e controle;
- Testes nos modelos PSP.

5.1 Componentes do túnel de vento

O túnel de vento subsônico em circuito aberto é composto de 5 partes principais: Cone de contração, câmara de ajuste, seção de teste, difusor, câmara de ventilação com motor de velocidade variável (BENSON, 2014) (SPAHN; STEELMAN, 2015).

- **Cone de contração** - Este módulo do túnel é a parte onde é coletado o fluxo de ar a baixa velocidade e durante a diminuição da área ocorre um aumento na velocidade;
- **Câmara de Ajuste** - Possui a função de laminar o fluxo de ar, ou seja, diminuir a turbulência;
- **Seção de Teste** - É o compartimento, no qual, será alocado o objeto cujos testes aerodinâmicos serão efetuados;
- **Difusor** - Tem por função eliminar qualquer turbulência de ar que possa voltar para a câmara e influenciar negativamente o teste, além disso, diminuir a velocidade de ar que segue para a câmara de ventilação.
- **Câmara de Ventilação** - Local onde é alocado a turbina para controlar a velocidade do vento dentro do túnel de vento.

5.1.1 Simulações

Antes de efetuar a implementação do túnel de vento, simulações foram realizadas fazendo uso do *software COMSOL Multiphysics*. O total de três simulações foram geradas, sendo uma com o túnel em formato retangular, que é o formato dos principais túneis de vento levantado na bibliografia pesquisada, e outros 2 em formatos cilíndricos. As primeiras simulações, foram geradas para velocidades de cerca de 200 km h^{-1} no interior da seção de testes, porém, o motor utilizado foi aquém do necessário para atingir tais velocidades.

Portanto, devido as limitações no sistema de ventilação, e para obter resultados próximo do túnel desenvolvido, um valor de fluxo laminar de entrada de $1,5\text{ m s}^{-1}$ foi definido para as simulações. A primeira simulação gerada foi do túnel com dimensões retangulares, na figura 17 é apresentado o túnel com seção de teste com dimensões de 300 x 300 mm de diâmetro. Na simulação é possível verificar a distribuição de velocidade no interior do túnel de vento durante a primeira simulação. Verificamos que nas regiões das bordas da seção de teste a velocidade é baixa, devido a uma situação conhecida como camada limite (*boundary layers*), nessa região a velocidade tende a zero (HERNANDEZ et al., 2013) (DOMMELEN, 2013).

Figura 17 – Simulação do túnel com seção de teste de 300x300 mm.

Fonte: Autor

Na entrada da seção de testes, na região central percebemos um aumento considerável da velocidade em torno de 14 m s^{-1} que pode ser calculado fazendo uso da equação 4, tratado na seção 4.1.2. Além disso, no limiar da saída do cone de contração com a entrada da seção de testes vemos um aumento na velocidade no interior do túnel, conforme demonstrado pela equação 1. Porém, a velocidade de saída de 14 m s^{-1} ($50,4\text{ km h}^{-1}$) está aquém da velocidade mínima desejada, que seria acima de 30 m s^{-1} .

Na segunda simulação foi decidido por alterar o *design* do túnel para um formato tubular e, dessa forma, verificar melhorias em relação à dinâmica da velocidade no interior

do túnel. O diâmetro da seção de testes deste túnel é de 200 mm. Na figura 18 temos os resultados da segunda simulação, onde percebe-se que a velocidade máxima no interior da seção de teste superou os valores de 30 m s^{-1} . Lembrando que esse valor é apresentado logo após a entrada na seção de teste, na região central da seção de testes a velocidade se mantém superior a 27 m s^{-1} . Os resultados deste modelo de túnel superaram em pelo menos 2 vezes os resultados obtidos na primeira simulação.

Figura 18 – Simulação do túnel com seção de teste de 200 mm.

Fonte: Autor

Na terceira e última simulação foi realizada a simulação do túnel com seção de teste com diâmetro de 150 mm, que é apresentado na figura 19, nela podemos verificar que a velocidade atingiu valores ligeiramente superiores às atingidas durante a simulação anterior, cerca de 35 m s^{-1} . Além disso, como suas dimensões são menores, podemos verificar que a velocidade começa a diminuir a partir da metade da seção de testes. Essa situação ocorre, pois, quanto menor a contração do túnel maior será a perda de carga (DELMEE, 2003).

Figura 19 – Simulação do túnel com seção de teste de 150 mm.

Fonte: Autor

Mesmo que a simulação com um túnel menor fosse efetuada, além da perda de carga, estaríamos limitados pela instrumentação, um dos instrumentos de medição da velocidade do vento, o *Annubar* é para tubulações de no mínimo 150 mm de diâmetro.

Portanto, o túnel apresentado na figura 19 foi o ideal para realizar a montagem física para os testes.

5.1.2 Montagem do túnel

Conforme discutido na seção 5.1.1 o formato e dimensões do túnel construído foi idealizado a partir dos resultados obtidos na terceira simulação. Como o túnel será no formato cilíndrico ele foi montado a partir de folhas de chapas galvanizadas e fixadas com rebites.

5.1.2.1 Túnel de contração

A razão da área de entrada do túnel para a saída do túnel de contração é de suma importância (BENSON, 2014), pois, caso se utilize de valores abaixo de 6, haverá uma

excessiva perda de pressão. Portanto, a razão da área de entrada do cone de contração para a saída para o túnel proposto foi de 16 (ARIFUZZAMAN, 2012), conforme apresentado na equação 9.

$$\frac{A1(mm^2)}{A2(mm^2)} = 16 \quad (9)$$

Porém, uma das especificações citadas por Arifuzzaman (2012) acabou não sendo seguida, a qual, orienta que o comprimento do túnel de contração deve variar entre 0,15 e 1 vezes o raio de entrada do túnel de contração para minimizar a turbulência na seção de testes. Pois, em nosso caso o comprimento é de 500 mm que é superior a faixa recomendada. Esse fato ocorreu devido as dificuldades de diminuir esse comprimento, já que o tubo de contração foi dobrado de forma manual e fixado com rebites.

5.1.2.2 Seção de Teste

Para a seção de teste recomenda-se que seu comprimento seja em torno de 0,5 à 3 vezes o diâmetro hidráulico da seção, isso é necessário para que a saída da vazão de ar seja aproximadamente uniforme, dessa forma, quanto maior for o comprimento da seção de teste, pode haver um incremento na camada limite (*boundary layer*), ou seja, regiões a qual, a velocidade é diminuída, causando com isso, velocidades não uniformes na saída da seção de teste, devido diferentes velocidades causadas pelo incremento da camada limite. Para o presente projeto a relação comprimento x diâmetro hidráulico foi de aproximadamente 3 (ARIFUZZAMAN, 2012). Essa relação foi escolhida devido as pequenas dimensões da seção de testes, problemas para a instalação da instrumentação de medição poderiam ser encontrados, além de possíveis dificuldades para instalar as janelas de inspeção do *PSP* poderiam ser enfrentadas.

5.1.2.3 Montagem

Na figura 20 temos as dimensões do túnel de vento desenvolvido. O túnel possui formato cônico e montado em folhas de chapa galvanizada, como discutido anteriormente.

Figura 20 – Dimensões do túnel de vento desenvolvido em mm.

Fonte: Autor

As junções das partes do túnel devem possuir conexões arredondadas (HERNANDEZ et al., 2013), afim de diminuir a turbulência em que o túnel pode ser submetido. Porém, devido dificuldades construtivas, neste modelo as partes do túnel foram unidas por meio de pequenas bordas retas e rebitadas. Portanto, o formato das juntas do túnel apresentam partes retas, conforme apresentado na figura 20.

O difusor possui a função de diminuir a velocidade do vento após a saída da seção de teste até a câmara de ventilação, ou seja, quanto mais longo o comprimento do difusor menor a velocidade na câmara de ventilação (ARIFUZZAMAN, 2012), no caso, o comprimento do difusor é de 1270 mm.

O motor e o ventilador foram instalados na câmara de ventilação. Possui dimensões de 480 mm de comprimento por 510 mm de diâmetro, esses valores foram definidos de acordo com dimensões do motor e ventilador disponíveis. Como foram adquiridos em sucata, a câmara de ventilação foi montada nas dimensões mínimas possíveis para alocar o ventilador em seu interior. Essa parte do túnel foi dimensionado de acordo com o material disponível, devido as dificuldades de se conseguir outro ventilador em outras dimensões.

Na figura 21 é apresentado o sistema motor X ventilador, com as barras de fixação no interior do túnel. O motor foi fixado em uma estrutura feita com barras *Metalon* de 40mm x 40mm de espessura, pelo fato do sistema conter partes móveis e estar submetido a grandes vibrações. Essa é uma das partes que exige segurança na hora de operação do motor, pois, caso seja mal fixado o ventilador pode soltar e causar um acidente.

Figura 21 – Sistema de ventilação.

Fonte: Autor

5.1.3 Sistema de medição e controle

Assim que as dimensões do túnel foram definidas, a malha de controle e um diagrama de blocos foram elaborados para representar o sistema de controle. Na figura 22 é apresentado o diagrama de blocos do controle do processo.

Figura 22 – Diagrama de blocos do controle em malha fechada.

Fonte: Autor

Conforme apresentado na figura 22 o sistema é alimentado com o Valor desejado, variável conhecida como *Setpoint*, o valor é comparado com o retorno do sinal, que irá retornar um erro, o qual, o CLP irá processar a informação, apresentar na tela de supervisão e armazenar os dados em uma base de dados *SQL Server*, após processar a informação o CLP irá enviar um sinal ao atuador, no caso, um inversor de frequência que irá aumentar ou diminuir a velocidade do motor, dependendo do erro do sistema. No sistema de supervisão deve ser selecionado qual o transmissor de temperatura que estará sendo utilizado para o cálculo da velocidade, se o transmissor 4..20 mA ou transmissor *IO-Link*. Após isso, o sistema verifica o diferencial de pressão e efetua o cálculo da velocidade em km h^{-1} , apresenta o valor na tela de supervisão e envia o retorno de sinal ao comparador para efetuar as devidas correções do sistema. Esse controle é conhecido como sistema em malha fechada (GARCIA, 2005).

Além disso, o diagrama P&ID da malha de controle foi desenvolvido seguindo a norma ISA 5.01-2009 (ISA, 2009), conforme apresentado na figura 23.

Figura 23 – Diagrama P&ID da malha de controle do sistema.

Fonte: Autor

O sistema de controle descrito na figura 23 apresentam as abreviações da instrumentação seguindo o padrão inglês conforme descrito na norma (ISA, 2009). O significado das siglas está descrito a seguir:

- *ST-1001 (Speed Transmitter)*: Transmissor de Velocidade. Esse transmissor é um transmissor de pressão diferencial, porém, sua função na malha é enviar o sinal diferencial de pressão para calcular a velocidade no interior da seção de teste;
- *SE-1001 (Speed Sensor)*: Sensor de Velocidade. Este é o tubo de *Pitot* ou o *Annubar* que envia o diferencial de pressão para o transmissor que, por sua vez, envia ao controlador;
- *TT-1001 (Temperature Transmitter)*: Transmissor de Temperatura. Verifica a temperatura enviada pelo sensor de temperatura e envia um sinal 4 a 20 mA ao controlador, referente a temperatura do sistema;
- *TE-1001 (Temperature Sensor - PT100)*: Sensor de Temperatura RTD(PT100). Esse sensor de temperatura é acoplado no *Annubar*, é utilizado para compensar a velocidade de acordo com a variação da temperatura;
- *TT-1002 (Temperature Transmitter)*: Transmissor de Temperatura *IO-Link*. Este é o transmissor de temperatura com comunicação digital *IO-Link*, para captar a temperatura na seção de teste quando não está sendo utilizado o *Annubar*. Foi selecionado devido a inovação tecnológica a nível do transmissor;
- *TE-1002 (Temperature Sensor)*: Sensor de Temperatura acoplado ao transmissor *IO-Link*;

- *SZ-1001 (Speed Actuator)*: Atuador de Velocidade. Este é o inversor de frequência que recebe um sinal do controlador, aumentando ou diminuindo a velocidade do motor, de acordo com o sistema de controle;
- *M (Motor)*: Motor do ventilador. Gera o fluxo de ar no interior do túnel;
- *UIR-1001 (Multivariable Indicator and Register)*: Indicador e Registrador Multivariável. É o sistema de supervisão que coleta os dados e armazena em uma base de dados *SQL Server*;
- *UC-1001 (Multivariable Controller)*: Controlador Multivariável. Esse é o CLP S7-1500 que capta as informações de medição do processo, efetua os cálculos de controle e atualiza a saída para manter o controle da velocidade desejada.

5.1.4 Instrumentação selecionada

A seguir são apresentados os instrumentos para medição e controle do sistema.

5.1.4.1 *Annubar*

O *Annubar* é um elemento de medição de vazão secundário, utilizado para medição de velocidade de gases em tubulações industriais, além de ser dotado de um poço com um sensor de temperatura RTD para efetuar a compensação da velocidade do fluxo. Na figura 24 é apresentado o *Annubar* Rosemount 485 de 150 mm, utilizado para medição de vazão em tubulações de 150 mm (ROSEMOUNT, 2009).

Figura 24 – *Annubar* utilizado. a) Vista frontal; b) Vista traseira

Fonte: Autor

Conforme apresentado na figura 24 a) o *Annubar* é dotado de duas tomadas de alta e baixa pressão, para que seja possível medir a pressão diferencial a qual ele é submetido, também pode ser visto a área sensora de pressão dinâmica. Na figura 24 b) é possível ver a tomada de ligação do sensor de temperatura e a área sensora de pressão estática.

Como o *Annubar* é um dispositivo de medição de velocidade média no interior da tubulação, seu ΔP será superior a de um tubo de *Pitot* hemisférico, portanto, é necessário um fator K para correção, o qual, foi utilizado um tubo de *Pitot* hemisférico para encontrar o fator K, para correção da velocidade (DELMEE, 2003).

5.1.4.2 Tubo de *Pitot*

Para obter o fator de correção K do *Annubar* foi selecionado um tubo de *Pitot* do tipo L com ponta hemisférica, também utilizado para medição de vazão em tubulações industriais. O modelo do tubo de *Pitot* é *PT6300 304 STAINLESS STEEL 300mm X 110mm*, com precisão (Fator K) entre 0,998 e 1,001 (+/- 0,1%) (PERFECT PRIME, 2018). Na figura 25 é apresentado o tubo de *Pitot* tipo L utilizado na aplicação apresentada.

Figura 25 – Tubo de *Pitot* com ponta hemisférica.

Fonte: Autor

5.1.4.3 Transmissor de Pressão

Para efetuar a medição de pressão diferencial tanto do *Annubar* quanto do tubo de *Pitot* foi selecionado um transmissor de pressão *Rosemount 2051*, conforme apresentado na figura 26.

Figura 26 – Transmissor de pressão *Rosemount* 2051.

Fonte: Autor

Na figura 26 é apresentado o transmissor de pressão diferencial, o qual, possui uma tomada de pressão baixa e outra de alta, para conexão do sensor de velocidade, o sinal de saída é de 4 a 20 mA. Foi ajustado para um diferencial de pressão de 0 a 14,7 mbar, por meio de um configurador *HART* 475 da *Emerson*.

As especificações do transmissor de pressão diferencial são:

- modelo: 2051CG2A02A1AH2BAL4M5DFQ4;
- Calibração de fábrica: 0 a 50 mbar;
- Sinal de saída: 4 a 20 mA *HART*.

5.1.4.4 Controlador Lógico Programável

O CLP selecionado foi o S7-1512C da linha 1500 da Siemens, utilizado para aplicações de alta performance na indústria (SIEMENS, 2016).

Na figura 27 temos a imagem do CLP S7-1500 utilizado no presente projeto.

Figura 27 – Controlador Lógico Programável - S7-1500.

Fonte: Autor

A aplicação foi desenvolvida fazendo uso do ambiente de desenvolvimento da *SIEMENS TIA Portal*, tendo a lógica desenvolvida em *Ladder* e *SCL*, com a aplicação sendo apresentada no apêndice A.

5.1.4.5 Inversor de frequência

O inversor de frequência *CFW09* da *WEG*, com um cartão *PROFIBUS Anybus* foi utilizado no controle da velocidade do motor. É um inversor para motores de 3 cv, porém, foi ligado a um motor de 0,75 cv que estava disponível.

A frequência máxima ajustada para o inversor foi de 3070 rpm, que foi a frequência máxima a qual, o motor não perderia o torque. Nesta frequência foi obtida a velocidade máxima no interior do túnel de 107 km h^{-1} .

Sua velocidade foi controlada via rede *PROFIBUS*, ligado ao módulo *PROFIBUS* no CLP.

A comunicação *PROFIBUS* foi estabelecida alterando os seguintes parâmetros (WEG, 2006a):

- P309 = 3: Comunicação *Fieldbus* - *PROFIBUS DP* - 6 I/O;
- P313 = 0: Parar o motor caso ocorrer perda de comunicação;

- P222 = 10: Referência de velocidade em modo remoto enviado via *Fieldbus*;
- P226 = 7: Sentido de giro enviado via *Fieldbus*, com padrão em sentido horário;
- P227 = 3: Gira/Pára em modo remoto enviado via *Fieldbus*.

Figura 28 – Inversor de frequência CFW09.

Fonte: Autor

5.1.4.6 Dispositivos *IO-Link*

Na figura 29 é apresentado os dispositivos *IO-link* utilizados no presente projeto.

Figura 29 – Dispositivos *IO-Link* utilizados.

Fonte: Autor

O sistema composto para integração dos módulos *IO-link* é composto por um mestre e dispositivos *IO-link* (COMMUNITY, 2013).

Como mestre da rede *IO-link* foi utilizado o cartão *Communication Module (CM 4xIO-link)* que é um cartão que possui 4 canais de comunicação com dispositivos *IO-link* (SIEMENS, 2017a). Por se tratar de um cartão ele deve ser acoplado a um dispositivo remoto. Para integrar o cartão à rede estamos utilizando uma remota *PROFINET ET200SP IM155-6PN ST* (SIEMENS, 2017b).

O dispositivo de campo *IO-link* é o transmissor de temperatura TR-2432 da fabricante IFM, além de comunicação *IO-link* ele também comunica 4 a 20 mA, porém, comunicando em rede *IO-Link*, além das informações de processo ainda envia informações de diagnóstico e do dispositivo (IFM, 2011) (IFM, 2012).

O pacote de informações pode conter até 232 *bytes* de dados (IFM, 2012) (COMMUNITY, 2013). Essas informações podem ser utilizadas pelo gerenciador de ativos da empresa e também para efetuar análises diagnósticas e programar ações preditivas, evitando, dessa forma, parada desnecessária do processo.

O bloco principal de programação é o FB50001 (*IO_LINK_DEVICE*) (SIEMENS, 2018) e toda a parametrização do bloco está descrita no apêndice A.

5.2 Sistema de supervisão

O sistema de supervisão do túnel de vento foi desenvolvido com o *WINCC RT Advanced*, o sistema é apresentado na figura 30.

Figura 30 – Sistema de supervisão.

Fonte: Autor

Como podemos verificar na figura 30 a tela é constituída pela imagem de um túnel, onde, são apresentadas as informações de temperatura, velocidade, além do diferencial de pressão em mbar e em Pa (que é a unidade utilizada para os cálculos). Todas essas informações são calculadas, a partir dos dados coletados pelo CLP, esses cálculos constam nas rotinas apresentadas no apêndice A.

Também apresenta ferramentas para controle e monitoração do motor, como os componentes *Gauge*, que monitora a rotação do motor e o *Slider*, que envia um comando para o motor entre 0 e 100 % da velocidade parametrizada no inversor, no caso, entre 0 e 3070 rpm. Os botões de liga e desliga do motor se encontram pouco abaixo do *Slider* e do *Gauge*.

Além disso, nessa tela constam os parâmetros do tipo de sensor que está sendo utilizado, se o *Annubar* ou o tubo de *Pitot*, lembrando que, caso seja selecionado o *Annubar* um fator de correção (K) de 0,661364 deve ser aplicado para correção do valor de velocidade. Também é possível ligar ou desligar o armazenamento de dados no banco. Essa funcionalidade foi implementada para evitar o armazenamento de informações desnecessárias na base de dados. Quando o armazenamento em banco é acionado, um gatilho na aplicação ativa a conexão com o banco e os dados são armazenados via *VB-Script* descrito no apêndice B.

Por fim, constam as informações do sensor *IO-Link*, cuja grande vantagem deste tipo de comunicação é a possibilidade de receber informações além da variável primária, que é a temperatura. No caso, além da temperatura, é apresentada a informação de máxima e mínima temperatura registrada pelo dispositivo, fabricante, site, nome do dispositivo, série do dispositivo e mensagem de falha (IFM, 2012). Essas informações são importantes tanto para análise preditiva de falha do sensor, quanto para gerenciamento de ativos (COMMUNITY, 2013).

Toda a lógica de controle e monitoramento desenvolvido encontra-se descrito no apêndice A.

5.3 Topologia da rede

Os dispositivos da rede Industrial foram integrados via rede, sendo que o CLP, com o sistema de supervisão e o metro *IO-Link* se comunicam via rede PROFINET e o inversor com o CLP se comunica via rede PROFIBUS.

Na figura 31 temos a topologia da rede de comunicação entre os dispositivos, implementada no TIA Portal V14. Os demais instrumentos apresentados no presente projeto, se comunicam via 4 a 20mA e não faz parte da topologia, pois, são ligados diretamente na entrada analógica do CLP.

Figura 31 – Topologia da rede.

Fonte: Autor

5.4 Coleta de dados

5.4.1 Armazenamento de dados

O armazenamento de dados do túnel de vento desenvolvido é efetuado em um banco de dados relacional *Microsoft SQL Express*, como critério para escolha do banco foi:

- Aplicação sem custo;
- Armazenamento de 10 GB de dados;
- Menor curva de aprendizagem.

A linha do *Microsoft SQL Express* é uma linha gratuita oferecida pela Microsoft, de fácil instalação e manuseio, com possibilidade de armazenamento de dados de até 10 GB. Além de apresentar a menor curva de aprendizagem, devido ao uso frequente da plataforma.

A conexão entre o banco e o *WinCC RT Advanced* foi criado via acesso ODBC, que cria o *alias* de conexão entre a aplicação e o banco de dados.

Um banco de dados chamado *DB_Dados_Tunel* foi criado e adicionada uma tabela chamada “DadosTestes”, para armazenar as informações de controle do túnel de vento, a estrutura de informações da tabela está descrito no apêndice C.

5.4.2 Calibração do *Annubar*

Para efetuar calibração do *Annubar* que é um tubo de *Pitot* de média, foi utilizado um tubo de Pitot de ponta hemisférica. Para isso, a média da velocidade do túnel deve ser calculada fazendo uso do tubo de *Pitot*. O método selecionado para calcular a média no interior da seção de testes, foi o *Tchebycheff* (DELMEE, 2003), tratado na seção 4.2.1.

O fator n selecionado foi $n=3$, conforme tabela 1, o qual devem ser tomados 3 pontos acima do raio da seção de testes e 3 pontos baixo do raio da seção de testes do túnel. Após o cálculo da média, ela deve ser utilizada para se encontrar o fator K do *Annubar* (DELMEE, 2003) (ROSEMOUNT, 2009). A função para calcular o fator k é descrito na equação 10. Esse fator é utilizado para efetuar uma correção na velocidade devido ao ΔP do *Annubar* apresentar um valor superior ao tubo de *Pitot*.

$$K = \frac{V_{Pitot}}{V_{Annubar}} \quad (10)$$

onde,

- K : Fator de correção de velocidade do *Annubar*;
- V_{Pitot} : Média de velocidade do Tubo de *Pitot*;
- $V_{Annubar}$: Velocidade medida pelo *Annubar*.

Dessa forma, assim que a velocidade média no tubo de *Pitot* for definida o valor da velocidade do *Annubar* é medido e como a velocidade apresentada é superior a do tubo de *Pitot*, esse valor é utilizado para a correção fazendo uso da equação 10.

Como $n = 3$ a equação para definir os pontos superiores e inferiores do raio da seção de teste pode ser definida como:

$$d = (n_n \times r_{tunel}) \pm r_{tunel} \quad (11)$$

onde,

- d : distância do raio;

- $r_{\text{túnel}}$: raio da seção de testes do túnel;
- n_n : fator n de acordo com a tabela 1, no caso foi selecionado $n=3$.

Como o diâmetro da seção de testes da tubulação é de 75 mm, calculamos os pontos acima e abaixo do raio da seção de testes fazendo uso da equação 11. Dessa forma, obtemos a tabela 2.

Tabela 2 – Pontos de medição de velocidades na seção de teste.

Quantidade de pontos no Raio	Método de <i>Tchebycheff</i>	
	n = 3	Distância em mm
Pontos acima	0,9239	5,7
	0,7071	21,97
	0,3827	46,3
Pontos abaixo	0,3827	103,7
	0,7071	128,03
	0,9239	144,29

Fonte: Autor

5.4.3 Definição da rotação do motor

Para verificar a maior velocidade que a turbina montada responde a determinada rotação do motor, foram aplicados testes variando entre 0 e 3200 rpm, pois, como o motor é fabricado para 1720 rpm, com corrente de operação de 2,9A e, ao aplicar uma rotação acima das especificações de fábrica, ocorre a perda de torque do motor (WEG, 2006b).

Os valores de velocidade de rotação do motor são apresentados tabela 3. Em cada uma das rotações apresentadas, foi deixado um período de 1 minuto para verificar variações de velocidade no interior do túnel. A partir de 3000 rpm, foram feitos testes com intervalos menores, pois, na faixa dos 3000 rpm foi o momento que o motor começou a perder torque. Dessa forma, a partir dos 3000 rpm que encontrava-se o limiar da velocidade máxima do sistema de ventilação do motor.

Tabela 3 – Rotações aplicadas ao motor no intervalo de 1 minuto

Rotação em rpm
160
320
480
640
800
960
160
1120
1280
1440
1600
1760
1920
2080
2240
2400
2560
2720
2880
3040
3070
3104
3136
3168
3200

Fonte: Autor

A partir desses dados a rotação máxima estabelecida para o motor foi de 3070 rpm, portanto, a rotação máxima parametrizada no inversor de frequência foi de 3070 rpm, dessa forma, evita que o inversor ultrapasse esse limite, deixando a referência de controle na escala de velocidade parametrizada, entre 0 e 3070 rpm (WEG, 2006a).

5.5 Captação de imagens

Ao captar a imagem da reação do corpo com PSP depositado, quando este estiver submetido a um fluxo de ar no interior do túnel, deve ser utilizado tanto um filtro no

sistema da excitação da molécula quanto no sistema de receptor (BRAGA; SALCEDO, 2018).

5.5.1 Excitação da molécula

No sistema de excitação a molécula foi utilizado um LED UV alimentado com 5,10V, modelo:

- VL380-5-15

Na figura 32 a) é possível verificar o encapsulamento do LED, onde, foi utilizado um tubo de caneta para fixá-lo no suporte, no qual, 2 resistores de $100\ \Omega$ foram ligados em série com o led para limitar a corrente a 25,5 mA e manter alta a intensidade no LED (GREGORY. et al., 2014).

Figura 32 – Encapsulamento do LED de 380 nm.

Fonte: Autor

Como podemos verificar na figura 32 b) um filtro ótico de 380 nm, modelo QB29 com transmitância de 85% foi alocado na saída do encapsulamento do LED, para minimizar fontes luminosas externas ao sistema. No gráfico 2 é apresentado a transmitância do filtro utilizado.

Gráfico 2 – Transmitância do filtro QB29 de 380 nm.

Fonte: Adaptação, tradução do autor dos itens de identificação do gráfico (EBAY, 2018)

As especificações do filtro utilizado são:

- Modelo: QB29;
- Característica: Luz azul;
- Transmitância: 85%;
- Diâmetro: 25 mm;
- Espessura: 2 mm.

O filtro não possui anel de proteção em seu entorno, portanto, cuidados em seu manuseio devem ser tomados.

5.5.2 Medição da resposta da molécula

Os trabalhos levantados sobre PSP, durante o desenvolvimento do presente projeto, utilizaram câmera científica com sensor CCD, porém, recentemente câmeras com sensor CMOS para medição em sistemas PSP foram desenvolvidas pela CSEM e PCO (YORITA et al., 2019).

As imagens foram captadas por uma câmera NIKON D5100, semi-profissional. Não foi utilizada uma câmera CCD específica para PSP, conforme apresentado nos trabalhos pesquisados, devido aos altos custos para aquisição.

Na figura 33 temos a imagem da câmera utilizada durante os testes com a amostra de PSP, suas especificações técnicas estão descritas no anexo A (NIKON, 2011).

Figura 33 – Câmera NIKON D5100.

Fonte: Autor

Além disso, é possível verificar o filtro ótico de 640 nm adaptado na objetiva da câmera apresentada na figura 33.

Esse filtro possui as seguintes especificações:

- Filtro: Carl Zeiss;
- Modelo: BP640/30;
- Transmitância: 88%;
- Referência: EB00499B;
- diâmetro: 25 mm;
- espessura: 4 mm.

No gráfico 3 é apresentado o comprimento de onda da transmitância do filtro adaptado na câmera, além disso, é possível verificar que o filtro está próximo de 90% de transmitância.

Gráfico 3 – Transmitância do filtro de 640 nm.

Fonte: Adaptação, tradução do autor dos itens de identificação da figura (CARL ZEISS, 2018).

Esse filtro possui anel de fixação.

5.6 Filme PSP

Para composição dos sensores de PSP foram depositadas, sobre as superfícies ativas das lâminas de vidro e do aerofólio (asa), membranas de PVC, contendo moléculas imobilizadas sensíveis de Octaetilporfirina de Platina (PtOEP). As membranas foram compostas por 2,5 mg de PtOEP dissolvidos em 1.5 mL de tetrahidrofurano (THF) $2,29 \times 10^{-3} \text{ mol L}^{-1}$. Adicionalmente, foram utilizados 20 mg e 38 mg de PVC com 43 μL e 82 μL de *Bis (2-ethylhexyl) sebacate (DOS)*, apresentados respectivamente nas Figuras 34 a) e b) (BRAGA; SALCEDO, 2018).

Figura 34 – Amostras desenvolvidas.

Fonte: Autor

Para homogeneização e diluição completa do PtOEP, ambas as misturas foram submetidas em agitação mecânica, por ultrassom, durante 30 minutos (BRAGA; SALCEDO, 2018). Os filmes foram depositados pelo processo de imersão denominado de *dip-coating* para formação das membranas ativas de PtOEP-PVC fixadas diretamente no lado superior das amostras de vidro. Para a deposição sobre o modelo aerofólio desenvolvido, a amostra de 38 mg foi depositada sobre o modelo e espalhada por um pincel utilizado em pintura a óleo. Na figura 38 é possível verificar o resultado da deposição da amostra.

5.6.1 Superfícies utilizadas

Os testes foram desenvolvidos com duas estratégias diferentes:

- Deposição em lâminas de microscopia;
- Deposição em um modelo de ASA impresso em impressora 3D;

5.6.1.1 Deposição em lâminas de microscopia

Nos primeiros testes foram separadas 5 lâminas, utilizadas em microscopia, e cortadas em formato quadrado no tamanho de 10mm X 10mm, totalizando 18 pequenas lâminas que foram utilizadas na deposição do reagente desenvolvido.

Foram utilizados 2 métodos para deposição do reagente nas lâminas:

- *Spin*;
- Gotejamento.

No método de deposição por *Spin* uma gota do reagente é depositado sobre a lâmina e rotacionada para homogeneização da amostra sobre a superfície. Nesse processo foi utilizado um conjunto de motor trifásico e inversor de frequência CFW09 da WEG, pois, dessa forma é possível controlar a velocidade de rotação com precisão de 0,5% quando não existem variações de carga (WEG, 2014). O inversor de frequência foi ajustado nas seguintes rotações durante 30 segundos:

- 3000 rpm;
- 2000 rpm;
- 1000 rpm;

- 500 rpm.

Em cada uma das velocidades, citadas acima, foram geradas 3 amostras. A deposição em duas das três amostras foram feitas em concentração de 38 mg e uma em 20 mg.

O método por gotejamento foi depositado em 6 lâminas, duas gotas foram depositadas em cada lâmina fazendo uso de uma pipeta. Sendo que, quatro dessas amostras foram depositadas com 38 mg de concentração e duas com 20 mg de concentração.

Todas as amostras foram levadas ao forno durante 1 hora a uma temperatura de 60 °C.

5.6.2 Modelo

Um modelo impresso em impressora 3D em formato geométrico de um aerofólio de avião foi desenvolvido. Dessa forma, uma maior variação fotoluminescente é esperada se comparado com as lâminas utilizadas, devido sua geometria não uniforme. Nas figuras 35 e 36 temos o projeto com as dimensões de construção do aerofólio impresso em 3D.

Sendo que a figura 35 é apresentado o aerofólio em vista superior com diâmetro de 30 mm.

Figura 35 – Vista superior do projeto do aerofólio impresso com dimensões em mm.

Fonte: Autor

Já a figura 36 é apresentado o projeto dimensional do aerofólio com vista lateral e com comprimento total de 50 mm e altura de 10 mm.

Figura 36 – Vista lateral do projeto do aerofólio impresso com dimensões em mm.

Fonte: Autor

Na figura 37 temos a imagem do aerofólio impresso e lixado com lixa fina 180, a fim de deixar a superfície lisa para a deposição do filme PSP.

Figura 37 – Modelo em formato de aerofólio desenvolvido para testes.

Fonte: Autor

A amostra utilizada para a deposição sobre a superfície possui uma concentração de 38 mg de PVC. Na figura 38 temos a imagem do modelo já com o filme depositado sobre sua superfície.

A deposição na amostra foi efetuada fazendo uso de uma pipeta e um pincel, dessa forma, com a pipeta foi gotejado o filme e com o pincel espalhado sobre a superfície do modelo. Como podemos verificar na figura 38 a deposição apresentou variações de espessura da tinta sobre sua superfície, devido à baixa eficácia do método de deposição utilizado. Porém, durante os testes, com a variação da velocidade ela apresentou diferentes intensidades, essas variações acabou por favorecer os resultados, pois, a câmera foi capaz de captar as diferentes intensidades apresentadas no modelo.

Figura 38 – Modelo com deposição de *PtOEP*.

Fonte: Autor

Os testes na amostra foram efetuados no mesmo dia da deposição, pois, as propriedades fotoluminescentes degradam com o tempo e utilização, além do tempo de exposição de luz sofrido pela amostra. Os testes foram efetuados durante a noite, para isolar fontes luminosas indesejadas. A temperatura ambiente no interior da seção de testes estava 17,4 °C.

Os testes foram efetuados no intervalo de 1 hora cada, ou seja, foram tiradas fotos nas velocidades descritas na metodologia. Dessa forma, foram montados 3 bancos de imagens no intervalo de 3 horas. O tempo para a repetibilidade da operação foi relativamente longo, para que o motor resfriasse, pois, o motor estava trabalhando acima de seus limites recomendados.

5.7 Testes no interior do túnel

Para os testes as amostras foram dispostas no interior do túnel a uma disposição de 20° (MITSUO; NAKAKITA; KURITA, 2004) com a face de entrada da seção de teste, em sua região central, conforme apresentado na figura 39.

Figura 39 – Disposição da amostra.

Fonte: Autor

A câmera utilizada para tomar as imagens da amostra foi disposta em um lado da seção de teste e o LED utilizado para a excitação da molécula foi disposto no lado oposto da câmera. Janelas de inspeção foram feitas para a excitação e análise da amostra. Para essas janelas foram utilizados lâminas para microscopia. Sua disposição é apresentada na figura 40.

Figura 40 – Disposição da câmera e LED emissor da excitação.

Fonte: Autor

Para a excitação da molécula foi utilizado um UV LED de 5 mm de 380 nm, conforme descrito na seção 5.5.1.

Como visto nos capítulos anteriores a amostra responde em um comprimento de onda de 640 nm, portanto, um filtro ótico de 640 nm foi fixado na lente da câmera. O filtro ótico utilizado foi o *Carl Zeiss* BP640/30 de 640 nm com transmitância de 70%. A câmera utilizada foi o modelo NIKON D5100, com sensor CMOS.

5.7.1 Análise das imagens

A técnica utilizada para análise das imagens foi a conversão para escala cinza e gerar o histograma da imagem para verificar a alteração de intensidade da emissão fotoluminescente e, gerar a imagem binarizada para verificar a distribuição fotoluminescente sobre a amostra utilizada (BASU; VASANTHARAJAN; RAJU, 2009). As imagens foram obtidas em diferentes velocidades, entre 90 km h^{-1} e 107 km h^{-1} .

O eixo horizontal, no histograma, pode apresentar uma variação de 0 a 1, o qual, quanto mais próximo a 1 mais claro é a amostra e quanto mais próximo de 0, mais escura a amostra. Essa situação apresenta a distribuição da molécula no corpo analisado, assim, quanto mais próximo ao branco indica que a molécula está sendo ativada. No eixo vertical é apresentado a intensidade de emissão da molécula na região do pixel analisado.

6 RESULTADOS

6.1 Túnel desenvolvido

Com o túnel montado, os instrumentos de controle e medição instalados e a aplicação desenvolvida, ele foi colocado em operação. Os dados foram coletados e armazenados em uma tabela criada no servidor de banco de dados *SQL Server*. No apêndice C é possível verificar os campos utilizados para armazenar os dados.

6.1.1 Montagem do Túnel

Após selecionar e parametrizar todos os instrumentos, toda a instrumentação do túnel de vento foi interligada ao CLP; os sensores foram instalados no túnel para que os testes de performance e PSP fossem efetuados, conforme apresentado na figura 41.

Na figura 41 todos os dispositivos selecionados foram instalados, os sensores de temperatura e de velocidade (*Annubar*) acoplados no túnel. Somente o tubo de *Pitot* fica de fora, sendo utilizado apenas para verificação de velocidade pontual na seção de testes. O CLP, o Inversor, a remota *IO-Link* e o transmissor de temperatura foram alocados em uma mesa ao lado do túnel.

Figura 41 – Montagem completa do Túnel de Vento.

Fonte: Autor

Após a montagem da infraestrutura os testes de velocidade puderam ser efetuados.

6.1.2 Fator de correção do *Annubar*

Assim que as distâncias de medição foram calculadas, as medições das velocidades no interior do túnel fazendo uso do tubo e *Pitot* foram tomadas e apresentadas na tabela 4. Dessa forma, a velocidade média no interior do túnel pode ser calculada, sendo obtido o valor de $101,05 \text{ km h}^{-1}$.

Tabela 4 – Velocidade média na seção de testes

Distância (mm)	Velocidade (km h ⁻¹)
5,7	98,58
21,97	103,14
46,3	105,11
103,7	105,93
128,03	104,5
144,29	89,05
Média	101,05

Fonte: Autor

Neste momento foi medida a velocidade obtida pelo *Annubar* que foi de 152,8 km h⁻¹. Com isso, fazendo uso da equação 10, podemos calcular o fator K de correção de velocidade no interior do túnel, cujo valor, é apresentado na equação 12.

$$k = \frac{V_{Pitot}}{V_{Annubar}} = \frac{101,05}{152,8} \Rightarrow k = 0,661364 \quad (12)$$

Esse fator foi acrescentado na programação do CLP, dessa forma, o usuário pode escolher entre utilizar o *Annubar* ou o tubo de *Pitot* para calcular a velocidade, sendo que, caso escolha o tubo de *Pitot*, nenhuma correção é aplicada, e caso escolha o *Annubar* o fator calculado na equação 12 é utilizado pela aplicação para calcular a velocidade no interior da seção de teste. Essa função é apresentada no apêndice A.

6.1.3 Dados coletados

No gráfico 4 é apresentado os resultados da primeira sequência de testes, onde, se apresenta a velocidade do vento no interior do túnel, conforme o aumento da rotação do motor. As rotações do motor aplicadas neste teste estão descritas na tabela 3. Conforme mencionado anteriormente esse teste foi efetuado para verificar o limiar de início da queda da rotação do motor, devido a perda de torque quando a rotação do motor está acima de suas especificações de fábrica (WEG, 2006b).

Gráfico 4 – Velocidade do vento no interior do túnel em relação a rotação do motor.

Fonte: Autor

Os picos apresentados no gráfico 4 são as variações de velocidades nas rotações definidas na tabela 3, os pontos de reta (degraus) apresentam o intervalo de alteração entre rotações estabelecidas. Além disso, podemos verificar que a partir de 3000 rpm houve ligeira diminuição da velocidade e para verificar essa situação foi gerado o gráfico 5 com escala definida nesta região de variação.

Gráfico 5 – Verificação da limiar com diminuição na velocidade do vento no interior do túnel.

Fonte: Autor

Conforme mencionado os pontos de pico apresentados no gráfico 5 são a variação de velocidade nas rotações definidas na tabela 3. Além disso, é possível verificar que a partir de 3100 rpm apresentou uma queda na rotação do motor. É constatado também, que até cerca de 3070 rpm as variações de velocidade permanecem em torno dos 100 km h^{-1} e a partir deste ponto, a velocidade começa a diminuir.

Assim que a rotação máxima foi definida outros testes nessa rotação foi efetuada no interior do túnel, conforme apresentado nos gráficos 6 “a”, “b”, “c” e “d”.

Verifique que nos gráficos 6 “a”, “b” e “d” a velocidade se mantém ligeiramente acima dos 100 km h^{-1} , porém, no gráfico 6 “c” é apresentado uma pequena diminuição da velocidade, agora variando pouco acima e abaixo de 100 km h^{-1} .

Os dados coletados e apresentados nos gráficos 6 “a” e “b” foram selecionados da sequência de testes efetuados, com pouco intervalo de descanso para o motor, em torno de 50 minutos. Os dados apresentados no gráfico 6 “c” foram coletados dessa mesma sequência de testes, a partir desse ponto os resultados foram similares. Os dados apresentados no gráfico 6 “d” foram coletados no dia seguinte, após um longo período de descanso para o motor. Porém, com testes em intervalos de descanso de 50 minutos, voltou a apresentar resultados similares ao que foi apresentado no gráfico “c”.

Esse fato passou a ocorrer após o constante uso do motor, dando apenas pequenos intervalos de descanso para o motor, cerca de 50 minutos, como ele passou a aquecer começou a perder suas características físicas e se continuasse a sequência os danos no motor poderiam ser permanentes (FRANCHI, 2008).

Gráfico 6 – Testes de velocidade no interior do túnel.

Fonte: Autor

Portanto os testes foram estabelecidos para no máximo 10 minutos em funcionamento e descanso de 50 minutos no intervalo de duas horas. Após transcorrido esse período novos testes seriam executados somente após 5 horas de descanso do motor.

6.2 Filme PSP

Os resultados apresentados a seguir foram efetuados nas lâminas de vidro e no modelo de aerofólio impresso em impressora 3D.

6.2.1 Testes com amostra depositada nas lâminas

As amostras foram testadas nas mesmas condições apresentadas na figura 39. Porém, todas as amostras depositadas por *spin* não apresentaram resultados satisfatórios, sendo que, as amostras em 3000 rpm, 2000 rpm e 1000 rpm não apresentaram variações de intensidade. A amostra de 500 rpm apresentou uma pequena variação de cerca de 2%

em relação ao *pixel* com maior intensidade entre o túnel desligado e ligado na velocidade máxima, uma resposta baixa e dentro da faixa de erro.

Um dos motivos possíveis na falta de resultados com as amostras depositadas por *spin*, é devido a baixa velocidade do túnel, que é inferior aos levantados na literatura (MITSUO; NAKAKITA; KURITA, 2004), além da câmera utilizada estar fora dos padrões utilizados em pesquisas PSP. A velocidade máxima obtida no interior do túnel foi cerca de 107 km h^{-1} .

As amostras que foram depositadas por gotejamento apresentaram variações em relação túnel desligado e túnel ligado. Para verificar a resposta da amostra, foi feita uma relação entre o *pixel* mais intenso do túnel ligado a velocidade máxima com o túnel desligado, cujo resultado variou entre 9% e 13%.

Na figura 42 temos um exemplo do teste de uma das amostras, cuja intensidade foi cerca de 13% em relação a imagem do túnel ligado em 107 km h^{-1} e desligado. Porém, todas as tentativas para variação de velocidade no interior do túnel não foram satisfatórias, pois, quando a velocidade foi diminuída de 107 km h^{-1} para 100 km h^{-1} a variação foi cerca de 1%.

Figura 42 – Imagem com o túnel desligado e ligado a 107 km h^{-1} da Amostra 1.

Fonte: Autor

Conforme mencionado anteriormente, as imagens foram convertidas para escala cinza e gerado um histograma, para verificar a variação da intensidade fotoluminescente na amostra e assim, efetuar a binarização com o limiar apresentado no histograma. Os algoritmos utilizados constam nos apêndices D e E.

Nos gráficos 7 (a) e 7 (b) são apresentados os histogramas das imagens tiradas com o túnel desligado e ligado a 107 km h^{-1} , respectivamente. Nos histogramas podemos verificar que a variação de intensidade ficou em torno de 0 à 0,035 do nível de escala cinza, próximo a zero. Lembrando que, com os valores de nível de escala cinza mais próximo de “1” a superfície da amostra está mais clara, ou seja, as moléculas estão sendo ativadas. Quanto mais próximo de “0” a superfície da amostra está mais escura, ou seja, representa regiões que a molécula não foi ativada. Além disso, podemos verificar que as variações de intensidade permaneceu na região próxima a zero, significa que houveram pouca variação de intensidade, quase que imperceptível.

No gráfico 7 (b) podemos verificar um aumento na concentração de *pixels* por escala cinza em comparação com o gráfico 7 (a), a partir do limiar 0,02 da escala cinza. Além disso, verificamos que não houve aumento da região ativada, pois, o nível de escala cinza permaneceu abaixo de 0,035, houve apenas o aumento da intensidade. Dessa forma, verificamos que houve ligeira diminuição de pressão em algumas regiões da amostra.

Gráfico 7 – Histograma gerado das imagens tiradas com o túnel desligado e ligado a 107 km h^{-1} .

Fonte: Autor

Com o levantamento efetuado a partir da análise dos histogramas foi gerado uma imagem binarizada, para uma análise visual da alteração na intensidade da supressão do oxigênio durante o teste na amostra. A figura 43 apresenta as imagens binarizadas com variação de intensidade entre o túnel desligado e ligado, o ponto de “*Threshold*” foi de 0,025, pois, foi o ponto de variação identificado de acordo com os histogramas gerados. Nesta imagem é possível verificar pontos de diminuição de pressão devido ao fluxo de ar passar pela lâmina a um ângulo de 20° .

Figura 43 – Imagens binarizadas da amostra 1.

Fonte: Autor

Na figura 44 temos as imagens tiradas nas velocidades com o túnel desligado, velocidade de 95 km h^{-1} , velocidade de 100 km h^{-1} e velocidade de 107 km h^{-1} , respectivamente. Com esta amostra houveram variações na intensidade fotoluminescente de acordo com a variação de velocidade e que são discutidas a seguir, ou seja, a pressão foi diminuída em alguns pontos da amostra.

Figura 44 – Imagens com o túnel desligado e ligado da amostra 2.

Fonte: Autor

Seguindo o método de análise apresentado anteriormente, as imagens foram convertidas para escala cinza e depois gerados os histogramas das imagens para análise do limiar da variação fotoluminescente de acordo com a variação de velocidade.

No gráfico 8 (a) temos o histograma da imagem com o túnel desligado e podemos verificar que o limiar de variação do nível da escala cinza permanece entre 0 e 0,05.

No gráfico 8 (b) temos o histograma da imagem com a intensidade fotoluminescente a uma velocidade de 95 km h^{-1} , a qual, verificamos variações na quantidade de pixels ativados a partir de 0,03. Dessa forma, 0,03 se torna o limiar para geração do arquivo binarizado.

O gráfico 8 (c) apresenta o histograma da imagem com a intensidade fotoluminescente na velocidade de 100 km h^{-1} e pode-se verificar que as variações aumentam entre as escalas de 0,03 até 0,045. Portanto, com o aumento da velocidade a amostra apresenta variações de emissão fotoluminescente.

Já no gráfico 8 (d) é apresentado o histograma da imagem da amostra com velocidade de 107 km h^{-1} , onde verifica-se que houve um aumento na intensidade fotoluminescente, próximo ao limiar de 0,045.

Conforme destacado a partir do histograma do gráfico 8 (b) uma nova região da amostra, entre 0,04 e 0,045, foi ativada e sua intensidade variou entre 95 km h^{-1} e 107 km h^{-1} . Isso indica, que a pressão nessa região começou a diminuir com o aumento da velocidade.

Gráfico 8 – Histograma gerado das imagens tiradas com o túnel desligado e ligado a 95 km h⁻¹, 100 km h⁻¹ e 107 km h⁻¹.

Fonte: Autor

Portanto, para gerar a imagem binarizada utilizamos o limiar de 0,03. Dessa forma, é possível análise visual das variações de intensidade de acordo com as velocidades que a amostra foi submetida.

Na figura 45 temos a imagem binarizada das amostras nas velocidades analisadas. Como pode-se verificar, de acordo com o aumento da velocidade a emissão fotoluminescente foi se alterando.

Figura 45 – Imagens binarizadas com limiar de 0,03.

Fonte: Autor

De acordo com a figura 45 não ocorreram variações significativas na intensidade fotoluminescente das imagens com as velocidades de 95 km h^{-1} e 100 km h^{-1} , porém, na velocidade de 107 km h^{-1} houve um aumento acentuado na intensidade fotoluminescente, que indica regiões com diminuição de pressão sobre sua superfície, devido ao fluxo de ar que passa pela lâmina (GREGORY. et al., 2014).

Dessa forma, podemos comprovar as variações da intensidade fotoluminescente em diferentes velocidades nas duas amostras analisadas. Devido as limitações físicas do túnel a velocidade foi limitada, não sendo possível analisar em velocidades superiores.

6.2.2 Teste no modelo

Conforme descrito anteriormente, os testes foram efetuados em velocidades que variavam de 90 km h^{-1} a 107 km h^{-1} (velocidade máxima) atingida pelo túnel. Porém, somente as velocidades 95 km h^{-1} e 107 km h^{-1} apresentaram resultados relevantes para o processo. O procedimento para testes efetuados foram, uma foto com o túnel desligado e com ele ligado (KOSE, 2005) nas velocidades: 90 km h^{-1} , 95 km h^{-1} , 100 km h^{-1} e 107 km h^{-1} .

Um total de 3 bancos de imagens foram gerados durante o período de 3 horas, com o intervalo de testes a cada hora.

6.2.3 Primeira sequência de testes

Na figura 46 temos as imagens em escala cinza que foram obtidas durante as medições. A primeira imagem apresenta o corpo no momento em que o túnel está desligado, a segunda imagem apresenta uma pequena variação em relação a primeira quando o corpo é submetido a uma velocidade de 95 km h^{-1} e a última imagem, com uma maior relevância de resultado quando o corpo é submetido a uma velocidade de 107 km h^{-1} . Com base nas imagens apresentadas na figura 46 é possível notar pequenas variações de pressão no modelo.

Figura 46 – Amostras em escala cinza no interior do túnel, com o sistema desligado, a 95 km h^{-1} e a 107 km h^{-1} da primeira sequência de testes.

Fonte: Autor

Para verificar a intensidade da resposta de emissão fotoluminescente da amostra foram gerados os histogramas de cada imagem (KOSE, 2005) (NAVARRA, 1997), utilizando o mesmo método efetuado com as lâminas. Lembrando que, quanto mais próximo a “1”

maior será a intensidade fotoluminescente; e quanto mais próximo a “0”, menor será a intensidade fotoluminescente.

No gráfico 9 (a) temos o histograma representando a amostra com o túnel desligado para comparar com as imagens do túnel em diferentes velocidades. Verificamos que a intensidade não ultrapassa o 0,3, porém, é superior a intensidade, com o túnel desligado, se comparados com as amostras depositadas na lâmina de vidro. No gráfico 9 (b) é apresentado o histograma da intensidade fotoluminescente com o túnel a 95 km h^{-1} , a qual, pode-se verificar variações de intensidade entre 0,2 e 0,3, não ocorreu um aumento significativo da região mais clara, porém, houve aumento da intensidade fotoluminescente nas regiões ativadas durante os testes.

Já no gráfico 9 (c) temos o terceiro resultado com a maior significância com os dados obtidos entre o túnel desligado e ligado à velocidade máxima, de 107 km h^{-1} . O nível da escala cinza da imagem se aproximou de 0,4, mostrando uma região maior de emissão fotoluminescente, além de um aumento significativo da intensidade entre 0,2 e 0,4. Esse foi o resultado com maior significância obtido durante os testes, o que, causou a maior percepção de emissão fotoluminescente, pois, as alterações na superfície das amostras anteriores eram praticamente imperceptíveis sem uso de instrumentos específicos. Outro fator relevante, foi que, em determinadas regiões a intensidade dos pixels diminuiu; isso ocorre, devido a diminuição da pressão nessa região em comparação com a situação anterior; a maior alteração ocorreu na região com escala cinza entre 0,05 e 0,15.

Portanto, o limiar para análise desta amostra com as demais foi 0,2 da escala cinza e a intensidade dos pixels nas demais amostras.

(a) Intensidade fotoluminescente com o túnel desligado.

(b) Intensidade fotoluminescente com velocidade de 95 km h^{-1}

(c) Intensidade fotoluminescente com velocidade de 107 km h^{-1}

Gráfico 9 – Histograma gerado das imagens tiradas com o túnel desligado, ligado a 95 km h^{-1} e 107 km h^{-1} da primeira sequência de testes.

Fonte: Autor

Após análises dos histogramas gerados, a imagem foi binarizada para destacar a relevância das alterações fotoluminescentes durante o processo. O limiar selecionado para binarizar a imagem foi de 0,2, pois, foi o ponto que apresentou maior relevância nas alterações da resposta fotoluminescente da amostra. Na figura 47 podemos verificar que houve alterações em relação ao túnel ligado e desligado a partir de 95 km h^{-1} , com o resultado de maior relação ligado/desligado a 107 km h^{-1} .

Figura 47 – Imagem binarizada do modelo na primeira sequência de testes.

Fonte: Autor

6.2.4 Segunda sequência de testes

Após uma hora da primeira sequência de testes foi efetuada uma nova sequência nas mesmas condições da primeira.

Na figura 48 temos a imagem em escala cinza, sendo a primeira, com o túnel desligado, a segunda com o túnel ligado a 95 km h^{-1} e a terceira com o túnel a 107 km h^{-1} .

As variações entre a primeira imagem e a segunda é pouco perceptível, porém, entre a primeira e a última a diferença se torna mais nítida.

Figura 48 – Amostras em escala cinza no interior do túnel, com o sistema desligado, a 95 km h^{-1} e a 107 km h^{-1} da segunda sequência de testes.

Fonte: Autor

Conforme o procedimento anterior foram gerados os histogramas das imagens de cada uma das velocidades submetidas. No gráfico 10 (a) temos o histograma da imagem tirada com o túnel desligado, o qual, podemos verificar que os valores são similares à

primeira sequência de testes. No gráfico 10 (b) temos o histograma do túnel com velocidade de 95 km h^{-1} . Neste caso houve uma pequena variação para baixo na escala cinza em relação ao túnel desligado (gráfico 10 (a)), ocorrendo um aumento na intensidade fotoluminescente em algumas regiões. Neste caso a variação foi inferior à apresentada na primeira sequência de testes.

Já na velocidade máxima de 107 km h^{-1} a variação entre o túnel ligado e desligado foi considerável, conforme apresentado no gráfico 10 (c). Além disso, a relação intensidade fotoluminescente x escala cinza é similar a primeira sequência de testes.

Gráfico 10 – Histograma gerado das imagens tiradas com o túnel desligado, ligado a 95 km h^{-1} e 107 km h^{-1} da segunda sequência de testes.

Fonte: Autor

O ponto de limiar da variação de intensidade permaneceu em torno de 0,2, apesar de ter diminuído na amostra a 95 km h^{-1} . Para manter o padrão em relação às primeiras análises, o limiar para gerar a imagem binarizada permaneceu em 0,2.

Na figura 49 temos a imagem binarizada da segunda sequência de testes. Dessa vez, a diferença entre a imagem do túnel desligado e a uma velocidade de 95 km h^{-1} é

pequena, com alguns pontos em branco a mais que a do túnel desligado. Já a imagem com velocidade a 107 km h^{-1} se destaca como podemos verificar.

Figura 49 – Imagem binarizada do modelo na segunda sequência de testes.

Fonte: Autor

6.2.5 Terceira sequência de testes

A terceira e última sequência de testes está sendo apresentada na figura 50. Novamente as mesmas condições dos testes anteriores foram mantidas.

Na figura 50 temos as três imagens tiradas com o túnel desligado, com velocidade de 95 km h^{-1} e a 107 km h^{-1} , respectivamente.

Figura 50 – Amostras em escala cinza no interior do túnel, com o sistema desligado, a 95 km h^{-1} e a 107 km h^{-1} da terceira sequência de testes.

Fonte: Autor

No gráfico 11 (a) temos o histograma da imagem com o túnel desligado, a relação intensidade x escala cinza permanece como as demais analisadas anteriormente. No gráfico

11 (b) temos o histograma da imagem tirada a uma velocidade de 95 km h^{-1} . Nela podemos ver um pequeno aumento na intensidade a partir de 0,25 da escala cinza.

Na velocidade de 107 km h^{-1} houve um considerável aumento na intensidade fotoluminescente da amostra, conforme apresentado no gráfico 11 (c), chegando próximo a 0,4, como visto nas sequências de testes anteriores.

Gráfico 11 – Histograma gerado das imagens tiradas com o túnel desligado, ligado a 95 km h^{-1} e 107 km h^{-1} da terceira sequência de testes.

Fonte: Autor

A imagem binarizada apresentada na figura 51 dos testes foi gerado com o mesmo valor de limiar de 0,2 utilizado nos testes anteriores.

Vale ressaltar que neste caso a imagem tirada a 95 km h^{-1} houve um pequeno aumento da intensidade em relação ao segundo teste. Já na terceira imagem a intensidade na velocidade de 107 km h^{-1} permaneceu a mesma dos testes anteriores.

Figura 51 – Imagem binarizada do modelo na terceira sequência de testes.

Fonte: Autor

Os diferentes pontos apresentados com relevância na alteração ocorreram devido a não uniformidade da pintura da amostra no corpo, sendo influenciado pela composição química da amostra com tempo de secagem e evaporação curtos, causando não uniformidades à pintura.

7 CONCLUSÕES

No presente trabalho foi projetado e fabricado um sistema de túnel de vento com controles automatizados para a leitura da velocidade do vento e temperatura que permitiram controlar a velocidade do vento desejada na área de ensaios dinâmicos do túnel. O túnel de vento assim projetado foi aplicado no monitoramento da pressão dinâmica de um sistema aerodinâmico utilizando-se o princípio de emissão fluorescente de uma tinta baseada em uma solução de PVC dopada com moléculas de Octaetilporfirina de platina (PtOEP).

As dimensões geométricas do túnel de vento utilizadas no processo de fabricação foram projetadas para obter velocidades de vento na faixa de 0 a 200 km h^{-1} , estes resultados foram obtidos utilizando-se o programa computacional *COMSOL Multiphysics*. Os resultados, da simulação, mostraram que formatos com seções transversais circulares são mais eficientes no dimensionamento da potência do motor e velocidade máxima do vento no túnel de vento, desta forma fabricamos um túnel de vento com seções transversais circulares.

A monitoração da velocidade do vento foi obtida utilizando-se dispositivos utilizados em processos industriais, o *Annubar*, permitiu a obtenção da velocidade média do vento na região ativa do túnel já que este dispositivo é aplicado para medir a velocidade média no interior de tubulações. O *Annubar* foi calibrado utilizando-se um tubo de *Pitot* que em general apresenta uma excelente resolução espacial.

O sistema de controle foi implementado a partir de um CLP S7-1500, que é um dispositivo de controle, de uma nova linha de CLPs da SIEMENS utilizado em processos industriais de médio e grande porte. Adicionalmente foi introduzido um sistema de sensoramento inteligente *IO-Link*, que possui inteligência embarcada no elemento sensor e envia informações de diagnóstico aos níveis superiores de controle, diminuindo necessidades de processamento por parte do controlador.

Os dados obtidos como resultado dos processos de medição dos diferentes parâmetros do túnel de vento junto com os parâmetros de controle foram armazenados no banco de dados *SQL Server* para posteriores análises, como por exemplo, o intervalo de uso do sistema, devido as limitações do motor. Assim o sistema automatizado do túnel de vento projetado e fabricado nos forneceu uma faixa de velocidades entre 0 e 107 km h^{-1} , resultado

menor ao projetado teoricamente. Esta diferença é atribuído às limitações impostas pela máxima potência do motor utilizado.

A monitoração de pressão dinâmica foi obtida através do uso de um sistema ótico constituída de um diodo laser de comprimento de onda de 380 nm como fonte excitadora e uma câmera com sensor CMOS como sistema detector, este sistema permitiu a obtenção de imagens da pressão dinâmica na superfície do objeto aerodinâmico em análises previamente pintada com a tinta sensível. Os resultados das imagens de pressão dinâmica obtidos no presente trabalho correspondem a pontos extremos da velocidade do vento no túnel (0 e 107 km h^{-1}), isto foi devido às limitações de sensibilidade da câmara utilizada no presente projeto. No entanto, o sistema projetado e o método proposto para a medição da pressão dinâmica mostrou-se adequado para se obter uma imagem de pressão dinâmica de superfícies aerodinâmicas, deve se considerar também que outra limitação imposta no sistema esta relacionado com a máxima velocidade do vento (107 km h^{-1}).

Os resultados obtidos no presente trabalho podem ser melhorados, se for utilizado um sistema de túnel de vento com circuito fechado, já que neste sistema o consumo de potência do motor é otimizado dando margem para atingir velocidades acima dos obtidos no presente trabalho. O sistema ótico de medição pode ser otimizado utilizando câmaras CCD de elevada sensibilidade, por exemplo, nos espectrômetros *Raman*.

REFERÊNCIAS

- ARIFUZZAMAN, M. M. M. Design construction and performance test of a low cost subsonic wind tunnel. *IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN)*, www.iosrjen.org, v. 2, p. 83–92, 2012.
- BASU, B. J.; VASANTHARAJAN, N.; RAJU, C. A novel pyrene-based binary pressure sensitive paint with low temperature coefficient and improved stability. *Sensors and Actuators B: Chemical*, ELSEVIER, p. 283–288, 2009.
- BENSON, T. *The Wandering Wind Tunnel*. 2014. Disponível em: <http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/WindTunnel/wandering_windtunnel.html>. Acesso em: 19 dez. 2016.
- BOLTON, W. *Programmable Logic Controllers*. 4. ed. [S.l.]: ELSEVIER, 2006.
- BRAGA, M.; SALCEDO, W. *Sensores ópticos multiespectrais e espectrofotômetro portátil para detecção de gases e íons metálicos*. [S.l.]: CRV, 2018. 166 p.
- BRAGA, M. S. *Sistemas optoeletrônicos portáteis para detecção de gases, oxigênio dissolvido e de metais pesados aplicados no controle ambiental. Tese (Doutorado em Microeletrônica). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo*. 2016.
- CARE, I.; BONTHOUX, F.; FONTAINE, J. R. Measurement of air flow in duct by velocity measurements. *IntechOpen*, EDP Sciences, 2014.
- CARL ZEISS. *Filter Assistant*. 2018. Disponível em: <<https://www.micro-shop.zeiss.com/en/us/shop/filterAssistant/filtersets/488050-9901-000>>. Acesso em: 10 mar. 2018.
- CHR., K. et al. Application of pressure sensitive paint (psp) for determination of the pressure field and calculation of forces and moments of models in a wind tunnel. Institute of Aerodynamics and Flow Technology, 2005.
- COMMUNITY, I.-L. C. *IO-Link System Description - Technology and Application*. [S.l.], 2013.
- DATE, C. *Relational Theory for Computer Professionals*. [S.l.]: O'Reilly Media, Inc., 2013. ISBN 9781449365431.
- DELMEE, G. J. *Manual de medição de vazão*. 3. ed. [S.l.]: Editora Edgard Blücher Ltda, 2003.
- DOMMELEN, R. v. *Design of an Atmospheric Boundary Layer Wind Tunnel. Thesis (Master). Department of built environment, the Eindhoven University of Technology*. 2013.
- EBAY. *2pcs 380nm Bandpass Filter Blue Optical Filter Dia. 25mm*. 2018. Disponível em: <<https://www.ebay.com/itm/2pcs-380nm-Bandpass-Filter-Blue-Optical-Filter-350NM-450NM-Pass-Dia-25mm-/262718581490>>. Acesso em: 10 mar. 2018.
- ENGLER, R. H.; CHR, K. Pressure sensitive paint systems for pressure distribution measurements in wind tunnels and turbomachines. *Meas. Sci. Technol.*, v. 11, p. 1770–1085, 2000.

FRANCHI, C. *Acionamentos Elétricos*. 4. ed. [S.l.]: Ed. Erica, 2008.

GARCIA, C. *Modelagem e simulação de processos industriais e de sistemas eletromecânicos*. 2. ed. São Paulo: EDUSP, 2005.

GREGORY, J. W. et al. A review of pressure-sensitive paint for high-speed and unsteady aerodynamics. *Proc. IMechE*, Division of Fluid Dynamics, p. 243–290, 2008.

GREGORY., J. W. et al. Fast pressure-sensitive paint for flow and acoustic diagnostics. *The Annual Review of Fluid Mechanics*, AR - Reviews in Advance, p. 303–303, 2014.

HALL, N. *Closed return wind tunnel*. 2015. Disponível em: <<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/tuncrct.html>>. Acesso em: 28 jul. 2017.

HALL, N. *Conservation of Mass*. 2015. Disponível em: <<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/mass.html>>. Acesso em: 18 out. 2016.

HALL, N. *Open return wind tunnel*. 2015. Disponível em: <<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/tunoret.html>>. Acesso em: 28 jul. 2017.

HALL, N. *Wind tunnel design*. 2015. Disponível em: <<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/tunnoz.html>>. Acesso em: 10 jun. 2017.

HALL, N. *Wind Tunnel Theory*. 2015. Disponível em: <<https://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/tunnoz.html>>. Acesso em: 10 jun. 2017.

HALL, N. *Wind tunnels*. 2015. Disponível em: <<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/bgt.html>>. Acesso em: 25 jul. 2017.

HERNANDEZ, M. A. G. et al. Design methodology for a quick and low-cost wind tunnel. *IntechOpen*, Wind Tunnel Designs and Their Diverse Engineering Applications, p. 3–28, 2013.

HITT, D. *What Are Wind Tunnels*. [S.l.]: Nasa Educational Tecnology Services, 2008.

HOFFPAUIR, D. *Pressure Sensitive Paint for Measuring Unsteady Launch Vehicle Aerodynamic Buffet*. 2017. Disponível em: <<https://www.nasa.gov/feature/pressure-sensitive-paint-for-measuring-unsteady-launch-vehicle-aerodynamic-buffet>>. Acesso em: 10 jul. 2019.

IFM. *Manual de instruções Unidade de avaliação para sensores de temperatura*. [S.l.], 2011.

IFM. *TR2432 - Control monitor for temperature measurement, -40°C to 300°C*. [S.l.], 2012.

ISA. *ANSI/ISA-5.1-2009 - Instrumentation Symbols and Identification*. [S.l.], 2009.

JAHANMIRI, M. Pressure sensitive paints: The basics and applications. Division of Fluid Dynamics, 2011.

KIRK, F. W.; WEEDON, T. A.; KIRK, P. *Instrumentation*. 5. ed. [S.l.]: American Technical Publishers, 2006.

- KOSE, M. E. *Multi-Luminophore Coatings for Pressure Sensitive Paint Applications. Thesis (PhD)*. 2005.
- LIPTAK, B. G. *Process Measurement and Analysis*. 4. ed. [S.l.]: CRC PRESS, 2003.
- MAGRYTA, P. Wind tunnel research on the influence of active airflow on the lift force generated by the airfoil. *Advances in Science and Technology Research Journal*, v. 7, n. 19, p. 60–65, 2013.
- MATOS, K. R. M. *Filmes Sensíveis a Pressão pela Técnica de Fotoluminescência*. Dissertação (Mestrado) — Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2011.
- MERBARKI, Y. Pressure sensitive paint: From laboratory to wind tunnel. *Icas 2000 Congress*, Intitute for Aerospace Research, 2000.
- MITSUO, K.; NAKAKITA, K.; KURITA, M. Investigation of image-based lifetime psp measurements with sinusoidal excitation light. *International Congress of the Aeronautical Sciences*, ICAS, 2004.
- NAVARRA, K. R. *Development of the Pressure-Sensitive-Paint Technique for advanced turbomachinery applications*. Dissertação (Mestrado) — Virginia Polytechnic Institute and State University, 1997.
- NIKON. *Câmera digital D5100 - Manual do usuário*. [S.l.], 2011.
- PERFECT PRIME. *PT6300 304 Stainless Steel Pitot-Static Tube 300mm x 110mm*. 2018. Disponível em: <<https://perfectprime.com/products/pt6300>>. Acesso em: 08 jan. 2018.
- ROSEMOUNT. *Rosemount Annubar Primary Flow Element Flow Test Data Book*. [S.l.], 2009. Disponível em: <<https://www.emerson.com/documents/automation/manual-rosemount-annubar-primary-flow-element-flow-test-data-book-en-74372.pdf>>. Acesso em: 14 mar. 2018.
- SCALEGRID. *2019 Database Trends – SQL vs. NoSQL, Top Databases, Single vs. Multiple Database Use*. 2019. Disponível em: <<https://scalegrid.io/blog/2019-database-trends-sql-vs-nosql-top-databases-single-vs-multiple-database-use/>>. Acesso em: 04 abr. 2019.
- SIEMENS. *The intelligent choice for your automation tasks - SIMATIC Controllers*. [S.l.], 2016.
- SIEMENS. *ET 200SP - Communication module IO-Link Master CM 4xIO-Link (6ES7137-6BD00-0BA0)*. [S.l.], 2017.
- SIEMENS. *ET 200SP IM 155-6 PN ST interface module (6ES7155-6AU01-0BN0)*. [S.l.], 2017.
- SIEMENS. *Acyclic Reading and Writing using the “IO-Link Library”*. [S.l.], 2018.
- SILBERSCHATZ, A.; KORTH, H. F.; SUDARSHAN, S. *DATABASE SYSTEM CONCEPTS*. 6. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 2011. ISBN 978-0-07-352332-3.
- SPAHN, J.; STEELMAN, R. *How to build and use a subsonic wind tunne*. 2015. Disponível em: <<http://www.sciencebuddies.org/science-fair-projects/wind-tunnel-toc.shtml#introductionl>>. Acesso em: 13 ago. 2017.

WEG. *CFW09 - Manual do usuário*. [S.l.], 2006.

WEG. *Guia Técnico - Motores de indução alimentados por conversores de frequência PWM*. 2006. Disponível em: <http://www.coe.ufrj.br/~richard/Acionamentos/motores_de_inducao_alimentados_por_conversores_de_frequencia_PWM.pdf>. Acesso em: 04 fev. 2018.

WEG. Guia de aplicação de inversores de frequência. *WEG Automação*, WEG, 2014.

YORITA, D. et al. Investigation of image-based lifetime psp measurements with sinusoidal excitation light. *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, DLR, 2019.

Apêndices

Apêndice A – Lógica de Controle

Desenvolvimento lógico do sistema de controle do túnel de vento. Todo o desenvolvimento foi elaborado em blocos, a iniciar pelo bloco *Organization Block 100* (OB100), que é uma OB de inicialização, esse bloco executa somente uma vez, no primeiro ciclo de *clock* da CPU, sendo utilizado para limpar as memórias na inicialização do programa.

O segundo bloco é a *Main(OB1)*, que é o programa principal, o qual, chama todos os blocos de funções que executam conversões, leitura de dados e ações de controle.

As *Functions* (FC) e as *Functions Block* (FB) são Funções e Blocos de Funções, respectivamente, que executam conversões matemáticas e ações no sistema, além disso, são utilizadas para organizar a estrutura do programa, assim, facilita a organização lógica de controle do processo.

O bloco chamado *IO_LINK_DEVICE (FB50001)* é um bloco utilizado para estabelecer comunicação via dispositivos *IO-Link* e foi baixado diretamente do suporte da *Siemens*, ou seja, foi desenvolvido pela equipe da *Siemens* e liberado para *Download*.

Totally Integrated Automation Portal

Startup [OB100]

Startup Properties

General

Name	Startup	Number	100	Type	OB	Language	LAD
Numbering	Automatic						

Information

Title	"Complete Restart"	Author		Comment		Family	
Version	0.1	User-defined ID					

Name	Data type	Default value	Supervision	Comment
▼ Input				
LostRetentive	Bool			True if retentive data are lost
LostRTC	Bool			True if date and time are lost
Temp				
Constant				

Network 1:

MOVE

EN

ENO

IN

OUT1

0.661364

%MD36

"Coef_Vazao_K"

Network 2:

MOVE

EN

ENO

IN

OUT1

1.019

%MD32

"PressaoAtm"

Totally Integrated Automation Portal							
Main [OB1]							
Main Properties							
General							
Name	Main	Number	1	Type	OB	Language	LAD
Numbering	Automatic						
Information							
Title	"Main Program Sweep (Cycle)"	Author		Comment		Family	
Version	0.1	User-defined ID					
Name		Data type	Default value	Supervision	Comment		
▼ Input							
Initial_Call	Bool				Initial call of this OB		
Remanence	Bool				=True, if remanent data are available		
Temp							
Constant							
Network 1:

Network 2:

Network 3:

Network 4:

Network 5:							

Totally Integrated Automation Portal		
--------------------------------------	--	--

MassaEspecifica [FB3]

MassaEspecifica Properties							
General							
Name	MassaEspecifica	Number	3	Type	FB	Language	SCL
Numbering	Automatic						
Information							
Title		Author		Comment		Family	
Version	0.1	User-defined ID					

Name	Data type	Default value	Retain	Accessible from HMI/OPC UA	Writ-able from HMI/OPC UA	Visible in HMI engineering	Setpoint	Supervision	Comment
▼ Input									
M	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False		Massa Molar do Gás
P	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False		Pressão do Gás
R	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False		Constante dos Gases
T	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False		Temperatura absoluta do gás
Z	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False		Fator de Compressibilidade
▼ Output									
MassaEspecifica	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False		Massa especifica do gás
InOut									
Static									
Temp									
Constant									

0001 #MassaEspecifica := (#M * #P) / (#R * #T * #Z);

Symbol	Address	Type	Comment
#M		Real	Massa Molar do Gás
#MassaEspecifica		Real	Massa especifica do gás
#P		Real	Pressão do Gás
#R		Real	Constante dos Gases
#T		Real	Temperatura absoluta do gás
#Z		Real	Fator de Compressibilidade

Totally Integrated Automation Portal									
--------------------------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--

velocidade_KM_H [FB4]

velocidade_KM_H Properties

General									
Name	velocidade_KM_H	Number	4	Type	FB	Language	SCL		
Numbering	Automatic								
Information									
Title		Author		Comment		Family			
Version	0.1	User-defined ID							

Name	Data type	Default value	Retain	Accessible from HMI/OPC UA	Writ-able from HMI/OPC UA	Visible in HMI engineering	Setpoint	Supervision	Comment
▼ Input									
dP	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False		
MassaEspecific	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False		
K	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False		Coefficiente de Vazão do Annubar
▼ Output									
Velocidade	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False		
Re	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False		Numero de Reynolds
InOut									
Static									
Temp									
Constant									

```

0001 #Velocidade := ((SQRT((2 * #dP) / #MassaEspecific)) * 3.6) * #K;
0002 #Re := ((#Velocidade/3.6)*0.15)/ 16.04e-6;
0003
0004

```

Symbol	Address	Type	Comment
#dP		Real	
#K		Real	Coefficiente de Vazão do Annubar
#MassaEspecific		Real	
#Re		Real	Numero de Reynolds
#Velocidade		Real	

Totally Integrated Automation Portal

Escalona_Int_Real [FB1]

Escalona_Int_Real Properties

General

Name	Escalona_Int_Real	Number	1	Type	FB	Language	LAD
Numbering	Automatic						

Information

Title		Author		Comment		Family	
Version	0.1	User-defined ID					

Name	Data type	Default value	Retain	Accessible from HMI/OPC UA	Write-able from HMI/OPC UA	Visible in HMI engineering	Setpoint	Supervision	Comment
▼ Input									
EscalaEntMin	Int	0	Non-retain	True	True	True	False		
EscalaEntMax	Int	0	Non-retain	True	True	True	False		
EscalaEnt	Int	0	Non-retain	True	True	True	False		
EscalaSaiMin	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False		
EscalaSaiMax	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False		
▼ Output									
EscalaSai	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False		
InOut									
▼ Static									
valNorm	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False		
Temp									
Constant									

Network 1:

NORM_X
Int to Real

EN

#EscalaEntMin — MIN

#EscalaEnt — VALUE

#EscalaEntMax — MAX

OUT — #valNorm

SCALE_X
Real to Real

EN

#EscalaSaiMin — MIN

#valNorm — VALUE

#EscalaSaiMax — MAX

OUT — #EscalaSai

Totally Integrated Automation Portal

Escalona_Real_Real [FB2]

Escalona_Real_Real Properties

General

Name	Escalona_Real_Real	Number	2	Type	FB	Language	LAD
Numbering	Automatic						

Information

Title		Author		Comment		Family	
Version	0.1	User-defined ID					

Name	Data type	Default value	Retain	Accessible from HMI/OPC UA	Write-able from HMI/OPC UA	Visible in HMI engineering	Setpoint	Supervision	Comment
▼ Input									
EscalaEntMin	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False		
EscalaEntMax	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False		
EscalaEnt	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False		
EscalaSaiMin	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False		
EscalaSaiMax	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False		
▼ Output									
EscalaSai	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False		
InOut									
▼ Static									
valNorm	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False		
Temp									
Constant									

Network 1:

NORM_X
Real to Real

EN

#EscalaEntMin
MIN

#EscalaEnt
VALUE

#EscalaEntMax
MAX

OUT

ENO

#valNorm

SCALE_X
Real to Real

EN

#EscalaSaiMin
MIN

#valNorm
VALUE

#EscalaSaiMax
MAX

OUT

ENO

#EscalaSai

Totally Integrated Automation Portal		
--------------------------------------	--	--

IO_LINK_TEMPERATURA [FC2]

IO_LINK_TEMPERATURA Properties

General

Name	IO_LINK_TEMPERATURA	Number	2	Type	FC	Language	LAD
Numbering	Manual						

Information

Title		Author		Comment		Family	
Version	0.1	User-defined ID					

Name	Data type	Default value	Supervision	Comment
Input				
Output				
InOut				
Temp				
Constant				
▼ Return				
IO_LINK_TEMPERATURA	Void			

Network 1:

SHR

Int

EN

ENO

%MW20

"SHR_IN"

IN

2

N

%QW256

"Tag_2"

OUT

Network 2:

%DB6

"IO_LINK_DEVICE_DB"

%FB50001

"IO_LINK_DEVICE"

EN

ENO

%M2.0

"Request_TR2432"

REQ

288

"et200sp-4x1"

4xIO-Link_1"

ID

227

CAP

%M2.1

"Read_Write_TR2432"

RD_WR

1

PORT

%MW8

"idx"

0

IO_INDEX

INT#0

LEN

"Process_Data_DB" Param.

Data_TR2432

RECORD_IOL_DATA

DONE_VALID

%M2.3

"Done_TR2432"

BUSY

%M2.4

"Busy_TR2432"

ERROR

%M2.5

"Error_TR2432"

%MW4

"Error_Code_TR2432"

STATUS

IOL_STATUS

RD_LEN

%M2.3

"Done_TR2432"

Network 3:

%FC1

"IO_LINK_LERPALAVRA"

EN

ENO

20

tamanho

"Process_Data_DB" Param.

Data_TR2432

palavra

Apêndice B – Script de integração no *SQL Server*

Abaixo segue a rotina de integração dos dados de medição do túnel que foi desenvolvida em *VB-Script* e integrada no *WINCC RT Advanced*.

S03_Write_data_record_into_a_table

Comment

```

0001
0002
0003 Sub S03_Write_data_record_into_a_table(ByRef Database_Name)
0004 '#####'Essa rotina recebe como parâmetro a conexão ODBC criada
0005 '#####'
0006 ' en: Este script insere dados na tabela do SQ Server 0007 '
0007 ' Created: 18-10-2018
0008 ' Version: v1.0
0009 ' Author: Cesar
0010 '#####'
0011 '#####'Declaração de Tags Locais
0012 Dim conn, rst, SQL_Table
0013
0014 On Error Resume Next
0015
0016 Set conn = CreateObject("ADODB.Connection")
0017 Set rst = CreateObject("ADODB.Recordset")
0018
0019 'Open data source - Datenquelle öffnen
0020 conn.Open "Provider=MSDASQL;Initial Catalog= DB_DadosTunel;DSN=" & Database_Name & ""
0021 '#####'Initial Catalog= DB_DadosTunel - Conexão com o banco de dados
0022 '#####'DSN=" & Database_Name & "" - irá acessar a conexão de acordo com o Alias de conexão ODBC
0023 '#####'UID=B1 é o usuário de conexão ao banco, no caso B1
0024
0025 '#####'Rotina retorna erro, caso houver um erro de conexão
0026 If Err.Number <> 0 Then
0027     ShowSystemAlarm "Error #" & Err.Number & " " & Err.Description
0028     Err.Clear
0029     Set conn = Nothing
0030     Exit Sub
0031 End If
0032
0033
0034 '#####' Insere dados na tabela
0035 If SmartTags("HMI_ArmazenaDados") <> 0 Then
0036     SQL_Table = "INSERT INTO [DB_DadosTunel].[dbo].[DadosTestes] VALUES (getdate(),replace(' " & SmartTags("Escalo-
0037     na_MMH2O_EscalaSai") & _
0038     " ', ' ', ' '), replace(' " & SmartTags("Escalona_Temp_EscalaSai") & " ', ' ', ' '), Replace(' " & SmartTags("veloci-
0039     dade_KM_H_DB_Velocidade") & _
0040     " ', ' ', ' '), REPLACE(' " & SmartTags("velTurbina") & " ', ' ', ' '), replace(' " & SmartTags("corrente") & _
0041     " ', ' ', ' '), Replace(' " & SmartTags("PressaoAtm") & " ', ' ', ' '),'" & SmartTags("sensorMedicao") & "')"
0042     'SensorMedicao = 1 Annubar
0043     'SensorMedicao = 0 Pitot
0044     '#####' Executa a rotina
0045     Set rst = conn.Execute(SQL_Table)
0046
0047 End If
0048
0049 '#####'encerra a conexão
0050 conn.close
0051
0052 Set rst = Nothing
0053 Set conn = Nothing
0054
0055 End Sub

```


Apêndice C – Estrutura da tabela criada no SQL

A tabela criada no banco de dados SQL Server foi criada conforme *script* abaixo.

C:\Users\Besitzer\AppData\Local\Temp\~vs4FDE.sql

1

```
USE [DB_DadosTunel]
GO
```

```
SET ANSI_NULLS ON
GO
```

```
SET QUOTED_IDENTIFIER ON
GO
```

```
CREATE TABLE [dbo].[DadosTestes](
    [id] [decimal](18, 0) IDENTITY(1,1) NOT NULL,
    [datahora] [datetime] NULL,
    [pressaoMMH20] [real] NULL,
    [temperatura] [real] NULL,
    [vel_KMH] [real] NULL,
    [vel_RPM] [real] NULL,
    [CorrenteMotor] [real] NULL,
    [PressaoAtm] [real] NULL,
    [ElementoSensor] [bit] NULL
) ON [PRIMARY]
GO
```

Apêndice D – Algoritmo que gera histograma no MATLAB

Este algoritmo primeiramente efetua a leitura no local onde a imagem se encontra, depois, converte a imagem em precisão dupla. Após isso, seleciona apenas a região que se encontra a imagem, ou seja, o *imcrop* enquadra apenas a região que se encontra a imagem desejada.

Após converter a imagem para escala cinza ela, o histograma da imagem é gerado.

27/10/19 20:05 C:\Users\Besitzer\Desktop\...\imgHstNew.m 1 of 1

```
imsp = imread('C:\Users\Besitzer\Desktop\ANALISE29092019\DSC_0019.jpg');

imsp = im2double(imsp);

imsp_cr = imcrop(imsp,[2000 400 2300 1400]);
%Converte a imagem a uma escala Cinza
imsp_gray = rgb2gray(imsp_cr);

figure;

[pixelCount, grayLevels] = imhist(imsp_gray);

bar(grayLevels, pixelCount); % Plot it as a bar chart.
grid on;
xlim([0,max(0.4)]);
ylim([0,max(100000)]);

title('Histograma imagem túnel 107 Km/h');
xlabel('Nível escala cinza');
ylabel('Pixel / escala cinza');
```

Apêndice E – Algoritmo de binarização de imagem no MATLAB

Neste algoritmo primeiramente a imagem é selecionada, depois recortada na região exata da imagem. Após isso, ela é convertida em escala cinza e depois binarizada a partir do limiar encontrado no histograma gerado.

27/10/19 20:05 C:\Users\Besitzer\Desktop...\EscalaCinza.m 1 of 1

```
imsp = imread('C:\Users\Besitzer\Desktop\ANALISE29092019\DSC_0019.jpg');
imsp = im2double(imsp);
%imsp_cr = imcrop(imsp,[2600 1200 1200 900]);
%Recorta a região da imagem da foto, para trabalhar apenas no local da
%imagem.
imsp_cr = imcrop(imsp,[2000 400 2300 1400]);

%Converte a imagem a uma escala Cinza
imsp_gray = rgb2gray(imsp_cr);

%figure,subplot(221);imshow(imsp_cr); title('Original image');

imsp_binary = im2bw(imsp_gray,0.20); %0.25

%Pixel mais intenso
img_col = size(imsp_gray,2);
img_lin = size(imsp_gray,1);
aux_max = 0;
for i = 1:img_col
    for j = 1:img_lin
        if aux_max < imsp_gray(j,i)
            aux_max = imsp_gray(j,i);
        end
    end
end

% figure,subplot(221);imshow(imsp_gray); title(aux_max);
figure;imshow(imsp_gray); title(aux_max);
figure;imshow(imsp_binary);title(aux_max);
```

Anexos

Anexo A – Especificações Técnicas da câmera NIKON D5100

Abaixo segue as especificações técnicas da câmera NIKON D5100.

Especificações técnicas

■ ■ Câmera Digital D5100 da Nikon

Tipo	
Tipo	Câmera digital reflex de lente única
Montagem da lente	Montagem F da Nikon (com contatos AF)
Ângulo de visão efetivo	Aprox. $1,5 \times$ distância focal da lente (formato Nikon DX)
Pixels efetivos	
Pixels efetivos	16,2 milhões
Sensor de imagem	
Sensor de imagem	Sensor CMOS de $23,6 \times 15,6$ mm
Pixels totais	16,9 milhões
Sistema para Redução de Poeira	Limpeza do sensor de imagem, dados de referência para a Remoção de Poeira da Imagem (software Capture NX 2 opcional requerido)
Armazenamento	
Tamanho da imagem (pixels)	<ul style="list-style-type: none"> • 4928×3264 (L) • 2464×1632 (S) • 3696×2448 (M)
Formato do arquivo	<ul style="list-style-type: none"> • NEF (RAW): 14 bits, comprimido • JPEG: JPEG-Baseline compatível com a compressão fine (aprox. 1 : 4), normal (aprox. 1 : 8) ou basic (aprox. 1 : 16) • NEF (RAW)+JPEG: Uma fotografia gravada nos formatos NEF (RAW) e JPEG
Sistema Picture Control	Padrão, Neutro, Vivo (Vívido), Monocromático, Retrato, Paisagem; o Picture Control selecionado pode ser modificado; armazenamento para os Picture Controls personalizados
Mídia	Cartões de memória SD (Secure Digital), SDHC e SDXC
Sistema de arquivos	DCF (Design Rule for Camera File System) 2.0, DPOF (Digital Print Order Format), Exif 2.3 (Exchangeable Image File Format for Digital Still Cameras), PictBridge
Visor	
Visor	Visor reflex de lente única com pentaespelho no nível dos olhos
Cobertura do enquadramento	Aprox. 95% na horizontal e 95% na vertical
Ampliação	Aprox. $0,78 \times$ (lente de 50 mm f/1.4 no infinito, $-1,0 \text{ m}^{-1}$)
Distância do olho	17,9 mm ($-1,0 \text{ m}^{-1}$)
Ajuste de diopia	$-1,7$ – $+0,7 \text{ m}^{-1}$
Tela de foco	Tela BriteView Clear Matte Mark VII Tipo B
Espelho reflex	Retorno rápido
Abertura da lente	Retorno instantâneo, controlado eletronicamente