Gustavo Marcelo Pinhata

Estudo do número de Strouhal em função do número de Reynolds em um anteparo triangular utilizando a técnica da análise tempo-frequência.

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. **Paulo Seleghim Júnior**

São Carlos

2006

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **GUSTAVO MARCELO PINHATA**

Dissertação defendida e julgada em 18/08/2006 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Associado **PAULO SELEGHIM JUNIOR (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado

Prof. Dr. **CARLOS DIAS MACIEL**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO

Prof. Dr. **LEANDRO FRANCO DE SOUZA**
(Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação/USP)

Aprovado

Prof. Associado **JONAS DE CARVALHO**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Mecânica

Profa. Titular **MARIA DO CARMO CALIJURI**
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

Dedico este trabalho a minha mãe, a qual não economizou esforços em prol de minha educação; e à minha companheira Michela, pela compreensão em face de todos os momentos que deixamos de passar juntos para que eu pudesse elaborar mais este importante projeto de minha vida.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Paulo Seleglim Júnior, pela orientação e atenção fornecida durante a elaboração deste trabalho.

Ao engenheiro Jorge Nicolau dos Santos, pela dedicação dada ao projeto sistema de coleta de dados, constante auxílio durante evolução dos experimentos e pela paciência.

À Roberto Prativiera, Hélio José Donizeti Trebi, pelo auxílio na montagem do sistema experimental.

A USP por ter colocado a minha disposição a estrutura do NETeF (Núcleo de Engenharia Térmica e Fluídos) da Escola de Engenharia de São Carlos, para a realização das atividades e, a todos os professores do NETeF.

Aos amigos Israel Frank de Almeida, Marco Arthur Pereira Candolo, Evaldo Ferezin pela amizade e apoio no decorrer das atividades desenvolvidas.

A empresa Smar Equipamentos Industriais Ltda., pelo apoio no meu desenvolvimento profissional.

“Se conhecemos o inimigo e a nós mesmo, não precisamos temer o resultado de uma centena de combates. Se nos conhecemos, mas não ao inimigo, para cada vitória sofreremos uma derrota. Se não conhecemos nem o inimigo, sucumbiremos em todas as batalhas.”

Sun Tzu

“A melhor maneira de ter uma boa idéia é ter várias idéias.”

Linus Pauling

RESUMO

PINHATA, G. M. (2006). Estudo do número de Strouhal em função do número de Reynolds em um anteparo triangular utilizando a técnica da análise tempo-frequência. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2006.

Neste trabalho simulou-se o escoamento do fluxo de ar em um tubo, com um anteparo de formato triangular com arestas cortantes, posicionado no centro do tubo. O objetivo do estudo é a análise do comportamento do número de Strouhal em função do número de Reynolds. Para isto, foi utilizada a técnica da análise tempo-frequência, baseada na transformada de Fourier e na transformada de Gabor. Os ensaios foram realizados com o fluxo com velocidades médias de escoamento de 3 a 10m/s, sendo utilizado um sensor de pressão tipo piezo-resistivo para a detecção da flutuação de pressão ocasionada pelo desprendimento e formação dos vórtices. Os ensaios foram realizados em cinco etapas com o objetivo de se verificar a influência dos seguintes parâmetros na coleta de sinais e no fenômeno: ruído da rede elétrica; influência do anteparo e do ruído proveniente do escoamento do fluxo de ar; número de pontos da amostragem na coleta dos dados; do comprimento da tubulação; e posicionamento do sensor. Pode-se observar, a sensibilidade do sistema de medição através do ensaio realizado sem o anteparo, sendo verificada a influência do ruído do escoamento de ar pelo tubo; pode-se observar também uma pequena interferência do ruído da rede elétrica predominantemente para velocidades abaixo de 3m/s. Apesar das influências citadas, e utilizando a transformada de Gabor para análise dos sinais, observou-se um sinal mais intenso na frequência dos vórtices para as velocidades de escoamento, podendo-se comprovar que o número de Strouhal permanece quase constante e é independente do número de Reynolds, devendo-se ressaltar que esta conclusão é válida para números de Reynolds compreendidos na faixa de 3000 a 100000. No experimento obteve-se um fator de sensibilidade (Frequência vórtices/velocidade média) de 8,2 Hz/m/s, e número de Strouhal médio de 0,196 .

Palavras-chave : análise de sinais, Gabor, tempo-frequência, vórtices, vortex, Strouhal

ABSTRACT

PINHATA, G.M. (2006). Study of the number of Strouhal in function of the Reynolds number in a triangular bluff body using the technique of the analysis time-frequency. M.Sc. Dissertation - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2006.

This work concerns the simulation of an air flux through a pipe with a triangular bluff body positioned inside it. In order to study the behavior of the Strouhal number in function of the Reynolds number. For this, the time-frequency analysis technique was used, based on Fourier transform and the Gabor transform. The experiments were carried out with an air flux velocity ranging from 3 to 10 m/s and using a piezoresistive pressure sensor to detect pressure fluctuations caused by the shedding and vortex formation. The experimental procedures were divided in five stages to make it possible to verify the influence of the following parameters in the signal data acquisition: electric network noise, the bluff body presence and the noise generated due to its presence, number of sampling data points, tubing length and sensor positioning. The sensitivity of the experiment could be observed testing the air flowing with no bluff body inside the pipe. Thus, it was possible to investigate the influence of the noise generated due to this flux limiting body. It could be also observed, mainly at 3 m/s or less, the noise generated due to the electric network. Despite the listed influences, and with the use of the Gabor transform, a more intense signal on the vortex frequency for the flow velocity was observed, showing that the Strouhal number remains almost constant and is independent of the Reynolds number. It is important to recall that this conclusion is valid for Reynolds numbers between 3000 and 100000. In the experiments the factor of sensitivity (Vortex Frequency/mean velocity) obtained was 8,2 Hz/m/s and the mean Strouhal number 0,196.

Keywords : signal analysis, Gabor, time-frequency, vortex shedding, vortex, Strouhal

Lista de figuras

<i>Figura 3.1 - Princípio de formação dos vórtices para uma seção circular – SOCKEL (1994, p.52).</i>	6
<i>Figura 3.2 - N° de Strouhal para um cilindro x N° de Reynolds - SOCKEL (1994, p.117).</i>	7
<i>Figura 3.3 - Exemplos de projetos de chaminés - SOCKEL (1994, p.81).</i>	9
<i>Figura 3.4 - Formas geométricas de corpos geradores de vórtices –MILLER (1996, p.14.18).</i>	10
<i>Figura 3.5 - Representação da formação dos vórtices e da variação da pressão no tempo - MILLER (1996, p.14.17).</i>	11
<i>Figura 3.6 – Fotografias seqüenciais da formação de vórtices mostrando um ciclo de separação em uma seção T em um tubo para 0,04s/frame [De Corpron et all,1978, MILLER,p.14.17].</i>	12
<i>Figura 3.7 – N° de Strouhal x n° de Reynolds – YOKOGAWA (2001, p.10-2).</i>	13
<i>Figura 3.8 – N° de Strouhal x n° de Reynolds de um corpo de seção cilíndrica e outro de seção retangular – BENTLEY (1995, p.297).</i>	13
<i>Figura 3.9 - Tabela diâmetro da tubulação e taxa de pulsos nominais do transmissor da Yokogawa (2001, p.2.2).</i>	15
<i>Figura 3.10 - Gráfico do fator K x n° de Reynolds – YOKOGAWA (2001).</i>	15
<i>Figura 3.11 - Fator K x n° de Reynolds e Coeficiente de arrasto - YAMASAKI (1974,p.977).</i>	16
<i>Figura 3.12 - Corpos geradores de vórtices e sistemas de detecção – BENTLEY (1995, p.299).</i>	17
<i>Figura 3.13 - Sinal da pressão no domínio do tempo (esquerda) e no domínio da frequência - HANS (2003, p.127).</i>	17
<i>Figura 3.14 - Gráfico da frequência de pulso x velocidade do fluxo medidas com sistema de ultra-som - HANS (2003, p.128).</i>	18
<i>Figura 3.15 - N° de Strouhal x velocidade média do fluxo, estudo da influência da geometria do anteparo - HANS (1998, p.130).</i>	18
<i>Figura 3.16 - Efeito da localização do sensor de pressão no fator K - MILLER (1996, p.15.48).</i>	19

<i>Figura 4.1 - Recomendação para instalação de equipamento medidor de vazão de medição de vórtices – YOKOGAWA (2001, p.3-1).</i>	20
<i>Figura 4.2 - Retificador de fluxo, onde D = diâmetro do tubo.</i>	20
<i>Figura 4.3 - Representação da bancada experimental.</i>	21
<i>Figura 4.4 – Geometria do anteparo utilizado no experimento.</i>	22
<i>Figura 4.5 - Experimento montado com sensor e anteparo a $15D$.</i>	22
<i>Figura 4.6 - Experimento montado com sensor e anteparo a $75D$.</i>	23
<i>Figura 4.7 - Montagem do experimento (retificador de fluxo, anteparo e sensor de pressão).</i>	23
<i>Figura 4.8 - Sistema de ventiladores.</i>	24
<i>Figura 4.9 - Sensor de pressão MPXV5004 [Freescale™,2004].</i>	24
<i>Figura 4.10 - Características operacionais do sensor de pressão-Freescale™(2004).</i>	24
<i>Figura 4.11 - Comportamento do sensor de pressão - Freescale™(2004).</i>	25
<i>Figura 4.12 - Comparativo da análise de Fourier com a decomposição da luz.</i>	29
<i>Figura 4.13 - Exemplos de frequência de espectro.</i>	30
<i>Figura 4.14 - Amostragem da composição de um sinal, observando a importância do componente de fase.</i>	30
<i>Figura 4.15 - Interpretando a transformada de Fourier – BRIGHAM (1988).</i>	32
<i>Figura 4.16 - Gráfico tempo-frequência da onda sonora emitida por uma baleia – COHEN (1995, p.72).</i>	34
<i>Figura 4.17 - Fenômeno Leakage.</i>	40
<i>Figura 4.18 - Representação do fenômeno de Leakage.</i>	40
<i>Figura 4.19 - Tipos de Janelas de amostragem.</i>	41
<i>Figura 5.1 – Representação a) da placa de orifício; b) instalação da placa de orifício e do tubo U para medição da variação da pressão (ΔP).</i>	43
<i>Figura 5.2 – Blocos de representação do circuito eletrônico de eliminação do nível DC.</i>	43
<i>Figura 5.3 –Representação esquemática de um filtro passa altas (a) e um filtro passa baixas (b).</i>	44
<i>Figura 5.4 - Vista da tela do osciloscópio para velocidade $v \approx 10$ m/s.</i>	44
<i>Figura 5.5 - Arranjo para medição da pressão antes do anteparo.</i>	45
<i>Figura 5.6 - Arranjo para medição da pressão (coleta de sinal).</i>	46
<i>Figura 5.7 - Arranjo para medição da pressão no centro do tubo.</i>	46

<i>Figura 5.8 - Representação geral do ensaio.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 5.9 - Representação esquemática do diagrama do programa LabVIEW para aquisição dos dados.</i>	<i>46</i>
<i>Figura 5.10 - Tela do LabVIEW para a velocidade média de 10 m/s.</i>	<i>47</i>
<i>Figura 5.11 – Figura representativa do SINAL, ESPECTRO E DIAGRAMA TEMPO-FREQÜÊNCIA.</i>	<i>48</i>
<i>Figura 5.12 - Ruído da rede elétrica: a) geral; b) detalhe.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 5.13 - Ruído da rede com o sensor energizado: a) geral; b)detalhe.</i>	<i>50</i>
<i>Figura 5.14 - Experimento sem o anteparo, $v=10,15$ m/s: a) geral ; b) detalhe.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 5.15 - Experimento com sensor antes do anteparo, $v=10,15$ m/s: a) geral; b) detalhe.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 5.16 - Velocidade média de 3,23 m/s para 4096 pontos de amostragem: a) geral; b) detalhe.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 5.17 - Velocidade média de 3,23 m/s para 16384 pontos de amostragem: a) geral; b) detalhe.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 5.18 - Velocidade média de 3,72 m/s para 4096 pontos de amostragem: a) geral; b) detalhe.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 5.19 - Velocidade média de 3,72 m/s para 16384 pontos de amostragem : a) geral ; b) detalhe.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 5.20 - Velocidade média de 4,20 m/s para 4096 pontos de amostragem : a) geral; b) detalhe.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 5.21 - Velocidade média de 4,20 m/s para 16384 pontos de amostragem: a) geral; b) detalhe.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 5.22 - Velocidade média de 4,94 m/s para 4096 pontos de amostragem : a) geral; b) detalhe.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 5.23 - Velocidade média de 4,94 m/s para 16384 pontos de amostragem : a) geral; b) detalhe.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 5.24 - Velocidade média de 5,92 m/s para 4096 pontos de amostragem : a) geral; b) detalhe; c) detalhe.</i>	<i>58</i>
<i>Figura 5.25 - Velocidade média de 5,92 m/s para 16384 pontos de amostragem : a) geral ; b) detalhe.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 5.26 - Velocidade média de 7,63 m/s para 4096 pontos de amostragem: a)geral; b) detalhe.....</i>	<i>59</i>

<i>Figura 5.27 - Velocidade média de 7,63 m/s para 16384 pontos de amostragem:</i>	
<i>a) geral ; b) detalhe.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 5.28 - Velocidade média de 8,93 m/s para 4096 pontos de amostragem :</i>	
<i>a) geral; b) detalhe.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 5.29 - Velocidade média de 8,93 m/s para 16384 pontos de amostragem :</i>	
<i>a) geral; b) detalhe.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 5.30 - Velocidade média de 9,76m/s para 4096 pontos de amostragem:</i>	
<i>a) geral; b) detalhe.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 5.31 - Velocidade média de 9,76 m/s para 16384 pontos de amostragem:</i>	
<i>a) geral ; b) detalhe.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 5.32 - Velocidade média de 9,99 m/s para 4096 pontos de amostragem :</i>	
<i>a) geral; b) detalhe.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 5.33 - Velocidade média de 9,99 m/s para 16384 pontos de amostragem:</i>	
<i>a) geral ; b) detalhe.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 5.34 - Velocidade média de 10,15 m/s para 4096 pontos de amostragem:</i>	
<i>a) geral ; b) detalhe.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 5.35 - Velocidade média de 10,15 m/s para 4096 pontos de amostragem:</i>	
<i>a) e b) detalhe.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 5.36 - Velocidade média de 10,15 m/s para 16384 pontos de amostragem:</i>	
<i>a) geral ; b) detalhe.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 5.37 - Velocidade média de 3,88 m/s: a) geral ; b) detalhe.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 5.38 - Velocidade média de 4,97 m/s : a) geral ; b) e c) detalhe.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 5.39 - Velocidade média de 5,51 m/s(obs. 16384 pontos de coleta) :</i>	<i>67</i>
<i>a) geral ; b) detalhe.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 5.40 - Velocidade média de 5,51 m/s - detalhe: a) geral ; b) detalhe.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 5.41 - Velocidade média de 6,45 m/s: a) geral ; b) detalhe.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 5.42 - Velocidade média de 7,05 m/s : a) geral ; b) detalhe.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 5.43 - Velocidade média de 7,05 m/s - detalhe: a) geral ; b) detalhe.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 5.44 - Velocidade média de 7,35m/s: a) geral ; b) detalhe.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 5.45 - Velocidade média de 8,56m/s: a) geral ; b) e c) detalhe.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 5.46 - Velocidade média de 9,48 m/s: a) geral ; b) detalhe.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 5.47 - Velocidade média de 9,92 m/s: a) geral ; b) detalhe.....</i>	<i>71</i>

<i>Figura 5.48 - Velocidade média de 10,41 m/s (observação: 16384 pontos de coleta) :</i> <i>a) geral ; b) detalhe.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 5.49 - Velocidade média de 6,37 m/s : a) geral ; b) detalhe.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 5.50 - Velocidade média de 7,83 m/s : a) geral ; b) detalhe.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 5.51 - Velocidade média de 8,28 m/s: a) geral ; b) detalhe.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 5.52 - Velocidade média de 8,68 m/s: a) geral ; b) detalhe.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 5.53 - Velocidade média de 9,41 m/s: a) geral ; b) detalhe.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 5.54 - Sem anteparo para velocidade de 9,41 m/s : a) geral ; b) detalhe.</i>	<i>76</i>
<i>Figura 5.55 - Comparativo do Strouhal x Reynolds para os posicionamentos do sensor e anteparo.</i>	<i>79</i>
<i>Figura 5.56 - Comparativo da Amplitude da FFT x Reynolds para o posicionamento do sensor e anteparo.</i>	<i>80</i>
<i>Figura 5.57 - Comparativo da Amplitude da FFT x Frequência para o posicionamento do sensor e anteparo.</i>	<i>80</i>
<i>Figura 5.58 - Comparativo entre a Frequência x Velocidade considerando a sensibilidade média ($f=8,17v$) e os dados experimentais.</i>	<i>81</i>

Lista de tabelas

<i>Tabela 1 – Características técnicas dos ventiladores</i>	<i>23</i>
<i>Tabela 2 – Metodologia dos experimentos</i>	<i>45</i>
<i>Tabela 3 – Valores experimentais da terceira etapa</i>	<i>53</i>
<i>Tabela 4 – Valores experimentais da quarta etapa</i>	<i>65</i>
<i>Tabela 5 – Valores experimentais da quinta etapa.....</i>	<i>73</i>
<i>Tabela 6 – Valores obtidos para sensor a 15D e 4096 pontos de amostragem, montado conforme figura 4.5.....</i>	<i>77</i>
<i>Tabela 7 – Valores obtidos para sensor a 15D e 16384 pontos de amostragem, montado conforme figura 4.5.....</i>	<i>77</i>
<i>Tabela 8 – Valores obtidos para sensor a 75D e 4096 pontos de amostragem, montado conforme figura 4.6.....</i>	<i>78</i>
<i>Tabela 9 – Valores obtidos para sensor a 75D e 13684 pontos de amostragem, montado conforme figura 4.6.....</i>	<i>78</i>
<i>Tabela 10 – Valores obtidos para sensor a 75D e sensor com prolongamento faceando o anteparo , montado conforme figura 5.5.</i>	<i>79</i>

Lista de abreviaturas e símbolos

St = Número de Strouhal

S = Número de Strouhal (utilizado por alguns autores em seus gráficos)

PVC = policloreto de vinila

V_{cr} = velocidade crítica do Fluido

f_n = frequência natural de carregamento

f_v = frequência do desprendimento dos vórtices

Γ = circulação

Δu = variação da velocidade

u_n = velocidade

F = força

Re = número de Reynolds

Q = vazão volumétrica

K = fator de bloqueio

D = diâmetro interno

C_d = coeficiente de arrasto

$\bar{v}$ = velocidade média

Δp = variação da pressão

p. = página

ω = frequência [rad/s]

T = período do sinal [s]

t = tempo

$j = \sqrt{-1}$ número complexo imaginário

β = relação entre diâmetro do orifício e diâmetro externo do elemento deprimogênio (placa).

Sumário

RESUMO	v
ABSTRACT	vi
<i>Lista de figuras</i>	vii
Lista de tabelas	xii
Lista de abreviaturas e símbolos	xiii
1 – Introdução	1
2 – Objetivos	4
3 - Revisão Bibliográfica	5
3.1 - Histórico	5
3.2 - Importância do Fenômeno dos Vórtices nas estruturas	5
3.2.1 - O número de Strouhal e a velocidade crítica do vento	8
3.2.2 - Projetos Aerodinâmicos de estruturas	8
3.3 - Princípio de funcionamento dos medidores de vazão tipo “Vortex”	9
3.4 - Princípio de medição	9
3.5 – A relação entre a frequência de geração de vórtices.....	12
3.6 - Uso comercial dos medidores de vórtices	16
4 - Metodologia	20
4.1 - Instalação do medidor de vórtice.....	20
4.1.1 – Bancada experimental	21
4.1.2 – Sensor	24
4.2 - Análise de Sinais	25
4.2.1 - Análise Temporal dos Sinais.....	26
4.2.3 - Energia de um sinal.....	26
4.2.3 - Baricentro e Duração de um sinal	27
4.2.4 - Análise Freqüencial dos Sinais	27
4.2.5 - Caracterização dos Sinais na Freqüência: Freqüência Média e Banda	31
4.2.6 - Interpretando a Transformada de Fourier	31
4.2.7 - Classificação dos Sinais	33
4.2.8 - A Análise Tempo – Freqüência	33
4.2.9 - A necessidade da análise tempo-frequência.....	35
4.2.10 - Por que o espectro varia?	36
4.2.11 - A transformada a curto tempo de Fourier	36

4.2.11.1 - A transformada a curto tempo de Fourier: equações.....	37
4.2.12 - Frequência Instantânea.....	38
4.2.13 - Bandas de frequência	39
4.2.14 – Número de pontos de tempo.....	39
4.2.15 – Janelas de amostragem	40
5 - Ensaio.....	42
5.1 - Matriz de testes.....	42
5.2 – Resultados	47
5.2.1 - Condições experimentais do ensaio	47
5.2.2 - Primeira Etapa: ruído do sistema de aquisição	48
5.2.3 - Segunda Etapa: medição sem o anteparo e com sensor posicionado antes do anteparo	51
5.2.4 -Terceira Etapa: anteparo e sensor a uma distância de 15D.....	52
5.2.5 - Quarta Etapa: coleta de dados a 75D	65
5.2.6 - Quinta Etapa: anteparo a 75D, sensor com prolongamento.....	73
5.3 - Comentários dos resultados experimentais	81
6 - Conclusões e sugestões.....	82
Referências Bibliográficas	84
APÊNDICES	88

1 – Introdução

A necessidade de se medir vazão surgiu quando, depois de canalizar a água para o consumo doméstico, a administração pública descobriu uma fonte de arrecadação e estabeleceu taxas para o consumo do líquido. Isso aconteceu a muitos séculos. Segundo consta, as primeiras medições de água teriam sido executadas pelos egípcios e romanos, povos cujas obras de adução de água fazem parte, hoje, das ruínas turísticas de vários países da Europa e do norte da África. Um texto do governador e engenheiro romano Julius Frontinus (30-103 d.C.) traz referências precisas a esse respeito [Delmeé, p. 1].

O assunto só voltou a ser estudado no século XV, com Leonardo da Vinci (1452-1519), no trabalho intitulado “Sobre o movimento da água e das águas pluviais”. No início do século XVII, Galileu Galilei (1564-1642), um dos criadores do método experimental, trouxe sua participação aos fundamentos da medição de vazão, e seu discípulo Evangelista Torricelli (1608-1647) estabeleceu a equação sobre o escoamento livre da água através de orifícios.

As bases da Mecânica dos Fluidos foram assentadas de forma definitiva por dois físicos do século XVIII : Daniel Bernoulli (1700-1782) e Leonardo Euler (1707-1783). Bernoulli formulou, em seu tratado de hidrodinâmica, publicado em 1738, a principal lei sobre o movimento dos líquidos, comumente chamada de “equação de Bernoulli”, e Euler estabeleceu as equações diferenciais gerais relativas ao movimento dos líquidos perfeitos. Ainda no século XVIII, Henri Pitot (1695-1771) apresentou um trabalho descrevendo o instrumento conhecido como “tubo de Pitot” ou apenas Pitot, capaz de medir a velocidade da água. Em 1797, Giovanni Venturi (1746-1822) publicou o resultado dos seus estudos o que ficou conhecido como “tubo de Venturi” ou apenas Venturi.

No século XIX, os trabalhos dos físicos Jean Poiseuille (1799-1869) (escoamento em tubos capilares e viscosidade dos fluidos), *sir* George Stokes (1819-1903) (trabalhos sobre a hidrodinâmica) e Osborne Reynolds (1842-1912) (número de

Reynolds), contribuíram significativamente para a evolução da tecnologia da medição de vazão.

No século XX, a necessidade de se medir a vazão de fluidos em geral tornou-se premente, em decorrência do crescimento da aplicação dos processos contínuos na indústria, em substituição aos processos em batelada. Princípios já conhecidos foram aplicados em conjunto com novas tecnologias, resultando em instrumentos modernos e confiáveis. Foram desenvolvidos novos medidores, baseados em princípios e resultados de estudos físicos que haviam pesquisado outros fenômenos. Os estudos de Theodor von Kármán (1881-1963) deram origem aos “vortex”; os de Michael Faraday (1791-1867), ao medidor eletromagnético; e os de Gaspar Coriolis (1792-1843), ao medidor que aproveita os efeitos da aceleração complementar devida a “força de Coriolis”.

Entre as variáveis mais freqüentes de medidas, a vazão é a que requer os recursos tecnológicos mais diversos para o desenvolvimento de medidores e transmissores. A medição de vazão encontra importantes aplicações no transporte de fluidos (oleodutos, gasodutos), nos serviços públicos (abastecimento, saneamento) e na indústria em geral, para controle de relação, de bateladas, balanço de massas, contribuindo para a qualidade e otimização de controle de processos. Em outra faixa de aplicações, os medidores domésticos (hidrômetros, medidor de gás) e medidores de combustíveis (bombas de postos de abastecimento) fazem parte do cotidiano do consumidor.

No século XV Leonardo da Vinci observou a formação de vórtices em um rio, os quais se formavam a jusante do objeto. Em 1878, Strouhal identificou o fenômeno, através da observação do som emitido por um fio sob a ação do vento era proporcional a velocidade do vento pela espessura do fio. Lord Rayleigh descobriu mais tarde (em 1879) a existência de uma força de sustentação (acompanhando o desprendimento dos vórtices “*vortex shedding*”) perpendicular a direção do escoamento. Pesquisas realizadas por von Kármán (1912) resultaram na conclusão da periodicidade do fenômeno.

A possibilidade do uso do *vortex shedding* como um dos princípios de medição de vazão, foi estudada em 1954 por Roshko. Uma experiência do uso desde princípio foi relatada por Shiba, em 1960, para a medição da velocidade de um navio. O primeiro medidor de vazão tipo vortex moderno para medições em condutores fechados foi

projetado por Yamasaki em 1967. Em 1969 o primeiro modelo de medidor foi construído e instalado em uma planta petroquímica em Tóquio.

A importância fundamental do medidor de vórtices (vortex) é que o fenômeno do *vortex shedding* não é influenciado pelas propriedades físicas do fluido como viscosidade e densidade. Portanto, o medidor tipo vortex não é sensível à temperatura e composição química do fluido.

O *vortex shedding* é um fenômeno essencialmente bidimensional. Em contraste ao escoamento dentro de um tubo que é tridimensional. Portanto, ocorrem fenômenos ocorrem no escoamento como turbulência, rotação e gradiente de velocidade influenciam prejudicialmente o *vortex shedding*. Uma alta modulação da amplitude e da frequência do *vortex shedding* tem sido observada. Este resultado dos efeitos tridimensionais causa variação na frequência ao longo do anteparo (*bluff body*¹).

Cousins indica quatro caminhos para solução do problema:

- condicionar o escoamento (fluxo) passando pelo anteparo
- introduzindo chapas finais no anteparo
- introduzindo técnicas de controle das condições de contorno sobre o anteparo
- processamento de sinal complexo.

No medidor vortex, a frequência é diretamente proporcional à velocidade do escoamento. A medida “ótima” do sinal deveria conter somente um componente espectral. Realmente, muitos componentes de distúrbio são observados. Portanto, a idéia da análise espectral para a medição do sinal.

A detecção dos vórtices pelo sensor de pressão normalmente demonstra um bom sinal senoidal no domínio do tempo. O sinal é sobreposto pelo ruído. A determinação da frequência do sinal é facilmente no domínio da frequência. A frequência do vórtice é significativa e excede o ruído com uma alta relação entre sinal e ruído.

Para o experimento proposto será utilizada a técnica de análise espectral de sinais para determinação da frequência dos vórtices. O princípio básico da análise dos sinais será a utilização da transformada a curto tempo de Fourier e a transformada de Gabor.

¹ Na literatura o termo *bluff body* é normalmente utilizado para denominação de corpos rombudos, porém, neste trabalho o termo *bluff body* ou anteparo será utilizado para um corpo ou obstáculo com as arestas cortantes.

2 – Objetivos

O objetivo inicial deste projeto de mestrado é a caracterização, conjuntamente em tempo e frequência e a análise do número de Strouhal (St) em função do número de Reynolds para o escoamento de ar em um tubo de PVC em torno de um anteparo com arestas “cortantes”.

Este trabalho será focado inicialmente na medição das flutuações de pressão ocasionadas pelo desprendimento e formação de vórtices quando o fluxo de ar encontra o anteparo, os sinais serão medidos por um sensor pressão tipo piezo-resistivo, cujo, o tempo de resposta do sensor é quase instantâneo, não havendo, portanto defasagem entre o fenômeno e a coleta de dados análise dos sinais. Os sinais coletados serão analisados utilizando o princípio da transformada a curto tempo de Fourier e a transformada de Gabor, com isso será determinada a frequência de formação dos vórtices em função da velocidade média do escoamento.

3 - Revisão Bibliográfica

3.1 - Histórico

O fenômeno dos vórtices foi estudado inicialmente por Leonardo da Vinci, no século XV, e posteriormente por von Kármán, em 1912. Os estudos modernos destinavam-se no início principalmente à prevenção de acidentes como destruição de chaminés ou pontes. Somente na segunda metade do século XX o fenômeno começou a ser aplicado à medição de vazão.

A primeira observação experimental deste fenômeno foi feita por Strouhal. Ele demonstrou que a frequência de vibração de um fio sob a ação do vento relaciona com a velocidade do vento e com o diâmetro do fio. Vários estudos foram desenvolvidos sobre a estabilidade e natureza dos vórtices.

3.2 - Importância do Fenômeno dos Vórtices nas estruturas

Para estruturas cilíndricas delgadas, vórtices são formados ao longo da direção do vento alternadamente à esquerda e à direita da secção transversal. Estas produzem forças de excitação pulsante na direção opostas ao vento. Para estruturas verticais, tais como chaminés, torres, pilares de pontes, mastros, cabos de transmissão de energia elétrica, etc., as linhas de vórtices são verticais, isto é, com referência à altura, os vórtices são geralmente desprendidos para o mesmo período do ciclo sobre a secção transversal. Portanto, para uma corrente de ar, a estrutura pode ser significativamente excitada especialmente no modo de carregamento. Se a frequência do desprendimento dos vórtices (*vortex shedding*) f_v for igual à frequência natural de carregamento f_n de ressonância da estrutura ocorre para a velocidade crítica do vento (v_{cr}):

$$v_{cr} = \frac{f_n d}{St} \quad (3.1)$$

onde d é o diâmetro do cilindro e St é o número de Strouhal (0.2 para seções circulares).

3.2.1 - Formação dos vórtices nas estruturas

Para estruturas delgadas (esbeltas) vórtices regulares podem ocorrer, se a linha de separação é aproximadamente seqüencial. Este é sempre o caso de estruturas com cantos retos ou para cilindros circulares para um especial número de Reynolds.

O princípio de aparecimento dos vórtices é mostrado na figura 3.1 abaixo.

Figura 3.1 - Princípio de formação dos vórtices para uma seção circular – SOCKEL (1994, p.52).

A separação do fluido no lado direito (na direção do fluxo) produz uma circulação $+ \Gamma$, na esteira do cilindro. Depois da Lei Vortex de Thomson, uma circulação contrária, $- \Gamma$, ocorre ao redor do cilindro. Esta velocidade, Δu , reduz a velocidade espacial u_2 no lado direito e aumenta a u_2 do lado esquerdo. Após o aumento da equação de Bernoulli, a pressão estática aumenta no lado direito e diminui do lado esquerdo, portanto uma força cruzada devido ao fluxo cruzado, F_y , ocorre agindo no cilindro. Com a alternância do vórtice esta força, F_y , alterna também.

Se o cilindro é flexível na secção transversal na direção do fluxo e se a frequência natural é próxima a da frequência de vórtice, a força de excitação, F_y , entre

em ressonância com a vibração do cilindro e este efeito é chamando de ressonância dos vórtices (*vortex resonance*).

A separação ou desprendimento dos vórtices sobre um cilindro é altamente dependente do número de Reynolds, denominado de Re . Há três faixas típicas de números de Reynolds, conforme mostrado na figura 3.2 (SOCKEL,1985).

- a) faixa subcrítica;
- b) faixa crítica e pós-crítica
- c) faixa transcítica

Figura 3.2 - N° de Strouhal para um cilindro x N° de Reynolds - SOCKEL (1994, p.117).

Com o aumento do número de Reynolds na faixa transcítica o fluxo de separação torna-se mais e mais regular e a esteira de vórtice é restabelecida, as quais foram estudadas por Roshko em 1961. A força de excitação aumenta respectivamente e, está é a razão para as perigosas vibrações excitadas por vórtices das grandes chaminés, torres ou mastro de antenas.

3.2.1 - O número de Strouhal e a velocidade crítica do vento

A frequência dos vórtices pode ser descrita pelo número adimensional denominado de número de Strouhal (St)

$$St = \frac{d \times f}{v} \quad (3.2)$$

onde:

d = diâmetro ou dimensão transversal

f = frequência de vortex shedding

v = velocidade média do fluxo não “perturbado”

Para um cilindro, St, depende somente do número de Reynolds (figura 3.2). Para uso prático em estruturas aerodinâmicas, o número de Strouhal é aproximadamente fixo em St=0,2 para todos os números de Reynolds (Re).

3.2.2 - Projetos Aerodinâmicos de estruturas

Muitos projetos aerodinâmicos contra distúrbios causados pela geração da esteira regular de vórtices são propostos por diferentes autores. Os projetos mais comuns são os de chaminés, os quais estão apresentados na figura 3.3 .

Figura 3.3 - Exemplos de projetos de chaminés - SOCKEL (1994, p.81).

3.3 - Princípio de funcionamento dos medidores de vazão tipo “Vortex”

O princípio de funcionamento dos medidores de vazão do tipo vórtice, ou *vortex*, baseia-se na observação de um fenômeno físico que ocorre quando uma corrente fluída encontra um obstáculo de perfil não aerodinâmico: a partir de determinada velocidade, uma esteira se forma a jusante do objeto, pelo surgimento de vórtices, gerados alternadamente de cada lado do obstáculo (anteparo). A frequência desse fenômeno oscilatório depende do tamanho e do formato do objeto, bem como da velocidade do fluxo do fluido.

3.4 - Princípio de medição

O princípio de operação do medidor tipo Vórtice (Vortex) é baseado no fenômeno natural do *vortex shedding*.

O perfil de velocidade numa seção transversal do duto é normalmente simétrico, normalmente parabólico pela redução do número de Reynolds. Muitos estudos foram

feitos para investigar o perfil de velocidade em torno de corpos submersos de seção circular e de outras formas geométricas (vide figura 3.4).

Figura 3.4 - Formas geométricas de corpos geradores de vórtices –MILLER (1996, p.14.18).

Em baixas vazões, as linhas de correntes seguem os contornos do corpo. Quando a velocidade de escoamento é aumentada, o escoamento não segue mais os contornos do corpo separando-se dele. A separação cria uma região de velocidade aumentada e conseqüentemente uma região de baixa pressão localizada resultando numa reversão do escoamento formando um vórtice (figura 3.5). Nas baixas velocidades o vórtice permanece numa posição fixa relativa ao corpo gerador de vórtice. À medida que a velocidade é aumentada o vórtice aumenta em tamanho e se separa do corpo se deslocando juntamente com o escoamento. O pulso forte de pressão que acompanha cada formação de vórtice impede a formação simultânea de outro vórtice no lado oposto. O resultado é a formação de uma fileira de vórtices alternadamente entre os lados e com espaçamento igual como mostrado na figura abaixo.

Figura 3.5 - Representação da formação dos vórtices e da variação da pressão no tempo - MILLER (1996, p.14.17).

Na figura 3.6 tem-se a representação fotográfica seqüencial da formação e desprendimento de vórtices em um anteparo de seção T – Miller (1996).

Figura 3.6 – Fotografias sequenciais da formação de vórtices mostrando um ciclo de separação em uma seção T em um tubo para 0,04s/frame [De Corpron et all,1978, MILLER,p.14.17].

À medida que o fluxo aumenta, a velocidade de formação dos vórtices aumenta na mesma taxa, com o resultado que o número de vórtices gerado é diretamente proporcional à taxa de vazão passando através do dispositivo.

3.5 – A relação entre a frequência de geração de vórtices

Como mencionado anteriormente no item 3.2.3, e re-arranjando a expressão 3.2, tem-se:

$$f = \frac{St \times v}{d} \quad (3.3)$$

onde:

f = frequência de geração de vorticidades ou vórtices

St = número de Strouhal

v = velocidade média de escoamento do fluido

d = comprimento característico

A razão fd/v é chamada de número de Strouhal (St) e pode ser considerado como fator de calibração e também pode caracterizar diferentes corpos como geradores de vorticidade. Assim dois corpos podem atuar como idênticos geradores de vorticidade, se o número de Strouhal for idêntico. O número de Strouhal é razoavelmente constante entre $3000 < Re < 100000$, conforme mostrado na figura 3.7.

Figura 3.7 – N° de Strouhal x n° de Reynolds – YOKOGAWA (2001, p.10-2).

Na figura 3.8 tem-se a representação da influência da geometria do corpo no número de Strouhal.

Figura 3.8 – N° de Strouhal x n° de Reynolds de um corpo de seção cilíndrica e outro de seção retangular – BENTLEY (1995, p.297).

Fora desta faixa de número de Reynolds, uma geometria específica é necessária para manter um número de Strouhal constante. Uma geometria com formato triangular é bastante usada como na figura 3.5 que gera vorticidades fortes e regulares. Esta geometria oferece um coeficiente de arrasto elevado para gerar vorticidades fortes e, alto bloqueio para minimizar as mudanças na frequência causadas pela mudança na largura do corpo (d). O fator de bloqueio é definido como a razão de largura do corpo com o diâmetro interno do medidor (D). Nesta geometria três parâmetros geométricos inter-relacionados são necessários para se obter os resultados desejados. Primeiramente a largura do corpo (d) deve ser uma fração apreciável do diâmetro do tubo (D), normalmente $d=0,24D$, de modo que o fluxo inteiro participa do processo de geração de vórtice. Em segundo lugar o corpo deve ter cantos vivos (arestas cortantes) para fixar linhas de separação do escoamento independentemente do número de Reynolds (Re). Finalmente o comprimento do corpo na direção do escoamento deve ser aproximadamente 1,3 vezes a largura do corpo no mínimo.

Logo a área de seção do corpo é definida em função da largura do corpo (isto é número de Strouhal fixo), o medidor de tipo de vórtice pode ser definido em função do diâmetro interno D. Se a razão d/D é mantida constante, os medidores podem ser escalados tamanho a tamanho conforme o fator K. O fator K é a relação entre os pulsos do elemento sensor e o fluxo volumétrico, e geralmente expresso em pulsos/unidade de volume.

$$K = \frac{N}{Q} \quad (3.4)$$

onde :

N= número de Pulsos

Q = vazão volumétrica

Na figura 3.9 tem-se a referência do fabricante de medidores de vazão Yokogawa para a tabela de relação do diâmetro e a taxa de pulsos do modelo DY Vortex Flowmeter.

Tamanho Nominal		Taxa nominal de pulsos	Fator K Nominal
mm	polegadas	Hz/m/s	Pulsos/litro
15	1/2	62,7	376
25	1	35,5	68,6
40	1 1/2	23,1	18,7
50	2	18,3	8,95
80	3	13,2	3,33
100	4	9,88	1,43
150	6	6,67	0,441
200	8	5,00	0,185
250	10	2,61	0,0966
300	12	3,27	0,0563

Figura 3.9 - Tabela diâmetro da tubulação e taxa de pulsos nominais do transmissor da Yokogawa (2001, p.2.2).

Como mencionado, a geração de vorticidade acontece na faixa de Reynolds maiores que 3000, mas os experimentos mostram que o fator medidor muda com o fluxo na faixa de $3000 < Re < 10000$. Esta mudança no fator medidor não é linear e de difícil precisão. Entretanto para valores de Reynolds acima de 10000 o fator do medidor permanece relativamente constante com o aumento no valor de Re. Assim o medidor do tipo vórtice deve ser usado para escoamentos de Re maior que 10000 como está na figura 3.10. Abaixo deste valor o fator do medidor é não linear e medidas precisas não são possíveis, conforme figura 3.10 .

Figura 3.10 - Gráfico do fator K x nº de Reynolds – YOKOGAWA (2001).

Na figura 3.11 tem-se a representação do fator K e o coeficiente de arrasto em função do número de Reynolds, segundo YAMASAKI.

Figura 3.11 - Fator K x nº de Reynolds e Coeficiente de arrasto - YAMASAKI (1974,p.977).

3.6 - Uso comercial dos medidores de vórtices

Como citado anteriormente, o princípio dos medidores de vazão tipo vórtices está baseado na relação entre a frequência dos vórtices atrás do anteparo e a velocidade média do fluxo. Sensores de pressão são utilizados na parede dos tubos ou dentro do corpo do anteparo para a detecção da separação dos vórtices, conforme figura 3.12. Vários modelos de anteparos podem ser projetados para criar uma estrutura de vórtices regular, bem definida e um sinal de pressão no sensor. Anteparos de grandes dimensões são requeridos para uma forte flutuação da pressão.

O processamento de sinal pressupõe vórtices bem definidos para somente uma frequência dominante. Os tamanhos convencionais dos anteparos não satisfazem esta condição. Anteparos triangulares geram vórtices secundários, os quais não são muito bem conhecidos. Adicionalmente, eles têm a desvantagem da grande dimensão com a largura de 24 a 28% do diâmetro do tubo ocupando uma área de mais de 30% da secção transversal do tubo e ocasionando uma grande perda de pressão.

O processo de geração de vórtice causa flutuações periódicas na velocidade e na pressão nas proximidades do corpo. Assim os sensores podem ser responsivos às

flutuações na velocidade e na pressão. Um sinal de amplitude suficiente para distinguir do ruído geral da instalação sem maiores dificuldades. Este sinal pode ser influenciado pela turbulência no escoamento, ondas sonoras e pela vibração mecânica do medidor e da tubulação.

Figura 3.12 - Corpos geradores de vórtices e sistemas de detecção – BENTLEY (1995, p.299).

Na figura 3.13 tem-se a representação do sinal no domínio do tempo e no domínio da frequência, e na figura 3.14 o gráfico da frequência de pulso em função da velocidade, em um sistema de medição utilizando o sistema de ultra-som, sendo as figuras 3.13 e 3.14 extraídas do trabalho de HANS (2003).

Figura 3.13 - Sinal da pressão no domínio do tempo (esquerda) e no domínio da frequência - HANS (2003, p.127).

Figura 3.14 - Gráfico da frequência de pulso x velocidade do fluxo medidas com sistema de ultra-som - HANS (2003, p.128).

Na figura 3.15 tem-se a representação do estudo da influência da geometria do corpo realizada por HANS (1998).

Figura 3.15 - N° de Strouhal x velocidade média do fluxo, estudo da influência da geometria do anteparo - HANS (1998, p.130).

Na figura 3.16 tem-se a representação do efeito da localização do sensor de pressão no fator K segundo MILLER (1996).

Figura 3.16 - Efeito da localização do sensor de pressão no fator K - MILLER (1996, p.15.48).

4 - Metodologia

4.1 - Instalação do medidor de vórtice

Figura 4.1 - Recomendação para instalação de equipamento medidor de vazão de medição de vórtices – YOKOGAWA (2001, p.3-1).

Na instalação, o medidor deve receber o escoamento totalmente desenvolvido e turbulento. Isto implica em evitar perturbações pelo arranjo da instalação especialmente antes do medidor colocando laminadores de fluxo (vide figura 4.2) e linha livre de válvulas, conexões, etc. A região após o medidor deve ter um comprimento livre adequado mesmo que o medidor seja menos sensível às condições da instalação após os mesmos.

Figura 4.2 - Retificador de fluxo, onde D = diâmetro do tubo.

4.1.1 – Bancada experimental

Para realização dos ensaios foram utilizados os seguintes componentes:

- retificador de fluxo (figura 4.2)
- placa de orifício em aço inox construída conforme ASME MFC-3M-1989, com diâmetro externo 50 mm e diâmetro do orifício 35 mm
- anteparo triangular com arestas cortantes e geometria de 24x48mm (figura 4.4)
- tubo de PVC com diâmetro (D) de 100 mm
 - uma peça com 2000 mm de comprimento (Figura 4.5)
 - uma peça montada com 8000 mm de comprimento (Figura 4.6)
- manômetro de tubo U com água para medição da variação de pressão (Δp) gerada pela uma placa de orifício
- a rede “pneumática” de simulações do NETeF (Núcleo de Engenharia Térmica e Fluídos), alimentada por um sistema de ventiladores com a capacidade indicada na tabela 1 e representada na figura 4.8
- sensor de pressão Freescale™ modelo MPXV5004GC7U, com faixa de 0 a 3,92 kPa (figura 4.9)
- fonte de alimentação do sensor e circuito eletrônico para eliminação do nível DC
- sistema de aquisição e condicionamento de sinais LabVIEW (National Instruments)

Figura 4.3 - Representação da bancada experimental.

Figura 4.4 – Geometria do anteparo utilizado no experimento.

Figura 4.5 - Experimento montado com sensor e anteparo a 15D.

Figura 4.6 - Experimento montado com sensor e anteparo a 75D.

Figura 4.7 - Montagem do experimento (retificador de fluxo, anteparo e sensor de pressão).

Tabela 1 – Características técnicas dos ventiladores

Ventilador	Vazão volumétrica (m ³ /min)	Dp (mmca)	Potência do motor (cv)	Rotação do motor elétrico (rpm)
1	5,9	1500	5	3450
2	5,9	850	7,5	3425
3	9,0	1500	30	3500

Figura 4.8 - Sistema de ventiladores.

4.1.2 – Sensor

Características técnicas do sensor piezo-resistivo utilizado (maiores detalhes nos anexos A,B e C).

A característica do sensor de pressão está representada nas figuras 4.9, 4.10 e 4.11 .

Figura 4.9 - Sensor de pressão MPXV5004 [Freescale™,2004]

OPERATING CHARACTERISTICS ($V_S = 5.0$ Vdc, $T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted, $P_1 > P_2$. Decoupling circuit shown in Figure 3 required to meet electrical specifications)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Pressure Range	P_{OP}	0	—	3.92 400	kPa mm H ₂ O
Supply Voltage ⁽¹⁾	V_S	4.75	5.0	5.25	Vdc
Supply Current	I_S	—	—	10	mAdc
Span at 306 mm H ₂ O (3 kPa) ⁽²⁾	V_{FSS}	—	3.0	—	V
Offset ⁽³⁾⁽⁵⁾	V_{off}	0.75	1.00	1.25	V
Sensitivity	V/P	—	1.0 9.8	—	V/kPa mV/mm H ₂ O
Accuracy ⁽⁴⁾⁽⁵⁾				±1.5 ±2.5	% V_{FSS} % V_{FSS}

Figura 4.10 - Características operacionais do sensor de pressão-Freescale™(2004).

Figura 4.11 - Comportamento do sensor de pressão - Freescale™(2004).

$$P1(V_{out}) = \frac{V_{out} - 0,2 * V_S}{0,2 * V_S} \quad (4.1)$$

Sensibilidade do sensor (V/P) = 1 V/kPa

4.2 - Análise de Sinais

Análise de Sinais é o estudo dos métodos de caracterização das propriedades básicas de sinais e foi historicamente desenvolvida paralelamente com a descoberta das grandezas fundamentais da natureza, tais como: campo elétrico, ondas sonoras, e correntes elétricas (COHEN, 1995). Um sinal é geralmente uma função que depende de várias variáveis, estas normalmente representando espaço e tempo. O campo elétrico, por exemplo, varia tanto em função do tempo como do espaço.

O tempo é uma variável fundamental. No entanto, algumas vezes é vantajoso estudar o sinal em uma representação diferente da temporal, ou seja, analisá-lo no plano das frequências.

Além do tempo, a mais importante variável de representação é a frequência. Sua representação matemática foi formalizada por Fourier, cuja principal motivação era solucionar a equação que governa o comportamento do calor.

Numa descrição simples pode-se dizer que um sinal é um fenômeno, que acontecendo em qualquer ambiente, pode ser descrito quantitativamente.

Os sinais são funções de uma ou mais variáveis independentes e, tipicamente contêm informação acerca do comportamento ou natureza de um fenómeno físico.

Exemplo 1 – Som de corda: Sinal unidimensional – função de uma variável simples, o tempo.

Exemplo 2 – Imagem vídeo a preto e branco : Sinal bidimensional – depende das coordenadas (x, y). Representa a intensidade em cada ponto (x,y).

No presente trabalho tratar-se-á essencialmente de funções de uma variável, em geral o tempo.

4.2.1 - Análise Temporal dos Sinais

Quantidades físicas como campo elétrico e magnético, pressão, voltagem, etc., variam no tempo e são chamadas formas de ondas ou sinais temporais. Denota-se o sinal por $x(t)$.

O mais simples sinal variando no tempo é senoidal, caracterizado pela amplitude a , e a sua frequência ω_0 , representado normalmente como :

$$x(t) = a \sin (\omega_0 t) \quad (4.2)$$

Dizer que cada sinal tem amplitude constante não significa que o sinal é de valor constante, mas que a máxima e a mínima das oscilações são constantes.

De forma generalizada o sinal senoidal pode ser escrito como:

$$x(t) = a(t) \sin [v(t)] \quad (4.3)$$

onde a amplitude, $a(t)$, e a fase, $v(t)$, são agora funções do tempo.

4.2.3 - Energia de um sinal

Se $|x(t)|^2$ é a energia ou intensidade de um sinal, então a energia total é obtida pela sua integração da densidade sobre todo o tempo, ou seja:

$$E = \int |x(t)|^2 dt \quad (4.4)$$

4.2.3 - Baricentro e Duração de um sinal

Considerando $|x(t)|^2$ como a densidade temporal de um sinal $x(t)$, então o baricentro, $\tilde{t}$, pode ser definido como :

$$\tilde{t} = \frac{1}{E_x} \int |x(t)|^2 dt \quad (4.5)$$

As razões para definir o baricentro são que este pode dar uma caracterização total da densidade e pode dar um indicador de onde a energia está concentrada.

Muitas medidas podem ser usadas para determinar o espalhamento ao redor do baricentro. A mais comum delas é o desvio padrão, Δx , dado por:

$$\Delta x^2 = \frac{1}{E_x} \int (t - \tilde{t})^2 |x(t)|^2 dt \quad (4.6)$$

O desvio padrão é um indicador da duração do sinal. Se o desvio padrão, Δx , é pequeno, então grande parte do sinal se encontra concentrado em torno do tempo médio e passará rapidamente, o que indica curta duração. De forma contrária temos um sinal de longa duração. Existem sinais que apresentam desvio padrão infinito, mesmo tendo energia finita. Isso indica que o sinal é muito duradouro (COHEN,1995).

4.2.4 - Análise Freqüencial dos Sinais

A análise freqüencial ou, também bastante usado, espectral, tornou-se extremamente rica com o estabelecimento de suas bases teóricas após o trabalho de Fourier. Isto se consolidou com a invenção do espectroscópio e com a descoberta de

que, através da análise espectral da luz, pode-se determinar a natureza da matéria; que átomos e moléculas podem ser caracterizados pelo espectro de luz que emitem ou absorvem (COHEN,1995).

Bunsen e Kirchhoff tornaram a análise espectral uma grande descoberta, devido às suas contribuições deixadas seis anos após Fourier ter apresentado suas idéias. Em suas descobertas, observaram que o espectro de luz pode ser usado para o reconhecimento, detecção e classificação das substâncias.

A análise do espectro tem ajudado na descoberta das leis básicas da natureza e tem permitido que se tenha um maior entendimento da natureza das substâncias do universo. Portanto, seria apropriado referir-se à análise espectral como a análise de Bunsen-Kirchhoff.

Existem quatro razões para utilizar-se a análise freqüencial ou análise espectral. Primeiro, analisando espectralmente um sinal, pode-se descobrir características de sua fonte. É dessa forma que se estuda a composição de estrelas, do sangue, dos papéis, etc.

Segundo, a propagação de ondas através de um meio depende geralmente da freqüência. A propagação de uma onda através de um meio é complicada, mas o efeito básico é que ondas de diferentes freqüências propagam com diferentes velocidades, a exemplo do que ocorre em um prisma. Para se estudar a propagação como função da freqüência decompõe-se o sinal em diferentes componentes freqüenciais, analisa-se cada componente e então se reconstrói o sinal para se obter a forma de onda resultante.

A terceira razão para decomposição espectral é que simplifica o entendimento dos sinais. Simples senóides são comuns na natureza e isto resulta do fato de que para algumas equações fundamentais de movimento, senóides são possíveis soluções, como também suas somas.

Na figura 4.12 tem-se um comparativo entre a análise de Fourier com a decomposição da luz.

Figura 4.12 - Comparativo da análise de Fourier com a decomposição da luz.

Finalmente, a decomposição ou análise de Fourier é uma poderosa ferramenta para a solução de equações diferenciais ordinárias e parciais.

Na análise de Fourier o sinal é expandido em termos de senos de diferentes frequências. Assim, para um sinal $x(t)$ a expansão é da forma (COHEN,1995)

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int X(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (4.7)$$

O sinal constituído pela soma dos componentes harmônicos $e^{j\omega t}$, caracterizadas pela frequência ω e ponderadas por $X(\omega)$, que é obtido a partir do sinal através da equação

$$X(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int x(t) e^{-j\omega t} dt \quad (4.8)$$

$X(\omega)$ é chamado de espectro do sinal $x(t)$ ou, transformada de Fourier de $x(t)$. Desde que $X(\omega)$ e $x(t)$ estão biunivocamente relacionados pode-se dizer que o espectro é a representação do sinal no domínio da frequência.

Analogamente ao sinal considera-se $|X(\omega)|^2$ a densidade de energia do espectro.

Considerando que a densidade de energia do espectro $|X(\omega)|^2$, a energia total é definida por:

$$E_x = \int |x(t)|^2 dt = \int |X(\omega)|^2 d\omega \quad (4.9)$$

Na figura 4.13 tem-se a representação de alguns exemplos de sinais no domínio do tempo e no domínio da frequência; e na figura 4.14 tem-se a amostragem de composição de um sinal.

Figura 4.13 - Exemplos de frequência de espectro.

Figura 4.14 - Amostragem da composição de um sinal, observando a importância do componente de fase.

4.2.5 - Caracterização dos Sinais na Freqüência: Freqüência Média e Banda

Se $|X(\omega)|^2$ representa a densidade em freqüência, então, pode-se usar para calcular a freqüência média, a mesma motivação inicial como no domínio do tempo, isto é, dando uma idéia aproximada das características principais da densidade espectral.

A freqüência média, $\tilde{\omega}$, e o desvio padrão Δx (também conhecido como o valor médio quadrático da banda de freqüências e representado por B) são dados, respectivamente, por :

$$\tilde{\omega} = \frac{1}{E_x} \int \omega |X(\omega)|^2 d\omega \quad (4.10)$$

$$B^2 = \Delta x^2 = \frac{1}{E_x} \int (\omega - \tilde{\omega})^2 |X(\omega)|^2 d\omega \quad (4.11)$$

A densidade de energia espectral $|X(\omega)|^2$ representa as freqüências que existiram durante o sinal. No entanto, ela não fornece nenhuma indicação de quando tais freqüências ocorreram.

4.2.6 - Interpretando a Transformada de Fourier

Uma interpretação simplificada da transformada de Fourier é ilustrada na figura 4.15. A transformada de Fourier identifica e distingue as ondas senoidais de diferentes freqüências (e suas respectivas amplitudes) que se combinam para formar o sinal (BRIGHAM,1988) . Matematicamente essa relação é dada pela equação (4.8).

Figura 4.15 - Interpretando a transformada de Fourier – BRIGHAM (1988).

Portanto, a transformada de Fourier é uma representação no domínio da frequência de uma função temporal (sinal). $X(\omega)$ contém exatamente a mesma informação que a função original, somente se diferencia na maneira de apresentação. Ou seja, a análise de Fourier permite examinar uma função temporal em outro ponto de vista referencial: pela análise frequencial.

4.2.7 - Classificação dos Sinais

Devido à diversidade de sinais existentes, a classificação dos sinais é feita de modo amplo. Se um sinal não varia em algum sentido, então diz-se, que ele é **estacionário** ; caso contrário ele é **não estacionário**. Se um sinal é de curta duração, ele é geralmente chamado de **transiente**. (Curto, neste caso, é um termo bastante relativo que pode significar um milhão de anos para a Astronomia ou um bilionésimo de segundo no caso da Física Nuclear).

Se um sinal é explicitamente conhecido, diz-se que se tem um sinal **determinístico**. Muito freqüentemente os sinais são governados por eventos randômicos, possibilitando o surgimento de vários sinais. Nesse caso o sinal é dito **randômico** ou **estocástico**.

O conteúdo espectral é algumas vezes usado para classificar sinais. Sinais cujo espectro se concentra em uma faixa freqüencial relativamente pequena são chamados de **banda limitada**; caso contrário são chamados de **banda larga**.

4.2.8 - A Análise Tempo – Freqüência

A análise tempo-freqüência originou-se há aproximadamente cinquenta anos, e tem tido recentemente um maior desenvolvimento no estabelecimento de seus princípios básicos e nas aplicações práticas.

É importante ressaltar que este campo está evoluindo muito rapidamente, com a introdução de novas idéias.

A idéia fundamental da análise tempo-freqüência é entender e analisar situações onde a composição freqüencial de um sinal está mudando no tempo. Um exemplo real mostra a necessidade da análise tempo-freqüência. Vejamos a onda sonora emitida por uma baleia, indicada na figura 4.16, que é constituída por três gráficos.

O gráfico da esquerda é o sinal original variando no tempo, ou melhor, intensidade x tempo. A densidade espectral está abaixo da figura principal e indica quais freqüências existiram, Na figura principal está o gráfico tempo x freqüência. A partir dele pode-se determinar as freqüências e suas intensidades relativas quando o tempo avança.

Figura 4.16 - Gráfico tempo-frequência da onda sonora emitida por uma baleia – COHEN (1995, p.72).

Observando o sinal variando no tempo, não se pode afirmar muita coisa, embora se verifique que a intensidade ou altura do som varia com o tempo. Para este som o espectro diz que as frequências variaram entre 175 e 325 Hz. Esta informação é importante, mas diz muito pouco sobre o que realmente está acontecendo, pois através do espectro não pode saber quando estas frequências existiram. Exemplificando, não se sabe apenas olhando para o espectro se o som de 300 Hz foi feito continuamente ou somente em alguns momentos discretos (alternados).

Através do gráfico tempo x frequência observa-se que no início a frequência estava em torno de 175 Hz e aumentou de forma mais ou menos linear até cerca 325 Hz; essa variação se deu durante 0,5 segundo. Durante 0,1 segundo o som apresentou frequência de 325 Hz, a partir do qual começou a cair.

Portanto, a diferença entre o espectro e a distribuição tempo – frequência é que o primeiro nos permite determinar quais frequências existiram, mas uma análise combinada tempo – frequência nos permite saber quais frequências existiram em um determinado instante.

4.2.9 - A necessidade da análise tempo-frequência

Suponha-se ter as distribuições individuais da altura e do peso de um tipo particular de animal. Estas distribuições individuais dizem tudo o que desejamos saber sobre a distribuição de altura e peso. No entanto, partindo destas distribuições pode-se determinar como a altura e o peso estão relacionados? Pode-se determinar se os indivíduos altos são os mais pesados? A resposta é não. As distribuições individuais de altura e peso não são uma descrição total da situação, pois partindo destas medidas, não é possível saber como as alturas e pesos estão relacionados. É preciso a junção da densidade de altura e peso em uma distribuição conjunta. Da mesma forma, a densidade de energia no tempo e a densidade de energia em frequência não são suficientes sozinhas para descrever totalmente a situação física, pois não descrevem exatamente o que está acontecendo. Em particular, através do espectro sabe-se quais as frequências estavam presentes no sinal, mas não se sabe quando existiram, por esta razão existe a necessidade de estabelecer a distribuição que representa a energia ou a intensidade de um sinal simultaneamente no tempo e frequência. Uma das maneiras de se fazer isso é através do diagrama tempo-frequência.

A variação do espectro no tempo é muito comum no cotidiano. Durante um pôr do sol a composição frequencial da luz (ou seja, sua cor) muda rapidamente. Quando, diz-se que o céu está avermelhado, está se falando em uma descrição tempo-frequência, pois descreve como a frequência está variando no tempo. A altura do som da voz humana muda constantemente quando se fala, o que é ocasionado pela mudança da frequência emitida.

Pode-se pensar na distribuição tempo-frequência como sendo a intensidade ou a concentração de energia em tempos e frequências particulares.

Portanto, uma análise conjunta tempo-frequência ou tempo escala tem por objetivo primário a identificação do conteúdo frequencial instantâneo de um sinal qualquer, isto é que frequências estão presentes a cada instante. Existem diversas abordagens possíveis e, uma das mais difundidas, baseia-se no conceito de projeção ou ângulo entre dois sinais. Em termos mais exatos, uma distribuição conjunta $P_x(t, \omega)$, associada a um sinal genérico $x(s)$, pode ser construída por intermédio da projeção deste último sobre uma família de sinais de análise $q_t, \omega(s)$ bem localizados no instante

t e com frequência característica dada por ω . No espaço dos sinais de energia finita isso pode ser feito através do produto escalar.

4.2.10 - Por que o espectro varia?

Existem muitas causas para a variação do espectro no tempo. Pode-se citar dois grandes mecanismos físicos que abrangem a maioria das situações. A primeira causa é que a produção de frequências particulares depende de parâmetros físicos que também mudam com o tempo. Uma corda de violino, por exemplo, com comprimento e tensão fixos produz uma frequência particular se perturbada. Se o comprimento ou a tensão variam com o tempo, diferentes frequências serão produzidas, porque a corda vibrará aleatoriamente. Quando violinistas tocam, mudam continuamente o comprimento das cordas, assim produzem diferentes frequências.

Um navio deslocando-se com velocidade constante devido à rotação de sua hélice girando com velocidade constante tem-se o som deste produzido em uma frequência igualmente constante. Se o navio acelera, então a hélice muda a razão de rotação, atingindo a água com uma frequência diferente.

Outra causa geradora da variação espectral é a influência do meio no qual as ondas de frequências se propagam.

4.2.11 - A transformada a curto tempo de Fourier

A transformada a curto tempo de Fourier é o método mais simples usado para estudar sinais não estacionários. Suponha o seguinte caso: gravou-se uma hora de determinada música onde no início da gravação sabe-se que houve violinos e no fim tambores. Utilizando a análise de Fourier durante toda a gravação (1 hora), a energia espectral mostra picos nas frequências correspondentes aos violinos e aos tambores, ou seja, ela comprova que houve violinos e tambores durante toda a música, no entanto, não indica quando eles ocorreram. O mais indicado a se fazer é “quebrar” o sinal gravado (a música) em segmentos de cinco minutos e então analisar espectralmente (transformada de Fourier) cada segmento. O exame de cada segmento determinará em quais intervalos de tempo ocorreram às frequências características dos violinos e

tambores. Desejando-se uma melhor localização temporal dessas frequências, pode-se reduzir o intervalo de cinco minutos para, por exemplo, um minuto. Essa é a idéia básica da transformada a curto tempo de Fourier: quebra o sinal em pequenos intervalos de tempo para assim determinar quais as frequências existem em cada intervalo e desse modo ter uma noção de como o espectro varia no tempo.

É importante saber que os intervalos de tempo não podem ser muito curtos. Isso porque, se a faixa temporal for muito estreita, o espectro da faixa torna-se sem significado e não mostra nenhuma relação com o espectro total.

4.2.11.1 - A transformada a curto tempo de Fourier: equações

A análise de sinais no domínio da frequência, baseada apenas nas transformadas de Fourier, nem sempre consegue descrever completamente o que está acontecendo, pois esta mostra as frequências existentes para a duração total do sinal e não aquelas existentes em uma janela de tempo particular. Se o sinal é do tipo periódico durante todo o tempo, análise do espectro em frequência é suficiente para uma boa descrição do seu comportamento. Porém, quando o sinal é composto por várias formas de ondas e seu espectro ocorre em determinadas faixas de tempo se faz necessário obter a sua representação conjunta tempo-frequência.

Para estudar as propriedades do sinal de tempo t , dá-se ênfase ao sinal naquele tempo e oculta-o em outros tempos. Isso é feito multiplicando o sinal por uma função janela $h(t)$ para produzir um sinal modificado do tipo:

$$x_t(\tau) = x(\tau) \cdot h(\tau - t) \quad (4.12)$$

O termo janela vem da idéia de olhar somente uma parte do sinal, da mesma forma que quando se olha através de uma janela real vê-se somente uma porção relativamente pequena do cenário.

Desde que o sinal modificado enfatiza o sinal em torno do tempo t , a transformada de Fourier de $x_t(\tau)$ refletirá a distribuição de frequências em torno daquele tempo (COHEN, 1995) :

$$X_t(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int e^{-j\omega\tau} x(\tau) d\tau \quad (4.13)$$

$$X_t(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int e^{-j\omega\tau} x(\tau) h(\tau - t) d\tau \quad (4.14)$$

A densidade espectral de energia no tempo t é então:

$$P(t, \omega) = |X_t(\omega)|^2 = \left| \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int e^{-j\omega\tau} x(\tau) h(\tau - t) d\tau \right|^2 \quad (4.15)$$

Para cada tempo t diferente, consegue-se uma densidade de energia espectral e a totalidade dessas densidades é a distribuição tempo-frequência $P(t, \omega)$. Transformada a curto tempo de Fourier, transformada de Gabor, transformada de Wavelet e distribuição de Wigner-Ville são formas de se construir a função $P(t, \omega)$. O que distingue cada forma é a função analisante h utilizada. A transformada de Gabor (utilizada neste trabalho para construir o plano tempo-frequência) por exemplo, usa a função gaussiana (distribuição normal) como a função analisante h, ou seja quando a função h for $(e^{-\alpha^2})$ tem-se a transformada de Gabor a partir da equação 4.15.

4.2.12 - Frequência Instantânea

Sinais na natureza são reais. Contudo, frequentemente é vantajoso definir um sinal complexo em algum sentido ou outro correspondente para o sinal real.

Obtém se um sinal complexo, $z(t)$, no qual a parte real é o “sinal real”, $s_r(t)$, e cuja parte imaginária, $s_i(t)$, é nossa escolha, escolhidos para concluir uma percepção física e descrição matemática

$$z(t) = s_r + js_i = A(t)e^{j\phi(t)} \quad (4.16)$$

Se puder fixar a parte imaginária pode-se então definir a amplitude e fase por

$$A(t) = \sqrt{s_r^2 + s_i^2} \quad (4.17)$$

$$\varphi(t) = \arctan \frac{s_r}{s_i} \quad (4.18)$$

as quais dão

$$\omega_i = \varphi'(t) = (s_i' s_r - s_r' s_i) / A^2 \quad (4.19)$$

para a frequência instantânea.

4.2.13 - Bandas de frequência

O analisador espectral possui uma banda de frequência ajustável para fazer o ensaio. Esta banda depende das frequências que se desejam analisar.

Por exemplo, tendo-se um sistema cujas frequências para estudo estão entre 0 e 2000Hz, então a banda de frequência deve ser especificada neste intervalo.

É aconselhável que o *input range settings* no analisador não deva ser maior que duas vezes o maior valor do sinal de entrada, conforme Nyquist.

4.2.14 – Número de pontos de tempo

O analisador espectral permite também escolher o número de pontos de amostragem no tempo. Estes pontos determinarão a precisão dos cálculos, ou seja, quanto maior o número de pontos, maior a precisão dos sinais obtidos.

Estes números de pontos de tempo definem o número de amostragens no intervalo T , cuja frequência de amostragem é $\Delta f = 1/T$.

4.2.15 – Janelas de amostragem

Os tipos de janelas do analisador espectral servem para controlar o tempo de análise e evitar o efeito *Leakage*. Este efeito ocorre quando um sinal periódico no tempo não completa o ciclo durante a amostragem, fornecendo o sinal FRF (função resposta em frequência) indesejável. As figuras 4.17 e 4.18 ilustram este problema.

Figura 4.17 - Fenômeno Leakage.

Figura 4.18 - Representação do fenômeno de Leakage.

Os tipos de janelas mais usadas são: Retangular (a), Hanning (b), Co-seno Taping (c) e Exponencial (d), como mostrado na figura 4.19 a seguir na ordem correspondente.

Figura 4.19 - Tipos de Janelas de amostragem.

A janela Retangular é utilizada apenas para definir o tempo de análise; as janelas Hanning e Co-seno são utilizadas para sinais contínuos (periódicos ou randômicos) e a janela Exponencial é usada para efeitos transientes.

5 - Ensaaios

5.1 - Matriz de testes

O experimento foi montado na rede pneumática de simulações do NETeF, na qual pode-se coletar os dados diretamente no LabVIEW (National Instruments), através do programa de aquisição e condicionamento de sinais. Os ensaios foram realizados em velocidades na faixa de 3 a 10 m/s, sendo as mesmas “ajustadas” em alguns pontos com o auxílio de uma válvula de controle de fluxo; as velocidades médias do fluxo de ar foram medidas com o auxílio de um elemento deprimogênio, denominado placa de orifício, instalado em uma tubulação de diâmetro 50mm, em um trecho com instalação normatizada (figura 4.3). A placa de orifício foi construída de acordo com a norma ASME MFC-3-1989, com as seguintes características:

- diâmetro externo = 50 mm;
- diâmetro do orifício = 35 mm;
- relação entre diâmetros $\beta = 0.7$;
- espessura = 3 mm.

Com o auxílio de um tubo em U com água foi medida a variação da pressão (Delta P) causada pelo elemento deprimogênio, e com o auxílio de um PT100, verificou-se a temperatura do ar. Através da variação da pressão entre a montante e a jusante da placa (Delta P) medida através da placa de orifício e tubo U (vide figura 5.1), verificou-se a velocidade média de escoamento no tubo com diâmetro de 50 mm e, através da norma ASME MFC-3-1989 e equação da continuidade (APÊNDICE A), determinou-se a velocidade média do fluxo no tubo de diâmetro 100 mm.

Figura 5.1 – Representação a) da placa de orifício; b) instalação da placa de orifício e do tubo U para medição da variação da pressão (Delta P).

Com auxílio de uma fonte de alimentação forneceu-se energia para ao funcionamento do sensor. O sinal de saída do sensor passava por um circuito eletrônico, no qual sofreu a eliminação do nível DC; este circuito eletrônico está representado na forma de blocos conforme figura 5.2 e, os esquemas de filtros passa altas e passa baixas estão representados na figura 5.3 a) e b) respectivamente, portanto, no experimento observou-se do apenas a flutuação da tensão do sinal, o que corresponde a flutuação da pressão; além da tela do computador, o sinal também foi observado através de um osciloscópio conforme figura 5.4 . O ganho utilizado no amplificador foi igual a um.

Figura 5.2 – Blocos de representação do circuito eletrônico de eliminação do nível DC.

Figura 5.3 – Representação esquemática de um filtro passa altas a) e um filtro passa baixas b).

Figura 5.4 - Vista da tela do osciloscópio para velocidade $v \approx 10$ m/s.

O sensor de pressão foi instalado a 48 mm do anteparo gerador de vórtice (figura 5.5), e posicionando de maneira a facear a parede do tubo para uma das etapas do experimento. Em uma das etapas a tomada de pressão do sensor foi posicionada faceando a aresta do anteparo; para isto foi utilizado-se um tubo “capilar” com 1,6 mm de diâmetro interno e 3 mm de diâmetro externo como extensão do sensor, as figuras 5.5, 5.6, 5.7 e 5.8 representam os arranjos para realização dos experimentos.

A tabela 2 resume a descrição e metodologia utilizada em cada etapa do experimento, sendo D o diâmetro interno do tubo, no caso 100 mm.

Tabela 2 – Metodologia dos experimentos

Etapa	Descrição	Metodologia
1 ^a	Verificação do(s) ruído(s) proveniente da rede elétrica e ou quaisquer outros elementos do sistema.	Coleta de dados com o sensor de pressão desligado, ou seja, sem energia e coleta de dados com energia.
2 ^a	Verificação da influência do anteparo .	Coleta de dados realizada posicionando o sensor de pressão antes do anteparo (figura 5.5) realizando a medição sem e com o anteparo.
3 ^a	Verificação da formação dos vórtices.	Coleta de dados com o sistema de anteparo e sensor de pressão localizado a 15D, realizando a amostragem de dados com 4096 e 16384 pontos.
4 ^a	Verificação da influência do comprimento do tubo na coleta de dados.	Coleta de dados com o sistema de anteparo e sensor de pressão localizado a 75D.
5 ^a	Verificação da influência do posicionamento do sensor.	Utilizando um sistema de prolongamento da haste do sensor, de forma que o mesmo fique no centro do tubo faceando a aresta do anteparo. Comparar os valores coletados com os valores do sensor posicionado na parede do tubo (figura 5.7).

As coletas de dados das etapas 3 e 4 foram realizadas para uma faixa de velocidade média de 3 a 10 m/s.

Figura 5.5 - Arranjo para medição da pressão antes do anteparo.

5.2 – Resultados

5.2.1 - Condições experimentais do ensaio

- temperatura ambiente: 22,5°C
- altura barométrica da atmosfera: 699 mmHg

Propriedades do ar:

- temperatura: 26°C
- massa específica: 1,19 Kg/m³
- viscosidade dinâmica: 0,0000184 Ns/m²

A temperatura do ar refere-se a temperatura do fluxo de ar, sendo a mesma medida através de um PT100, e com o auxílio de um tubo em U para medição da variação da pressão na placa de orifício (figura 5.1) e a planilha de cálculo exemplificada no Apêndice A, determinou-se a velocidade média do perfil de escoamento 10 m/s, e obteve-se o resultado representado na figura a seguir:

Figura 5.10 - Tela do LabVIEW para a velocidade média de 10 m/s.

Figura 5.11 – Figura representativa do SINAL, ESPECTRO E DIAGRAMA TEMPO-FREQÜÊNCIA.

5.2.2 - Primeira Etapa: ruído do sistema de aquisição

Amostragem de dados do ruído do sistema com o sensor de pressão desenergizado e energizado.

Todas as figuras em detalhe representam a Amplitude da FFT do sinal *versus* Frequência.

Figura 5.12 - Ruído da rede elétrica: a) geral; b) detalhe.

Conforme figura 5.12, se observa ruídos na rede elétrica à aproximadamente 60Hz, 104Hz e 210Hz.

Figura 5.13 - Ruído da rede com o sensor energizado: a) geral; b)detalhe.

5.2.3 - Segunda Etapa: medição sem o anteparo e com sensor posicionado antes do anteparo

Todas as figuras a seguir representam o Sinal (Amplitude *versus* Tempo), o Espectro do Sinal (Amplitude da FFT *versus* Frequência) , Diagrama Tempo-Frequência e as figuras em detalhe representam a Amplitude do sinal *versus* Frequência dos experimentos para velocidade média (v) do fluxo de 10,15m/s, sendo a primeira coleta de dados realizada sem o anteparo e a segunda coleta com o anteparo conforme montagem representada na figura 5.5.

Figura 5.14 - Experimento sem o anteparo, $v=10,15$ m/s: a) geral ; b) detalhe.

Figura 5.15 - Experimento com sensor antes do anteparo, $v=10,15$ m/s: a) geral; b) detalhe.

Na coleta de dados com o anteparo pode-se observar um espectro de frequência bem variável.

5.2.4 -Terceira Etapa: anteparo e sensor a uma distância de 15D

A primeira parte do experimento da terceira etapa foi realizada com o tubo e o anteparo próximo distância de 15D, sendo D o diâmetro do tubo de PVC, ou seja, $D=100$ mm, para realizar a variação da velocidade utilizou-se à abertura de uma válvula de tal maneira que o fluxo de ar sofresse variação. As amostragens de dados foram realizadas com 4096 (2^{12}) e 16384 (2^{14}) pontos.

Tabela 3 – Valores experimentais da terceira etapa

Experimento n°.	Velocidade média do fluxo de ar no tubo de 100 mm de diâmetro (m/s)
1	3,23
2	3,72
3	4,20
4	4,94
5	5,92
6	7,63
7	8,93
8	9,76
9	9,99
10	10,15

A seguir, estão representadas algumas figuras gerais do sinal, do espectro da frequência, diagrama tempo-frequência e de detalhe da Amplitude da FFT *versus* Frequência, obtidas durante o experimento com o anteparo posicionado a uma distância denominada 15D e o sensor a 48mm do anteparo conforme figura 5.6 e montado conforme figura 4.5.

Figura 5.16 - Velocidade média de 3,23 m/s para 4096 pontos de amostragem:
a) geral; b) detalhe.

Figura 5.17 - Velocidade média de 3,23 m/s para 16384 pontos de amostragem:
a) geral; b) detalhe.

*Figura 5.18 - Velocidade média de 3,72 m/s para 4096 pontos de amostragem:
a) geral; b) detalhe.*

*Figura 5.19 - Velocidade média de 3,72 m/s para 16384 pontos de amostragem :
a) geral ; b) detalhe.*

Figura 5.20 - Velocidade média de 4,20 m/s para 4096 pontos de amostragem :

a) geral; b) detalhe.

Figura 5.21 - Velocidade média de 4,20 m/s para 16384 pontos de amostragem:

a) geral; b) detalhe.

Figura 5.22 - Velocidade média de 4,94 m/s para 4096 pontos de amostragem :
a) geral; b) detalhe.

Figura 5.23 - Velocidade média de 4,94 m/s para 16384 pontos de amostragem :
a) geral; b) detalhe.

Figura 5.24 - Velocidade média de 5,92 m/s para 4096 pontos de amostragem :
a) geral; b) detalhe; c) detalhe.

Figura 5.25 - Velocidade média de 5,92 m/s para 16384 pontos de amostragem :
a) geral ; b) detalhe.

Figura 5.26 - Velocidade média de 7,63 m/s para 4096 pontos de amostragem:
a) geral; b) detalhe.

Figura 5.27 - Velocidade média de 7,63 m/s para 16384 pontos de amostragem:
a) geral ; b) detalhe.

Figura 5.28 - Velocidade média de 8,93 m/s para 4096 pontos de amostragem :
a) geral; b) detalhe.

Figura 5.29 - Velocidade média de 8,93 m/s para 16384 pontos de amostragem :
a) geral; b) detalhe.

Figura 5.30 - Velocidade média de 9,76m/s para 4096 pontos de amostragem:
a) geral; b) detalhe.

Figura 5.31 - Velocidade média de 9,76 m/s para 16384 pontos de amostragem:
a) geral ; b) detalhe.

Figura 5.32 - Velocidade média de 9,99 m/s para 4096 pontos de amostragem :
a) geral; b) detalhe.

Figura 5.33 - Velocidade média de 9,99 m/s para 16384 pontos de amostragem:
a) geral ; b) detalhe.

Figura 5.34 - Velocidade média de 10,15 m/s para 4096 pontos de amostragem:
a) geral ; b) detalhe.

Figura 5.35 - Velocidade média de 10,15 m/s para 4096 pontos de amostragem:
a) e b) detalhe.

Figura 5.36 - Velocidade média de 10,15 m/s para 16384 pontos de amostragem:
a) geral ; b) detalhe.

5.2.5 - Quarta Etapa: coleta de dados a 75D

Coleta de dados para o anteparo posicionando a uma distância de 75D e sensor posicionado a 48 mm do anteparo conforme figura 5.6 e montado conforme figura 4.6.

Tabela 4 – Valores experimentais da quarta etapa

Experimento nº	Velocidade média do fluxo de ar no tubo de 100 mm de diâmetro (m/s)
1	3,88
2	4,34
3	4,97
4	5,51
5	6,45
6	7,05
7	7,35
8	8,56
9	9,48
10	9,92
11	10,41

Conforme observado nos experimentos da terceira etapa, o número de pontos de amostragem não teve uma influência significativa nos resultados. A seguir, serão apenas representadas as figuras dos ensaios realizados com 4096 pontos de amostragem. Sendo representados: Sinal (Amplitude *versus* Tempo), o Espectro do Sinal (Amplitude da FFT *versus* Frequência), Diagrama Tempo-Frequência e as figuras em detalhe a Amplitude do sinal *versus* Frequência dos experimentos para o sensor a 75D.

Figura 5.37 - Velocidade média de 3,88 m/s: a) geral ; b) detalhe.

Figura 5.38 - Velocidade média de 4,97 m/s : a) geral ; b) e c) detalhe.

Figura 5.39 - Velocidade média de 5,51 m/s(obs. 16384 pontos de coleta) :
a) geral ; b) detalhe.

Figura 5.40 - Velocidade média de 5,51 m/s - detalhe: a) geral ; b) detalhe.

Figura 5.41 - Velocidade média de 6,45 m/s: a) geral ; b) detalhe.

Figura 5.42 - Velocidade média de 7,05 m/s : a) geral ; b) detalhe.

Figura 5.43 - Velocidade média de 7,05 m/s - detalhe: a) geral ; b) detalhe.

Figura 5.44 - Velocidade média de 7,35m/s: a) geral ; b) detalhe.

Figura 5.45 - Velocidade média de 8,56m/s: a) geral ; b) e c) detalhe.

Figura 5.46 - Velocidade média de 9,48 m/s: a) geral ; b) detalhe.

Figura 5.47 - Velocidade média de 9,92 m/s: a) geral ; b) detalhe.

Figura 5.48 - Velocidade média de 10,41 m/s (observação: 16384 pontos de coleta) :
a) geral ; b) detalhe.

5.2.6 - Quinta Etapa: anteparo a 75D, sensor com prolongamento

A montagem desta etapa foi realizada de maneira que a coleta de sinal seja obtida no centro do tubo conforme figura 5.7 e montado conforme figura 4.6.

Tabela 5 – Valores experimentais da quinta etapa

Experimento nº	Velocidade média do fluxo de ar no tubo de 100 mm de diâmetro (m/s)
1	6,37
2	7,83
3	8,28
4	8,68
5	9,41

As figuras dos resultados dos experimentos com o sensor no centro do tubo e, com uma amostragem de 4096 pontos estão representadas a seguir.

Figura 5.49 - Velocidade média de 6,37 m/s : a) geral ; b) detalhe.

Figura 5.50 - Velocidade média de 7,83 m/s : a) geral ; b) detalhe.

Figura 5.51 - Velocidade média de 8,28 m/s: a) geral ; b) detalhe.

Figura 5.52 - Velocidade média de 8,68 m/s: a) geral ; b) detalhe.

Figura 5.53 - Velocidade média de 9,41 m/s: a) geral ; b) detalhe.

Como efeito comparativo, realizou-se o experimento com o prolongamento sensor, sem anteparo para o tubo prolongado 75D (figura 5.7).

Figura 5.54 - Sem anteparo para velocidade de 9,41 m/s : a) geral ; b) detalhe.

Considerando resultados na coleta de dados, e objetivando a ilustração, foram plotados alguns gráficos que estão no apêndice e, elaborados as tabelas de resumo das principais características obtidas no experimento, sendo estas:

- velocidade média do fluxo (v)
- frequência (f)
- sensibilidade (f/v)
- fator K ($K = f/Q$)
- amplitude da FFT
- número de Reynolds (Re)
- número de Strouhal (St)

Devido à amplitude do sinal ser muito baixa, ou o valor da frequência não estar bem definido em alguns gráficos optou-se pela não indicação do valor nas tabelas, porém, isto não tem influência significativa nos valores médios obtidos; e como para valores de velocidades médias inferiores a 5 m/s, a amplitude do ruído de 60 Hz é superior a amplitude do sinal referente à frequência de desprendimento do vórtice, tomou-se com referência o segundo maior pico para velocidade de escoamento compreendida na faixa entre 3,3 e 5 m/s.

Tabela 6 – Valores obtidos para experimento montado conforme figura 4.5, com sensor posicionado a 15D e com 4096 pontos de amostragem.

Sensor a 15D e 4096 pontos de amostragem						
Velocidade média [v] (m/s)	Frequência [f] (Hz)	f/v (Hz/m/s)	Amplitude da FFT (volts)	K (pulso/m3)	Reynolds [Re]	Strouhal [St]
3,23	-	-	-	-	20.514	-
3,72	29,3	7,9	3,00E-06	1039,836	23.626	0,189
4,20	33,3	7,9	6,00E-06	1045,716	26.674	0,190
4,94	40,3	8,2	1,30E-05	1076,671	31.374	0,196
5,92	48,8	8,3	2,30E-05	1089,017	37.598	0,198
7,63	58,6	7,7	1,43E-04	1013,942	48.458	0,184
8,93	73,9	8,3	1,19E-04	1091,944	56.714	0,198
9,76	80,9	8,3	2,13E-04	1094,038	61.986	0,199
9,99	83,3	8,3	1,67E-04	1101,118	63.446	0,200
10,15	85,5	8,4	2,96E-04	1111,548	64.462	0,202
Valor médio		8,1		1073,759		0,195

Tabela 7 – Valores obtidos para experimento montado conforme figura 4.5, sensor posicionado a 15D e com 16384 pontos de amostragem.

Sensor a 15D e 16384 pontos de amostragem						
Velocidade média [v] (m/s)	Frequência [f] (Hz)	f/v (Hz/m/s)	Amplitude da FFT (volts)	K (pulso/m3)	Reynolds [Re]	Strouhal [St]
3,23	26,9	8,3	-	1097,784	20.514	0,200
3,72	29,7	8,0	2,00E-06	1053,700	23.626	0,192
4,20	33,0	7,9	5,00E-06	1036,122	26.674	0,188
4,94	40,3	8,2	6,00E-06	1076,671	31.374	0,196
5,92	48,8	8,3	2,30E-05	1088,883	37.598	0,198
7,63	58,6	7,7	8,00E-05	1013,941	48.458	0,184
8,93	74,5	8,3	1,36E-04	1100,968	56.714	0,200
9,76	80,6	8,3	1,67E-04	1089,909	61.986	0,198
9,99	83,0	8,3	2,01E-04	1097,083	63.446	0,199
10,15	85,5	8,4	1,07E-04	1111,548	64.462	0,202
Valor médio		8,2		1076,661		0,196

Tabela 8 – Valores obtidos para experimento montado conforme figura 4.6, sensor posicionado a 75D e com 4096 pontos de amostragem.

Sensor a 75D e 4096 pontos						
Velocidade média [v] (m/s)	Frequência [f] (Hz)	f/v (Hz/m/s)	Amplitude da FFT (volts)	K (pulso/m3)	Reynolds [Re]	Strouhal [St]
3,88	30,5	7,9	-	1038,495	24.642	0,189
4,97	40,3	8,1	-	1070,172	31.564	0,195
5,51	-	-	-	-	34.994	-
5,86	47,6	8,1	8,00E-06	1072,663	37.217	0,195
6,45	52,5	8,1	4,20E-05	1074,496	40.964	0,195
7,05	57,4	8,1	1,06E-04	1074,496	44.774	0,195
7,35	59,8	8,1	-	1074,4962	46.680	0,195
8,56	70,8	8,3	1,05E-04	1092,070	54.364	0,199
9,48	79,4	8,4	3,17E-04	1105,103	60.207	0,201
9,92	83,0	8,4	3,49E-04	1104,825	63.002	0,201
10,41					66.114	
Valor médio		8,1		1085,450		0,194

Tabela 9 – Valores obtidos para experimento montado conforme figura 4.6, sensor posicionado a 75D e com 16384 pontos de amostragem.

Sensor a 75D e 16384 pontos						
Velocidade média [v] (m/s)	Frequência [f] (Hz)	f/v (Hz/m/s)	Amplitude da FFT (volts)	K (pulso/m3)	Reynolds [Re]	Strouhal [St]
3,88	30,5	7,9	-	1038,496	24.642	0,189
4,97	40,0	8,0	-	1062,066	31.564	0,193
5,51	44,6	8,1	1,10E-05	1067,672	34.994	0,194
5,86	47,3	8,1	1,20E-05	1065,787	37.217	0,194
6,45	52,5	8,1	1,70E-05	1074,497	40.964	0,195
7,05	57,4	8,1	3,10E-05	1074,497	44.774	0,195
7,35	59,8	8,1	4,30E-05	1074,497	46.680	0,195
8,56	71,1	8,3	1,25E-04	1096,778	54.364	0,199
9,48	79,4	8,4	1,46E-04	1105,100	60.207	0,201
9,92	83,0	8,4	2,08E-04	1104,825	63.002	0,201
10,41	88,2	8,5	1,69E-04	1118,623	66.114	0,203
Valor médio		8,2		1080,258		0,196

Tabela 10 – Valores obtidos para experimento montado conforme figura 5.7, sensor posicionado a 75D e com prolongamento de maneira a facear a aresta do anteparo.

Sensor a 75D e com prolongamento						
Velocidade média [v] (m/s)	Frequência [f] (Hz)	f/v (Hz/m/s)	Amplitude da FFT (volts)	K (pulso/m ³)	Reynolds [Re]	Strouhal [St]
6,37	51,3	8,0	1,21E-03	1062,7	40.456	0,193
7,82	64,7	8,3	1,49E-03	1092,4	49.665	0,199
8,28	68,4	8,3	1,42E-03	1090,1	52.586	0,198
8,68	74,5	8,6	2,56E-03	1132,7	55.126	0,206
9,41	78,1	8,3	5,13E-03	1096,2	59.763	0,199
Valor médio		8,3		1094,8		0,199

Com base nos dados das tabelas 6 a 9, plotou-se os gráficos a seguir.

Figura 5.55 - Comparativo do Strouhal x Reynolds para os posicionamentos do sensor e anteparo.

Figura 5.56 - Comparativo da Amplitude da FFT x Reynolds para o posicionamento do sensor e anteparo.

Figura 5.57 - Comparativo da Amplitude da FFT x Frequência para o posicionamento do sensor e anteparo.

5.3 - Comentários dos resultados experimentais

Com base nos dados coletados obteve-se:

- uma sensibilidade média (f/v) de 8,2 Hz/m/s
- Strouhal médio : 0,196 ; desvio padrão : 0,002
- Fator K : 1083,2 pulsos/m³

Figura 5.58 - Comparativo entre a Frequência x Velocidade considerando a sensibilidade média ($f=8,17v$) e os dados experimentais.

6 - Conclusões e sugestões

A geração da esteira de vórtices de von Kármán é um processo relativamente complicado. Independentemente do comportamento determinístico, fenômenos randômicos são observados. A complexidade do problema é a principal dificuldade devido ao fenômeno ser muito sensível aos parâmetros geométricos do anteparo gerador de vórtices e ao tubo. Portanto, há a necessidade de reconhecimento do fenômeno pela aplicação de vários métodos de pesquisa.

No experimento realizado, testou-se apenas uma geometria de anteparo e pode-se observar que o sistema de medição era suficientemente sensível, devido a observação da influência do ruído do escoamento de ar pelo tubo na coleta dos sinais, esta influência foi observada principalmente no ensaio sem o anteparo. Pode-se observar a pequena interferência do ruído da rede elétrica, esta interferência é predominante para velocidades abaixo de 3m/s. Apesar das influências citadas, através da análise de sinais utilizando a transformada de Gabor, a qual é um caso especial da transformada de Fourier a curto termo, pode-se observar um sinal mais intenso na frequência dos vórtices para as velocidades de escoamento, podendo-se comprovar que o número de Strouhal é quase constante e independente do número de Reynolds, devendo-se ressaltar que esta afirmação é válida somente para o número de Reynolds entre $3000 < Re < 100000$. Foi detectado no experimento um fator de sensibilidade (f/v) de 8,2 Hz/m/s, um número de Strouhal médio de 0,196 e um fator K de 1083,2 pulsos/m³, sendo estes valores bem próximos aos citados pelas literaturas.

Para trabalhos futuros, tem-se as seguintes sugestões:

- experimentar novas geometrias de anteparos com objetivo de verificar a influência na formação dos vórtices, sendo uma das geometrias recomendadas a do tipo *end plate*, ou seja um corpo triangular com extremidade reta (vide anexo D)

- estudar o problema da localização do sensor, pois os vórtices podem ser detectados em vários pontos. Na prática a localização pode ser dividida em três categorias: dentro do anteparo, na parede do tubo e separado do anteparo, sendo que o sensor deve ser posicionado em um ponto de vórtices e regulares
- estudar da detecção da força de sustentação, denominada de *lift*, ou seja a força periódica que ocorre na direção perpendicular ao fluxo de escoamento observando também a correlação entre a frequência da força com a frequência de desprendimento dos vórtices e a velocidade do fluxo
- estudar influência da vibração da tubulação no sistema de aquisição constituído do anteparo e sensor
- comparar o sinal adquirido por um sensor de pressão e um sensor de ultra-som, para análise da questão modulação do sinal referente a amplitude e fase e, a análise da formação dos vórtices secundários e sua detecção com os dois tipos de sensores
- estudar o fenômeno de formação e detecção de vórtices, utilizando a técnica da Covariância da distribuição tempo-frequência , referente a análise de sinais, para se observar quanto a frequência instantânea e o tempo estão correlacionados, sendo que, se a frequência não variar no tempo, a covariância será nula e quando maior o grau de não estacionaridade de um sinal, mais a frequência varia com o tempo, e portanto, maior a covariância
- estudar o comportamento de outros métodos/equipamentos de detecção tais como : termistores, fio quente (*hot-wire*), ultra-som
- estudar o período da estabilidade do sinal dos vórtices
- estudo do sensor na performance do medidor de vazão referente a qualidade e estabilidade do sinal
- estudar a resistência a vazão/perda de carga gerada pelo anteparo
- estudar a incerteza no medidor de vazão tipo vórtice e sua influência no fator K (razão entre o número de pulsos e a vazão volumétrica) do medidor.

Referências Bibliográficas

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS (1989). *Measurement of Fluid Flow in Pipes Using Orifice, Nozzle and Venturi*. ASME MFC-3M-1989.

BENTLEY, J. P. (1995). *Principles of Measurement Systems*. 3rd Edition. Ed. Longman Scientific & Technical.

BENTLEY, J. P.; BENSON, R.A.; SHANKS, A.J. (1996). *The development of dual bluff body vortex flowmeters*. Flow Measurement Instruments., Vol.7, No. 2, p. 85-90.

BOURAS, C.; COMOLET, R. (1985). *Influence de quelques paramètres géométriques sur un débitmètre à effet vortex*. J. Phys. E. Sci. Instrum. ,Vol. 18, p.941-943.

BRIGHAM, E. O. (1988). *The fast Fourier transform and its applications*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall.

COHEN, L. (1995). *Time-frequency analysis*. New Jersey, Prentice Hall.

DELMEE, G. J. (2003). *Manual de medição de vazão*. São Paulo. Edgard Blücher Ltda..

Freescale™ Semiconductor – Technical Data – Integrated Silicon Pressure Sensor On-chip Signal Conditioned, Temperature Compensated and Calibrated – MPXV5004 SERIES, rev06 (2004) . Disponível em: <http://www.freescale.com>.

HANS, V. ; Poppen, G.; von LAVANTE, E.; PERPEET, S. (1998). *Vortex shedding flow meters and ultrasound detection : signal processing and influence of bluff body geometry* . Flow Measurement and Instrumentation 9. p.79-82.

HANS, V.; WINDORFER, H. (2003). *Comparison of pressure and ultrasound measurements in vortex flow meters*. Measurement 33. p.121-133.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (2003). *Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full - Part 1 : General principles and requirements* . ISO 5167-1.

ISMAIL, K. A. R.; GONÇALVES, M. M.; BENEVENUTO F. J. (1998). *Instrumentação Básica para Engenharia*. Campinas, Ed. do autor.

KLEIN, F.L (1999). *Caracterização Tempo-Frequência de regimes de escoamento bifásico*; 74p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 1999.

MATTAR, W.M.; VIGNOS, J.H. (1999). *Flow Measurement – Vortex Shedding Flowmeter*.

MILLER, R. W. (1996). *Flow Measurement Engineering Handbook*, 3rd Edition, McGraw Hill

PANKANIN, G. L. (2005). *The vortex flow meter : various methods of investigating phenomena* – Measurement Science and Technology 16 R1-R16.

PENG, J.; FU X.; CHEN, Y. (2004). *Flow measurement by a new type vortex flow meter of dual triangulate bluff body* – Sensors and Actuators A 115 p.53-59.

SELEGHIM, P. Jr. (2002). *Criação de uma linha de pesquisa em escoamentos multifásicos*, 133p., Texto de sistematização de carreira relativo ao concurso de Livre-Docente junto ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos. 2002.

SOCKEL, H. (1994). *Wind-Excited Vibrations of Structures*. International Centre For Mechanical Sciences – Courses And Lectures, Nº 335. , Vienna: Springer – Verlog

SOUZA, L.V. (1999). *Análise do comportamento hidrodinâmico de um leito fluidizado borbulhante no plano Tempo-Frequência*; 72p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 1999.

XU, G.; ZHOU, Y. (2004). *Strouhal numbers in the wake of two inline cylinders*. Experiments in Fluids 37 p. 248-256.

YAMASAKI, H.; RUBIN M. (1974). *The Vortex Flowmeter* ,FLOW Its Measurement and Control in Science and Industry. Instrument Society of America, volume one . p. 75-983.

YOKOGAWA (2001) – Technical Information – Model DY Vortex Flow meter
TI01F06A00-01E; YOKOGAWA ELECTRIC CORPORATION; 1st Edition ,
May 2001. Disponível em: <http://www.yokogawa.com>

APÊNDICES

APÊNDICE A – Cálculo da velocidade média conforme norma ASME MFC-3-1989 e a equação da continuidade.

Placa de Orifício ASME MFC-3-1989

Parâmetros medidos

LLL1 altura manométrica (água) da tomada a montante (upstream)	4,6300E-01 m
LLL2 altura manométrica (água) da tomada a jusante (downstream)	1,1740E+00 m
LLL altura manométrica da atmosfera	9,0500E-01 m
D diâmetro do tubo	5,0000E-02 m
ddd diâmetro do orifício da placa	3,5000E-02 m
hatm altura barométrica (mercúrio) da atmosfera	6,99E-01 m
Tatm temperatura da atmosfera	22,50 °C

Parâmetros tabelados

g aceleração da gravidade	9,81 m/s ²
R constante de gas perfeito do ar	287,00 J/kg K
dag densidade da água	1000 kg/m ³
dmerc densidade do mercúrio	13560 kg/m ³
k razão de calores específicos do ar	1,4

Parâmetros calculados

DLLL diferença de nível do tubo em U	0,711 m
A área da seção transversal do tubo	0,001963495 m ²
patm pressão atmosférica	92916,9846 Pa
Dppp diferença de pressão	6974,91 Pa
ppp1 pressão absoluta na tomada a montante	97253,0046 Pa
ppp2 pressão absoluta na tomada a jusante	90278,0946 Pa
ppp2/ppp1 razão das pressões da placa > 0,75	0,928280776
BBB razão de diâmetros	0,7
dens1 densidade do ar à montante da placa	1,146154721 kg/m ²
dens2 densidade do ar à jusante da placa	1,063953394 kg/m ³
u viscosidade absoluta do ar u = u (Tatm) (interpolação pela eq. de Sutherland entre 2 pontos conhecidos de u(T))	1,82747E-05 N s/m ²

Coefficiente de expansão a jusante

Cexp2 1,01164358

Coefficiente de descarga arbitrado

Cdes1 0,60531676

Coefficiente de descarga calculado

Cdes2 0,60607612

Vazão mássica

qm 0,08233862 kg/s

258,620431 M3/h

diferença entre os coeficientes de descargas

-0,000759364

Número de Reynolds 2000<Rd<100*10^6

Rd 114734,452

velocidade média

sem erros 36,58730664 m/s

com erro + 36,96210271 m/s

com erro - 36,21422941 m/s

Estimativa de erro da velocidade média

erro de Cdes conforme a norma ASME

erCdes 0,00423722

erro de Cexp conforme a norma ASME

erCexp 0,00290217

erro de leitura no manômetro de coluna d'água

erDLLL 5,00E-04 m

	Variação total		derivadas parciais		
Vm	36,5873066	36,58730664	36,58730664	36,58730664	36,58730664
Vm(1+e)	36,9621027	36,21422941	36,58734323	36,58734323	36,58732493
	DVm _{max}	DVm _{min}	dVm/dCdes	dVm/dCexp	dVm/dDLL
	0,37479607	-0,37307723	73,78037844	44,14647628	31,40682091 analítico
			60,44324112	36,16620254	25,72946376 numérico

estimativa do erro a partir das derivadas

erVm ≈ ± DVm ≈ ± 0,45644756 m/s

erro percentual 0,012475571

Equação conservação da massa para determinação da velocidade média no tubo de 100 mm

D1 0,098 m V tubo 100mm 9,5240 m/s

APÊNDICE B – Gráfico para coleta de dados com anteparo e sensor a 15D, com 4096 pontos e velocidade média de 3,23m/s.

APÊNDICE C – Gráfico para coleta de dados com anteparo e sensor a 15D, com 4096 pontos e velocidade média de 3,72m/s.

APÊNDICE D – Gráfico para coleta de dados com anteparo e sensor a 15D, com 4096 pontos e velocidade média de 4,20m/s.

APÊNDICE E – Gráfico para coleta de dados com anteparo e sensor a 15D, com 4096 pontos e velocidade média de 4,94m/s.

APÊNDICE F – Gráfico para coleta de dados com anteparo e sensor a 15D, com 4096 pontos e velocidade média de 5,92m/s.

APÊNDICE G – Gráfico para coleta de dados com anteparo e sensor a 15D, com 4096 pontos e velocidade média de 7,63m/s.

APÊNDICE H – Gráfico para coleta de dados com anteparo e sensor a 15D, com 4096 pontos e velocidade média de 8,93m/s.

APÊNDICE I – Gráfico para coleta de dados com anteparo e sensor a 15D, com 4096 pontos e velocidade média de 9,76m/s.

APÊNDICE J – Gráfico para coleta de dados com anteparo e sensor a 15D, com 4096 pontos e velocidade média de 9,99m/s.

APÊNDICE K – Gráfico para coleta de dados com anteparo e sensor a 15D, com 4096 pontos e velocidade média de 10,15m/s.

De maneira análoga elaborou-se os outros gráficos para auxiliar na observação e amostragem dos dados.

APÊNDICE L – Gráfico para coleta de dados com anteparo e sensor a 15D, com 4096 pontos para as varias velocidades média.

APÊNDICE M – Referências Bibliografias sugeridas para trabalhos futuros

AHLBORN, B.; SETO, M. L.; NOACK, B. R. (2002). *On drag, Strouhal number and vortex-street structure*. Fluid Dynamics Research 30 p.379-399.

BERA, S.C.; RAY, J.K.; CHATTOPADHYAY, S. (2004). *A modified inductive pick-up type technique of measurement in a vortex flowmeter*. Measurement 35 p. 9-24.

BOURAS, C. ; COMOLET, R. (1983). *Débitmètre et volumétrie à effet vortex en écoulement permanent ou non permanent*. J. Phys. E. Sci. Instrum. ,Vol. 16, p. 1116-1123.

BURESTI, G.; LOMBARDI, G.; BELLAZZINI, J. (2004) *On the analysis of fluctuating velocity signals through methods based on the wavelet and Hilbert transforms*. Chaos, Solitons and Fractals 20 p.149-158.

GHAOUD, T.; CLARKE D.W. (2002). *Modelling and tracking a vortex flow-meter signal*. Flow Measurement and Instrumentation 13 p.103-117.

HUANG, Z.; OLSON, J.A.; KEREKES, R.J.; GREEN, S.I. (2005) *Numerical simulation of the flow around rows of cylinders* – Computers & Fluids 35 p.463-544

JAN, Y. J.; SHEU, T. W.H. (2004). *A numerical confirmation of the dual body vortex flowmeter design*. Computers & Fluids 33 p.1157-1174.

KAHAWITA, R.; WANG, P. (2002). *Numerical simulation of the wake flow behind trapezoidal bluff bodies* – Computers & Fluids 31 p.99-112.

LAM, K.; LI, J.Y.; SO, R.M.C. (2003) *Force coefficients and Strouhal numbers of four cylinders in cross flow* - Journal of Fluids and Structures 18 p. 305-324.

- MATSUMOTO M. (1999) *Vortex shedding of bluff bodies a review* - Journal of Fluids and Structures 13 p.791-811.
- MIAU, J. J.; YEH, C.F.; HU, C. C.; CHOU J.H. (2005) *On measurement uncertainty of a vortex flowmeter* – Flow Measurement and Instrumentation 16 p.397-404.
- SKWAREK,V.; WINDORFER, H.; HANS, V. (2001). *Measuring pulsating flow with ultrasound*. Measurement 29 p.225-236.
- WEI, C.Y.; CHANG, J.R. (2002). *Wake and base-bleed flow downstream of bluff bodies with different geometry*. Experimental Thermal and Fluid Science 26 p.39-52.
- YU, D.; KAREEM, A. (1996). *Two-dimensional simulation of flow around rectangular prisms*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 62 p.131-161.

ANEXO A – Características técnicas do Sensor de Pressão.

Freescale Semiconductor
Technical Data

MPXV5004G
Rev. 6, 10/2004

Integrated Silicon Pressure Sensor On-Chip Signal Conditioned, Temperature Compensated and Calibrated

The MPXV5004G series piezoresistive transducer is a state-of-the-art monolithic silicon pressure sensor designed for a wide range of applications, but particularly those employing a microcontroller or microprocessor with A/D inputs. This sensor combines a highly sensitive implanted strain gauge with advanced micromachining techniques, thin-film metallization, and bipolar processing to provide an accurate, high level analog output signal that is proportional to the applied pressure.

Features

- Temperature Compensated over 10° to 60°C
- Available in Gauge Surface Mount (SMT) or Through-hole (DIP) Configurations
- Durable Thermoplastic (PPS) Package

Application Examples

- Washing Machine Water Level
- Ideally Suited for Microprocessor or Microcontroller-Based Systems

Figure 1. Fully Integrated Pressure Sensor Schematic

MPXV5004G SERIES

INTEGRATED
PRESSURE SENSOR
0 to 3.92 kPa
(0 to 400 mm H₂O)
1.0 to 4.9 V OUTPUT

SMALL OUTLINE PACKAGE SURFACE MOUNT

MPXV5004G6U
CASE 482

MPXV5004GC6U
CASE 482A

MPXV5004GP
CASE 1369

MPXV5004DP
CASE 1351

MPXV5004GVP
CASE 1368

SMALL OUTLINE PACKAGE THROUGH-HOLE

MPXV5004G7U
CASE 482C

MPXV5004G7U
CASE 482B

PIN NUMBER

1	N/C	5	N/C
2	V _S	6	N/C
3	Gnd	7	N/C
4	V _{out}	8	N/C

NOTE: Pins 1, 5, 6, 7, and 8 are internal device connections. Do not connect to external circuitry or ground. Pin 1 is noted by the notch in the lead.

ANEXO B – Características técnicas do Sensor de Pressão

MAXIMUM RATINGS(NOTE)

Parameter	Symbol	Value	Unit
Maximum Pressure (P1 > P2)	P_{max}	16	kPa
Storage Temperature	T_{stg}	-30 to +100	°C
Operating Temperature	T_A	0 to +85	°C

NOTE: Exposure beyond the specified limits may cause permanent damage or degradation to the device.

OPERATING CHARACTERISTICS ($V_S = 5.0$ Vdc, $T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted, P1 > P2. Decoupling circuit shown in Figure 3 required to meet electrical specifications)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Pressure Range	P_{OP}	0	—	3.92 400	kPa mm H ₂ O
Supply Voltage ⁽¹⁾	V_S	4.75	5.0	5.25	Vdc
Supply Current	I_S	—	—	10	mAdc
Span at 306 mm H ₂ O (3 kPa) ⁽²⁾	V_{RSS}	—	3.0	—	V
Offset ⁽³⁾⁽⁴⁾	V_{off}	0.75	1.00	1.25	V
Sensitivity	V/P	—	1.0 9.8	—	V/kPa mV/mm H ₂ O
Accuracy ⁽⁴⁾⁽⁵⁾					
0 to 100 mm H ₂ O (10 to 60°C)	—	—	—	±1.5	% V_{RSS}
100 to 400 mm H ₂ O (10 to 60°C)	—	—	—	±2.5	% V_{RSS}

NOTES:

- Device is ratiometric within this specified excitation range.
- Span is defined as the algebraic difference between the output voltage at specified pressure and the output voltage at the minimum rated pressure.
- Offset (V_{off}) is defined as the output voltage at the minimum rated pressure.
- Accuracy (error budget) consists of the following:
 - Linearity: Output deviation from a straight line relationship with pressure over the specified pressure range.
 - Temperature Hysteresis: Output deviation at any temperature within the operating temperature range, after the temperature is cycled to and from the minimum or maximum operating temperature points, with zero differential pressure applied.
 - Pressure Hysteresis: Output deviation at any pressure within the specified range, when this pressure is cycled to and from the minimum or maximum rated pressure, at 25°C.
 - Offset Stability: Output deviation, after 1000 temperature cycles, -30 to 100°C, and 1.5 million pressure cycles, with minimum rated pressure applied.
 - ToSpan: Output deviation over the temperature range of 10 to 60°C, relative to 25°C.
 - ToOffset: Output deviation with minimum rated pressure applied, over the temperature range of 10 to 60°C, relative to 25°C.
 - Variation from Nominal: The variation from nominal values, for Offset or Full Scale Span, as a percent of V_{RSS} , at 25°C.
- Auto Zero at Factory Installation: Due to the sensitivity of the MPXV5004G, external mechanical stresses and mounting position can affect the zero pressure output reading. Autozeroing is defined as storing the zero pressure output reading and subtracting this from the device's output during normal operations. Reference AN1636 for specific information. The specified accuracy assumes a maximum temperature change of ±5°C between autozero and measurement.

ANEXO C – Características técnicas do Sensor de Pressão.

ON-CHIP TEMPERATURE COMPENSATION, CALIBRATION AND SIGNAL CONDITIONING

The performance over temperature is achieved by integrating the shear-stress strain gauge, temperature compensation, calibration and signal conditioning circuitry onto a single monolithic chip.

Figure 2 illustrates the gauge configuration in the basic chip carrier (Case 482). A fluorosilicone gel isolates the die surface and wire bonds from the environment, while allowing the pressure signal to be transmitted to the silicon diaphragm.

The MPXV5004G series sensor operating characteristics are based on use of dry air as pressure media. Media, other than dry air, may have adverse effects on sensor performance and long-term reliability. Internal reliability and qualification

test for dry air, and other media, are available from the factory. Contact the factory for information regarding media tolerance in your application.

Figure 3 shows the recommended decoupling circuit for interfacing the output of the MPXV5004G to the A/D input of the microprocessor or microcontroller. Proper decoupling of the power supply is recommended.

Figure 4 shows the sensor output signal relative to pressure input. Typical, minimum and maximum output curves are shown for operation over a temperature range of 10°C to 60°C using the decoupling circuit shown in Figure 3. The output will saturate outside of the specified pressure range.

Figure 2. Cross-Sectional Diagram (Not to Scale)

Figure 3. Recommended power supply decoupling and output filtering.
For additional output filtering, please refer to Application Note AN1646.

Figure 4. Output versus Pressure Differential
(See Note 5 in Operating Characteristics)

MPXV5004G SERIES

ANEXO D – Geometria proposta para estudo futuro e gráfico da influência da extremidade do anteparo no fator K, segundo PANKANIN, G. L. (2005). *The vortex flow meter : various methods of investigating phenomena* – Measurement Science and Technology 16 R1-R16.

Figura (A): anteparo com extremidade “livre”
Figura (B): anteparo com extremidade “truncada”

Figura comparativa da influência das extremidades dos anteparos no fator K