

FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL,
ARQUITETURA E URBANISMO



UNICAMP

2005

Mestrado

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL,
ARQUITETURA E URBANISMO**

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM MEDIDOR
DE VAZÃO ELETROMAGNÉTICO EM SITUAÇÕES
PRÁTICAS REAIS DE INSTALAÇÃO**

André Luís Sotero Salustiano Martim

**Campinas
2005**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL,
ARQUITETURA E URBANISMO**

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM MEDIDOR
DE VAZÃO ELETROMAGNÉTICO EM SITUAÇÕES
PRÁTICAS REAIS DE INSTALAÇÃO**

André Luís Sotero Salustiano Martim

Orientador: Prof^a. Dr^a. Ana Inês Borri Genovez

Dissertação de Mestrado apresentada à Comissão de pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração de Recursos Hídricos.

**Campinas, SP
2005**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

M363a Martim, André Luís Sotero Salustiano
Avaliação do desempenho de um medidor de vazão
eletromagnético em situações práticas reais de instalação /
André Luís Sotero Salustiano Martim.--Campinas, SP: [s.n.],
2005.

Orientador: Ana Inés Borri Genovez
Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e
Urbanismo.

1. Água – Medição. 2. Engenharia hidráulica. 3.
Medidores de fluxo. 4. Recursos hídricos - Desenvolvimento.
5. Água – Estações de tratamento. 6. Correntes fluviais –
Medição. 7. Água. I. Genovez, Ana Inés Borri. II.
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia
Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Título em Inglês: Evaluation of the performance of an electromagnetic flowmeter
in real practical situations of installation

Palavras-chave em Inglês: Electromagnetic flowmeters, Installation effects,
Velocity profiles, Flow measurement, Water flow

Área de concentração: Recursos Hídricos

Titulação: Mestre em Engenharia Civil

Banca examinadora: Yvone de Faria Lemos de Lucca, Evaldo Miranda Coiado

Data da defesa: 24/02/2005

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL,
ARQUITETURA E URBANISMO**

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM MEDIDOR
DE VAZÃO ELETROMAGNÉTICO EM SITUAÇÕES
PRÁTICAS REAIS DE INSTALAÇÃO**

André Luís Sotero Salustiano Martim

Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:

**Prof^a. Dr^a. ANA INÊS BORRI GENOVEZ
Presidente e Orientador/FEC/UNICAMP**

**Prof^a. Dr^a. YVONE DE FARIA LEMOS DE LUCCA
DAEE/FCTH/USP**

**Prof. Dr. EVALDO MIRANDA COIADO
FEC/UNICAMP**

Campinas, 24 de fevereiro de 2005

Dedicatória:

Dedico este trabalho aos meus pais, por me ensinaram o importante da vida: aprender e amar.

Agradecimentos:

Agradeço à professora doutora Ana Inês Borri Genovez pela dedicação, paciência e criatividade na solução dos problemas.

Agradeço à professora doutora Yvone de Faria Lemos de Lucca pelas preciosas contribuições em todo o trabalho.

Agradeço ao professor doutor Evaldo Mirando Coiado por me ter despertado o interesse pela hidráulica, ainda nos tempos da graduação.

Colaboradores especiais:

Agradeço aos engenheiros da Sabesp Cecília Megumi Hasegawa e Eric Cerqueira Carozzi, pela colaboração fundamental à conclusão deste trabalho.

Agradeço aos engenheiros do IPT Nilson Massami Taira, Fernando Rodrigues Garcia, Sandro Almeida Mota e Elcimar Nóbrega pelas sugestões e informações.

Agradeço aos técnicos do laboratório de Hidráulica e Mecânica dos Fluidos da Unicamp, Carlão e Marcelo.

Agradeço à Suzana Margarida Almeida, engenheira formada pela escola de engenharia de Coimbra, Portugal, pela preciosa colaboração nos trabalhos realizados no Laboratório.

SUMÁRIO

Lista de Figuras.....	xi
Lista de Tabelas.....	xiv
Lista de Símbolos.....	xv
Lista de Abreviaturas.....	xvii
Resumo.....	xviii
Abstract.....	xix
Capítulo 1.....	1
Introdução.....	1
1.1 Medição de Vazão	1
1.2 Importância da Medição de Vazão.....	3
1.3 Objetivos do Trabalho.....	5
Capítulo 2.....	6
Métodos de Medição de Vazão.....	6
2.1 Histórico.....	6
2.2 Métodos de Calibração de Medidores.....	10
2.2.1 Método Gravimétrico.....	12
2.2.2 Método Volumétrico.....	13
2.2.3 Método do Proveedor.....	14
2.2.4 Método do Medidor Mestre ou Padrão.....	15
2.2.5 Calibração Seca.....	16
2.3 Equipamentos Para Medição de Vazão.....	18
2.4 Medidores de Vazão Mais Usuais.....	20

2.4.1 Medidores Volumétricos.....	20
2.4.2 Medidores Instantâneos.....	27
2.5 Equipamentos Retificadores de Escoamento.....	35
Capítulo 3.....	42
Medidores Eletromagnéticos.....	42
3.1 Histórico.....	42
3.2 Características Gerais dos Medidores.....	47
3.3 Vantagens e Desvantagens dos Medidores.....	52
3.4 Características Físicas dos Medidores.....	54
3.5 Aplicações do Medidor Eletromagnético.....	61
3.6 Fatores que Influenciam na Medição.....	62
3.6.1 Efeito do Perfil de Velocidades.....	65
3.7 Parâmetros para o Dimensionamento do Medidor Eletromagnético.....	73
3.8 Ensaio e Verificação de Desempenho de Medidores Eletromagnéticos.....	73
3.9 Outros Tipos de medidor Eletromagnético.....	75
Capítulo 4.....	78
Materiais e Métodos.....	78
4.1 Bancada de Ensaio.....	78
4.1.1 Primeira Configuração (M1).....	81
4.1.2 Segunda Configuração (M2).....	83
4.1.3 Terceira Configuração (M3).....	86
4.1.4 Quarta Configuração (M4).....	89
4.2 Medidores Utilizados.....	94
4.2.1 Medidor de Vazão Eletromagnético.....	94
4.2.2 Medidor de Vazão Ultra-sônico.....	95
4.2.3 Tubo de Venturi.....	98
4.2.4 Tubo de Pitot.....	100
Capítulo 5.....	104
Resultados e Discussões.....	104
5.1 Apresentação dos Resultados.....	104
5.1.1 Resultados da Primeira Configuração (M1).....	107

5.1.2 Resultados da Segunda Configuração (M2).....	115
5.1.3 Resultados da Terceira Configuração (M3).....	122
5.1.4 Resultados da Quarta Configuração (M4).....	129
5.2 Perfis Adimensionais.....	136
5.3 Considerações Gerais.....	141
Capítulo 6.....	143
Conclusões.....	143
Referências Bibliográficas.....	146
ANEXO A – Definições.....	151
ANEXO B – Conceitos de Mecânica dos Fluidos.....	155
ANEXO C – Determinação da Vazão.....	160
ANEXO D – Levantamento do Perfil de Velocidades.....	163
ANEXO E - Determinação da Incerteza da Vazão do Venturi.....	175

LISTA DE FIGURAS

			Página
Figura	2.1	Método de calibração gravimétrico - ISO 4185/80 (1980).....	13
Figura	2.2	Método de calibração volumétrico - ISO 8316/87 (1987).....	14
Figura	2.3	Método de calibração do provador - SILVA (1997).....	15
Figura	2.4	Método de calibração do medidor padrão ou referência.....	16
Figura	2.5	Método de Calibração Seca - Fonte: Hemp (2001).....	18
Figura	2.6	Diagrama de classificação de medidores de vazão - NBR 10396/88 (1988).....	19
Figura	2.7	Medidor de sifão inclinante – BEAN (1971).....	23
Figura	2.8	Medidor de foles - BEAN (1971).....	23
Figura	2.9	Medidor de pistão recíproco – TROSKOLANSKI (1960).....	24
Figura	2.10	Medidor de pistão rotativo – BEAN (1971).....	24
Figura	2.11	Medidor de disco de natação – SILVA (1997).....	24
Figura	2.12	Medidor de paletas deslizantes - BEAN (1971).....	25
Figura	2.13	Medidor de engrenagens ou lóbulos rotativos - SILVA (1997).....	26
Figura	2.14	Medidor de rotor semi-submerso - SILVA (1997).....	26
Figura	2.15	Medidor proporcional.....	26
Figura	2.16	Tubo de Venturi clássico – TROSKOLANSKI (1960).....	27
Figura	2.17	Placa de orifício - SILVA (1997).....	27
Figura	2.18	Bocal - BEAN (1971).....	28
Figura	2.19	Bocal – Venturi – TROSKOLANSKI (1960).....	28
Figura	2.20	Medidor cotovelo - DALLY (1984)	29
Figura	2.21	Tubo de Pitot - BEAN (1971)	29
Figura	2.22	Tubo de Darcy – TROSKOLANSKI (1960)	30
Figura	2.23	Tubo de Pitot Cole - BEAN (1971)	30
Figura	2.24	Medidor ultra-sônico de efeito Doppler – Linford (1961)	31
Figura	2.25	Medidor ultra-sônico de tempo de trânsito – Linford (1961)	31
Figura	2.26	Medidor de aerofólio - SILVA (1997)	32
Figura	2.27	Medidor de vórtice - DALLY (1984)	32
Figura	2.28	Medidor de força – ABNT NBR 10396 (1988)	33
Figura	2.29	Medidor de área variável – TROSKOLANSKI (1960)	33
Figura	2.30	Medidor térmico – ABNT NBR 10396 (1988)	36
Figura	2.31	Medidor Turbina - DALLY (1984)	36
Figura	2.32	Medidor Coriollis - NBR 10396/88 (1988)	36
Figura	2.33	Medidor de válvula – TROSKOLANSKI (1960)	35
Figura	2.34	Instalação de retificadores de fluxo - ISO 7194/83 (1983)	37
Figura	2.35	Condicionador Zanker - ISO 5167/94 (1994)	39
Figura	2.36	Condicionador Sprengle - ISO 5167/94 (1994)	40
Figura	2.37	Condicionador Feixe de Tubos - ISO 5167/94 (1994)	40
Figura	2.38	Condicionador AMCA - ISO 5167/94 (1994)	41
Figura	2.39	Condicionador Étoile - ISO 5167/94 (1994)	41
Figura	3.1	Medidor de corrente circular – SHERCLIFF (1962)	44
Figura	3.2	Corrente circular - SHERCLIFF (1962)	44
Figura	3.3	Medidor eletromagnético Kolin - SHERCLIFF (1962)	46
Figura	3.4	Medidor de vazão com corrente axial e fluxo radial - SHERCLIFF (1962).....	46

Figura	3.5	Medidor de vazão eletromagnético NBR ISO 6817 (1999)	55
Figura	3.6	Medidor de vazão eletromagnético ISO 6817 (1980)	56
Figura	3.7	Fotografia de um medidor típico LINFORD (1961).....	57
Figura	3.8	Representação vetorial do medidor eletromagnético NBR ISO 6817 (1999).....	58
Figura	3.9	Campo magnético gerado pelo medidor eletromagnético ISO 6817 (1980).....	59
Figura	3.10	Instalação elétrica do medidor eletromagnético DOEBELIN (1975).....	61
Figura	3.11	Perfil de Velocidade deformado CHEREMISINOFF (1988)	66
Figura	3.12	Instalação do medidor eletromagnético ISO 9104 (2000)	71
Figura	3.13	Obstruções equivalentes NBR ISO 9104/2000 (2000)	72
Figura	3.14	Sonda de medidor eletromagnético de inserção – TECFLUID (2003)	77
Figura	4.1	Esquema da bancada do laboratório – esquema geral.....	80
Figura	4.2	Esquema da bancada do laboratório – Configuração M1.....	81
Figura	4.3	Fotografia da configuração M1.....	83
Figura	4.4	Esquema da bancada do laboratório – Configuração M2.....	84
Figura	4.5	Fotografia da configuração M2.....	86
Figura	4.6	Disposição das curvas - Configuração M3.....	87
Figura	4.7	Esquema da bancada do laboratório – Configuração M3.....	87
Figura	4.8	Fotografia da configuração M3.....	89
Figura	4.9	Esquema da bancada do laboratório – Configuração M4.....	90
Figura	4.10	Válvula de Gaveta - DN 4" (Abertura 100%).....	91
Figura	4.11	Válvula de Gaveta - DN 4" (Abertura 50% do curso).....	91
Figura	4.12	Fotografia da configuração M4.....	92
Figura	4.13	Elemento primário do medidor Eletromagnético.....	95
Figura	4.14	Elemento secundário do medidor Eletromagnético.....	95
Figura	4.15	Elemento primário do medidor Ultra-sônico - Clamp-on.....	97
Figura	4.16	Aplicação do gel na sonda do medidor.	97
Figura	4.17	Esquema da posição de instalação direta - AWWA (1989)	97
Figura	4.18	Elemento secundário do medidor Ultra-sônico.....	98
Figura	4.19	Elemento primário do medidor Venturi.....	99
Figura	4.20	Elementos secundários do medidor Venturi.....	99
Figura	4.21	Tubo de Pitot Cole.....	101
Figura	4.22	Transdutores de Pressão TP03 e TP01.....	103
Figura	5.1	Levantamento horizontal e vertical de velocidades.....	107
Figura	5.2	Perfil de velocidade vertical - Configuração M1.....	108
Figura	5.3	Perfil de velocidade horizontal - Configuração M1.....	109
Figura	5.4	Gráfico de desvio de indicação do Eletromagnético - Configuração M1.....	111
Figura	5.5	Gráfico da incerteza relativa da vazão - Configuração M1.....	113
Figura	5.6	Gráfico comparativo Qventuri x Qeletromagnético - M1.....	114
Figura	5.7	Perfil de velocidade vertical - Configuração M2.....	115
Figura	5.8	Perfil de velocidade horizontal - Configuração M2.....	116
Figura	5.9	Gráfico de desvio de indicação do Eletromagnético - Configuração M2.....	118
Figura	5.10	Gráfico da incerteza relativa da vazão - Configuração M2.....	120
Figura	5.11	Gráfico comparativo Qventuri x Qeletromagnético - M2.....	121
Figura	5.12	Perfil de velocidade vertical - Configuração M3.....	123
Figura	5.13	Perfil de velocidade horizontal - Configuração M3.....	123
Figura	5.14	Gráfico de desvio de indicação do Eletromagnético - Configuração M3.....	125
Figura	5.15	Gráfico da incerteza relativa da vazão - Configuração M3.....	126
Figura	5.16	Gráfico comparativo Qventuri x Qeletromagnético - M3.....	128
Figura	5.17	Perfil de velocidade vertical - Configuração M4.....	129

Figura	5.18	Perfil de velocidade horizontal - Configuração M4.....	130
Figura	5.19	Gráfico de desvio de indicação do Eletromagnético - Configuração M4.....	132
Figura	5.20	Gráfico da incerteza relativa da vazão - Configuração M4.....	133
Figura	5.21	Gráfico comparativo Qventuri x Qeletromagnético - M4.....	134
Figura	5.22	Perfil de velocidade vertical adimensional - Configuração M1.....	137
Figura	5.23	Perfil de velocidade horizontal adimensional - Configuração M1.....	137
Figura	5.24	Perfil de velocidade vertical adimensional - Configuração M2.....	138
Figura	5.25	Perfil de velocidade horizontal adimensional - Configuração M2.....	138
Figura	5.26	Perfil de velocidade vertical adimensional - Configuração M3.....	139
Figura	5.27	Perfil de velocidade horizontal adimensional - Configuração M3.....	139
Figura	5.28	Perfil de velocidade vertical adimensional - Configuração M4.....	140
Figura	5.29	Perfil de velocidade horizontal adimensional - Configuração M4.....	140
Figura	D.1	Pitot Cole inserido na tubulação - SABESP (1997).....	165
Figura	D.2	Pitot Cole inserido na tubulação.....	165
Figura	D.3	Perfil de Velocidade - Cheremisinoff (1979).....	166
Figura	D.4	Posicionamento do Pitot - SABESP (1997).....	167
Figura	D.5	Posicionamento do Pitot - Log Linear SCOTT (1982).....	168
Figura	D.6	Tomadas de Pressão do tubo de Pitot (TIP).....	170
Figura	D.7	Perfil de velocidade.....	172

LISTA DE TABELAS

			Página
Tabela	2.1	Valores Comparativos de Desempenho.....	20
Tabela	2.2	Vantagens e desvantagens dos principais medidores.....	21
Tabela	2.3	Trechos Retos Necessários de Instalação de /tubo Venturi – ISO 5167(1994)..	37
Tabela	4.1	Configuração – M1.....	82
Tabela	4.2	Configuração – M2.....	85
Tabela	4.3	Configuração – M3.....	88
Tabela	4.4	Configuração – M4.....	91
Tabela	4.5	Resumo das Configurações Esnaiadas.....	93
Tabela	4.6	Medidor de Vazão Eletromagnético – Elemento Primário.....	94
Tabela	4.7	Medidor de Vazão Eletromagnético – Elemento Secundário.....	95
Tabela	4.8	Medidor de Vazão Ultra-Sônico – Elemento Primário.....	97
Tabela	4.9	Medidor de Vazão Ultra-Sônico – Elemento Secundário.....	97
Tabela	4.10	Elemento Primário do Medidor Venturi.....	99
Tabela	4.11	Elemento Secundário 1 (TP2).....	100
Tabela	4.12	Elemento Secundário 2 (TP4).....	100
Tabela	4.13	Elemento Secundário 3.....	100
Tabela	4.14	Elemento Primário do Tubo de Pitot.....	102
Tabela	4.15	Elemento Secundário 1 (TP03).....	102
Tabela	4.16	Elemento Secundário 2 (TP 01).....	102
Tabela	5.1	Vazões de Referência.....	106
Tabela	5.2	Desvios de Indicação – Configuração M1.....	110
Tabela	5.3	Incerteza da Vazão do Tubo Venturi – Configuração M1.....	112
Tabela	5.4	Resumo dos Resultados – Configuração M1.....	114
Tabela	5.5	Desvios de Indicação – Configuração M2.....	117
Tabela	5.6	Incerteza da Vazão do Tubo Venturi – Configuração M2.....	119
Tabela	5.7	Resumo dos Resultados – Configuração M2.....	122
Tabela	5.8	Desvios de Indicação – Configuração M3.....	124
Tabela	5.9	Incerteza da Vazão do Tubo Venturi – Configuração M3.....	126
Tabela	5.10	Resumo dos Resultados – Configuração M3.....	127
Tabela	5.11	Desvios de Indicação – Configuração M4.....	131
Tabela	5.12	Incerteza da Vazão do Tubo Venturi – Configuração M4.....	132
Tabela	5.13	Resumo dos Resultados – Configuração M4.....	135
Tabela	D.1	Posicionamento do Tubo de Pitot.....	168
Tabela	D.2	Posicionamento do Tubo de Pitot.....	169
Tabela	D.3	Exemplo do Cálculo da Vazão.....	174

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Referência	Dimensões	Unidades SI
A	Área da seção transversal da tubulação	L ²	m ²
A'	Tanque do medidor de sifão	*	*
A''	Tanque do medidor de sifão	*	*
AC	Corrente alternada	*	*
Φ_B	Densidade do fluxo Magnético	ML ² T ⁻¹ Q ⁻¹	T
C	Eixo do medidor de pivô / medidor de pistão	*	*
Cd	Coefficiente do Pitot	*	*
D	Diâmetro da Tubulação	L	m
D'	Entrada do fluido no medidor de pistão rotativo	*	*
DC	Corrente contínua	*	*
Di	Desvio de indicação	*	*
DN	Diâmetro Nominal	L	m
dV	Variação de volume	L ³	m ³
dt	Intervalo de tempo	T	s
dm	Variação de massa	M	kg
$d\Phi_B$	Taxa de variação do fluxo magnético	ML ² T ⁻¹ Q ⁻¹	T
E	Saída do fluido no medidor de pistão rotativo	*	*
Fs	Frequência de oscilação do medidor de vórtice	T ⁻¹	s ⁻¹
H	Pressão diferencial do Venturi	ML ⁻¹ T ⁻²	N/m ²
i	Corrente elétrica	T ⁻¹ Q	A
K'	Pivô do medidor de sifão	*	*
k	Constante do campo magnético	*	*
K	Constante de calibração do medidor Venturi	*	*
K _e	Constante de calibração do medidor eletromagnético	*	*
K''	Pivô do medidor de sifão	*	*
\mathcal{L}	Comprimento do Condutor	L	m
L	Comprimento do condutor	L	m
Le	Distância entre eletrodos	L	m
m_i	Massa inicial	M	kg
m_f	Massa final	M	kg
N	Válvula do medidor de válvulas	*	*
n	Expoente de calibração do medidor Venturi	*	*
Q	Vazão	L ³ T ⁻¹	m ³ /s
Qi	Vazão indicada	L ³ T ⁻¹	m ³ /s
Q _{ref}	Vazão de referência	L ³ T ⁻¹	m ³ /s
Qv	Vazão do verdadeira	L ³ T ⁻¹	m ³ /s
R	Raio do tubo	L	m
Re	Número adimensional de Reynolds	*	*
S	Sifão do medidor de sifão	*	*

S'	Sifão do medidor de sifão	*	*
Sn	Número de Strouhal	*	*
t_i	Tempo inicial	T	s
t_f	Tempo final	T	s
U	Velocidade do escoamento	$L.T^{-1}$	m/s
Vadm	Velocidade Adimensional	*	*
Vaxial	Velocidade axial paralela ao tubo	$L.T^{-1}$	m/s
Vmax	Velocidade axial máxima	$L.T^{-1}$	m/s
v	Velocidade	$L.T^{-1}$	m/s
v_i	Velocidade no ponto i	$L.T^{-1}$	m/s
v_{is}	Velocidade no ponto i no perfil subida	$L.T^{-1}$	m/s
v_{id}	Velocidade no ponto i no perfil descida	$L.T^{-1}$	m/s
v_{im}	Velocidade no média no ponto i	$L.T^{-1}$	m/s
$\forall i$	Volume inicial	L^3	m^3
$\forall f$	Volume Final	L^3	m^3
Vc	Velocidade no centro	$L.T^{-1}$	m/s
Vm	Velocidade média	$L.T^{-1}$	m/s
Vo	Velocidade do escoamento	$L.T^{-1}$	m/s
Vy	Velocidade na posição y	$L.T^{-1}$	m/s
W	Contrapeso do medidor de sifão	*	*
W'	Contrapeso do medidor de sifão	*	*
Y	Distância da parede do tubo	L	m
ΔP	Diferença de pressão	$ML^{-1}T^{-2}$	N/m^2
ΔQ	Incerteza na vazão do Venturi	L^3T^{-1}	m^3/s
ω	Frequência do Campo Magnético	T^{-1}	Hz
ϵ	Tensão Elétrica (Diferença de Potencial)	$ML^2T^2Q^{-1}$	V
ρ	Massa específica	ML^{-3}	kg/m^3

(*) Adimensional

LISTA DE ABREVIATURAS

Abreviatura	Significado
ANA	Agência Nacional de Águas
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASME	American Society of Mechanical Engineering
AWWA	American Water Works Association
BSI	British Standards Institution
EE	Estação Elevatória
ETA	Estação de Tratamento de Água
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
ISO	International Organization For Standardization
RBC	Rede Brasileira de Calibração
SABESP	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo

RESUMO

Martim, André Luís Sotero Salustiano. **Avaliação do Desempenho de um Medidor de Vazão Eletromagnético em Situações Práticas Reais de Instalação**. Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, 2005. 182 páginas. Dissertação.

A busca do melhor aproveitamento dos recursos hídricos é uma característica permanente nas políticas atuais, e o gerenciamento de recursos hídricos implica no equacionamento entre a vazão disponível e a vazão de demanda, ou seja, na medição de vazão. A partir de 2004 os usuários de recursos hídricos são obrigados a declarar os volumes de água captados, é a declaração anual de uso de recursos hídricos. A qualidade da vazão medida depende das técnicas de medição, e um dos principais fatores intervenientes é a condição de instalação do medidor. A avaliação de um medidor eletromagnético de vazão em condições práticas de instalação foi desenvolvida experimentalmente neste trabalho. O medidor de vazão eletromagnético utilizado foi instalado em quatro situações diferentes e os valores de vazão obtidos foram comparados com os de dois medidores instalados adequadamente, um medidor Venturi e um medidor Ultra-sônico. Os ensaios foram desenvolvidos em uma bancada no Laboratório de Hidráulica e Mecânica dos Fluidos da Faculdade de Engenharia Civil da Unicamp. Para a configuração com o medidor eletromagnético instalado à jusante de uma curva 90° de raio curto, o desvio máximo foi de 0,742% com uma incerteza de 0,27%. Para a configuração com o medidor eletromagnético instalado à jusante de duas curvas 90° de raio curto, o desvio máximo foi de 0,447% com uma incerteza de 0,74%. Para a configuração com o medidor eletromagnético instalado à jusante de uma válvula de gaveta, com 50% de abertura, o desvio máximo foi de -2,046% e uma incerteza de 0,50%. Os resultados obtidos mostram claramente que a condição de instalação do medidor frente às singularidades da tubulação afetam sua performance. Os valores de desvio de indicação podem ser considerados baixos ou altos, dependendo da exatidão exigida do medidor dentro do sistema.

Palavras chave: vazão, medidor de vazão, medidor de vazão eletromagnético.

ABSTRACT

Martim, André Luís Sotero Salustiano. **Evaluation of the performance of an electromagnetic flowmeter in real practical situations of installation.** Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, 2005.

The search of the best utilization of the water resources is a permanent characteristic in the current politics, and the management of water resources implies in the balance equally between the available flow and the flow of demand, or either, in the flow measurement. From 2004 the users of water resources are obliged to declare the caught volumes of water, is the annual declaration of use of water resources. The quality of the measured flow depends on the measurement techniques, and one of the main intervening factors is the condition of installation of the flowmeter. The evaluation of an electromagnetic flowmeter in practical conditions of installation was developed experimentally in this work. The electromagnetic flowmeter was installed in four different situations and the gotten values of flow measurement had been compared with the ones of two flowmeters installed adequately, an Venturi flowmeter and an Ultrasonic flowmeter. The evaluation had been developed in a work-bench in the Laboratory of Hidraulical and Mechanic of fluid of the College of Civil Engineering of the Unicamp. For the configuration with the electromagnetic flowmeter installed downstream of a 90° elbow of short ray, the maximum deviation was of 0,742% with a 0,27% uncertainty. For the configuration with the electromagnetic flowmeter installed downstream of a two 90° elbow of short ray, the maximum deviation was of 0,447% with a 0,74% uncertainty. For the configuration with the installed electromagnetic flowmeter downstream a drawer valve, with 50% of opening, the maximum deviation was of a -2,046% and uncertainty of 0,50%. The gotten results show clearly that the condition of installation of the flowmeter front to the singularity of the tubing affects its performance. The values of deviation indication can be considered low or high, depending on the demanded accuracy of the flowmeter inside of the system.

Key words: Electromagnetic flowmeter, installation effects, velocity profiles effects.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Neste capítulo será apresentado de forma breve o que é a medição de vazão, qual a sua importância em engenharia, e como este trabalho se encaixa nesse contexto.

1.1 MEDIÇÃO DE VAZÃO

A medição de vazão há muito tempo é utilizada em engenharia, porém mais recentemente, devido ao aumento da demanda de recursos hídricos nas regiões mais desenvolvidas, ela tem tomado outro foco, dando-se mais atenção aos processos e técnicas de medição. Essa maior atenção da medição de vazão ocorre em razão da maior atenção às reservas hídricas do planeta, utilizadas para diversas finalidades e em abastecimento público. Citando por exemplo a Região Metropolitana de São Paulo, a Região Metropolitana de Campinas e a Região do Vale do Paraíba que estão em estado crítico, já no limite de capacidade das suas bacias, tendo hoje cada metro cúbico de água uma importância muito maior que no passado.

Antes do início da cobrança pelo uso da água a medição de vazão era utilizada como um mecanismo de auxílio, para fornecer dados aos processos de produção da água tratada, e para dimensionamentos hídricos e hidráulicos.

A necessidade era saber qual a vazão aduzida de um rio, para proceder a dosagem de produtos químicos, ou para se estabelecer uma regra de operação, definindo tempos e volumes de detenção e decantação, por exemplo. Havia a necessidade de se determinar qual a vazão de consumo de água de uma cidade, para o dimensionamento de redes, ou para determinar regras de operação.

O que ocorria, é que dada a necessidade meramente operacional da medição de vazão, não havia necessidade de tanta exatidão no valor medido, e as incertezas admitidas eram maiores, conseqüentemente as condições de instalação dos medidores não eram consideradas nos projetos das Estações de Tratamento de Água (ETA), Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) e Estações Elevatórias (EE) e redes de abastecimento.

Porém com o aumento das populações urbanas e a crescente demanda de reservas hídricas, o Governo Federal, criou mecanismos de fiscalização do uso da água. Estes mecanismos tem como principal agente os comitês criados pela agência reguladora denominada ANA⁽¹⁾, Agência Nacional de Águas. Ela é responsável pela implantação da Política Nacional de Recursos Hídricos, e uma de suas principais missões é fornecer suporte aos comitês das Bacias Hidrográficas para regulamentar a cobrança pelo uso da água, bem como fornecer as outorgas para uso da água. Os parâmetros dessa cobrança devem ser definidos pelos comitês de cada bacia.

(1) Criada pelo projeto de lei aprovado pelo Congresso no dia 7 de junho de 2000, transformando-se na Lei 9.984, sancionada pelo presidente da República em exercício, Marco Maciel, no dia 17 de julho do mesmo ano. A Agência Nacional de Águas (ANA) é uma autarquia sob regime especial com autonomia administrativa e financeira, vinculada ao Ministério do Meio Ambiente.

Com o início da cobrança pelo uso da água, e com a venda de água tratada entre as empresas de saneamento, a necessidade de se melhorar a exatidão e em reduzir a incerteza na medição de vazão se fazem evidentes.

Deste modo a condição de instalação de um medidor de vazão é fundamental para a determinação e redução das incertezas na medição de vazão. Como era de se esperar o parque de medidores de vazão existente hoje foi concebido em outro contexto, sendo então formado, muitas vezes, por um conjunto de instalações que não obedece às orientações presentes nas normas técnicas.

Dentre os medidores de vazão existentes e utilizados em saneamento, o medidor de vazão eletromagnético representa uma grande parte do parque de medidores. Atualmente, o medidor eletromagnético representa uma das melhores opções de instalação em relação ao custo-benefício e, considerando que outros métodos, tais como os de inserção, ou ultra-sônicos tipo “clamp-on”, apesar de terem um custo mais baixo, ainda não estão consolidados por não apresentam tanta confiabilidade de operação e não serem normalizados.

1.2 IMPORTÂNCIA DA MEDIÇÃO DE VAZÃO.

Historicamente a medição de vazão, era utilizada como um parâmetro operacional, ou seja, um dado a ser utilizado na operação dos sistemas hidráulicos, para abastecimento em redes hidráulicas, e para dosagem de produtos químicos. A exatidão da medição de vazão não era fator determinante (em que exatidão é o grau de concordância entre o resultado de medição e o valor verdadeiro convencional da grandeza medida).

Citando um exemplo de um processo industrial qualquer, onde a medição da vazão que entra ou que sai do sistema é importante para o controle do processo, de

forma a parametrizar as dosagens de insumos, neste caso a exatidão necessária é a que garanta as condições operacionais do processo. Estes conceitos estão dando espaço aos novos conceitos de auditoria da água, tomando outras proporções, sendo necessária uma exatidão maior dos valores mensurados, e uma maior adequação das estações de medição. Pelos conceitos da **AWWA – American Water Works Association (1999)** de auditoria da água, todas as entradas e saídas do sistema devem ser medidos, de forma a contabilizar todo o processo de utilização da água. Podendo o processo ou sistema ser uma ETA, uma ETE ou uma rede de abastecimento público.

Segundo **AWWA (1999)** a “auditoria da água” é uma contabilização exaustiva de toda a água que entra e sai de um sistema de abastecimento, bem como um exame, em profundidade, dos dados registrados de um sistema de distribuição, com a intenção de se determinar a eficiência operacional do sistema e de se identificarem as origens das perdas de água e de receita.

De maneira simplificada a auditoria de sistemas de abastecimento água se constitui de processo de subtração da água que sai do sistema (água vendida micromedida, volumes de uso social e autorizados) da água total que entra no sistema, determinado pelos macromedidores de vazão.

O medidor de vazão passa a ser considerado a caixa registradora do sistema, sendo que ele registra as quantidades que entram e que saem de um sistema, correspondendo a despesa e receita do sistema.

Um exemplo disso ocorre em sistemas onde há transferência de custódia, com importação e exportação de água entre empresas permissionárias de saneamento. O medidor de vazão é muito mais do que um medidor da água que passa pelo sistema, ele tem uma função de balanço, em que cada metro cúbico a mais ou a menos significa prejuízo para uma parte ou outra. Nestes casos a exatidão exigida para o sistema é cada dia maior.

Para a automatização dos sistemas hidráulicos, a medição de vazão também tem papel fundamental, pois a dosagem de produtos químicos, e as manobras de operação, que num sistema não automatizado podem ser definidas pela experiência e sensibilidade do operador, num sistema automatizado dependem diretamente da vazão indicada pelo medidor, que é um dos principais parâmetros de alimentação do sistema, em tempo real.

1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO

A condição de instalação de um medidor de vazão é fundamental para o seu perfeito funcionamento e, para a determinação e redução das incertezas na medição de vazão. O parque de medidores de vazão existente está instalado, muitas vezes, inadequadamente, formado por um conjunto de instalações que nem sempre obedece às orientações presentes nas normas técnicas. Na prática, muitas vezes por falta de espaço não é possível atender a normalização técnica.

O objetivo deste trabalho é avaliar um medidor eletromagnético de vazão, em situações de instalação não recomendadas pela norma, simulando situações práticas reais de instalação. Para atender esse objetivo foi feito um estudo experimental. Outros estudos apresentam resultados para escoamentos laminares, mas as instalações práticas quase sempre apresentam escoamento turbulento, como é o caso deste estudo.

CAPÍTULO 2

MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE VAZÃO

2.1 HISTÓRICO

2000 a.C. – sistemas de medição de vazão são utilizados nos canais de irrigação da civilização egípcia. **Silva (1997)**

101 – 44 a.C. – desenvolvimento dos princípios básicos da medição de vazão, tendo início no império romano, na época do grande imperador Caio Julio César, quando se utilizavam orifícios e clepsidras (relógios d'água) para a medição do tempo e para a medição da água utilizada pelos habitantes das áreas urbanas. Sendo que o desenvolvimento, que conduziu para a teoria dos medidores utilizados atualmente, é de origem bem mais recente. **Spink (1973)**

90 d.C. – registros de **Frontinus** relatando o uso de medidores de vazão. **Delmée (1983).**

Séc. XV – Leonardo Da Vinci publica o trabalho intitulado “Sobre o movimento das águas e as obras Fluviais” **em que** trata do assunto da medição de vazão. **Delmée (1983).**

Séc. XVII – Galileu Galilei publica estudos sobre a hidrostática que é de fundamental importância para o desenvolvimento dos conceitos de medição de vazão. **Delmée (1983).**

No início do **Séc. XVII** – Benedetto **Castelli** e Evangelista **Torricelli** precederam a fundação da teoria dos medidores de vazão deprimogêneos com o desenvolvimento de conceitos que demonstravam que a vazão era proporcional à velocidade vezes a área da seção, e que a descarga através de um orifício variava com a raiz quadrada da altura da coluna d’água. **Spink (1973).**

No início do **Séc. XVIII** – Giovanni **Poleni**, professor de matemática na Universidade de Pádua, teve resultados promissores com orifícios de descarga, precursores dos medidores de vazão. **Spink (1973).**

1738 – Johann **Bernoulli** e seu filho Daniel **Bernoulli** desenvolveram o teorema com as equações hidráulicas que governam o funcionamento dos medidores de vazão deprimogêneos. **Spink (1973).**

1755 – O matemático suíço Leonhard **Euler** (1707-1783) estabelece pela primeira vez as equações diferenciais gerais relativas ao movimento dos líquidos. **Spink (1973).**

1732 – Henri **Pitot** apresenta um artigo intitulado: “Descrição de uma máquina para medição da velocidade do escoamento da água e da velocidade nas tubulações”. Sendo que várias aplicações para essa máquina chamada de “tubo de Pitot” foram desenvolvidas ao longo da sua vida. **Spink (1973).**

1797 – O físico italiano Giovanni Battista **Venturi** (1746-1822) publica os resultados de seu experimento, em que os princípios do tubo de Venturi foram apresentados, e são a base dos medidores Venturi. **Spink (1973)**.

1887 – Clemens **Herschel**, desenvolve a partir das teorias de Venturi, um medidor de vazão do tipo tubo de Venturi, com fabricação comercial, que era formado de um elemento primário muito parecido com o dos medidores deprimogêneos utilizados de 1910 até hoje. **Spink (1973)**.

No início de **1900**, em razão dos problemas apresentados na medição de gás natural com medidores Venturi, devido a expansões e transformações adiabáticas, surgiram os medidores do tipo placa de orifício.

Desde o início do século XX até hoje, o desenvolvimento dos medidores, e o surgimento de novos conceitos de medidores de vazão não estagnou, sendo que o que há de mais moderno nesta área são os conceitos de medição de vazão utilizando ultrassom com vários pares de feixes formando o que é conhecido como tomografia. Existem também os medidores de feixes a laser.

Os medidores eletromagnéticos apareceram comercialmente no início de 1950, sendo que a teoria eletromagnética existe desde o século XVIII. **Cheremisinoff (1979)**.

Resumidamente, a medição de vazão tem importância direta com:

I - Operação de sistemas hidráulicos

- Operação de Estações de Tratamento de Água (incluindo-se outorgas de captação de água junto ao DAEE);
- Operação de Estações de Tratamento de Esgotos;
- Redes de Abastecimento de Água:

- Operação de válvulas redutoras de pressão;
- Operação de boosters;
- Operação de válvulas remotas;

II - Planejamento e Gerenciamento de mananciais

- Busca de novos mananciais;
- Aproveitamento múltiplo;
- Transposição de bacias;

III - Controle de Perdas

- Captação de água bruta;
- Produção de água;
- Sistemas adutores;
- Redes de distribuição;
- Balanço hídrico e auditoria da água;

IV - Transferência de Custódia

- Importação de água bruta/tratada;
- Exportação de água bruta/tratada;

V - Automação de Sistemas hidráulicos

- Acionamento de válvulas remotas;
- Controle de vazões;
- Controle de reservatórios;
- Monitoramento on-line das variáveis do sistema;
- Regras operacionais;

VI - Outros fluidos: Gás Natural e Petróleo

VII - Processos industriais

2.2 MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO DE MEDIDORES

Os medidores de vazão são equipamentos desenvolvidos para medir vazão, mesmo que essa informação dependa de uma integração da velocidade v pela área A , ($\int v \cdot dA$). Seja por um funcionamento deprimogênico ou por qualquer outro método. Ocorre que em muitos casos não existe normalização ou padronização para a fabricação do mesmo, ou mesmo quando existe, como é o caso dos medidores do tipo Tubo de Venturi, é muito difícil determinar qual a exatidão do medidor somente com as informações de fabricação. É neste momento que surge a necessidade de calibração do medidor, para que seja determinada a sua exatidão.

Ao longo da vida útil do medidor também há a necessidade de calibração, para que seja verificado se as características de fabricação (calibração do fabricante e fator de calibração) se mantêm, ou se ocorreu alguma mudança. Essas mudanças podem ocorrer em função de vários motivos, como, por exemplo, de incrustações no interior do medidor, alterando o escoamento, as tomadas de pressão e a área da seção transversal da tubulação. Pode ocorrer que as constantes de fabricação já não correspondam a realidade.

AWWA (1989) afirma que a confiança e a exatidão do sinal de saída de um medidor de vazão é altamente dependente das condições de instalação. E que uma posição de instalação inadequada pode degradar a exatidão do medidor abaixo de níveis aceitáveis. Neste sentido a calibração do medidor em campo é condição necessária para a determinação da exatidão do medidor após sua instalação.

O autor afirma ainda que a responsabilidade dos fabricantes está em fornecer nos manuais de usuário as recomendações de instalação, mas que além disso o medidor deve ser checado imediatamente após ser instalado e periodicamente ao longo da sua vida útil, para garantir a estabilidade da exatidão.

Nestes casos pode ser necessária uma alteração das constantes do medidor, o que pode ser feito em campo ou somente em laboratório, dependendo do tipo de medidor e do método de calibração utilizado.

Pode-se afirmar que ao longo da vida útil do medidor, caso se esteja interessado em manter a confiabilidade do valor mensurado pelo mesmo, a calibração do medidor deve ser algo freqüente, desde a sua fabricação e instalação.

Um dos meios mais usados para a calibração em campo de medidores de vazão é a que usa o Tubo de Pitot Cole, para cálculo das velocidades médias pontuais. O cálculo é feito determinando o perfil de velocidade do escoamento na tubulação e, com base neste perfil é determinada a vazão.

Para o caso do medidor eletromagnético, a calibração em campo, utilizando o tubo de Pitot, tem a finalidade de verificar o comportamento do medidor ao longo da sua vida útil, verificando se não ocorrem grandes alterações de tempos em tempos, não sendo conveniente alterar a constante de calibração do medidor. Nesta situação, caso fossem encontrados valores muito diferentes entre as constantes de calibração do fabricante e da calibração em campo, seria recomendado uma calibração em laboratório para alteração do valor do fator de calibração. Ou então por algum método que tivesse uma exatidão de medição maior do que a do medidor eletromagnético, pois a exatidão do tubo de Pitot é inferior a do eletromagnético.

Para o caso de um medidor deprimogênico, em geral o fator de calibração da calibração de campo utilizando Tubo de Pitot, pode ser aplicada nas constantes do

medidor, uma vez que a exatidão do tubo de Pitot no mapeamento do perfil de velocidade pode ser maior do que a do medidor em calibração.

Os principais métodos de calibração utilizados são apresentados nos itens 2.2.1 a 2.2.5 a seguir.

2.2.1 MÉTODO GRAVIMÉTRICO

De maneira simplificada, é um método de calibração, em que o medidor a ser calibrado, tem o seu valor de indicação confrontado com o valor em massa, determinado por uma balança de pesagem, em função do tempo. O princípio do método, de acordo com a norma **ISO 4185 (1980)**, e observando a figura 2.1, consiste em:

- 1º - determinar a massa inicial do tanque de pesagem;
- 2º - desviar o fluxo com o difusor para o tanque de pesagem;
- 3º - determinar a massa final contida no tanque;

A vazão de referência (Q_{ref}) pode ser determinada pelo quociente da massa coletada em função do tempo de aquisição. Este valor é então comparado com o valor indicado pelo medidor em calibração. Ou então podemos determinar o volume totalizado pelo medidor em calibração e confrontar com o valor do tanque de pesagem.

$$Q_{ref} = \frac{dm}{\rho \cdot dt} = \frac{(mf - mi)}{\rho \cdot (tf - ti)} \quad \left[\frac{M \cdot L^3}{M \cdot T} \right] \quad (2.1)$$

em que:

ρ = massa específica;

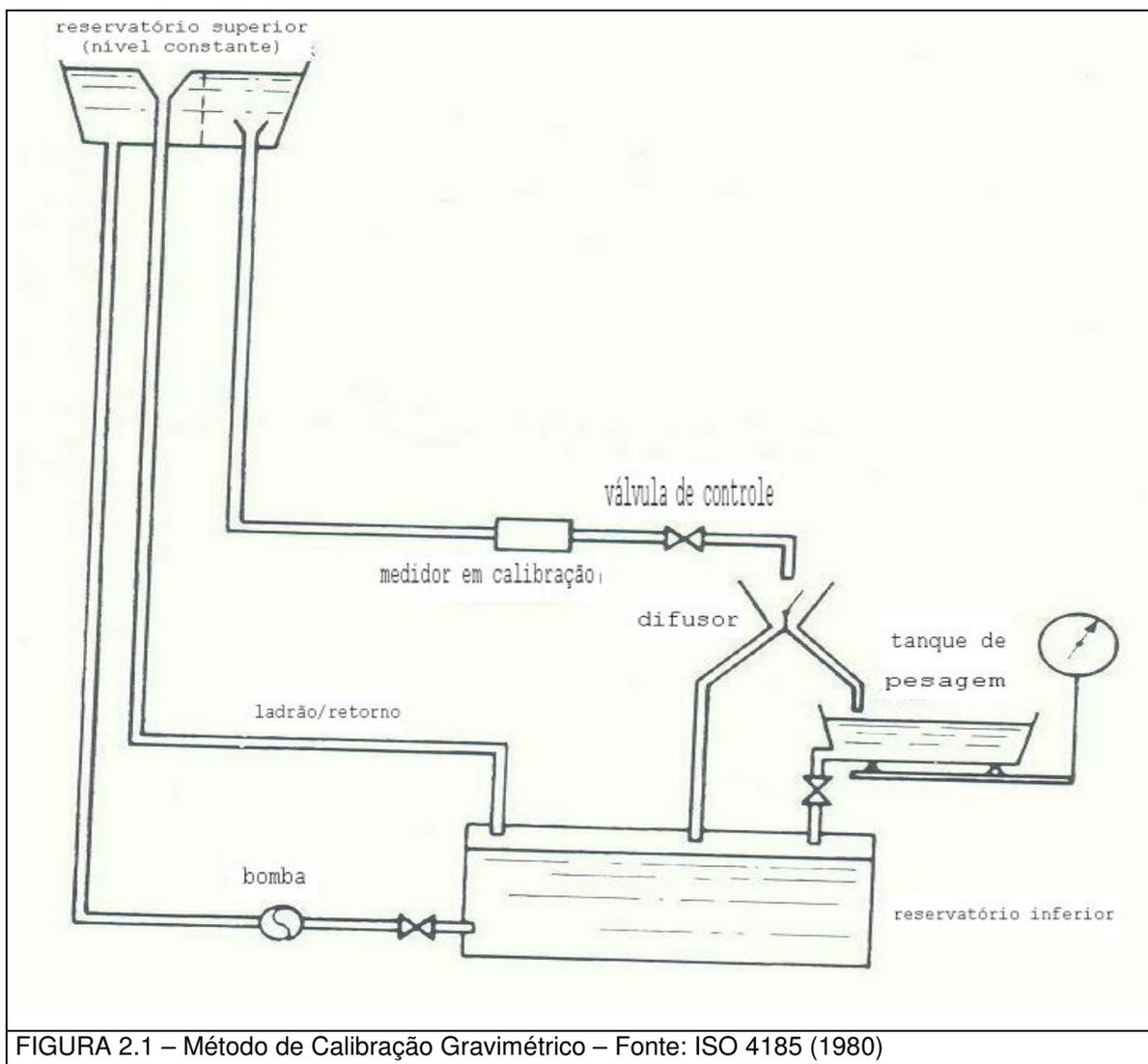
Q_{ref} = Vazão de referência ou padrão;

dm = variação da massa de líquido no tanque;

dt = tempo decorrido;

mf = massa final; mi = massa inicial;

tf = tempo final; ti = tempo inicial.



2.2.2 MÉTODO VOLUMÉTRICO

Consiste em calibrar o medidor, confrontando o valor mensurado pelo medidor em calibração com o volume determinado pelo nível de um tanque volumétrico de calibração, em função do tempo.

O princípio do método, de acordo com a norma **ISO 8316 (1987)**, e observando a figura 2.2, consiste em:

1º - determinar o volume inicial do tanque volumétrico;

2º - desviar o fluxo com o difusor para o tanque volumétrico, e zerar o cronômetro;

3º - determinar o volume final contido no tanque volumétrico;

A vazão será determinada pela razão do volume coletado em função do tempo de aquisição. Este valor é então comparado com o valor indicado pelo medidor em calibração

$$Q_{ref} = \frac{dV}{dt} = \frac{(V_f - V_i)}{(t_f - t_i)} \quad \left[\frac{L^3}{T} \right] \quad (2.2)$$

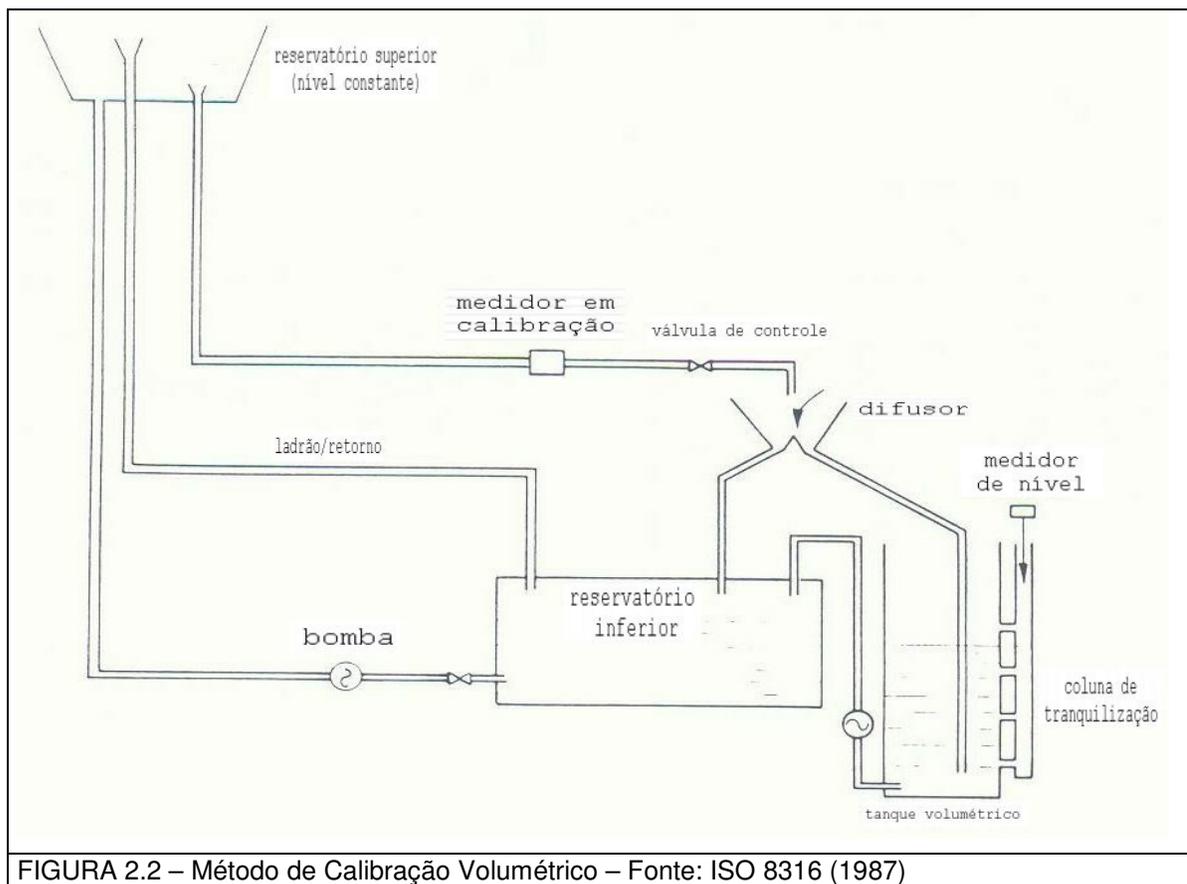


FIGURA 2.2 – Método de Calibração Volumétrica – Fonte: ISO 8316 (1987)

2.2.3 MÉTODO DO PROVADOR

SILVA (1997), descreve o calibrador para deslocamento positivo de líquidos, em que o medidor é instalado em um trecho de tubulação em circuito fechado com

comprimento e diâmetro muito bem conhecidos, como pode ser observado na figura 2.3. Neste circuito é inserida uma esfera, de diâmetro igual ao da tubulação e, de tal forma a vedá-la completamente, e que para permitir o escoamento ela precise se movimentar em velocidade igual a do escoamento. Esta esfera vai determinar o volume que passar pela tubulação, sendo que toda a vez que ela passar por determinada seção, significa que um determinado volume passou pela tubulação e, conseqüentemente pelo medidor em calibração. (um contador/registrator conta e registra o número de voltas da esfera e o volume totalizado).

A norma **ISO 4006 (1991)** denomina esse tipo de método de calibração por “Provador com Pistão”, do tipo pistão unidirecional livre.

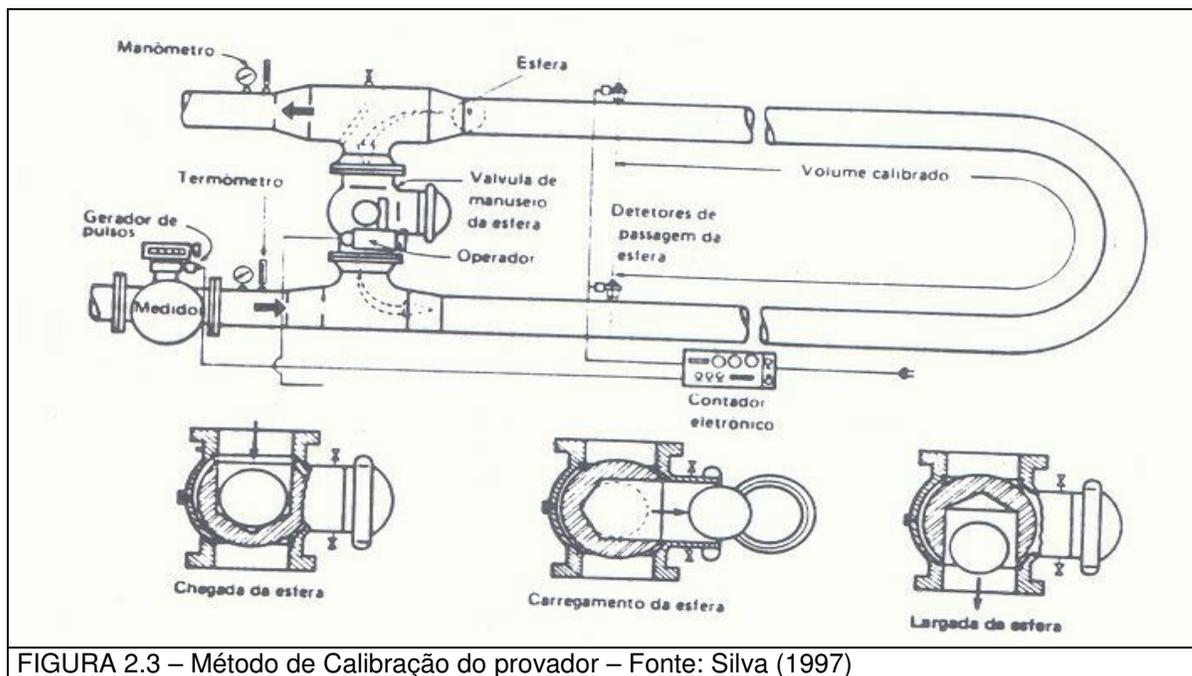
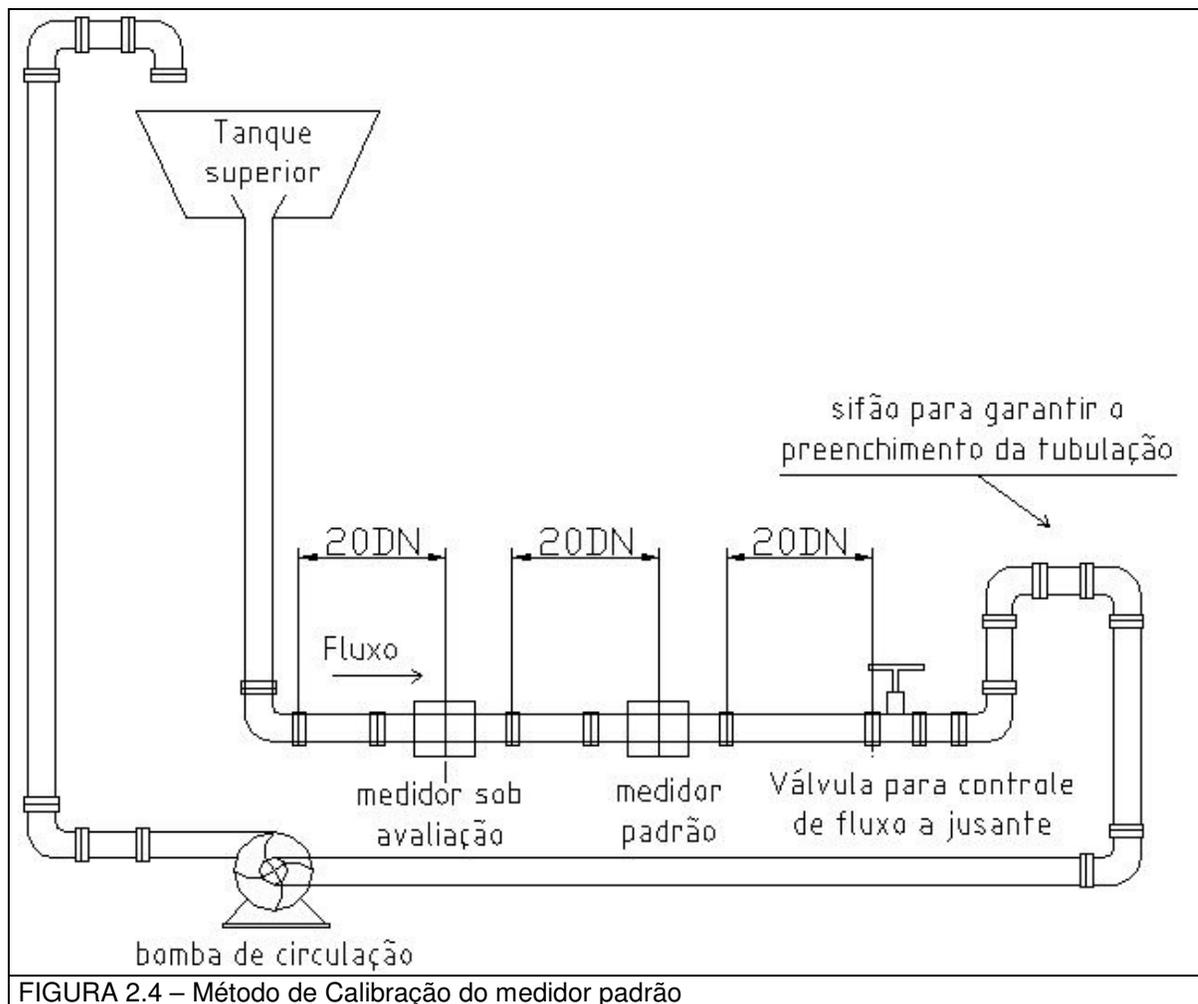


FIGURA 2.3 – Método de Calibração do provador – Fonte: Silva (1997)

2.2.4 MÉTODO DO MEDIDOR MESTRE OU PADRÃO

O método, apresentado na **ABNT NBR ISO 9104 (2000)** consiste em utilizar um medidor previamente calibrado por um laboratório de reconhecimento legal, com

exatidão maior do que a do medidor a ser calibrado, instalado em série com o medidor a ser calibrado, estando os dois medidores em condições de instalação adequadas. O procedimento então compara o volume totalizado pelo medidor padrão ao volume totalizado pelo medidor em calibração. A figura 2.4 mostra o método descrito.



2.2.5 CALIBRAÇÃO SECA

HEMP (2001) apresenta uma técnica de calibração de baixo custo para medidores eletromagnéticos de grande diâmetro. A técnica chamada de “calibração

seca” propõe a calibração do medidor sem necessidade de fluxo de água, o que pode ser muito caro para medidores de grandes diâmetros.

A técnica consiste em avaliar a resposta ao campo magnético para um perfil de velocidade plano, conforme figura 2.5, procurando a sensibilidade do campo magnético para esse perfil. O princípio deste método é dado pela equação (2.3):

$$\frac{\mathcal{E}}{v} = - \frac{\Phi_B}{i \cdot \omega} \quad (2.3)$$

Em que:

v = velocidade do perfil plano;

\mathcal{E} = diferença de potencial gerada por v ;

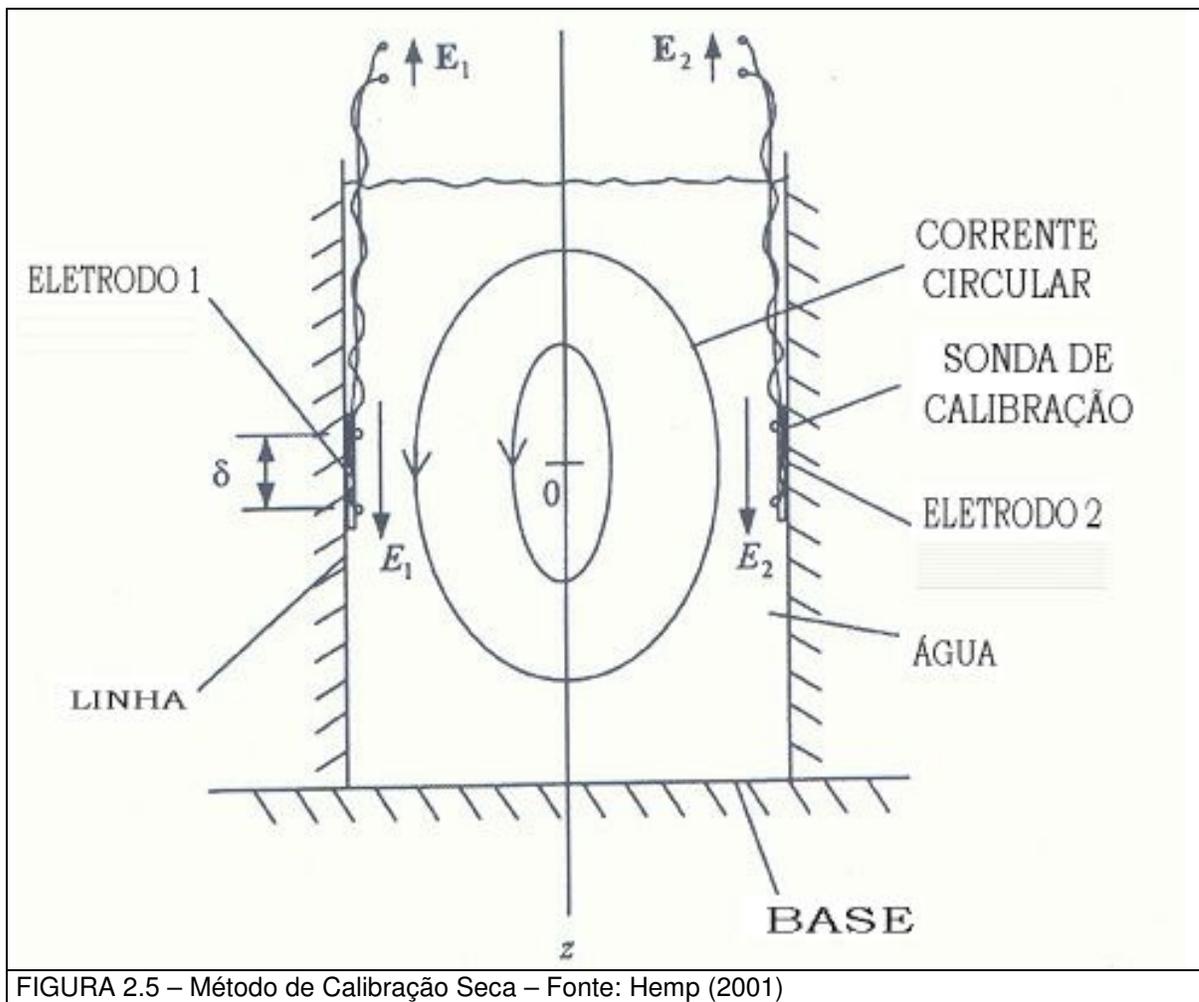
Φ_B = campo magnético;

ω = frequência do campo magnético;

i = corrente elétrica,

Conhecendo o valor de Φ_B , de v e de ω , obtém-se \mathcal{E} e conseqüentemente a sensibilidade do campo magnético para o perfil de velocidade, considerando um perfil de velocidade plano (velocidade zero).

O método de calibração, porém, não é suficiente para medidores que sejam sensíveis a variações no perfil de velocidade, ou seja, para medidores em que o fator de calibração seja significativamente dependente do número de Reynolds do escoamento, o que nas aplicações práticas de engenharia, e para os medidores convencionais inviabiliza a utilização do método.



2.3 EQUIPAMENTOS PARA MEDIÇÃO DE VAZÃO

Segundo a norma brasileira **ABNT NBR 10396 (1988)**, medidor de vazão de fluidos é um instrumento usado para medir a quantidade de fluido que escoar em um determinado elemento condutor, na unidade de tempo.

A **ABNT NBR 10396 (1988)** classifica os medidores de vazão em dois tipos básicos:

Volumétricos (ou mássicos), em que o volume é determinado pelo enchimento e esvaziamento alternado de câmaras de capacidade determinada;

Vazão instantânea, em que a indicação da vazão é em tempo real, sem a necessidade de enchimento de câmaras;

De forma esquemática os medidores de vazão se agrupam conforme o diagrama mostrado na figura 2.6 extraído da **ABNT NBR 10396 (1988)**.

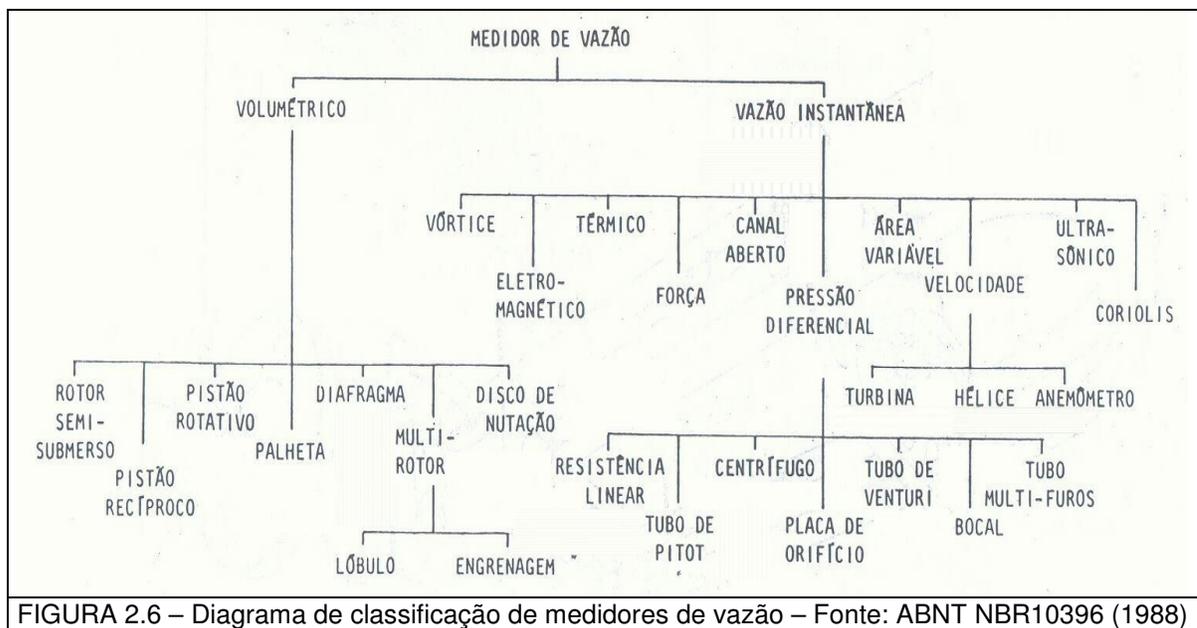


FIGURA 2.6 – Diagrama de classificação de medidores de vazão – Fonte: ABNT NBR10396 (1988)

A tabela 2.1, elaborada com base nas informações contidas em **AWWA (1989)** mostra um comparativo de desempenho para valores de exatidão, repetibilidade, rangeabilidade e diâmetros comerciais para alguns dos principais medidores de vazão.

A exatidão refere-se ao grau de conformidade do valor indicado em relação a um valor aceito como padrão.

Repetibilidade refere-se à capacidade do medidor em indicar o mesmo valor medido em medições consecutivas sob as mesmas condições.

Rangeabilidade é a razão entre a vazão máxima e a vazão mínima que o medidor é capaz de medir.

Tabela 2.1 – Valores comparativos de desempenho - Fonte: AWWA (1989)

MEDIDOR	EXATIDÃO (%) da vazão.	REPETIBILIDADE	RANGEABILIDADE	DIÂMETROS
VENTURI	±0,75	±0,25	4:1 até 10:1	25mm - 3m
PLACA DE ORIFÍCIO	±0,25 a ±2,0	±0,25	4:1	Todos
ELETROMAGNÉTICO	±0,5	±0,25	10:1	2.5mm – 3m
TURBINA	±0,25 a ±2,0	±0,25	10:1	5 – 600mm
ULTRA-SÔNICO	±1,0 a ±2,5	±0,25	20:1	3.1mm – 3m
PITOT	±0,25 a ±5,0	±0,5	4:1	13mm – 2,4m

A tabela 2.2 apresenta um quadro comparativo entre os medidores, mostrando as principais vantagens e desvantagens dos medidores mais utilizados, e foi elaborada com base em informações obtidas das normas técnicas e informações obtidas junto aos fabricantes.

As informações são apresentadas de forma geral, sem qualquer hierarquia ou ponderação entre as vantagens e desvantagens dos medidores de vazão. A tabela tomou por base tabelas apresentadas em **Delmée (1983)** e **Bean (1971)**.

2.4 MEDIDORES DE VAZÃO MAIS USUAIS

2.4.1 MEDIDORES VOLUMÉTRICOS (OU MÁSSICOS)

A seguir se apresentam os diferentes tipos de medidores volumétricos e uma descrição sucinta do funcionamento dos mesmos.

Tabela 2.2 – Vantagens e desvantagens dos principais medidores.

	Vantagens	Desvantagens
Deprimogêneos	Custo relativamente Baixo	Insera perda de carga na linha
	Usados a mais de 100 anos	Sensível a distúrbios do escoamento
	Boa Resistência (não possui peças móveis)	Sensível a qualidade da água
	Medidor de vazão Instantânea (resposta imediata)	Precisão baixa (2%)
Eletromagnético	Boa Resistência (não possui peças móveis)	Sensível a distúrbios do escoamento
	Medidor de vazão Instantânea (resposta imediata)	Interferência eletromagnética e da rede elétrica
	Não insera perda de carga na linha	Exige fluido condutivo
	Funcionamento Bidirecional	Problemas de curto nos eletrodos
	Funcionamento Vertical/Horizontal	Exige trechos retos a montante (>10D) e a jusante do medidor (> 5D) (ISO 6817)
	Sinal de Resposta Linear	Funcionamento necessita energia elétrica
	Boa faixa de velocidade (0,5 a 10 m/s)	Manutenção exige mão de obra especializada
Velocidade Pontual	Instalação fácil	Sensível a distúrbios do escoamento
	Permite medir grandes vazões e grandes diâmetros	Sensível a qualidade da água (incrustações)
	Baixo custo	Trechos retos: montante (>20D) e a jusante (> 10D)
	Versatilidade – Serve para vários diâmetros	Sofre desgaste (possui peças móveis)
	Manutenção em geral é simples (Pitot)	Sem padronização
Ultra-sônico	Boa Resistência (não possui peças móveis)	Custo Elevado
	Medidor de vazão Instantânea (resposta imediata)	Interferência de ruídos de válvulas
	Não insera perda de carga na linha	Sensível a distúrbios do escoamento
	Funcionamento Bidirecional	Tecnologia relativamente recente
	Funcionamento Vertical/Horizontal	Não existe normalização
	Facilidade de Montagem (modelo "Clamp-On" externo)	A espessura da tubulação pode ser fonte de incerteza
Volumétricos	Custo Relativamente Baixo	Sensível a qualidade da água
	Baixas Vazões, e pequenos diâmetros	Baixa Resistência (possui peças móveis)
	Insensível ao perfil de velocidade	Insera perda de carga
	Range de vazão limitado	Desgaste elevado

Medidor de Pesagem: medidor composto de dois tanques colocados sobre balanças, e de uma válvula de desvio, de tal modo a permitir que o fluxo seja desviado de um tanque para o outro durante o processo de medição. Ou seja, enquanto um tanque está

enchendo o outro está esvaziando, formando um ciclo e permitindo medir o fluxo continuamente. A vazão é determinada em função do peso determinado dos tanques e do número de ciclos por unidade de tempo.

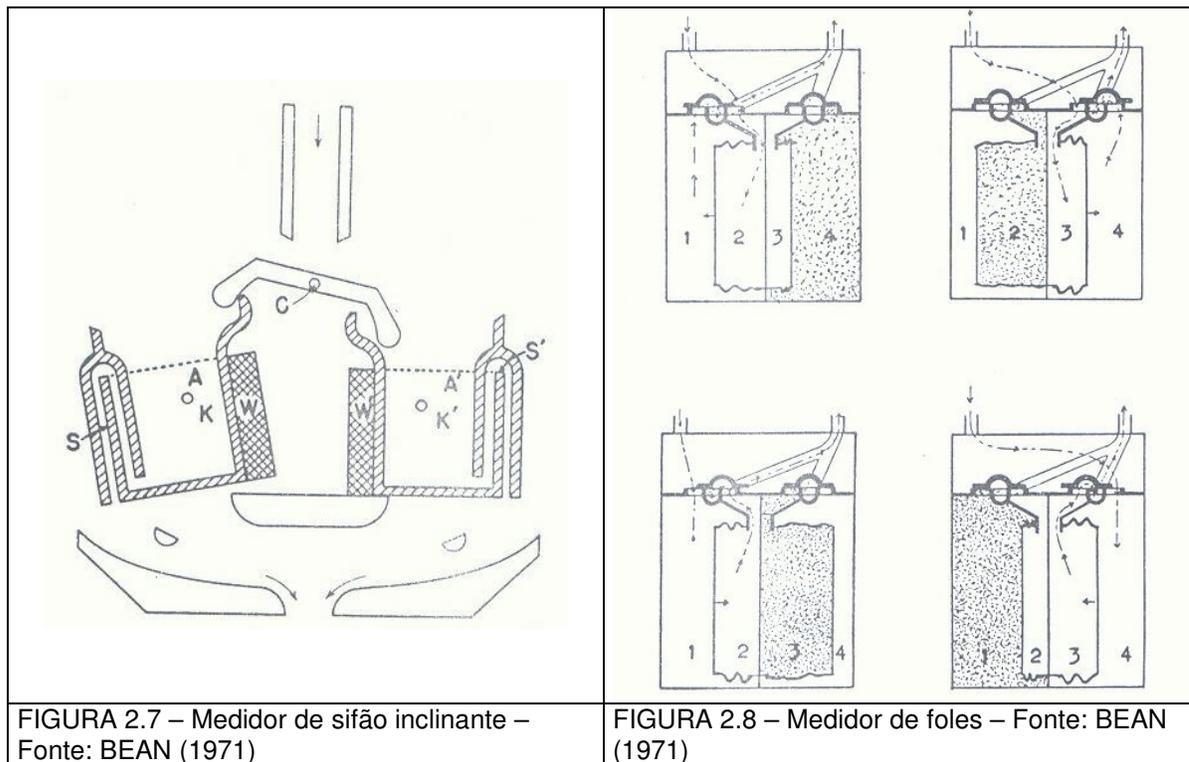
Medidor com sifão inclinante: conforme a figura 2.7 é formado por dois tanques (A e A') munidos de contrapesos (W e W') e de dois sifões (S e S') suportados por dois pivôs (K e K') e de um divisor com eixo (C) abastecidos por um fluxo central descendente. O princípio do medidor é simples: quando o primeiro tanque (K) está cheio, o peso do líquido supera o do contrapeso (W), inclinando o tanque e permitindo que o fluido escoe pelo sifão (S). Desviando o fluxo para o outro tanque (K'), repete o processo, e a vazão é determinada em função do volume dos tanques e do número de ciclos por unidade de tempo.

Tanque de medição: é a forma mais elementar de medidor volumétrico, sendo composto de um ou mais tanques de volume conhecido, sendo preenchidos e esvaziados sucessivamente, sendo que a vazão é determinada em função do número de vezes que se enchem os tanques, podendo o controle ser automático (mecânico ou eletrônico) ou manual.

Medidores de deslocamento positivo para líquidos e gases: medidor em que o fluido a ser medido passa por uma ou mais câmaras de volumes perfeitamente determinados. São constituídos de partições ou êmbolos, que são deslocados pelo escoamento do fluido, enchendo e esvaziando alternadamente os compartimentos, e com um dispositivo que conta e registra os ciclos de deslocamentos, em unidades de vazão.

Medidor de Foles: o nome usual deste medidor é “medidor seco de deslocamento positivo” sendo utilizado somente para gases. Os elementos principais desse medidor são os diafragmas dos compartimentos de medição, as válvulas para o controle de entrada e de saída do gás, um dispositivo para sincronizar as válvulas aos diafragmas, e um registrador para contar o número de ciclos do medidor. O funcionamento é

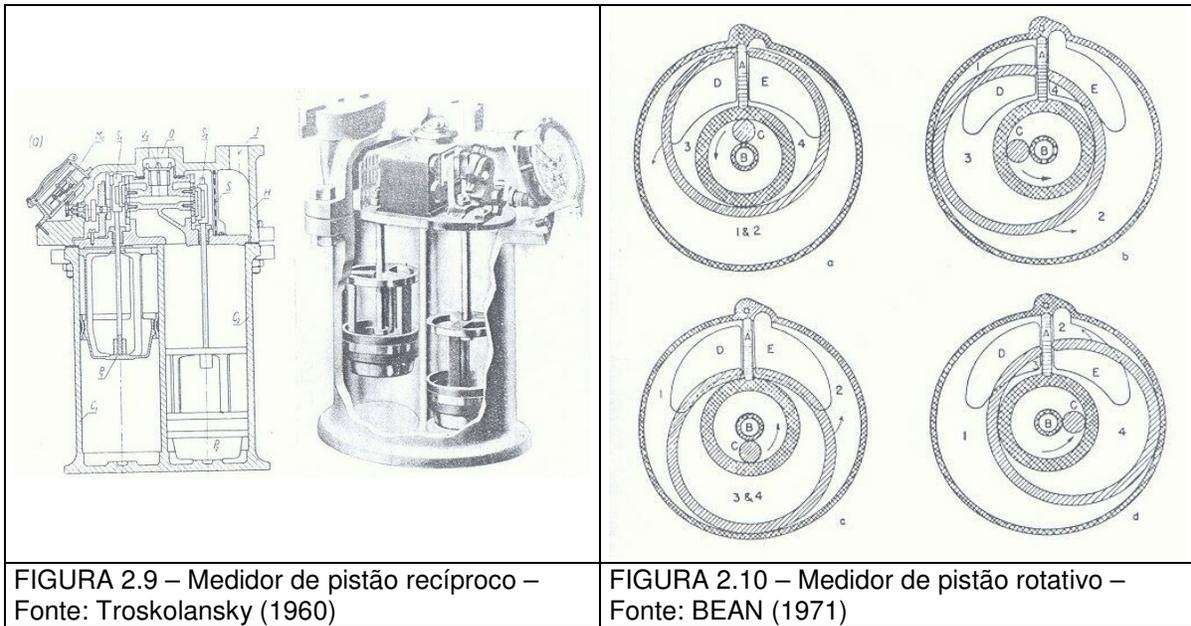
baseado no preenchimento e esvaziamento de compartimentos de volume determinado, em que cada ciclo representa um volume determinado que passa pelo medidor, determinando desta maneira a vazão. A figura 2.8 ilustra o medidor de Foles com as suas câmaras numeradas 1,2,3 e 4.



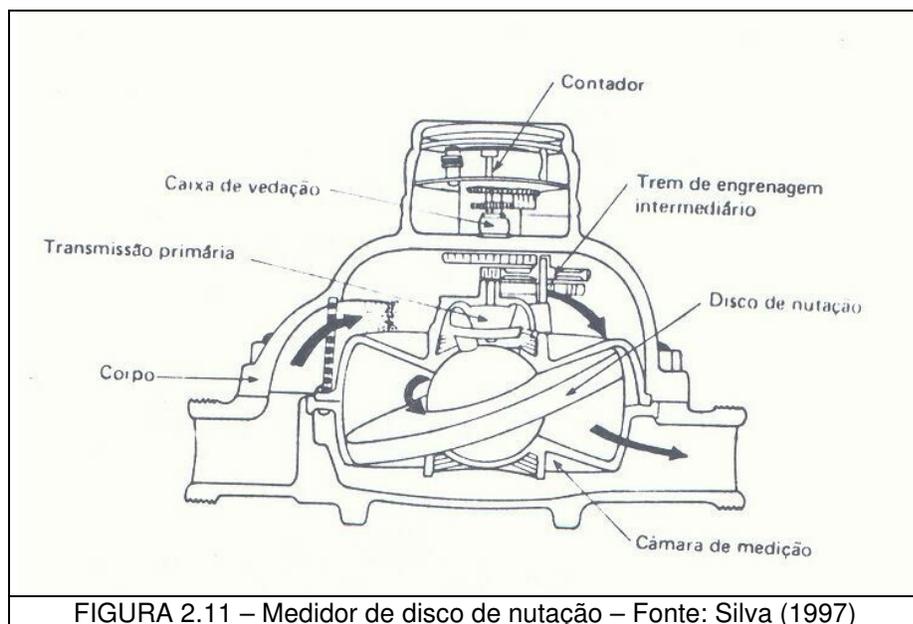
Medidor de Pistão Recíproco: o medidor é formado basicamente de um pistão e de um cilindro, sendo que o fluido provoca o movimento do primeiro dentro do segundo. A vazão é então determinada pela contagem dos movimentos do pistão dentro do cilindro que possui volume conhecido. O medidor pode ser composto de um ou mais cilindros e pistões, em disposição radial ou linear. Na figura 2.9 pode-se observar um medidor de pistão recíproco de dois pistões com disposição linear.

Medidor de Pistão Rotativo: o medidor é formado de um pistão e um cilindro com a mesma altura, mas diâmetros diferentes, como pode-se observar na figura 2.10. O eixo do pistão é indicado pela letra “C” e as letras “D” e “E” representam a entrada e a saída do medidor. O pistão atua também como válvula, fechando a entrada e a saída de acordo com o movimento. A vazão pode ser calculada em função da contagem dos

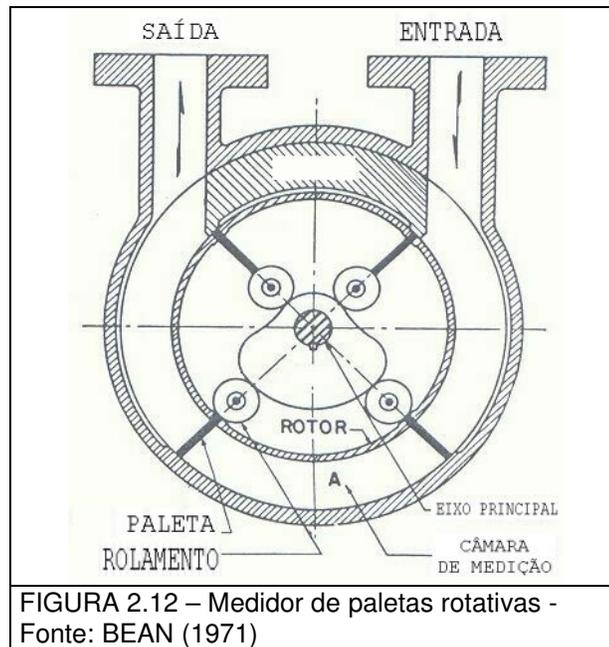
ciclos do pistão e, em função do volume deslocado que é determinado a partir das características geométricas do medidor.



Disco de Nutação: medidor deste tipo tem um disco montado em uma câmara circular, com uma cobertura cônica e com uma base cônica ou plana. O disco possui uma esfera central que funciona com o eixo do mesmo. Pelo movimento nutante deste disco ocorre o deslocamento de volume determinado, conforme pode-se observar pela figura 2.11.



Medidor de Paletas Deslizantes: medidor que possui um rotor com palhetas móveis que desloca uma quantidade determinada de volume, em função da rotação do conjunto, como pode ser observado pela figura 2.12.



Medidor de Engrenagens (medidor de lóbulos rotativos): como é mostrado na figura 2.13 o medidor é formado por duas engrenagens que permitem a passagem do líquido a ser medido girando em rotações opostas, e que a cada revolução permitem a passagem de um volume determinado de fluido. A vazão pode ser determinada através da contagem do número de rotações dadas pelas engrenagens.

Medidor de rotor semi-submerso (medidor de selo líquido): medidor formado por um rotor, semi-submerso em um líquido selante, sendo formado por câmaras de volume conhecido que deslocam volumes de gás determinado. Conforme é mostrado na figura 2.14 para o correto funcionamento do medidor, é necessário que a carcaça esteja preenchida pelo líquido selante até a submersão parcial do rotor. Este tipo de medidor é indicado para a medição de gases.

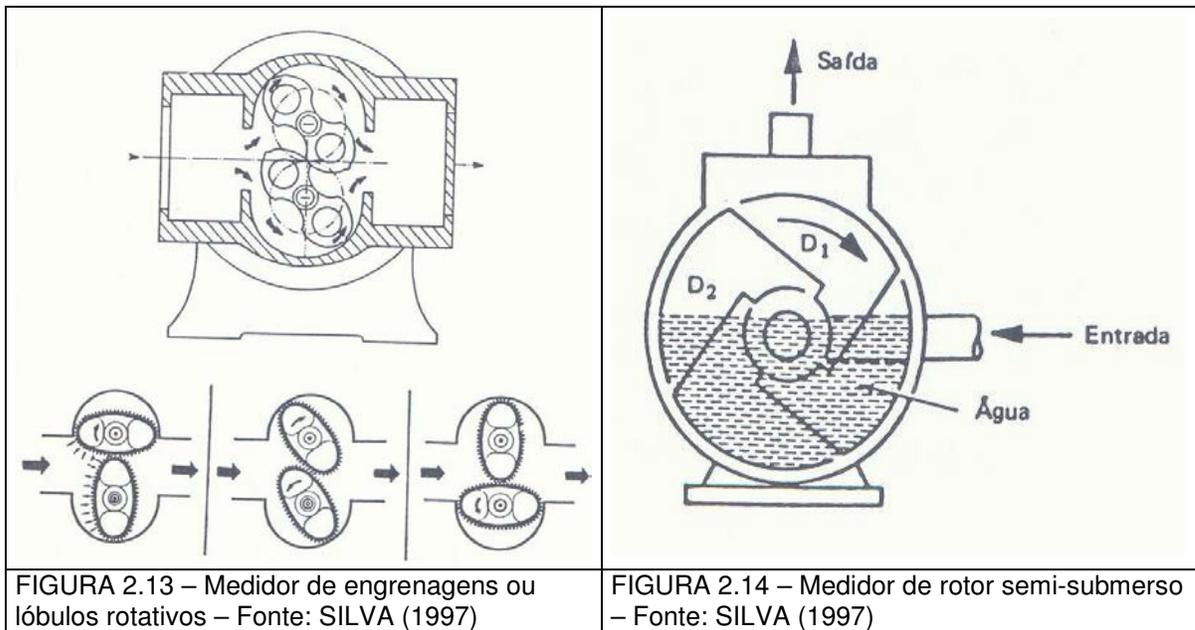


FIGURA 2.13 – Medidor de engrenagens ou lóbulos rotativos – Fonte: SILVA (1997)

FIGURA 2.14 – Medidor de rotor semi-submerso – Fonte: SILVA (1997)

Medidor Proporcional: é formado por um medidor volumétrico instalado em uma derivação “by-pass” da tubulação principal, indicando um valor de vazão proporcional à vazão total escoada na tubulação principal. É um medidor muito utilizado em saneamento, onde em geral é utilizado um hidrômetro instalado no by-pass, resultando em uma opção de baixo custo de instalação, e de fácil manutenção, não exigindo mão de obra especializada.

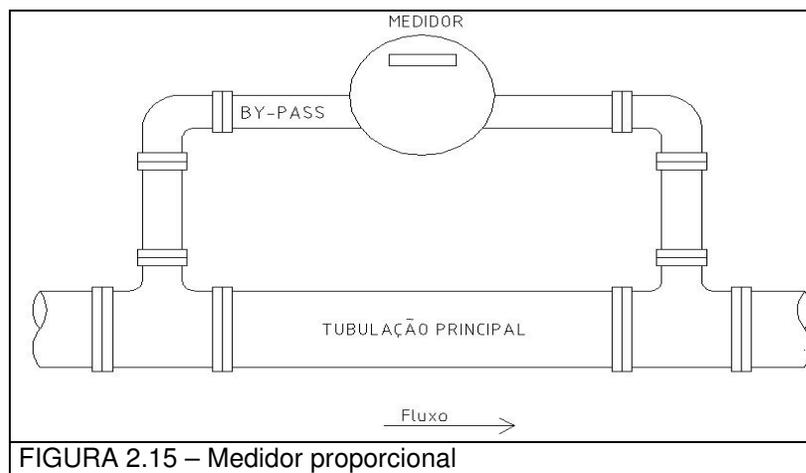


FIGURA 2.15 – Medidor proporcional

2.4.2 MEDIDORES INSTANTÂNEOS

A seguir se apresentam os diferentes tipos e uma descrição sucinta do funcionamento.

Medidores de Pressão Diferencial (deprimogêneo): dispositivo inserido na tubulação que restringe a área da seção transversal da tubulação, gerando assim uma diferença de pressão, proporcional as características geométricas da tubulação e do fluido, permitindo calcular a vazão escoada, em geral por uma função do tipo $Q = \alpha (\Delta P)^{1/2}$, em que ΔP é a diferença de pressão entre as tomadas de pressão instaladas à montante e à jusante do elemento deprimogêneo; e Q é a vazão.

Medidor Venturi: medidor deprimogêneo, formado por um tubo convergente e um tubo divergente, possuindo entre eles uma garganta que restringe o escoamento e provoca uma perda de carga localizada, proporcional a vazão escoada. Tomando-se a pressão em um ponto a montante da garganta e num ponto junto à jusante da garganta, pode-se calcular o valor da perda de carga Δp que permite calcular a vazão escoada. A figura 2.16 mostra um corte de um medidor Venturi clássico.

Placa de orifício: dispositivo formado por uma placa, que instalada na linha provoca uma perda de carga, funcionando com o princípio de um medidor diferencial. A placa pode possuir um orifício centrado, segmentado, ou excêntrico, pode ainda possuir a borda espessa ou delgada, com corte reto ou chanfrado. Esses detalhes de projeto dependem das características do fluido medido e do escoamento. A figura 2.17 mostra em corte e em vista um medidor de placa de orifício usual.

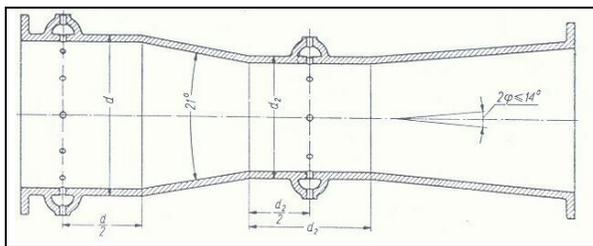


Figura 2.16 – Medidor Venturi clássico – Fonte: Trokolanski (1960)

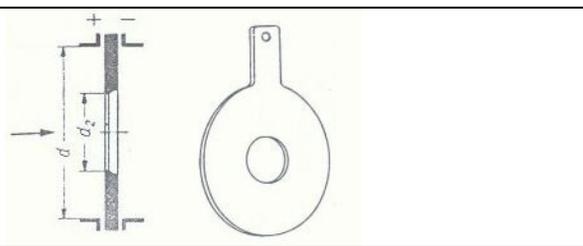
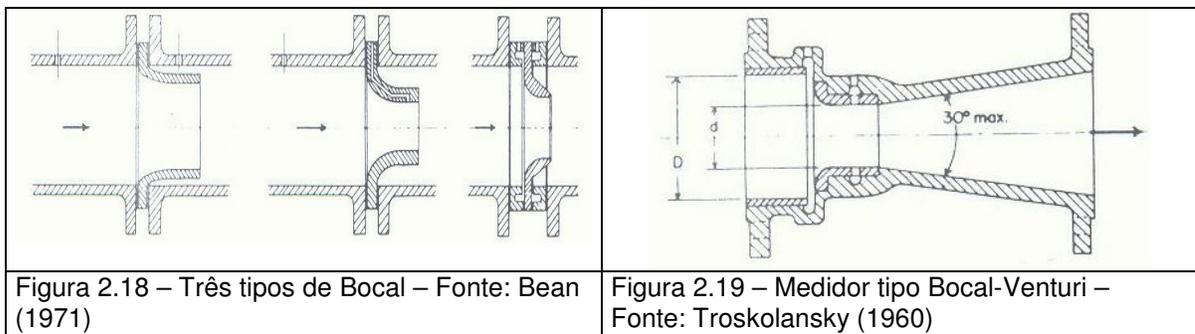


Figura 2.17 – Placa de Orifício – Fonte: Silva(1997) e Bean (1971)

Bocal: tipo de medidor em que o dispositivo que provoca a diferença de pressão é um bocal, que tem por objetivo não provocar uma perda de carga muito significativa, e de não criar pontos de acúmulo de sedimentos, como pode ser visto na figura 2.18. Acaba sendo um medidor intermediário entre o Tubo de Venturi e a Placa de Orifício, em termos de perda de carga total da tubulação, sendo adequado para escoamentos de líquidos abrasivos ou corrosivos.

Bocal Venturi: tipo de bocal que possui um cone convergente e um cone divergente trata-se de um tubo de venturi curto, como pode ser observado na figura 2.19.



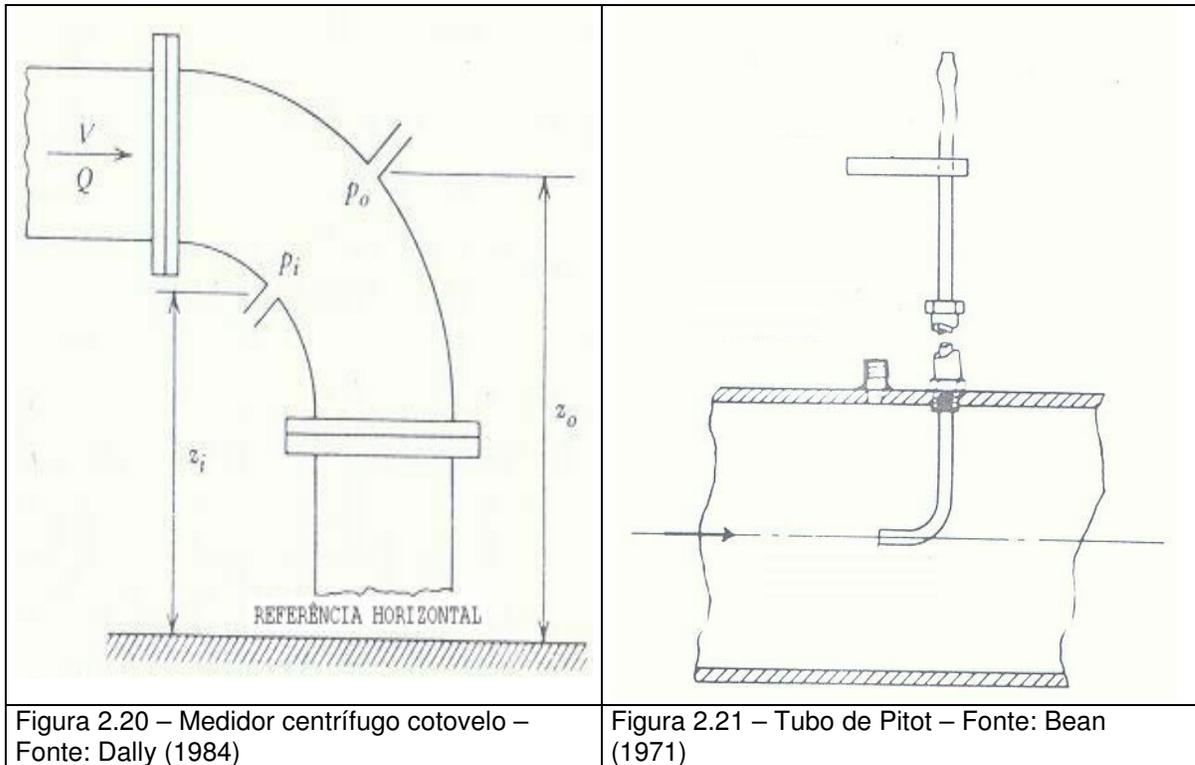
Medidor Centrífugo: é um tipo de medidor de pressão diferencial, onde as tomadas de pressão são posicionadas radialmente numa curva, sendo uma interna e outra externa à curva. A vazão é calculada como nos demais medidores de pressão diferencial, ou seja, em função da raiz quadrada da diferença de pressão.

Medidor de Cotovelo: variante do medidor centrífugo, em que o primário é formado por um cotovelo, com duas tomadas de pressão, como pode ser visto na figura 2.20.

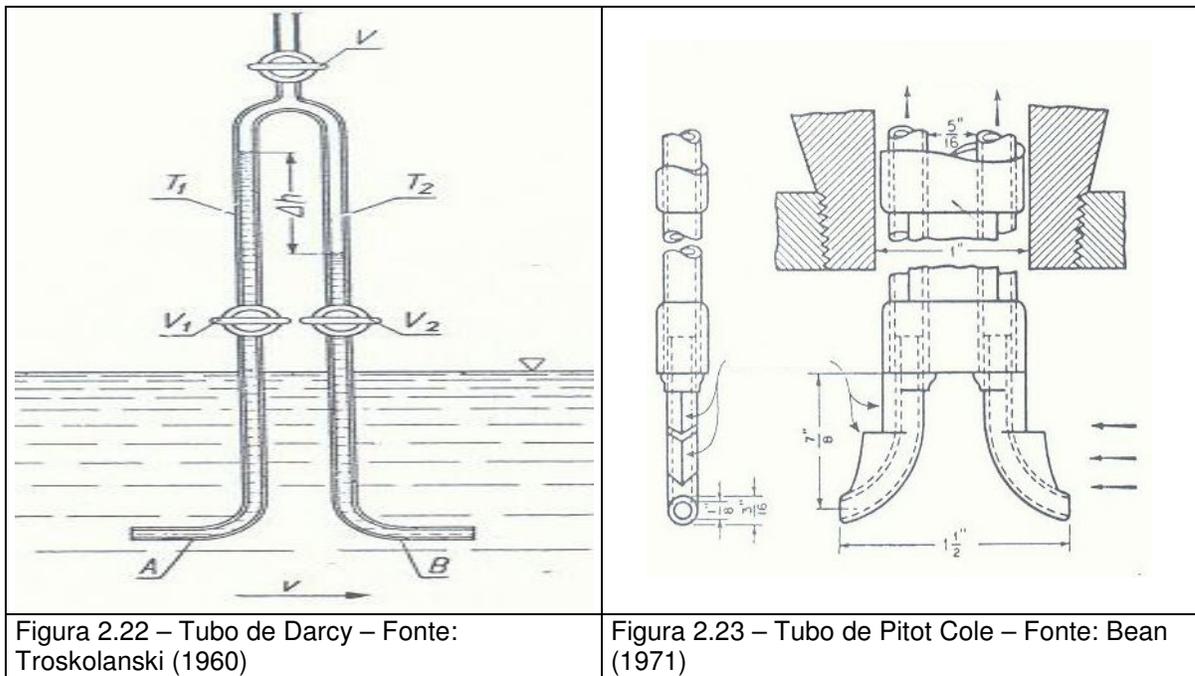
Medidor de Curva de Raio longo: variante do medidor centrífugo, e do medidor de cotovelo, onde o elemento primário do deprimogêneo é formado por uma curva de raio longo.

Tubo de Pitot: medidor de pressão diferencial, onde as tomadas de pressão são inseridas na tubulação, sendo uma tomada de pressão estática, e uma de pressão dinâmica ou total, como pode ser observado na figura 2.21. A vazão é definida como

nos demais medidores deprimogêneos, ou seja a vazão (Q) é proporcional a raiz quadrada da diferença de pressão medida $[(\Delta P)^{1/2}]$.



Tubo de Pitot Cole: uma variante do tubo de Pitot, apresentada por Edward S. Cole, em 1896, que constitui num instrumento de medição bastante utilizado pelas empresas de saneamento na atualidade, em função do seu custo reduzido e simplicidade de operação. O equipamento, baseado no tubo de Darcy (1858) visto na figura 2.22 em que T1 e T2 são os tubos de medição, V, V1 e V2 são as válvulas de controle e Δh a deflexão medida, que é proporcional a velocidade v . O tubo de Pitot é formado por dois tubos com tomadas reversíveis, chamadas de “tips”, que são as tomadas de pressão que medem a diferença de pressão. A figura 2.23 dá uma idéia do equipamento, que pode ser usado para determinar o perfil do escoamento, determinando a velocidade do escoamento em diversos pontos da seção transversal da tubulação. A velocidade do escoamento é obtida em função da deflexão medida nos meniscos do tubo, Δh , ou mais recentemente com a utilização de transdutores de pressão eletrônicos.



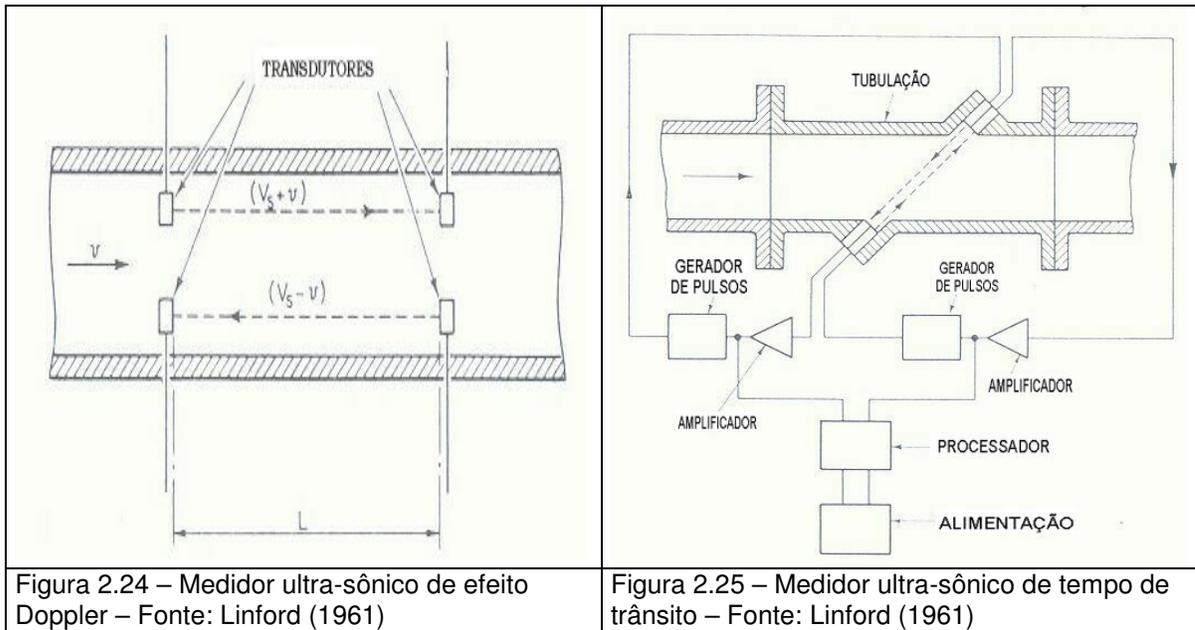
Tubo de Pitot-Venturi: é uma variante do tubo de Pitot, indicada pra casos onde a velocidade do escoamento é baixa, e conseqüentemente o diferencial de pressão também. Neste caso as tomadas de pressão são inseridas na tubulação em uma sonda com o formato de um mini tubo de Venturi. Em razão do formato da sonda o diferencial de pressão gerado é maior do que o gerado num Pitot Cole.

Medidor Ultra-sônico de efeito Doppler: medidor que funciona pelo princípio do efeito Doppler, da propagação de ondas ultra-sônicas através do fluido medido. O medidor possui um emissor e um receptor, de ultra-som, sendo que o emissor emite uma onda ultra-sônica, que é recebida pelo receptor. A frequência do sinal de resposta do ultra-som recebido pelo receptor é proporcional à velocidade do fluido. O princípio de operação pode ser observado na figura 2.24.

Medidor Ultra-sônico de tempo de trânsito: medidor que opera com o princípio da propagação de ondas ultra-sônicas através do fluido medido, sendo formado por um ou mais pares de sondas, uma emissora e outra receptora (podendo as sondas assumir as duas funções simultaneamente). O intervalo de tempo que a onda ultra-sônica leva para percorrer o trecho entre o emissor e o receptor é função da velocidade média do

escoamento. As sondas podem ser posicionadas na tubulação em três configurações básicas em V, W ou sem reflexão. Na figura 2.25 está a instalação direta sem reflexão.

Medidor eletromagnético: medidor que funciona pelo princípio de Indução eletromagnética de Faraday, e será apresentado detalhadamente no capítulo 3 deste estudo.



Aerofólios: medidor composto de duas aberturas retangulares separadas por um aerofólio margeadas por dois semi-aerofólios, como mostrado na figura 2.26. A vazão é calculada em função da diferença de potencial entre as tomadas de alta e baixa pressão, como em qualquer medidor deprimogênico. O perfil das asas é aerodinâmico com a finalidade de minimizar a perda de carga.

Medidores de Vórtices: medidor que relaciona a frequência de oscilações causadas por vórtices, provocados por um dispositivo inserido na tubulação. A velocidade V_0 do escoamento é determinada em função da frequência das oscilações f_s e do número de Strouhal S_N . Governada pela equação $V_0 = f_s \cdot D / S_N$, em que “D” é a dimensão

característica do dispositivo inserido na tubulação, no caso, o diâmetro do cilindro. A figura 2.27 ilustra o esquema de funcionamento do medidor.

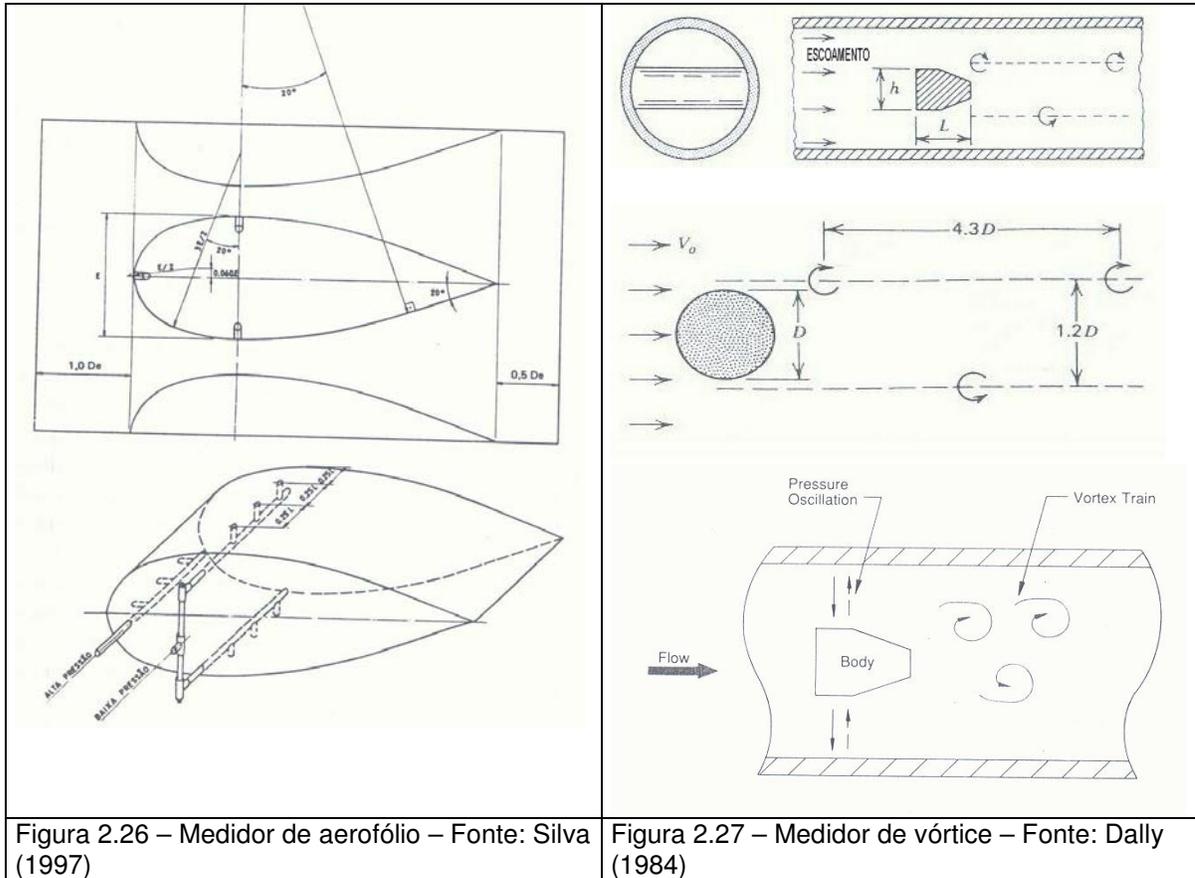


Figura 2.26 – Medidor de aerofólio – Fonte: Silva (1997)

Figura 2.27 – Medidor de vórtice – Fonte: Dally (1984)

Medidor de força: instrumento no qual a vazão é dada em função da força exercida pelo escoamento sobre um dispositivo introduzido na tubulação, conforme a figura 2.28.

Medidor de área variável: Medidor no qual a indicação da vazão é dada pela posição de equilíbrio entre as forças gravitacionais e as forças de arrasto de uma peça móvel, introduzida em um trecho de duto de seção variável. Na figura 2.29 pode-se ter idéia do funcionamento desse tipo de medidor, também conhecido por Rotâmetro, sendo muito utilizado em medição de esgotos, e também na área médica para a medição de oxigênio.

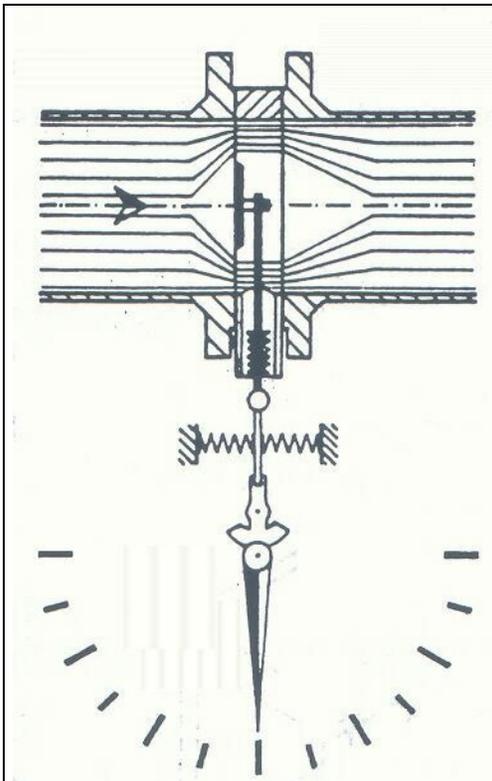


Figura 2.28 – Medidor de Força – Fonte: ABNT NBR 10396 (1988)

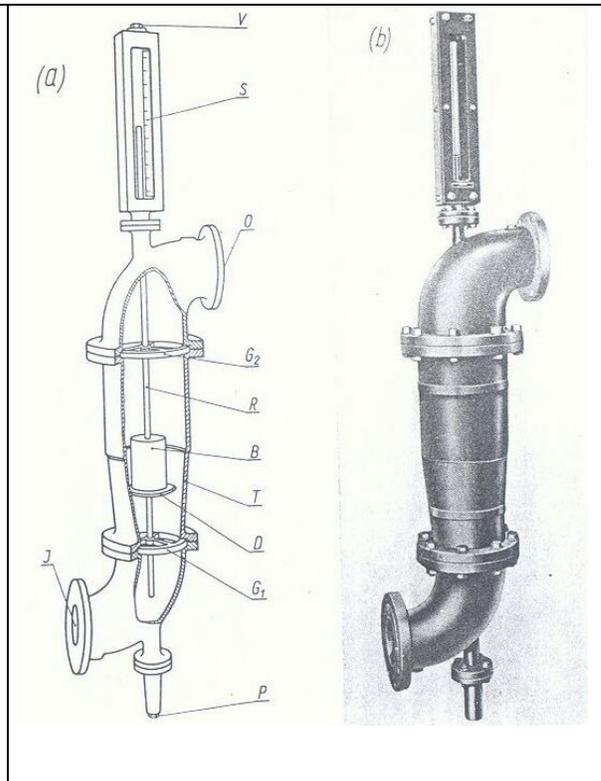


Figura 2.29 – Medidor de área variável – Fonte: Troskolanski (1960)

Medidor Térmico: medidor que utiliza o princípio da transferência de calor para o fluido como princípio de medição de vazão, sendo formado por uma fonte de calor (resistência elétrica) e por dois termômetros instalados na tubulação, sendo um a montante e outro a jusante da fonte. Calculando a diferença de temperatura, é possível determinar a vazão. A figura 2.30 ilustra o esquema do medidor.

Medidor de turbina ou hélice: medidor no qual a velocidade do escoamento é determinada diretamente em função da rotação de uma turbina ou hélice, instalada na tubulação. Caso a turbina ocupe toda a seção transversal do tubo, o medidor pode atuar como medidor de vazão, caso contrário ele será um medidor de velocidade pontual. Um medidor turbina pode ser visto na figura 2.31. Este medidor é utilizado para ocupar toda a seção da tubulação, com uma entrada e uma saída, atuando como medidor de vazão.

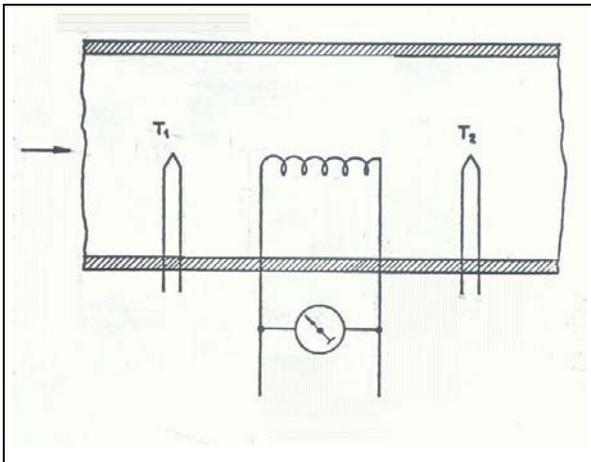


Figura 2.30 – Medidor térmico – Fonte: ABNT NBR 10396 (1988)

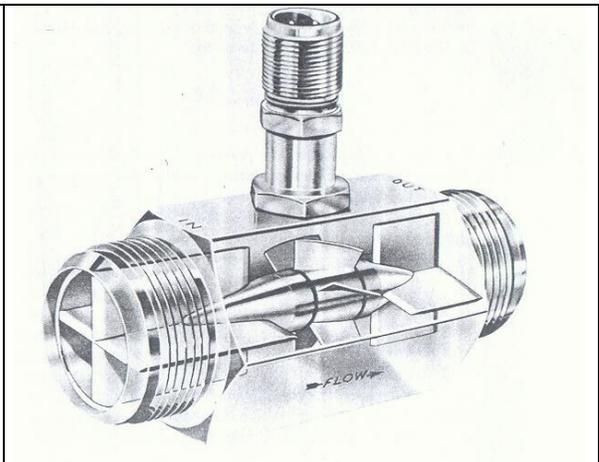


Figura 2.31 – Medidor turbina – Fonte: Dally (1984)

Medidor Coriolis: medidor muito utilizado para medição de gás, quando uma boa exatidão é necessária. O fluido é submetido a uma translação e a uma rotação, provocando na tubulação uma força resultante que depende da vazão em massa. A figura 2.32 mostra uma vista externa do medidor.

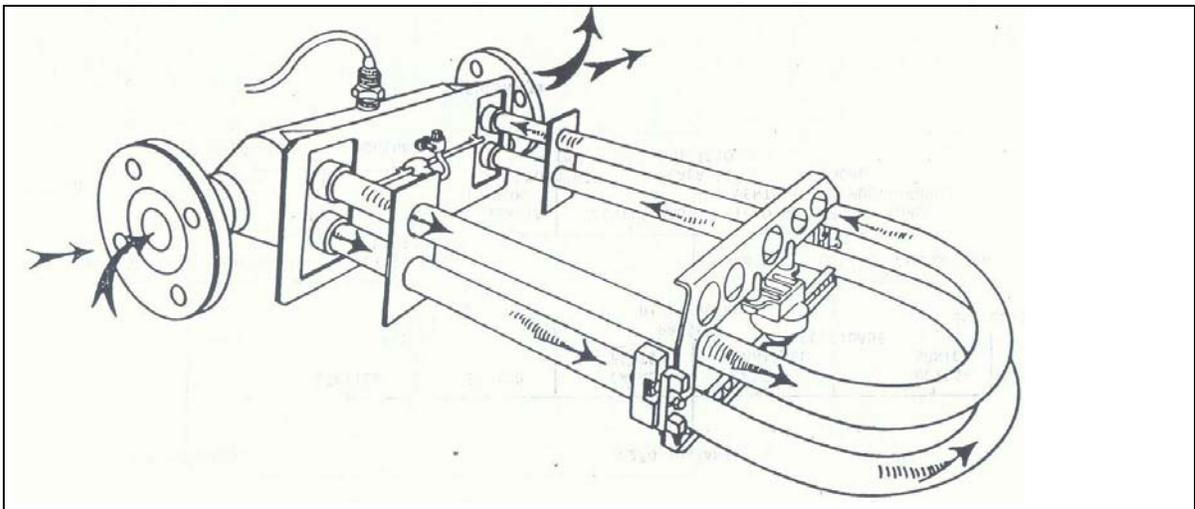


Figura 2.32 – Medidor Coriolis – Fonte: ABNT NBR 10396 (1988)

Medidor de Válvula: existem vários tipos de medidor de válvula, dependendo da construção da válvula, mas basicamente todos funcionam como um medidor por diferença de pressão. O elemento que insere a perda de carga na tubulação, restringindo a área da seção e aumentando a velocidade do escoamento, é uma

válvula. A figura 2.33 mostra a vista externa de um medidor de válvula, onde pode-se observar as duas tomadas de pressão (1 e 2) e a válvula ou agulha (N). A válvula é acionada por um motor servo-assistido.

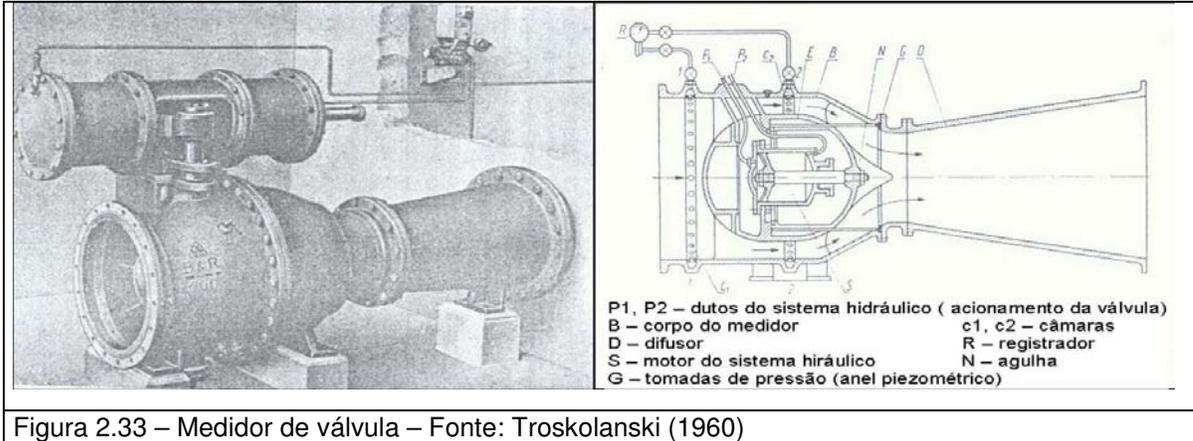


Figura 2.33 – Medidor de válvula – Fonte: Troskolanski (1960)

2.5 EQUIPAMENTOS RETIFICADORES DE ESCOAMENTO

A norma **ISO 7194 (1983)** estabelece que os condicionadores de escoamento são dispositivos instalados na linha com a finalidade de amortecer distorções do escoamento. Tem a finalidade de reduzir o trecho reto necessário a montante do elemento primário de um medidor de vazão em relação a singularidades da tubulação, garantindo o perfeito funcionamento do medidor de vazão.

Eles executam basicamente duas funções:

I - Eliminação de escoamentos rotacionais, ou vórtices, sendo que o dispositivo inserido no conduto, deve reduzir ou eliminar os vórtices.

II - Regularização do perfil de velocidades, no qual o dispositivo instalado no conduto elimina, ou apenas reduz, a assimetria do perfil de velocidades, provocada por singularidades.

Segundo a norma **ISO 7194 (1983)** nas situações em que o escoamento é assimétrico ou sofre turbilhonamento são utilizados retificadores de fluxo, para retificar ou condicionar o fluxo, tornando-o simétrico ou sem turbilhonamento, conforme o caso.

Os retificadores de fluxo devem ser instalados obedecendo aos trechos retos à montante e a jusante de singularidades. Ou seja, como pode ser visto na figura 2.34 deve haver um trecho reto entre a singularidade e o retificador (L1) e, entre este e o medidor de vazão (L2) e, ainda entre este e a próxima singularidade a jusante (L3). Estes comprimentos, ditos L1, L2 e L3 devem, segundo a norma obedecer aos seguintes limites:

$$L1 \geq 3 \cdot DN \quad (2.4)$$

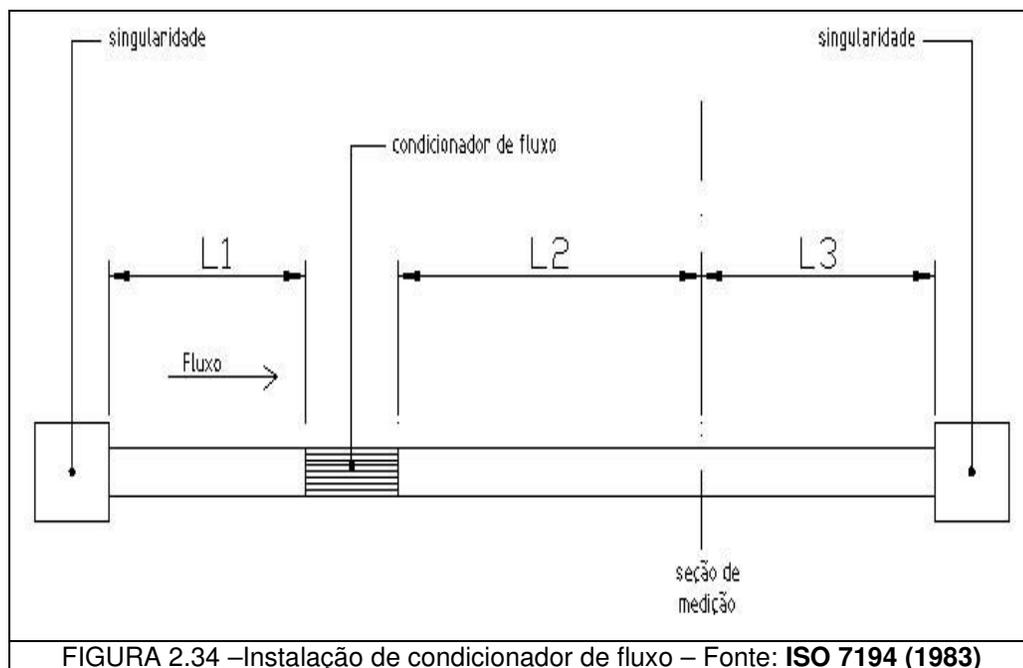
$$L2 \geq 5 \cdot DN \quad (2.5)$$

$$L3 \geq 2 \cdot DN \quad (2.6)$$

Em que DN é o diâmetro nominal da tubulação.

A figura 2.34 mostra estes limites de instalação, considerando distúrbios a montante e a jusante do medidor.

A escolha do tipo de retificador deve ser função da natureza do perfil de velocidades e da perda de carga admissível ao sistema. A norma **ISO 7194 (1983)** apresenta cinco tipos de retificadores: **ZANKER, SPRENKLE, TUBE BUNDLE (Feixe de Tubos), AMCA e ÉTOILE**. Segundo a norma **ISO 5167 (1980)** e sua tradução a **ABNT NBR ISO 5167-1 (1994)** o uso de retificadores de fluxo é recomendado para permitir a instalação do medidor à jusante de montagens não previstas na tabela 2.3. A tabela serve para medidores do tipo Venturi.



Quando for usado um medidor de grandes dimensões os retificadores podem reduzir os trechos retos necessários, que podem ter grandes proporções. Desde que a instalação obedeça aos critérios de instalação para os retificadores descritos o mesmo não introduz qualquer incerteza adicional ao escoamento.

Tabela 2.3 - Trechos retos necessários - tubo de Venturi - fonte: ABNT NBR ISO 5167 (1994)

Relação de diâmetro μ	Uma única curva de 90° (*)	Duas ou mais curvas de 90° no mesmo plano **)		Duas ou mais curvas de 90° em diferentes planos (**)		Redução de 3D para D num comprimento de 3,5 D		Expansão de 0,75D para D num comprimento de D		Válvula esférica ou gaveta totalmente aberta	
0,30	0,5***)	1,5	(0,5)	(0,5)***)	(0,5)	1,5	(0,5)	1,5	(0,5)	1,5	(0,5)
0,35	0,5***)	1,5	(0,5)	(0,5)	(0,5)	1,5	(0,5)	1,5	(0,5)	2,5	(0,5)
0,40	0,5***)	1,5	(0,5)	(0,5)	(0,5)	2,5	(0,5)	1,5	(0,5)	2,5	(1,5)
0,45	1,0 (0,5)	1,5	(0,5)	(0,5)	(0,5)	4,5	(0,5)	2,5	(1,0)	3,5	(1,5)
0,50	1,5 (0,5)	2,5	(1,5)	(0,5)	(0,5)	5,5	(0,5)	2,5	(1,5)	3,5	(1,5)
0,55	2,5 (0,5)	2,5	(1,5)	(12,5)	(0,5)	6,5	(0,5)	3,5	(1,5)	4,5	(2,5)
0,60	3,0 (1,0)	3,5	(2,5)	(17,5)	(0,5)	8,5	(0,5)	3,5	(1,5)	4,5	(2,5)
0,65	4,0 (1,5)	4,5	(2,5)	(23,5)	(0,5)	9,5	(1,5)	4,5	(2,5)	4,5	(2,5)
0,70	4,0 (2,0)	4,5	(2,5)	(27,5)	(0,5)	10,5	(2,5)	5,5	(3,5)	5,5	(3,5)
0,75	4,5 (3,0)	4,5	(3,5)	(29,5)	(0,5)	11,5	(3,5)	6,5	(4,5)	5,5	(3,5)

*) - Os raios da curvatura da curva devem ser iguais ou maiores que o diâmetro da tubulação
 **) - Como o efeito destas conexões podem ainda estar presentes depois de 40 D, não podem ser dados valores sem parênteses.
 ***) - Uma vez que nenhuma conexão pode ser instalada mais próxima do que 0,5 D da tomada de pressão a montante de tubo de Venturi, os valores de "incerteza adicional nula" são os únicos aplicáveis nesta distância.

Como os efeitos da instalação em medidores de vazão eletromagnéticos não são muito bem conhecidos, na prática alguns engenheiros fazem uma analogia com os medidores Venturi. Adotando valores da tabela 2.3 para a instalação de eletromagnéticos.

Do ponto de vista teórico, o medidor eletromagnético de vazão pode ser mais afetado por distúrbios do perfil de velocidade do que o medidor Venturi, pois o primário do Venturi possui uma redução da tubulação, o que pode promover, em certos casos, uma ligeira retificação do perfil do escoamento, reduzindo em alguns casos os efeitos dos distúrbios do escoamento. Já o medidor eletromagnético permite a passagem direta do fluxo sendo mais afetado pelos efeitos do perfil de velocidade do que o Venturi.

Os critérios de instalação determinam que qualquer retificador de fluxo utilizado deve ser instalado em um trecho reto entre o elemento primário e a fonte de distúrbio a montante, ou da conexão mais próxima do elemento primário do medidor. A norma afirma que o elemento primário deve ser instalado em uma posição tal que as condições do escoamento imediatamente a montante se aproximem daquelas de um perfil completamente desenvolvido e livre de movimentos rotacionais. Estas condições podem ser presumidas quando em cada ponto da seção transversal a relação entre a velocidade axial local (V_{axial}) e a velocidade axial máxima (V_{max}) nesta seção variarem menos que 5%, resultando na relação (2.7). Comparada com a relação obtida num escoamento sem nenhuma componente rotacional, obtido numa seção no final de um trecho de $100D$ de uma tubulação similar.

$$0,95 \leq \frac{V_{axial}}{V_{max}} \leq 1,05 \quad (2.7)$$

Caso estas condições não tenham sido determinadas, o comprimento de trecho reto entre a fonte de distúrbio e o retificador deve ser no mínimo $20D$, e o trecho reto entre o elemento primário e o retificador de fluxo deve ser de pelo menos $22D$.

Retificadores de fluxo somente serão completamente funcionais se a sua instalação obedecer ao mínimo às folgas entre os elementos resistivos do retificador, evitando escoamentos preferenciais que impeçam o seu funcionamento adequado.

A norma **ISO 5167 (1980)** apresenta os mesmos cinco retificadores de fluxo padronizados que a norma **ISO 7194 (1983)**, ou seja: **ZANKER, SPRENKLE, TUBE BUNDLE (Feixe de tubos), AMCA e ÉTOILE**, descritos a seguir.

ZANKER – O elemento consiste de uma placa perfurada com orifícios de tamanho definido seguido de um número de canais (um para cada orifício) formado pela interseção de placas de comprimento L aproximadamente igual ao diâmetro da tubulação D . As dimensões principais são mostradas na figura 2.35, na qual pode-se observar as placas que formam os canais e a placa frontal. As placas devem ser escolhidas para promover uma retificação adequada, sem produzir uma perda de carga muito elevada. Sendo que a espessura das chapas deve ser a menor possível para não impor muita resistência ao escoamento da água, mas com resistência estrutural suficiente.

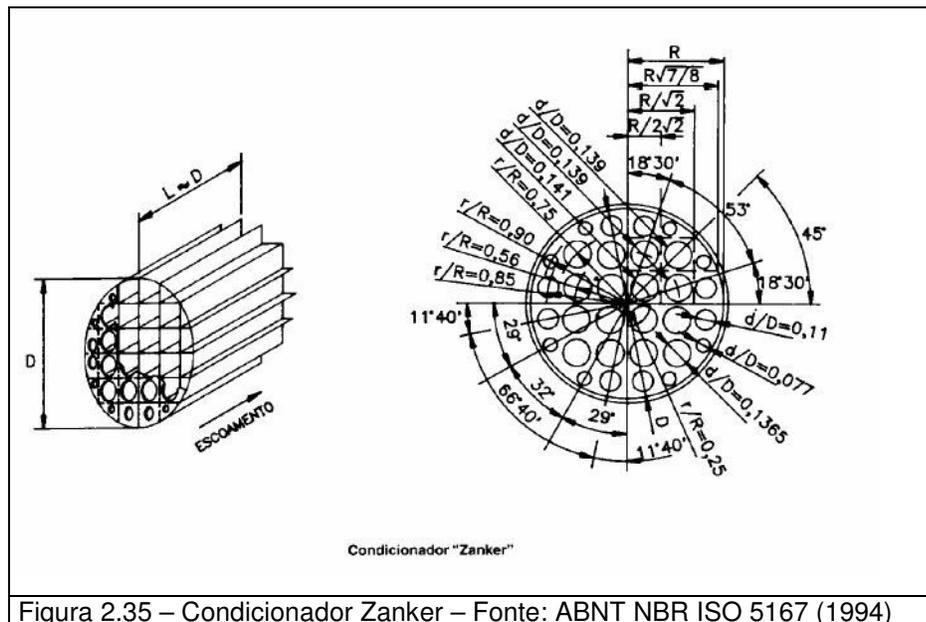
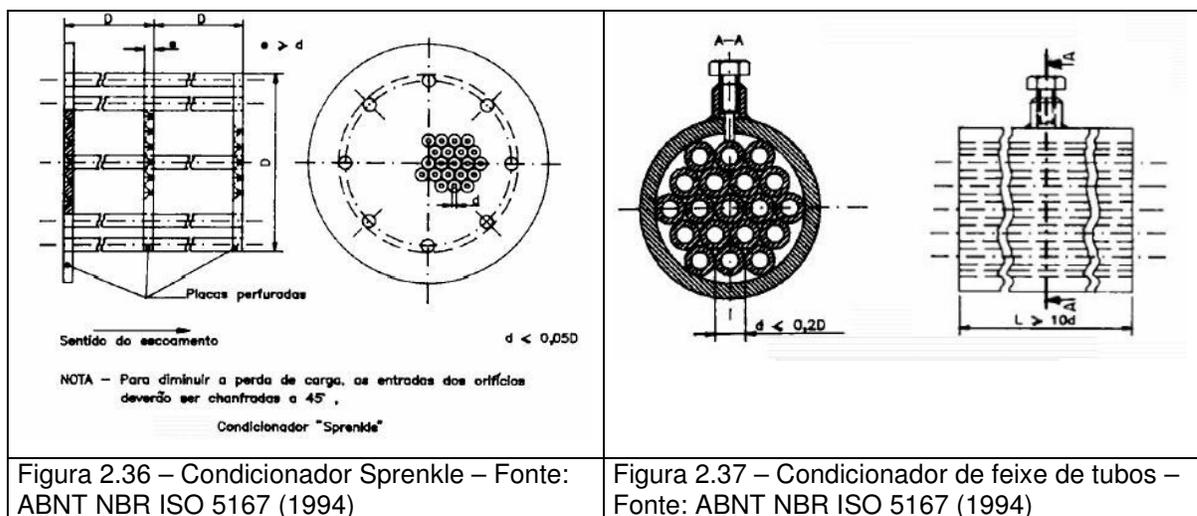


Figura 2.35 – Condicionador Zanker – Fonte: ABNT NBR ISO 5167 (1994)

SPRENKLE – O retificador é formado por três placas paralelas perfuradas instaladas em série, transversalmente à tubulação, com espaçamento de $1D$ entre placas

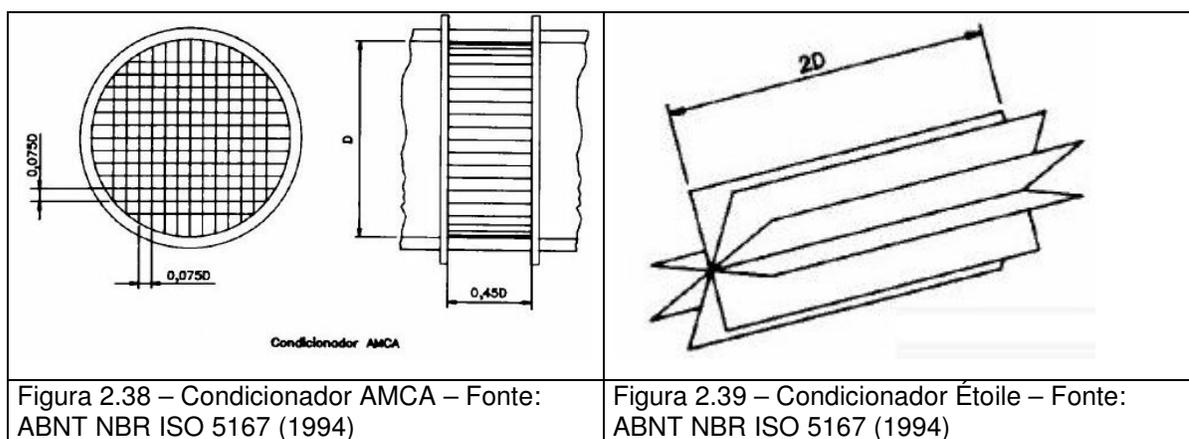
sucessivas. Os orifícios devem ser chanfrados na face de montante e a área total dos orifícios deve ser no mínimo 40% da área total da tubulação. A relação entre a espessura da placa e o diâmetro dos orifícios deve ser de pelo menos 1 e o diâmetro dos orifícios deve ser $\leq 0,05D$. As três placas devem ser unidas de forma a garantir rigidez mecânica necessária e de maneira a não interferir no escoamento. A figura 2.36 mostra um corte das placas perfuradas, onde se observa o posicionamento das mesmas, além de uma vista frontal de uma placa.

TUBE BUNDLE (Feixe de tubos) – Este tipo de condicionador é formado de um feixe de tubos paralelos tangentes à tubulação, onde os tubos devem ser rigidamente paralelos entre si e em relação ao eixo da tubulação, devendo ser em número mínimo de 19 tubos e possuir um comprimento mínimo de $10D$. A figura 2.37 mostra um corte transversal do retificador onde os tubos estão dispostos paralelos entre si, e com diâmetro externo $d \leq 0,2 D$. A figura 35 mostra também um corte longitudinal do retificador.



AMCA – Este retificador de fluxo é formado por uma colméia de grade retangular, como observa-se na figura 2.38, sendo que o espaçamento entre as grades deve ser de $0,075 D$. As pás guias devem possuir comprimento de pelo menos $0,45D$ com a menor espessura possível, suficiente para garantir resistência estrutural à peça.

ÉTOILE - Retificador formado por placas dispostas radialmente em forma de estrela, que possuem comprimento igual a $2D$, permitindo a passagem do fluido nos espaços entre as placas, que devem ser tão delgadas quanto possível, de modo a não afetar sua resistência estrutural. A figura 2.39 mostra um retificador tipo Étoile, onde pode-se observar a configuração de estrela, que é a mais adequada para amenizar escoamentos rotacionais. Esse tipo de retificador não é adequado para escoamentos assimétricos.



CAPÍTULO 3

MEDIDOR DE VAZÃO ELETROMAGNÉTICO

Segundo **Troskolanski (1960)**, os medidores de vazão eletromagnéticos podem ser divididos em três grupos básicos, sendo: (1) Medidor eletromagnético para medição da vazão instantânea, (2) Medidores do tipo bocal eletromagnético usado para a medição da velocidade pontual do escoamento em escoamentos de direção conhecida, e (3) Medidores de corrente utilizados para a determinação de direção, sentido e velocidade de escoamentos de direção desconhecida. Neste trabalho será discutido somente o medidor do primeiro tipo, por ser o mais utilizado.

3.1 HISTÓRICO

1831 – O inglês Michael **Faraday**, publica a lei que leva seu nome, que trata da indução magnética, que contempla os conceitos do princípio básico de funcionamento dos medidores eletromagnéticos. Sendo que independentemente e praticamente na mesma época o americano Joseph **Henry** também chegou aos mesmos resultados, não tendo, entretanto, publicado seus resultados antes que Faraday o fizesse (**Cheremisinoff, 1979**).

1832 – **Faraday** reporta a Royal Society of London, como ele havia tentado medir a tensão elétrica induzida através do Rio Tamisa pelo movimento da água na componente vertical de um campo magnético na terra. A medição foi feita com eletrodos de grandes dimensões, colocados na Ponte de *Waterloo*. Os sinais detectados eram esparsos devido a efeitos termoelétricos e eletroquímicos, esses dois fatores puderam ser levantados como os problemas da medição da velocidade ou vazão do rio. O experimento de Faraday falhou, principalmente devido aos curtos-circuitos provocados pelo leito do rio, anulando os sinais legítimos. **Shercliff (1962)**.

1851 – **Wollaston** mede, aparentemente com sucesso, as tensões elétricas induzidas pelo movimento da água em um canal Inglês. **Shercliff (1962)**.

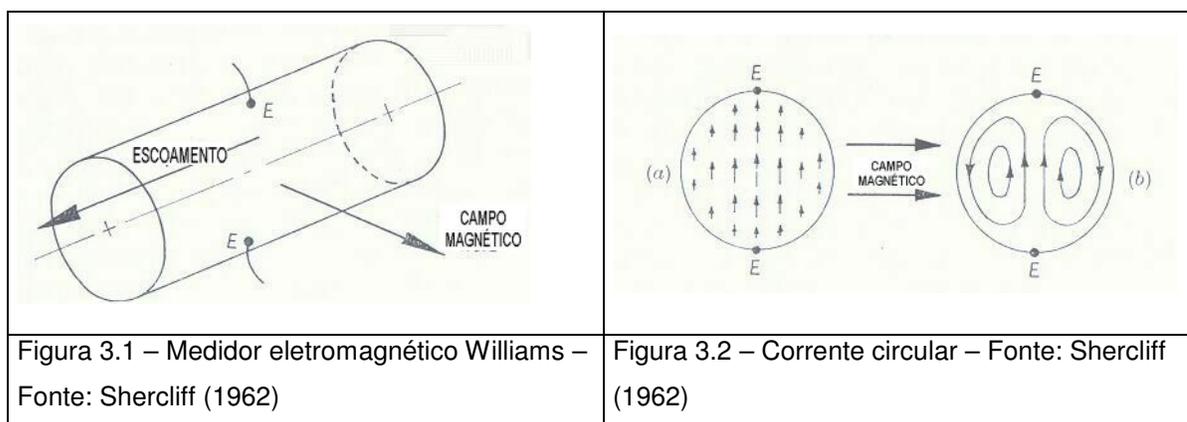
1881 – **Wollaston** reporta ao Journal of Societ Telegraph Engineers o sucesso de um experimento similar ao de Faraday. **Baker (1989)**.

1917 – **Smith** e **Sleptian** obtêm a patente de um esquema eletrônico para determinação da velocidade de navios relativa ao mar, a partir da medição da tensão elétrica induzida entre dois eletrodos fixados no casco do navio, na presença de um campo magnético gerado. Neste esquema era utilizada para excitação das bobinas a corrente alternada, evitando deste modo o efeito da polarização dos eletrodos, que pode ocorrer na utilização da corrente contínua. **Shercliff (1962) e Linford (1961)**.

1920 – **Young, Gerrard e Jevons** estudaram o movimento dos mares pelo efeito das marés, e relataram que os sinais induzidos entre dois eletrodos (inseridos na água) eram perfeitamente correlacionados com o movimento da água. **Shercliff (1962) e Linford (1961)**.

1930 – **Williams**, aparentemente sem nenhum interesse acadêmico, relatou que mediu a vazão de uma solução de sulfato de cobre escoando em uma tubulação de seção circular, transversal a um campo magnético uniforme, como pode-se observar na figura 3.1. Uma tensão elétrica de corrente contínua foi medida entre os eletrodos EE, o

valor medido era proporcional à vazão escoada. Ele percebeu que a distribuição da velocidade não era uniforme devido aos efeitos de aderência das paredes do tubo, e que a f.e.m. (força eletro motriz) induzida também não era uniforme, gerando uma diferença de potencial periférica dentro do tubo, o que daria origem a uma corrente elétrica circular, como mostra a figura 3.2. Este efeito provoca uma redução na tensão elétrica medida nos eletrodos, que passa a assumir um valor menor do que a simples soma das f.e.m. ao longo da linha entre os eletrodos. Essa queda é ocasionada pela resistência ôhmica. Williams apresenta ainda em seu trabalho, que caso o campo magnético seja suficientemente forte e, caso o fluido seja muito mais condutor que o eletrólito utilizado, as correntes de circulação geradas podem ser tão intensas que forças significativas podem ser exercidas no fluido pela interação destas correntes com o campo magnético. **Shercliff (1962). Linford (1961)**



1932 – Fabre utilizou, no ramo da fisiologia e medicina, medidores de vazão eletromagnéticos como instrumento de medição para fluxo sanguíneo. Ele apresentou duas grandes vantagens dos medidores eletromagnéticos para o fluxo de sangue nas artérias: sinal de resposta instantâneo, capaz de indicar com detalhes as pulsações do fluxo; e a medição livre do contato do fluido com partes móveis ou mecanismos do medidor e conseqüentemente livre de contaminação. **Shercliff (1962).**

1939 – Kolin faz a primeira tentativa para medir escoamentos em tubulações, sendo que o foco do seu estudo era a medição de vazão de sangue em sistemas

circulatórios, a patente do equipamento para este fim foi requerida neste mesmo ano.

Linford (1961).

1941 – Thurlemann chegou à primeira evidência geral que para uma dada vazão e para qualquer perfil de velocidade simétrico, a tensão elétrica induzida, através de um tubo circular com paredes não condutivas, é a mesma se a velocidade do fluido for uniforme. A simplicidade deste estudo levou a idéia de que o medidor eletromagnético é absoluto não sofrendo com deformações do perfil de velocidades, esta é, porém, uma visão errônea do real comportamento do medidor. **Shercliff (1962).**

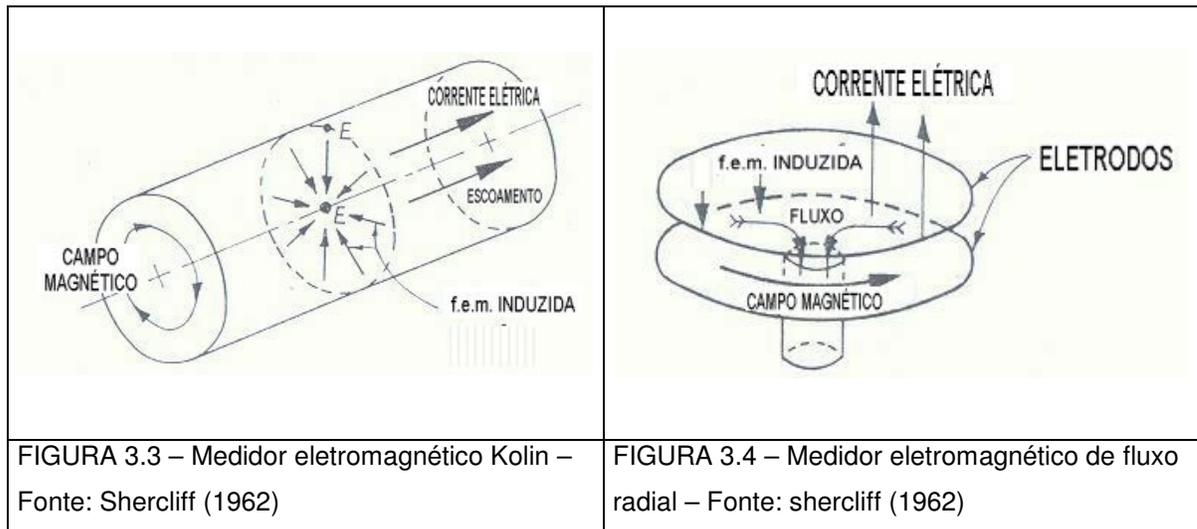
1952 – os medidores de vazão eletromagnéticos são introduzidos no mercado pela companhia *Foxboro Corporation* e passam a ser comercializados. **Cheremisinoff (1979).**

1955 – Denison apresenta uma alternativa para a excitação das bobinas do medidor eletromagnético, com utilização de onda retangular, e não senoidal como era feito até então. **Baker (1989).**

1955 – Thurlemann faz uma importante análise teórica da medição de velocidade por meios eletromagnéticos. **Baker (1989).**

1956 – Kolin idealiza uma variação do medidor proposto por **Williams**, e apresenta um medidor com campo magnético circular concêntrico ao eixo do tubo, resultante de uma corrente de excitação de um condutor sólido central ao tubo, e de dois eletrodos, um na parede do tubo e outro no centro do tubo, isto pode ser visto na figura 3.3. Na figura 3.4 pode ser visto um outro tipo de medidor, também sugerido por Kolin, que é composto de dois eletrodos formados por placas paralelas com fluxo radial entre as placas, na presença de um campo magnético circular. **Shercliff (1962).**

1960 – Yanof e Salz apresentam mais uma alternativa para a excitação das bobinas do medidor eletromagnético, com utilização de onda trapezoidal. **Baker (1989).**



1961 – Wyatt faz um levantamento dos principais problemas da medição do fluxo sangüíneo com medidores eletromagnéticos. **Baker (1989)**.

1962 – Shercliff publica um livro discutindo amplamente a teoria dos medidores eletromagnéticos. **Baker (1989)**.

Segundo **Shercliff (1962)**, o desenvolvimento dos medidores de vazão eletromagnéticos deu um grande salto com o início da utilização dos reatores nucleares para a geração de energia, após a Segunda Grande Guerra. Nestes reatores o líquido usado como refrigerante pode, muitas vezes, estar em altas temperaturas, e pode possuir partículas de metais radioativos de poder corrosivo. Desta maneira o medidor utilizado para esse fim deve ser resistente a essas características, e permitir a manutenção e a indicação remota da vazão, sem contato direto com o fluido. Neste sentido os medidores eletromagnéticos (bem como medidores ultra-sônicos) são ideais, pois não apresentam partes móveis e não possuem fontes de vazamento, por se tratar internamente de apenas um tubo, livre de obstáculos. Outra aplicação prática, que contribuiu ao avanço dos medidores eletromagnéticos, é a tecnologia hidro-dinâmica-magnética aplicada ao plasma, dos programas aeroespaciais.

3.2 CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS MEDIDORES

Troskolansky (1960) apresenta que o funcionamento do medidor eletromagnético é linear, característica positiva deste tipo de medidor, em oposição a outros sistemas. Para os eletromagnéticos a relação não é linear apenas para velocidades abaixo de 0,5m/s, onde o comportamento sofre influência de ruídos de tensões. Ainda para baixas velocidades, o autor recomenda, que seja instalado um compensador, onde a diferença de potencial entre os eletrodos do medidor seja tomada com base num pólo aterrado, ou seja, a tensão entre cada eletrodo e o pólo aterrado, posteriormente comparados.

Para medidores com princípio de diferencial de pressão, a curva de calibração não é linear, alterando-se o fator K (fator de calibração) conforme se altera a vazão. Sendo que K é o fator que relaciona a diferença de pressão medida e a vazão escoada na relação $Q=K(\Delta P)^{1/2}$, e ΔP é a diferença de pressão entre as tomadas de montante e de jusante, e Q é a vazão escoada. Para os medidores eletromagnéticos isso não ocorre, sendo a relação entre a vazão e a Tensão, é linear.

Linford (1961) afirma que o medidor eletromagnético possui uma abordagem completamente diferente dos medidores de vazão existentes na época, por apresentar uma abordagem não hidráulica da medição de vazão, sem a utilização ou inserção de obstáculos no escoamento.

A operação do medidor eletromagnético é baseada na mesma lei que governa o funcionamento de todos os geradores elétricos (lei da Indução eletromagnética de Faraday). Esta lei estabelece que um corpo condutor ao atravessar um campo elétrico perpendicular ao mesmo, produzirá uma força eletromotriz (f.e.m) perpendicular ao campo e à direção do movimento.

A equação básica da lei é dada por:

$$\varepsilon = -\frac{d\phi_B}{dt} \quad (3.1)$$

Em que:

ε = força eletro motriz

$d\phi_B/dt$ = taxa de variação do fluxo magnético em função do tempo.

A descoberta de que o movimento de um corpo condutor através de um campo magnético gera uma força agindo numa direção perpendicular a ambos, foi uma das fundações do eletromagnetismo, e é a base do funcionamento de todo medidor eletromagnético.

Linford (1961) apresenta que o sinal de saída do medidor eletromagnético é sempre proporcional à velocidade do escoamento, independente da viscosidade do líquido medido. Em razão disso, o escoamento dos líquidos com características não newtonianas pode ser medido com exatidão. A saída não é influenciada pela massa específica do líquido e insensível a variações na distribuição de velocidade. Como resultado disso, não precisam ser tomadas precauções para se obter uma condição hidráulica sem distúrbios a montante ou a jusante do medidor, pois o sinal de saída será sempre proporcional à velocidade média do escoamento. Estas afirmações extraídas de **Linford (1961)** entram em conflito com o que é apresentado na norma **ISO 6817 (1980)**, que são apresentadas mais adiante.

Como o medidor não possui peças móveis, há uma completa ausência de inércia mecânica no medidor. Isto associado a linearidade característica do medidor, permite que a resposta do medidor seja rápida seguindo fielmente as flutuações da vazão, em tempo real. Não há limitação teórica para o tamanho dos medidores, sendo apenas inviável economicamente para diâmetros muito grandes.

Em **Cheremisinoff (1979)** é apresentada a operação do medidor magnético de vazão, no qual o fluido em movimento (corpo condutor) é a água e o campo magnético é gerado por uma bobina. O movimento da água perpendicular ao campo magnético induz uma tensão elétrica dentro do condutor, perpendicular a ambos, que pode ser medida pelos eletrodos. A tensão elétrica induzida é proporcional à velocidade relativa entre a massa de água e o campo magnético. Desta maneira pode ser medida a velocidade e, portanto, a vazão do líquido.

O medidor é formado de um elemento primário, que é um trecho de tubo com os eletrodos, bobinas magnéticas e todos os circuitos eletrônicos, e um elemento secundário, que é um dispositivo que transforma o sinal elétrico (enviado pelo elemento primário) em sinal de vazão. O elemento primário é montado diretamente na tubulação, enquanto o elemento secundário pode ser instalado remotamente.

Bentley (1995) apresenta um equacionamento mais simplificado para o funcionamento do medidor, enunciando lei de uma forma mais sintética. Ele afirma que se um condutor de comprimento \mathcal{L} estiver se movimentando com uma velocidade v perpendicular a um campo magnético de densidade de fluxo ϕ_B , então a tensão elétrica ε induzida transversalmente sobre os eletrodos extremos do condutor é dada por:

$$\varepsilon = \phi_B \mathcal{L} v. \quad (3.2)$$

Por analogia se um fluido condutivo estiver se movendo com uma velocidade média v através de um campo magnético aplicado Φ_B , então a tensão elétrica induzida que aparece nos eletrodos de medição é:

$$\varepsilon = \Phi_B D v \quad (3.3)$$

Em que D é a distância de separação dos eletrodos, que é igual ao diâmetro do tubo D . A equação assume que o campo magnético é uniforme e, admitindo que o tubo esteja cheio de água, pode-se escrever:

$$v=Q/A \quad (3.4)$$

Onde Q é a vazão que escoar e A é a área da seção transversal da tubulação.

Combinando (3.4) com a equação (3.3) chega-se na equação que representa o funcionamento do medidor.

A equação básica do medidor de vazão eletromagnético é dada por:

$$\varepsilon = \frac{4 \cdot \phi_B}{\pi \cdot D} \cdot Q \quad (3.5)$$

O autor mostra que na excitação das bobinas que geram o campo Φ_B , pode ser usada a corrente contínua (DC), ou alternada (AC). Para os caso em que é usada a corrente contínua podem ocorrer problemas de polarização dos eletrodos. A polarização ocorre quando há uma migração de íons do fluido de um eletrodo para o outro podendo originar reações químicas ou eletrólíticas, gerando gases ou regiões ionizadas. Essas regiões formam uma camada ao redor do eletrodo de medição, que tem efeito isolante, invalidando a medição da tensão ε gerada pelo escoamento do fluido. Para solucionar esse problema pode ser adotada a corrente contínua pulsada em um período fixo, ou então simplesmente adotar a corrente alternada (AC) para a excitação das bobinas.

Segundo **Bean (1971)** o tamanho dos medidores eletromagnéticos varia desde os medidores para fluxo sanguíneo com os menores diâmetros, da ordem de fração de polegada, aos medidores de esgoto com diâmetros da ordem de 9 pés (2700mm). A menor temperatura de operação para o medidor eletromagnético é a que garanta a

fluidez do fluido escoado. O limite superior depende do material isolante utilizado, garantindo que a isolação das bobinas do medidor não seja comprometida.

O medidor de vazão eletromagnético alimentado por corrente contínua tem custo significativamente menor, sendo, entretanto, adequados somente para escoamentos pulsados, com alta frequência de variação e para medição de fluidos de alta condutividade. Isto se deve ao fato de que para fluidos de baixa condutividade pode ocorrer a polarização do fluido na superfície do eletrodo de medição, isolando-o e impedindo a medição da tensão elétrica induzida, fato que não ocorre para os medidores de vazão de corrente alternada, que é o caso da maioria dos medidores. Nos medidores em que a corrente de excitação da bobina é alternada (A.C.), a densidade do fluxo magnético B não será constante, sendo necessário medir a razão ε/Φ_B , ou seja a tensão (ε) gerada dividida pela densidade do fluxo magnético Φ_B . Caso contrário, medindo a tensão (ε) isoladamente ocorreriam erros na medição, em virtude da variação de Φ_B .

Linford (1961) afirma que para garantir a estabilidade do medidor em relação à resistência elétrica do líquido, ela não deve ultrapassar 1% da impedância total do circuito externo. O volume de qualquer matéria suspensa ou dissolvida no líquido poderá ser medido sem problemas, pois o medidor trabalha em função do volume médio escoado. Em razão da sua construção simples, sem partes móveis ou inseridas no fluxo, o medidor pode ser facilmente limpo e esterilizado, dispensando manutenções mais complexas, característica adequada para medição de produtos alimentícios e aplicações médicas. O limite inferior (menor velocidade medida) é da ordem de 0,3 m/s, não havendo limite superior. O tamanho dos medidores comerciais pode ir de 1/10 polegada (2,54mm) até 72 polegadas (1800mm) sendo que não há um limite máximo teórico. Em instalações horizontais, para evitar o efeito de bolhas de ar, o plano dos eletrodos deve ser preferencialmente horizontal, evitando o posicionamento do eletrodo de medição posicionado na geratriz superior do tubo, possível local de concentração de bolhas de ar e, na geratriz inferior, onde pode haver depósito de sedimentos.

3.3 VANTAGENS E DESVANTAGENS DO MEDIDOR

Segundo **Elonka (1976)**, as principais vantagens dos medidores eletromagnéticos são:

- Possibilidade de operação em tubos verticais e horizontais, em ambos os sentidos (não esquecendo que em tubos verticais o fluxo deve ser sempre no sentido ascendente, para garantir que a tubulação esteja sempre cheia);
- Funcionamento Linear em que os dados de saída obedecem a uma função linear (ao contrário dos medidores deprimogêneos, onde o sinal de saída é uma função quadrática da diferença de pressão);
- Possibilidade de trabalho em vazões muito baixas;
- Não há limite teórico para vazão máxima (limitado hidraulicamente);
- Exatidão e sensibilidade elevadas, aliado a um baixo tempo de resposta, dependendo do elemento conversor pode ser da ordem de 0,5s / resposta;
- Não há erros com fluidos de alta condutividade;
- Perda de carga desprezível (corresponde a perda de carga de um trecho de tubo equivalente, sem singularidades).

Segundo **Troskolanski (1960)** as vantagens dos medidores de principio eletromagnético são:

- Ausência de inércia, medidor não possui partes móveis, passíveis de desgaste;
- Ausência de obstruções na tubulação;
- Alta sensibilidade;
- Pequena interferência com o escoamento;
- Extensa variação de circuitos e sistemas elétricos para conexão.

Troskolanski (1960) conclui que a área de aplicação do medidor aumentou além da esfera dos laboratórios, incluindo vários campos de aplicação onde, os métodos da hidrometria clássica falhou.

Para **AWWA – American Water Works Association (1989)** as principais vantagens do medidor eletromagnético são:

- Faixa de diâmetros disponíveis vai de 0,1 a 120 polegadas (2,5 mm a 3000 mm);
- Funcionamento bidirecional, adequado para medir escoamentos reversíveis;
- Saída linear;
- Pouco efeito de variações de mudanças na viscosidade, massa específica, temperatura, pressão,

Em **Bentley (1995)**, é apresentado um resumo das principais vantagens dos medidores de vazão eletromagnéticos, sendo estas:

- Eletrodos embutidos dentro de tubulação isolada, que possui o mesmo diâmetro da tubulação local. O medidor não obstrui o fluxo em qualquer sentido, e a perda de carga e/ou bloqueio da tubulação são desprezíveis;
- Boa exatidão, sendo de aproximadamente +/- 1% da vazão máxima indicada;
- Calibração independe de mudanças na viscosidade, pressão, densidade e temperatura;
- Velocidades de operação estão entre 0,5 e 10 m/s e o diâmetro estão entre 2mm e 1200mm;
- Consumo de energia é baixo, sendo em geral menor do que 30w;

Segundo **Troskolanski (1960)** a principal desvantagem avaliada é em relação às precauções de instalação.

Ou seja, na década de 60 já era apresentado pela literatura que as condições de instalação poderiam afetar o funcionamento de medidores eletromagnéticos.

Segundo **AWWA (1989)** as principais desvantagens do medidor eletromagnético são:

- Líquido a ser medido deve ter condutividade mínima de $200\mu\text{S}/\text{m}$;
- Para pequenos diâmetros o medidor pode ser relativamente grande e caro;
- Medidores de alta exatidão podem ser muito caros;
- Cada medidor deve ser calibrado individualmente em uma linha de teste;
- Medidor é sensível a propriedades geométricas da linha;
- Medidor é sensível a variações da tensão e corrente de alimentação;

Em **Bentley (1995)** é apresentada como principal desvantagem do medidor:

- Medidor só pode ser usado para medir fluidos com condutividade elétrica maior que $10\mu\text{mho}/\text{cm}$, isto exclui todos os gases e líquidos derivados de hidrocarbonos (derivados de petróleo) sendo adequado para esgotos que na fase líquida tenham condutividade adequada.

3.4 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO MEDIDOR

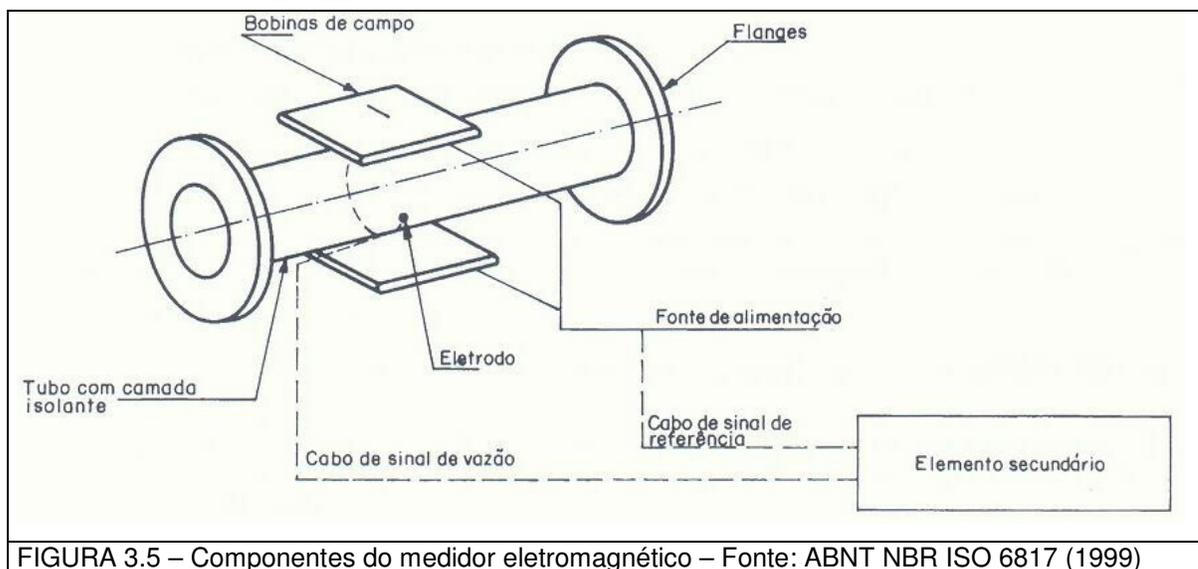
Como já foi dito, uma grande vantagem desse tipo de medidor de vazão é a mínima exposição dos componentes do sistema com o fluido, em oposição aos medidores mecânicos que possuem partes móveis e metálicas expostas ao fluido medido. Nos medidores de vazão magnéticos estão expostos somente os eletrodos e o tubo do elemento primário, que geralmente é revestido com um material não magnético e não condutor. Isto minimiza a corrosão e/ou erosão possibilitando a medição de fluidos corrosivos ou que contenham sólidos suspensos ou abrasivos.

O medidor de vazão eletromagnético é uma combinação de dois elementos: o elemento primário e o elemento secundário.

O elemento primário é formado por três componentes básicos:

- Um tubo de material não magnético e isolado eletricamente. Podendo ser do mesmo material da tubulação ou outro material desde que revestido internamente de um material isolante, por exemplo: plástico reforçado com fibra de vidro, borracha, Neoprene, Ebonite, Poliuretano, PTFE (teflon);
- Um par de eletrodos metálicos não magnéticos montados diametralmente opostos nas paredes do tubo, devendo ser de um material adequado às características do fluido quanto à abrasão e agressividade química. Por exemplo: aço inoxidável, platina, hastelloy, titanium, ligas de zinco e cromo;
- Um par de bobinas eletromagnéticas que são montadas externamente ao tubo de medição em um compartimento protetor, em que uma corrente elétrica (AC ou DC) é usada para excitar as bobinas e gerar um campo magnético ortogonal ao eixo da passagem do fluido de processo através da tubulação (elemento primário).

Estes componentes podem ser vistos na figura 3.5 e na figura 3.6.



É necessário que o líquido a ser medido seja condutivo, pois pelo princípio de funcionamento do medidor, a passagem do líquido através do campo magnético, deve gerar uma tensão elétrica (diferença de potencial elétrico) que se desenvolve perpendicularmente ao eletrodo. Para que isto ocorra, deve haver uma perturbação

magnética do campo, o que só ocorre com materiais condutores. Os fluidos podem ter condutividades baixas de até $200\mu\text{S/m}$ (microsiemens por metro) (ou $2\mu\text{mho/cm}$).

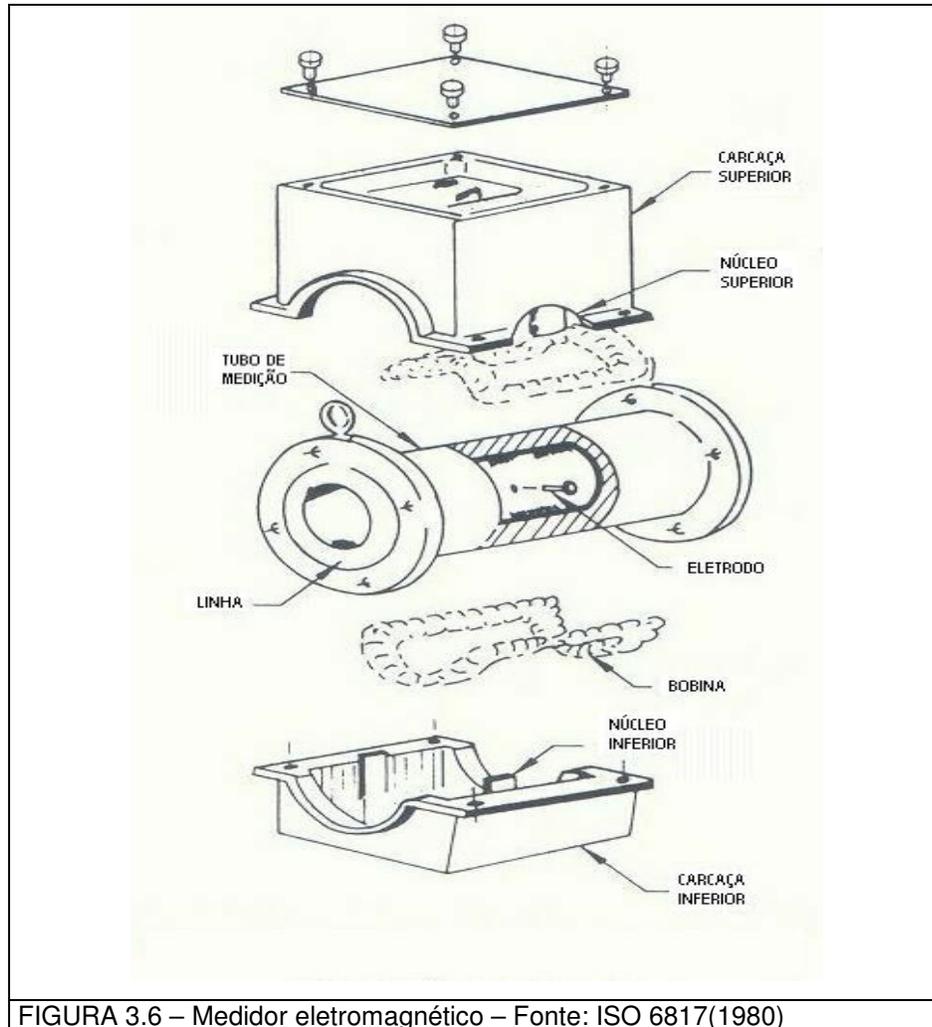


FIGURA 3.6 – Medidor eletromagnético – Fonte: ISO 6817(1980)

A tensão elétrica gerada, que é proporcional à velocidade do escoamento, é amplificada em um conversor e então pode ser convertida num sinal de vazão no transmissor de vazão ou para um outro sinal padronizado de corrente DC. O sinal pode ser transmitido para um receptor apropriado que converte o sinal elétrico em sinal de vazão. Este sinal de saída pode usar o padrão de tensão elétrica 0-10V DC ou corrente 4 a 20 mA, ou então uma saída pulsada.

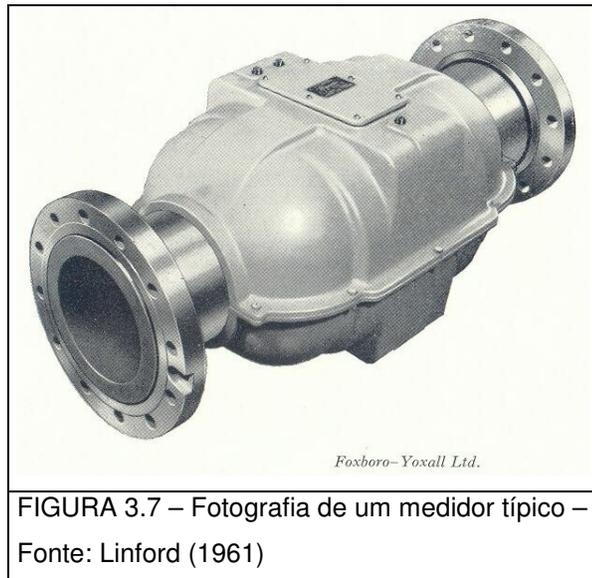
O medidor de vazão eletromagnético vai determinar a velocidade média do escoamento e, a partir da velocidade média, é calculada a vazão através da tubulação pela fórmula da continuidade:

$$Q = V_m \cdot A \quad (3.6)$$

Em que, Q é a vazão total através da tubulação, V_m é a velocidade média do escoamento e A é a área da seção transversal da tubulação.

O diâmetro interno da tubulação é conhecido (podendo ser medido com calibres) e a área pode ser calculada. Desta maneira medindo a velocidade média, o cálculo da vazão é imediato.

A figura 3.7 é uma fotografia de um medidor típico, mostrada por Linford (1961).



Ao contrário de medidores Venturi ou medidores de vazão diferenciais, o medidor de vazão magnético não é afetado por variações na viscosidade do fluido, temperatura e pressão. Ele é, entretanto, sensível a grandes mudanças na condutividade do fluido e ligeiramente afetado por variações na frequência e tensão elétrica.

Um detalhe da instalação é o de permitir que o medidor seja removido com facilidade, podendo ser retirado da linha para calibração em laboratório, desde que o custo de remoção, e calibração sejam viáveis. Quando as condições da linha não permitirem a instalação em carretel pode ser adotada a instalação com flanges, que permitem a remoção do medidor, para diâmetros não muito grandes. Em ambos os casos, o sistema de medição deve prever uma estação pitométrica ou uma estação para instalação de outro medidor de inserção ou não, para que possa ser feita a calibração em campo.

Segundo a norma **ISO 6817 (1980)** e a equivalente **ABNT NBR ISO 6817 (1999)** o eletromagnético é um medidor de vazão que utiliza o princípio da Lei de Indução Magnética de Faraday, em que uma força-eleto-motriz (f.e.m.) é induzida ortogonalmente a um campo magnético gerado, quando um corpo condutor atravessa o mesmo. O Medidor de vazão eletromagnético cria então um campo magnético perpendicular ao fluxo líquido, que ao ser atravessado pelo fluido condutor induz uma f.e.m. perpendicular ao fluxo e ao campo magnético, proporcional a velocidade média do escoamento, essa f.e.m. provoca então uma diferença de potencial nos eletrodos do medidor, essa tensão é proporcional à velocidade do fluxo, de onde é possível calcular a vazão. A representação espacial destas forças pode ser observada na figura 3.8

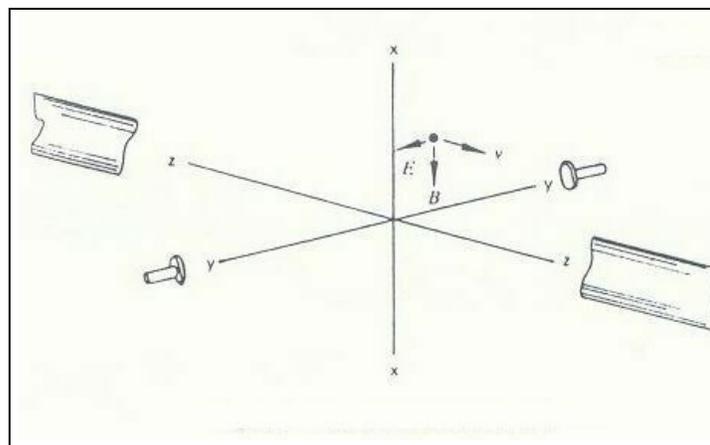
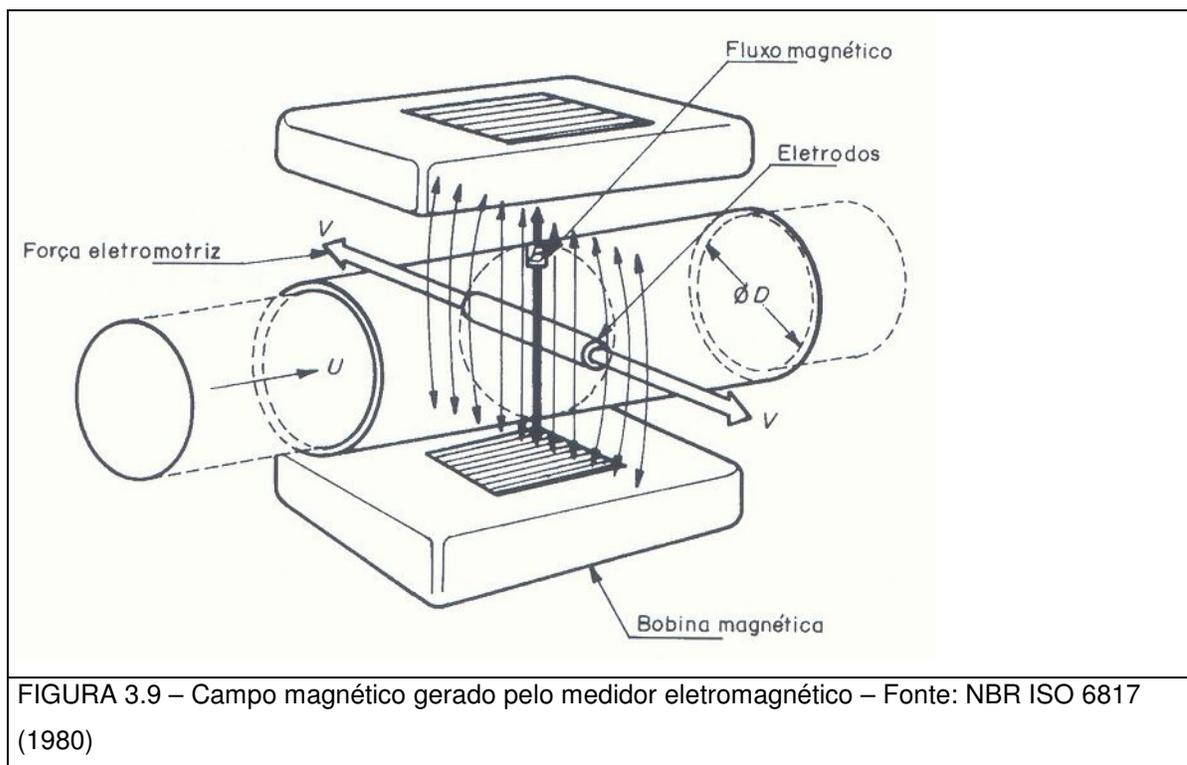


FIGURA 3.8 – Representação vetorial do medidor eletromagnético – Fonte: ABNT NBR ISO 6817 (1999)

Nos eletrodos do primário, devido ao fluxo de água através do campo magnético, é gerada uma f.e.m. (lei de indução de Faraday) que é enviada para o secundário onde é convertida em sinal de vazão.

Na figura 3.9 é possível observar o campo magnético gerado pela bobina magnética em que Φ_B é o campo magnético; D é o diâmetro do tubo; ε a f.e.m. e V é a velocidade do escoamento. A figura que foi extraída da norma **ISO 6817 (1980)** também é encontrada na norma **NBR ISO 6817 (1999)** e apresenta uma visão esquemática do medidor eletromagnético.

Pode-se ver na figura a posição relativa do campo magnético aos eletrodos, e a distância entre os mesmos, que é igual ao diâmetro da tubulação. A força eletromotriz é representada pela letra V , e a velocidade do escoamento é representado pela letra U . O diâmetro da tubulação é indicado por ΦD



A norma apresenta ainda o funcionamento do medidor, que obedece a lei de indução de Faraday, onde a intensidade da tensão é dada por:

$$\varepsilon = k \cdot \phi_B \cdot D \cdot V \quad (3.7)$$

em que:

ε = sinal de vazão (volt);

k = constante;

Φ_B = densidade do fluxo magnético;

D = distância entre eletrodos;

V = velocidade média axial do líquido;

Sendo a vazão no tubo circular dada por (3.6). Combinando (3.7) e (3.6), ficamos com:

$$Q = \frac{\pi \cdot D^2}{4 \cdot k \cdot D} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\phi_B} \right) \quad (3.8)$$

Sendo que a distância entre os eletrodos(D), o diâmetro da tubulação(D), e o valor de k são constantes, pode-se simplificar, chamando de K_e o fator de calibração, dado por:

$$Q = K_e \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\phi_B} \right) \quad (3.9)$$

Em que o valor da constante K_e depende de:

$$K_e = \frac{\pi \cdot D^2}{4 \cdot k \cdot D} \quad (3.10)$$

Em **Doebelin (1975)** é apresentado um esquema para o medidor eletromagnético, mostrando a resistência interna do medidor, representando a equação $e = \Phi_B/v$ a tensão elétrica induzida ε , pela passagem do fluido com uma velocidade v e com um comprimento l através do campo magnético Φ_B , este esquema pode ser visto na figura 3.10.

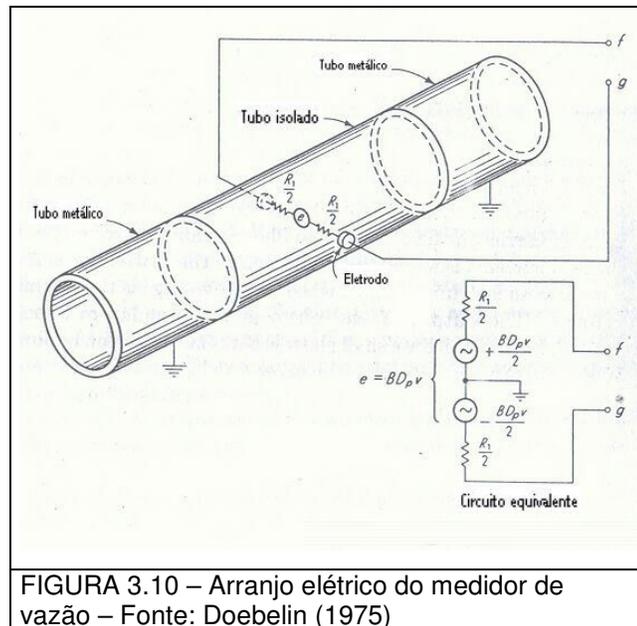


FIGURA 3.10 – Arranjo elétrico do medidor de vazão – Fonte: Doebelin (1975)

3.5 APLICAÇÕES DO MEDIDOR ELETROMAGNÉTICO

Segundo **Cheremisinoff (1979)**, os medidores de vazão eletromagnéticos são usados para medir todos os tipos de líquidos corrosivos, ácidos fortes, bases, materiais granulados e viscosos. Aplicações específicas de medição incluem ácido nítrico, soda cáustica, poliestireno, látex butadieno, cloreto de alumínio, vários sais orgânicos, ácidos férricos e hidróxido de amônia. Na indústria de polpa e papel, medidores de vazão eletromagnéticos são usados em manuseio de líquidos sujos em alta temperatura, escoamento de polpa, água dura, tinturas, aditivos, alvejantes químicos, lodos, argilas, soluções de sulfatos de alumínio, e pastas de dióxido de titânio. Em indústrias de mineração e refinarias, esses medidores são usados para medição de minério de ferro, escórias de cobre e alumínio, circuitos de trituração, escórias de minérios básicos. Na indústria do aço, medidores eletromagnéticos de vazão são empregados em uma variedade de aplicações de escoamentos de água em sistemas de tratamento de efluentes e afluentes de água. A maioria dessas aplicações é de escórias e resíduos abrasivos. Na indústria têxtil, medidores de vazão magnéticos são usados no monitoramento das medições químicas e de monitoramento de fluxo de resíduos e na medição de vazão de tintas, produtos cáusticos, resinas e água.

Nas usinas termoelétricas, esses sistemas são utilizados para medição de vazão em torres de resfriamento de água, sistemas de recirculação de água, borras de carbono, detritos químicos, em escovas de SO₂ e sistemas de tratamento de resíduos.

Esses medidores também são largamente utilizados em todos os aspectos dos sistemas de tratamento de águas e esgotos (ETA e ETE), incluindo dragueamento de lodo dos decantadores de ETE e medição de vazão em massa. A limitação primária desse tipo de medidor é a condutividade elétrica do fluido.

Para os processos da indústria alimentícia, os materiais devem ser adequados ao contato com produtos alimentares e aprovados pelos órgãos competentes, tais como a F.D.A., "Food and Drug Administration" órgão do Departamento de Saúde do Governo dos E.U.A. e o Ministério da Agricultura do Brasil que regulam os serviços de atividades com alimentos. Algumas aplicações citadas na bibliografia são: pasteurização do leite, processamento de milho, refino de açúcar, cerveja, refrigerantes, café, melado de milho, cat-chup e outros produtos viscosos, uma vez que o medidor não é afetado por mudanças na massa específica e viscosidade do fluido. Medidores eletromagnéticos são ideais para muitas aplicações alimentícias. Tendo alta performance com produtos de laticínios como leite e sorvete, ou diferentes líquidos com dificuldades para medição são também medidos. Na indústria de alimentos, medidores magnéticos de vazão oferecem a vantagem do desenho interior limpo, sem pontos de acúmulo de material sem pontos de eventuais contaminações externas.

3.6 FATORES QUE INFLUENCIAM NA MEDIÇÃO

A norma **ISO 6817 (1980)** estabelece que a condutividade elétrica do líquido deve obedecer a parâmetros, conforme recomendações do fabricante do medidor.

Segundo a norma para o uso industrial o efeito do número de Reynolds é muito pequeno e geralmente pode ser ignorado para aplicações práticas.

A norma estabelece que distorções do perfil de velocidades causadas por acessórios presentes na tubulação (tais como curvas, válvulas, reduções, etc.) colocadas à jusante ou a montante do medidor, podem ter efeito no desempenho do medidor.

A dimensão do medidor deve ser sempre que possível a mesma da tubulação a não ser que a velocidade do escoamento correspondente a condição de utilização normal do escoamento seja menor do que a velocidade recomendada pelo fabricante. Neste caso pode ser adotado um diâmetro para o medidor menor que o da tubulação adjacente.

O efeito do arranjo físico na distribuição de velocidade é discutido na norma **ISO 6817 (1980)**, afirmando que dados precisos dos efeitos de perturbações no escoamento nem sempre estão disponíveis, mas para a maioria dos medidores de vazão eletromagnéticos é recomendado que qualquer fonte de perturbação do escoamento, tais como uma curva, esteja no mínimo a dez diâmetros (10DN) da tubulação a montante do plano dos eletrodos, se o desempenho não for para ser alterado mais do que 1%. A norma afirma ainda que quando a distância for inevitavelmente menor do que esta deve ser solicitada orientação ao fabricante. Afirma ainda que quando houver suspeita de escoamento com turbilhonamento, é uma boa prática inserir um redutor de turbilhonamento que esteja de acordo com a norma **ISO 7194 (1983)**.

A norma diz que o efeito de turbilhonamento ou do perfil de velocidade distorcido, pode ser potencializado ou amenizado pela introdução de reduções na linha para a instalação do elemento primário do medidor, dependendo da geometria das peças utilizadas e da distorção apresentada.

Segundo **ASME (1971)** os fatores intervenientes nos medidores eletromagnéticos são:

- **Condutividade:** a mínima condutividade admissível do fluido mensurado é de $10\mu\Omega/\text{cm}$, para valores menores do que esse limite são necessárias condições especiais, tais como a mistura de substâncias condutivas ao fluido mensurado ou utilização de equipamentos especiais, porém não ultrapassando o limite de $0,1\mu\Omega/\text{cm}$. Isto inviabiliza a utilização de medidores eletromagnéticos para a medição de petróleo e seus derivados, a menos que o fluido seja ionizado artificialmente.

- **Depósitos na tubulação:** o efeito de depósitos na superfície da tubulação e dos eletrodos, tais como ferrugem ou substâncias dissolvidas no fluido que precipitem ao longo do escoamento, depende da condutividade da substância depositada pois caso seja a mesma do fluido escoado, não haverá efeito de leitura do sinal, sendo somente o problema da redução da área da seção transversal, podendo originar erros de determinação da vazão, na integração $Q = \int VdA$, pois a velocidade medida será maior em função da redução da área, e caso não se considere essa redução de área (o que é provável de que ocorra, pois é difícil identificar a presença de depósitos na tubulação, salvo por inspeção visual) o valor indicado de vazão será superior ao valor escoado verdadeiro. E caso a condutividade seja diferente, ou nula, a tensão elétrica indicada pelos eletrodos não será o valor verdadeiro.

Segundo a norma **ABNT NBR ISO 9104 (2000)** os fatores de influência a serem considerados são de dois tipos, os que afetam o líquido dentro do elemento primário de medição de vazão e os provenientes de fatores externos.

A norma **ABNT NBR ISO 9104 (2000)** apresenta como efeitos internos as mudanças na temperatura do líquido, na distribuição da velocidade do escoamento e na condutividade do líquido. O efeito da variação da temperatura do líquido deve ser determinado para as várias temperaturas de trabalho, mantendo constante a

temperatura ambiente, e verificando o desvio de indicação do medidor, contradizendo **BENTLEY (1995)**.

Os fatores de influência externos são as mudanças na temperatura do ambiente, umidade, pressão barométrica e variações no fornecimento de corrente, tensão ou frequência. O efeito de cada um destes fatores deve ser identificado por determinação no desvio da saída, obtido sob condições de referência. A vazão de ensaio deve impor uma velocidade da ordem de 1 m/s, para garantir condições de escoamento adequadas.

A avaliação das influências internas deve abordar três aspectos principais: Temperatura do líquido, condutividade do líquido e o efeito da distribuição de velocidades.

O efeito da temperatura do líquido deve ser determinado mantendo-se a temperatura ambiente constante, mantendo o regime permanente, e conduzido o ensaio de tal forma a determinar os efeitos em função da porcentagem da faixa de sinal de saída.

O efeito da mudança da condutividade do líquido deve ser estudado para três valores distintos de condutividade, considerando os valores extremos apresentados pelo fabricante. Os resultados dos efeitos devem ser apresentados em função da porcentagem da faixa do sinal de saída.

3.6.1 EFEITO DO PERFIL DE VELOCIDADES

Segundo **ASME (1971)** mudanças no perfil de velocidades, provenientes de linhas de fluxo do escoamento completamente turbulento, não apresentam efeitos na medição da vazão, desde que o perfil seja simétrico em relação ao eixo do tubo. Um escoamento de perfil assimétrico, turbilhonamentos e escoamentos helicoidais, caso

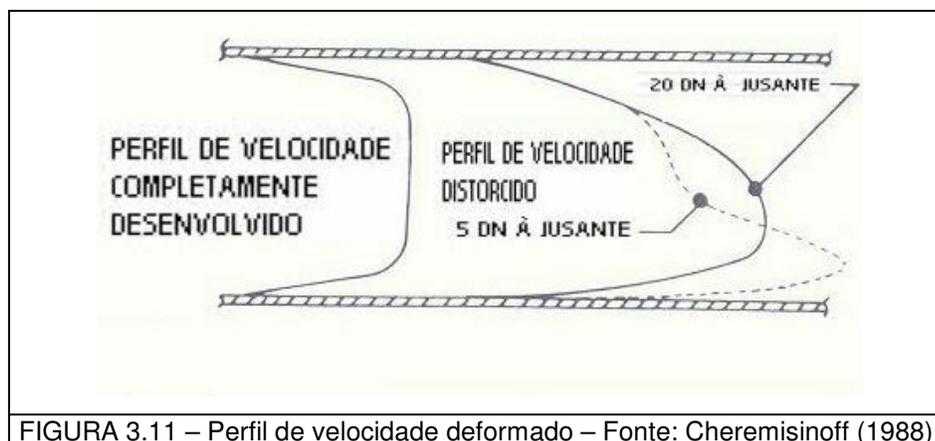
tenham uma interferência na seção do tubo, podem causar um efeito de até 20% da indicação da medição da vazão.

Ainda segundo **ASME (1971)** um perfil assimétrico pode produzir até 50% de bloqueio nos eletrodos, produzindo efeitos acima de 20% de desvio na vazão, dependendo da orientação dos eletrodos e da assimetria.

Cheremisinoff (1979) mostra um perfil de escoamento completamente desenvolvido e dois perfis assimétricos obtidos a partir de medições tomadas a 5 e 20 diâmetros a jusante de uma curva numa linha de 75mm que estão ilustrados na figura 3.11.

O perfil distorcido mostrado em **Cheremisinoff (1979)** reflete uma típica distribuição de velocidade encontrada em instalações de campo, com a presença de singularidades. Na referência não é possível determinar se o perfil corresponde a um levantamento vertical ou horizontal, devendo corresponder a um perfil vertical.

Erros significativos deverão ocorrer quando da medição de vazão tomada em perfis de escoamento distorcidos, uma vez que as condições de calibração de laboratório são muito diferentes. Medidores que não permitirem calibração em campo, muito provavelmente estarão sujeitos a desvios do valor indicado, devido a condições da instalação que podem deformar o perfil de velocidades.



AWWA (1989) afirma que a confiança e a exatidão do sinal de saída de um medidor de vazão é altamente dependente das condições de instalação. E que uma posição de instalação inadequada pode degradar a exatidão do medidor abaixo de níveis aceitáveis.

As configurações da tubulação podem causar distorções na exatidão do medidor, sendo que todo o medidor tem limites para a instalação próxima a singularidades, exigindo trechos retos a montante e a jusante do medidor. Estas informações podem ser fornecidas pelo fabricante e em normas técnicas. O autor recomenda ainda que caso as recomendações do fabricante não estejam disponíveis, deve ser respeitado um trecho reto de 50D a montante do medidor.

Ainda segundo **AWWA (1989)**, caso não sejam respeitadas as condições mínimas de instalação do medidor em campo, a calibração do medidor em laboratório pode ser invalidada, em função da deformação do perfil de velocidades.

Caso a instalação não possa respeitar os trechos retos recomendados, um retificador de fluxo, para remover as distorções do perfil de velocidades pode ser utilizado, considerando que este também deve obedecer algumas condições de instalação. O manual recomenda que o medidor e o retificador de fluxo estejam a 20D e nunca a menos de 10D de distância.

Segundo a norma **BS 7405 (1991)** na instalação do medidor a escolha do local de instalação deve obedecer aos trechos retos mínimos em relação às singularidades, bem como garantir o preenchimento completo da tubulação.

Lim e Chung (1999) investigaram numericamente os efeitos da instalação de um medidor eletromagnético de vazão, instalado a jusante de um cotovelo 90°, para o caso laminar. No estudo foi simulado por meio do software FLUENT um escoamento laminar e, por meio desta simulação, investigado o efeito das singularidades num medidor eletromagnético instalado a até 22D de um cotovelo 90°. Também foi estudada a

relação do raio de curvatura do cotovelo, e o efeito de orientação do plano dos eletrodos do medidor eletromagnético, considerando 0° , 45° e 90° . Os estudos foram feitos na faixa de Reynolds de 400 até 1500.

O estudo conclui que nem sempre a localização do medidor distante de um cotovelo pode ser suficiente para minimizar o desvio do mesmo, existe uma posição ótima para o posicionamento do medidor para um desvio mínimo. O estudo conclui também que o melhor posicionamento do plano dos eletrodos do medidor é a 45° com o plano de simetria do cotovelo.

Os resultados desse estudo devem ser aplicados levando em consideração aos escoamentos estudados que estão todos na faixa laminar, nas situações práticas de instalação isso não é comum, sendo que os casos de escoamento turbulento são mais usuais.

Bates (1999) estudou os efeitos de diferentes diâmetros de tubulação instalados à jusante de um medidor eletromagnético modificado. O medidor Danfoss de 50mm foi instalado em uma tubulação de 45, 50 e 55mm. No estudo também foi analisado o efeito do desalinhamento, vertical e horizontal, de 3mm da tubulação em relação ao medidor, mantendo o plano dos eletrodos na horizontal. O autor apresenta fatores que considera a causa de erros dos medidores em campo, sendo que a calibração dos medidores pelos fabricantes é feita pelo método gravimétrico, em laboratório com condições ideais de instalação, com trechos retos a jusante e a montante, e perfil de velocidades completamente desenvolvido. Ocorre que nas instalações muitas vezes isso não ocorre. Também em calibrações de laboratório, muitas vezes os diâmetros da linha são maiores ou menores do que o diâmetro do medidor, sendo assim o autor propôs o ensaio com três arranjos: medidor e linha centralizados; medidor desalinhado da tubulação em 3mm na vertical, com o plano dos eletrodos na horizontal; e por último tubulação desalinhada com o alinhamento do medidor em 3mm na horizontal, com o plano dos eletrodos na horizontal. Esses três arranjos foram ensaiados para os três diâmetros do estudo 45, 50 e 55mm.

Os resultados mostraram que o maior desvio encontrado ocorreu com o menor diâmetro da tubulação (45mm) montado com desalinhamento de 3mm na horizontal (com plano dos eletrodos na horizontal) e foi da ordem de 1%. Sempre com séria variação do perfil de velocidade horizontal e vertical, em comparação com o perfil completamente desenvolvido.

Bates (2000) estudou a performance de dois medidores eletromagnéticos instalados a jusante de uma combinação de redução-curva 90°. A comparação de dois medidores geometricamente similares, instalados a jusante de uma curva de diâmetro 254mm a 90° e de uma redução de 254mm para 152,4mm a 1m do medidor, ou seja, a 7,667 DN. O padrão utilizado de medição foi uma anemometria laser de efeito Doppler (LDA), instalado a 1,667 DN a jusante do medidor eletromagnético, a investigação com o LDA verificou a existência de instabilidades e de média assimétrica do perfil de velocidades, especialmente no plano vertical, ou seja, no plano da curva de 90°. A assimetria do perfil de velocidades influenciou a performance dos medidores eletromagnéticos, suficientemente para causar erros da ordem de 1%.

A norma **ABNT NBR ISO 9104 (2000)** afirma que os medidores de vazão são calibrados assumindo a condição de escoamento turbulento completamente desenvolvido. Esta é uma condição de escoamento ideal representada por uma distribuição de velocidades axialmente simétrica com o valor da velocidade máxima ocorrendo no centro da tubulação e com a velocidade mínima ocorrendo junto à parede da tubulação. Qualquer alteração da distribuição de velocidades que produza um perfil de velocidades assimétrico pode provocar desvios de indicação da vazão medida.

Escoamentos rotacionais também podem comprometer o funcionamento do medidor de vazão.

As alterações do perfil de velocidades são causadas pelas condições de instalação do medidor, ou seja, pelas singularidades e conexões existentes na linha.

A norma afirma que se o perfil de velocidades for significativamente diferente daquele da calibração do medidor, poderá ocorrer um desvio na calibração do mesmo. Sendo assim devem ser executados ensaios para avaliar a resposta do medidor de vazão quando submetido a perfis de velocidade distorcidos. Esses perfis podem ser originados do arranjo de conexões existente a montante do elemento primário do medidor, desses arranjos, os mais encontrados em situações práticas são provenientes de reduções, válvulas a montante, e de uma ou duas curvas.

Para as reduções, a **ABNT NBR ISO 9104 (2000)** diz que os ensaios deverão ser conduzidos com uma redução concêntrica, inicialmente montada imediatamente no flange adjacente à montante do medidor, e posteriormente a 5 DN a montante do plano de referência do eletrodo do medidor. A redução deve ter uma razão de conicidade de 2:1, sendo recomendado que a redução tenha comprimento de 3 DN em relação ao menor diâmetro, podendo ser usada uma conexão disponível comercialmente de outro comprimento.

O ensaio indicado deve ser feito para cada um dos pontos recomendados dentro da faixa de medição de vazão do medidor.

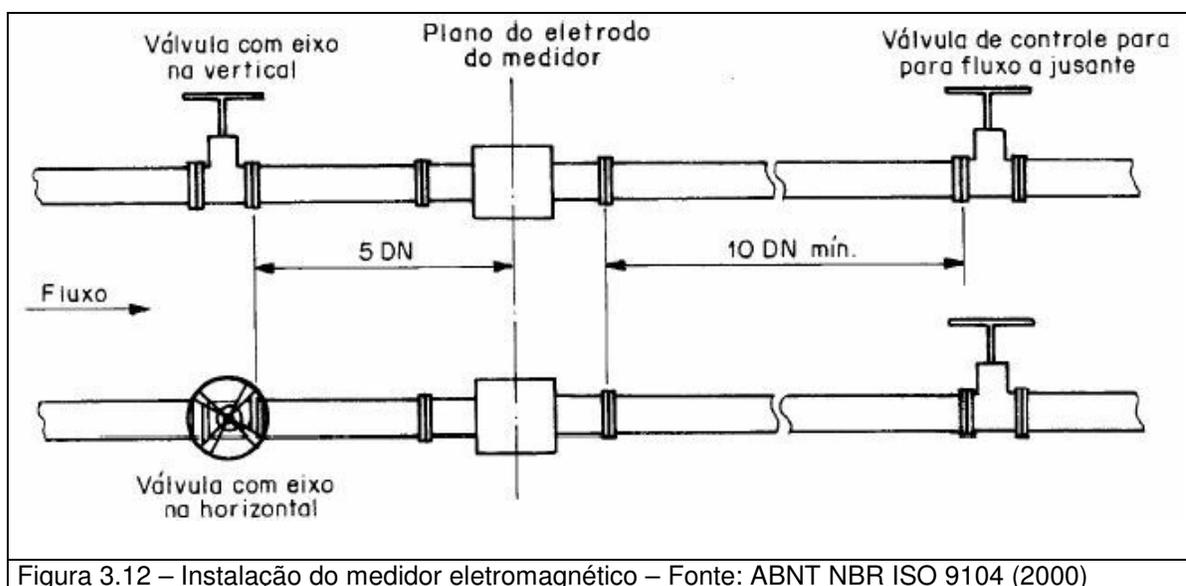
Em relação às válvulas de controle situadas a montante do elemento primário do medidor, uma série de ensaios deve ser feita com uma válvula-gaveta montada primeiramente a 2 DN a montante do plano do eletrodo (ou se o medidor for maior que 4 DN, adjacente ao flange à montante do medidor) e posteriormente a 5 DN a montante do plano do eletrodo conforme a figura 3.12. Para ambos os casos, ensaios devem ser conduzidos para a válvula montada com a haste: a) perpendicular e b) paralelo a uma linha imaginária unindo os centros dos eletrodos diametralmente.

Os resultados dos ensaios devem ser obtidos primeiramente com a vazão sendo controlada usando a válvula a montante como um simulador de distúrbios do escoamento e posteriormente com a válvula a montante ajustada em posições fixas de

25% e 50% fechada. No último arranjo a vazão é controlada por uma válvula a jusante do circuito de ensaio.

A pressão no tubo durante esses ensaios deve ser mantida dentro de um valor suficiente para evitar qualquer perigo de cavitação.

Em todos os arranjos de ensaio, os ajustes do ponto de ensaio devem ser obtidos para pelo menos quatro posições representativas da faixa de medição, dentro do que permitam o arranjo e a capacidade da bancada de ensaio.



Para a situação com uma curva, uma série de ensaios deve ser executada no medidor ($r = 1,5 \text{ DN}$, onde r é o raio de curvatura) fixada primeiramente adjacente ao flange a montante do medidor de vazão e posteriormente a 5 DN a montante do plano dos eletrodos.

Já no caso de duas curvas uma série adicional de ensaios deve ser executada, na qual duas curvas adjacentes em planos mutuamente perpendiculares são instaladas sem separação, primeiramente imediatamente adjacente ao flange à montante do medidor de vazão e posteriormente à 5 DN a montante do plano dos eletrodos.

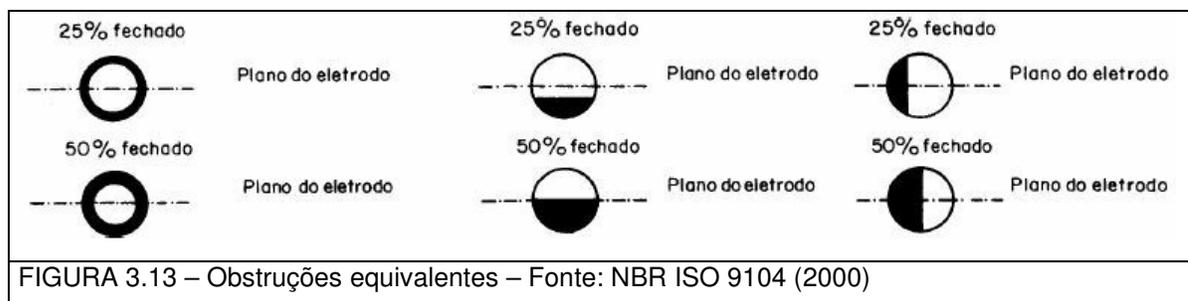
Para cada arranjo de ensaio as leituras devem ser tomadas em cada um dos pontos recomendados dentro da faixa de medição do medidor. Para todos os ensaios a orientação do(s) plano(s) da(s) curva(s) relativa à linha imaginária, unindo diametralmente o centro dos eletrodos, deve ser registrada na planilha de ensaio, preferivelmente na forma de um esboço mostrando as informações pertinentes.

A norma sugere ainda que para diâmetros maiores do que 100 mm os ensaios de laboratório podem ficar muito caros, em razão disso podem ser usadas obstruções anulares ou segmentares, tais como as mostradas na figura 3.13.

As influências externas citadas na norma incluem alterações na fonte de alimentação elétrica principal, interferências elétricas, temperatura ambiente, umidade, e vibração mecânica.

Estas influências não devem fazer parte deste estudo e para os ensaios realizados em laboratório serão quando possível consideradas constantes.

A norma apresenta também outras influências, tais como a influência magnética, e correntes de dispersão dentro do líquido e radiointerferência. Estas influências também não devem fazer parte deste estudo e, para os ensaios realizados em laboratório, serão quando possível consideradas constantes.



3.7 PARÂMETROS PARA O DIMENSIONAMENTO DO MEDIDOR ELETROMAGNÉTICO

Segundo **Elonka (1976)**, para dimensionamento dos medidores eletromagnéticos, devem ser solicitados pelos fabricantes as seguintes informações:

- Diâmetro da tubulação;
- Dimensões desejadas para o elemento primário do medidor (custo);
- Vazões máxima e mínima de operação;
- Tipos de conexões e terminais (função do fluido medido e do ambiente);
- Revestimento interno do medidor (função do fluido medido);
- Valores máximos e mínimos da temperatura e pressão de trabalho.
- Condutividade do fluido em $\mu\text{S/m}$ (micro siemens por metro).

3.8 ENSAIOS DE AVALIAÇÃO E VERIFICAÇÃO DE DESEMPENHO DE MEDIDORES ELETROMAGNÉTICOS

A norma **ABNT NBR ISO 9104 (2000)** apresenta métodos de avaliação para determinar o desempenho de medidores eletromagnéticos, para ser usado pelos fabricantes e, para verificação do desempenho e especificações declaradas, pelos usuários.

A norma recomenda métodos de ensaio para serem aplicados a medidores de vazão eletromagnéticos em condutos fechados, não se aplicando para medidores de inserção. Durante os ensaios deve ser garantida a vazão constante, o líquido deve escoar tanto pelo medidor, como por toda a instalação de ensaio. A vazão média deve

garantir uma faixa de trabalho com número de Reynolds próximos às das condições de utilização.

Nos ensaios devem ser consideradas as incertezas envolvidas na medição.

O medidor de referência deve ser calibrado previamente, deve estar de acordo com a normalização existente, e deve possuir preferencialmente uma exatidão três vezes superior a do medidor em teste.

A faixa de vazão do medidor de referência deve ser adequada às vazões do ensaio.

O ensaio deve ser feito, variando-se um parâmetro de cada vez, assegurando que os demais parâmetros identificados não sofram alterações, afim de se mapear o efeito de cada parâmetro individualmente.

Para realização do ensaio devem ser obedecidas as recomendações a seguir:

- Garantir que o tubo esteja completamente preenchido de água;
- Local isento de gases e bolhas no escoamento;
- Obedecer às instruções de montagem do fabricante;
- O desvio entre o diâmetro da tubulação e do medidor deve ser no máximo de 3%;
- Instalar o primário a uma distância de pelo menos 10DN de qualquer perturbação a montante e 5DN de qualquer distúrbio a jusante.
- A conexão entre a instalação e o medidor deve ser de tal forma a evitar ressalto que interfiram no escoamento.
- Não deve haver diferença de potencial elétrico entre o medidor e o líquido, estando os dois devidamente aterrados;
- A água deve estar entre 4°C e 35°C, isenta de ar e de partículas magnéticas em suspensão e razoavelmente livre de partículas visíveis.

- A pressão de ensaio deve ser suficientemente alta para manter o líquido acima da pressão de vapor e evitar que gases dissolvidos saiam da solução em algum ponto da tubulação.
- A faixa de condutividade do líquido de ensaio deve estar entre 5mS/m (50 μ S/cm) e 500mS/m (5000 μ S/cm);
- A condição ambiente padrão de referência para ensaio exige temperatura de 20°C , umidade Relativa de 65%, pressão 1013 Bar; para ensaios realizados em condições diferentes deve ser efetuada uma correção;

O ensaio deve ser realizado nos pontos de ensaio que devem ser tomados nas vazões de aproximadamente 10%, 25%, 50%, 75% e 100% da largura da faixa de trabalho, devendo ser tomadas três medidas para cada ponto de ensaio, destas três medidas deve ser tomada uma média, a qual será computada.

As diferenças entre esses valores e os valores correspondentes no sistema padrão de referência, é o desvio relativo.

3.9 OUTROS TIPOS DE MEDIDOR ELETROMAGNÉTICO

Além do modelo convencional de medidor, existe um tipo de medidor eletromagnético que pode ser inserido no interior da tubulação, é o medidor de vazão eletromagnético de inserção.

O medidor pode ser usado em instalações de diversos diâmetros, sendo facilmente removível. É necessário apenas um furo na tubulação (com diâmetro em torno de 50mm), e uma válvula, para permitir a colocação e retirada do medidor com a tubulação em carga, onde uma vez inserido estará pronto para medir a vazão.

Segundo **Cheremisinoff (1979)** existem diferenças significativas entre os projetos dos medidores de inserção para os convencionais. O medidor de inserção opera pelo mesmo princípio de indução eletromagnética de Faraday. A diferença é que o medidor de vazão de inserção é um sensor pontual da velocidade instantânea.

Os medidores de vazão eletromagnéticos de inserção trabalham como medidores de velocidade local, determinando a vazão pelo cálculo da velocidade média do escoamento, em função de um perfil de velocidades característico para determinado diâmetro.

É preciso localizar o ponto de velocidade média e determiná-la, e desde que a área seja uma constante, é possível relacionar a velocidade diretamente com a vazão.

Um problema dos medidores de inserção é a obstrução provocada pela sonda magnética inserida dentro da linha, em que há uma redução da área transversal do tubo resultando num aumento da velocidade. O medidor lê uma velocidade ligeiramente maior do que a velocidade verdadeira do escoamento. Para reduzir esse efeito deve ser considerado um fator de bloqueio nas sondas dos medidores quando calibradas.

A sonda gera um campo magnético preciso que pode ser observado na figura 3.14 e, como o líquido se move através desse campo, ela funciona como um gerador elétrico que é proporcional à velocidade do líquido que escoar. Essa tensão elétrica é registrada nos eletrodos das sondas e, é processado por um circuito elétrico para gerar sinais proporcionais à vazão.

A calibração de medidores de inserção também é muito diferente comparada aos convencionais. Medidores convencionais são calibrados com um escoamento, simulando a condição de trabalho do medidor. Já a calibração de um medidor de vazão de inserção é completamente diferente, pois o medidor é um medidor de velocidade. Nesta calibração o sensor é arrastado fixado a um carro de arrasto em um tanque de grandes dimensões. Esta calibração pode assegurar uma exatidão de +/- 1%.

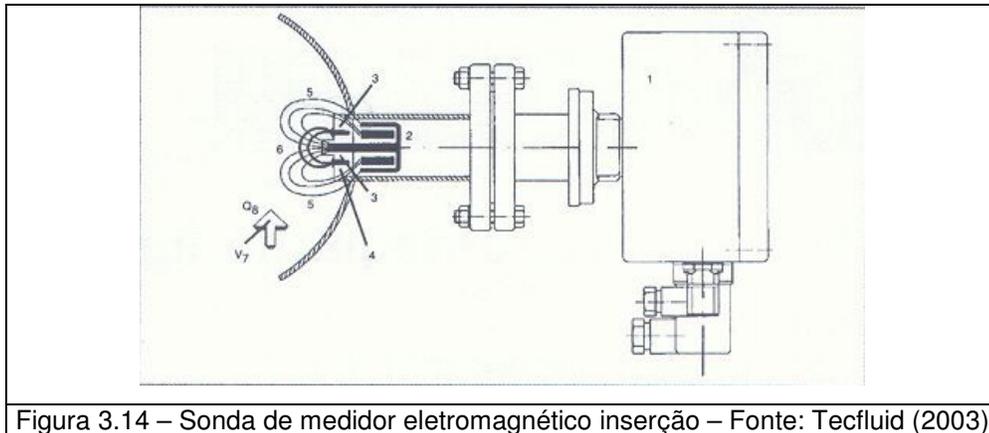


Figura 3.14 – Sonda de medidor eletromagnético inserção – Fonte: Tecfluid (2003)

A Rede Brasileira de Calibração (RBC) assim como o National Bureau Standard (EUA) aceita o carro de arrasto como o único meio legítimo de calibração de medidores de inserção (sensores de velocidade). A calibração com carro de arrasto possui um custo muito mais elevado do que uma calibração convencional, mas acredita-se que com a popularização desses instrumentos, haja uma redução do custo com um maior número de instalações adequadas oferecidas pelos fabricantes.

Bates e Turner (2003) estudaram um novo medidor de vazão eletromagnético, comercialmente conhecido como AquaMaster, que foi desenvolvido para melhorar o desempenho dos eletromagnéticos convencionais para baixas vazões. O desenvolvimento do medidor de vazão eletromagnético tem o sentido de satisfazer as demandas de projetos de instalação e de aumentar a capacidades de calibração. O medidor eletromagnético utilizado no estudo possui um tubo convergente e um tubo divergente, sendo que a redução de diâmetro é de 103mm para 65mm, e em seguida aumentado para 105mm novamente. Essa redução de diâmetro provoca um aumento da velocidade do escoamento e conseqüentemente uma maior exatidão do valor medido.

CAPÍTULO 4

MATERIAIS E MÉTODOS

A avaliação do desempenho de um medidor eletromagnético em situações práticas de instalação foi desenvolvida em uma bancada de ensaio montada no Laboratório de Hidráulica e Mecânica dos Fluidos da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da UNICAMP.

4.1 BANCADA DE ENSAIO

A bancada é formada por duas partes, uma de PVC com 100mm diâmetro e outra de ferro fundido com diâmetro de 150mm. A bancada funciona em circuito fechado, ou seja, não há perdas no sistema. A alimentação do sistema é feita por uma bomba rotativa.

A bomba recalca o fluido (água tratada) de um reservatório inferior, e a faz circular pela tubulação em conduto forçado, com seção totalmente preenchida pela água. O que é garantido pelo sifão de afogamento instalado no final da tubulação.

Após o sifão a água retorna para o reservatório inferior por meio de um canal subterrâneo de concreto, fechando o circuito.

Na bancada foram instalados quatro medidores em série, sendo:

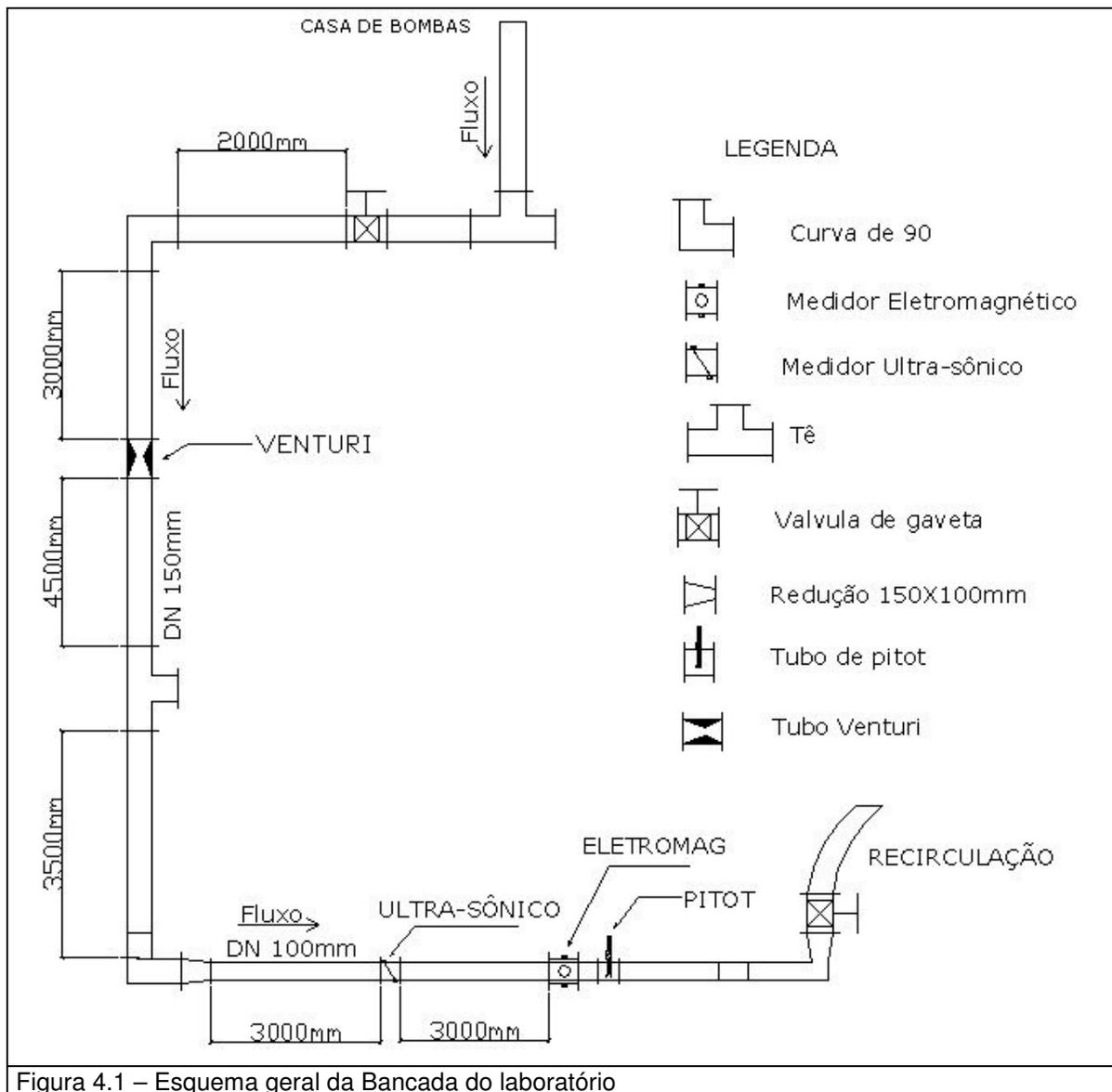
- Medidor de vazão tipo Tubo de Venturi Inserido;
- Medidor de vazão ultra-sônico do tipo tempo de trânsito (Clamp-on);
- Medidor de vazão eletromagnético;
- Medidor de velocidade local do tipo Tubo de Pitot Cole;

A forma geral da bancada pode ser vista na figura 4.1.

O primeiro trecho do circuito, onde está instalado o Tubo de Venturi, segue da casa das bombas até a curva imediatamente após o Venturi, é formado por tubos de ferro fundido (FoFo) com 150mm de diâmetro. O segundo trecho, onde estão instalados os outros três medidores é formado por tubos de PVC de 100mm de diâmetro, e segue da curva imediatamente antes do Ultra-sônico até o sifão que está instalado 1500mm após o tubo de Pitot.

O ensaio contou com quatro configurações diferentes, mantendo os medidores em série alterando, porém, as condições de instalação do medidor eletromagnético. As quatro configurações diferentes de montagem da bancada, chamadas aqui de M1, M2, M3 e M4, são descritas a seguir.

Todos os ensaios foram realizados exclusivamente no Laboratório de Hidráulica e Mecânica dos Fluidos da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da UNICAMP, excetuando-se algumas calibrações dos equipamentos. Os equipamentos utilizados estão todos descritos neste trabalho, identificados com seus respectivos números de série, permitindo a qualquer momento a reprodução dos ensaios.



Em todas as configurações, foi mantido um trecho reto de 6000mm (60DN) entre a singularidade em estudo e a singularidade mais próxima à montante. Ou seja, existe um trecho reto antes das singularidades em estudo de 6000mm. Este trecho reto à montante da singularidade tem como função eliminar qualquer distorção do perfil de velocidade existente, exceto as distorções provocadas pela singularidade cujo efeito está sendo estudado. A informação mais conservadora encontrada na bibliografia se refere a **AWWA (1989)** recomendando um trecho reto de 50DN para garantir um perfil de velocidade completamente desenvolvido, para os casos em que o perfil não possa ser determinado.

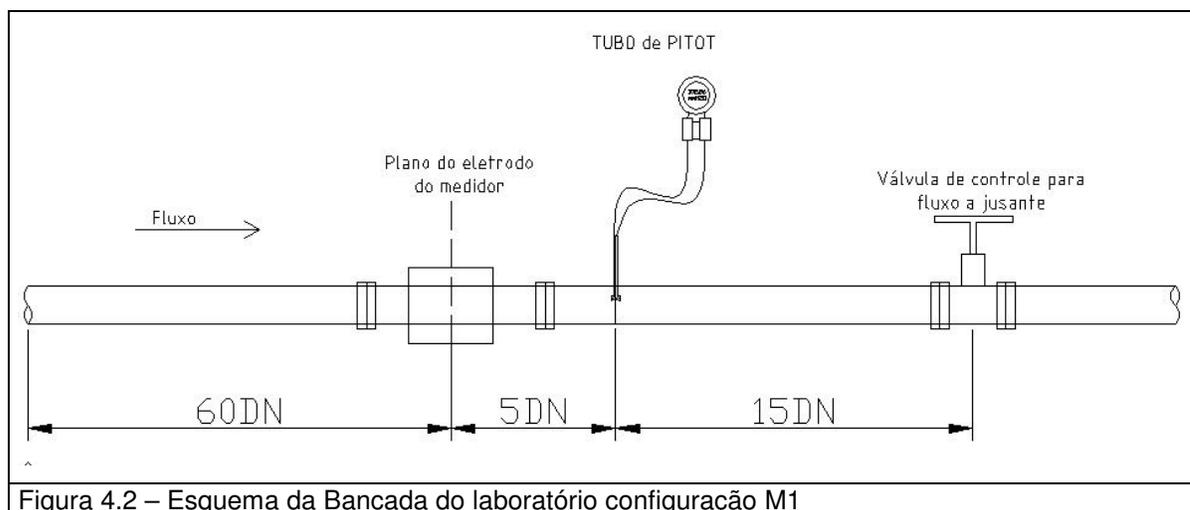
Desse modo pode-se garantir que o perfil de velocidade levantado na seção em que está instalado o Tubo de Pitot, sofre efeito somente da singularidade cujo efeito está em estudo.

4.1.1 PRIMEIRA CONFIGURAÇÃO (M1)

Na configuração “M1” todos os medidores foram instalados em condições adequadas quanto aos trechos retos mínimos, de acordo com os fabricantes e normas técnicas, sempre adotando o maior valor.

À montante do eletromagnético foi deixado um trecho reto de 6000mm (60DN) e de 1500mm (15DN) à jusante. O Ultra-sônico ficou com 3000mm (30DN) de trecho reto à montante e 3000mm (30DN) à jusante. O Tubo de Venturi com trechos retos de 3000mm (20DN) à montante e 1500mm (10DN) à jusante.

Foram feitos vários ensaios para a calibração da bancada, e para o ajuste dos medidores. A figura 4.2 mostra a instalação do eletromagnético na configuração “M1”, e a figura 4.3 é uma foto da configuração “M1”.



O objetivo da configuração M1 é de observar o comportamento em toda a faixa de vazões para cada um dos medidores e do desvio de indicação encontrado entre eles, de modo a fazer a verificação inicial.

O resumo com a posição relativa dos medidores na configuração M1 é mostrado na tabela 4.1, em que são considerados todas as dimensões relativas à bancada de ensaio.

Tabela 4.1 – Configuração M1

MEDIDOR DN da tubulação (mm)	MONTANTE		JUSANTE	
	SINGULARIDADE	TRECHO RETO	SINGULARIDADE	TRECHO RETO
VENTURI (150)	COTOVELO 90°	20DN	TÊE PASSAGEM FECHADO	10DN
ULTRA-SÔNICO (100)	TÊE DERIVAÇÃO E REDUÇÃO 150/100mm	30DN	TUBO DE PITOT INSERIDO NA LINHA	35DN
			COTOVELO 90°. (SIFÃO)	48DN
ELETROMAGNÉTICO (100)	TÊE DERIVAÇÃO E REDUÇÃO 150/100mm	60DN	TUBO DE PITOT INSERIDO NA LINHA	5DN
			COTOVELO 90°. (SIFÃO)	18DN
TUBO DE PITOT (100)	TÊE DERIVAÇÃO E REDUÇÃO 150/100mm	65DN	COTOVELO 90°. (SIFÃO)	13DN

Nesta disposição foi feito o teste de “zero” em todos os medidores, isto é, a válvula de montante do circuito foi fechada, de tal forma deixar o escoamento com velocidade zero, e então foi verificada a indicação dos medidores.

Caso o medidor não estivesse marcando zero de vazão, está informação foi introduzida na sua configuração, entrando no medidor com a opção “Actual Zero Flow”, ou seja, vazão atual igual a zero.

Esta configuração foi feita no início da série de ensaios e foi repetida após o término dos ensaios da configuração “M4” para a verificação da estabilidade dos medidores.



Figura 4.3 – Fotografia da configuração M1.

4.1.2 SEGUNDA CONFIGURAÇÃO (M2)

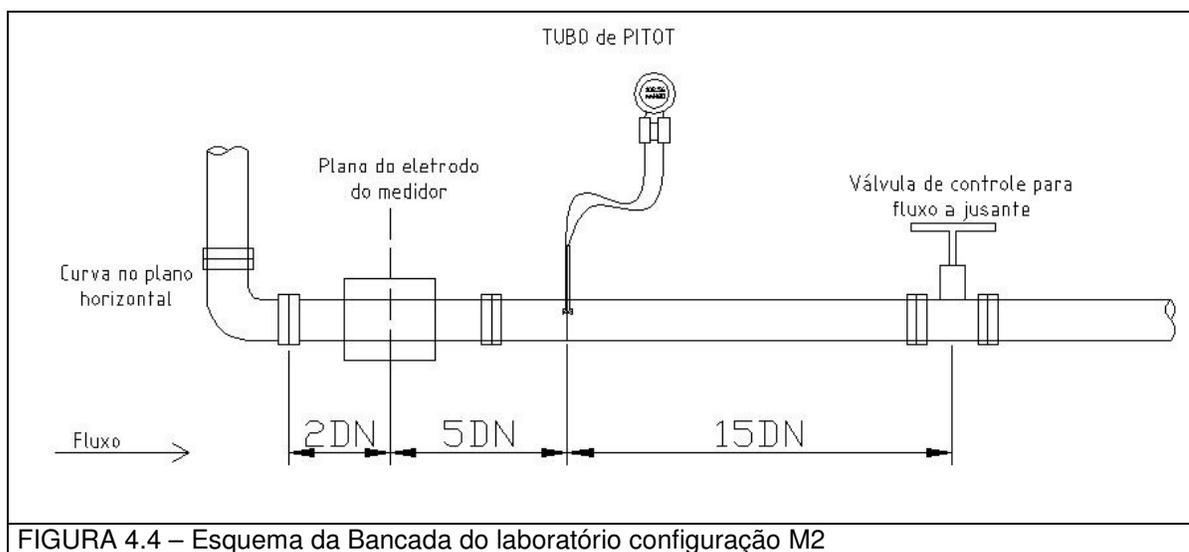
Na configuração “M2” foi mantida a posição de instalação dos medidores de referência, Tubo de Venturi e Ultra-sônico, sendo 3000 mm (30DN) à montante e 3000 mm (30DN) à jusante do Ultra-sônico, e 3000 mm (20DN) à montante e 1500 mm (10DN) à jusante do Venturi.

O Eletromagnético foi instalado 200 mm (2DN) à jusante de uma curva 90° de raio curto (cotovelo 90°) com 100 mm de diâmetro.

A 500 mm (5DN) a jusante do medidor eletromagnético, respeitando o trecho reto mínimo especificado pelo fabricante, foi instalado o Tubo de Pitot Cole.

O objetivo do arranjo M2 foi de observar o comportamento do medidor eletromagnético em relação à deformação do perfil de velocidades em função da singularidade existente, no caso o cotovelo 90°.

A figura 4.4 mostra um esquema da configuração M2, em que é possível ver a posição relativa entre o medidor eletromagnético e a curva.



A tabela 4.2 mostra de forma resumida a configuração M2 apresentando todas as distâncias entre os medidores e às singularidades mais próximas. As distâncias foram tomadas sempre em relação às flanges das singularidades.

Os valores estão apresentados em relação ao diâmetro nominal da tubulação em que o medidor está instalado.

Tabela 4.2 – Configuração M2

MEDIDOR DN da tubulação (mm)	MONTANTE		JUSANTE	
	SINGULARIDADE	TRECHO RETO	SINGULARIDADE	TRECHO RETO
VENTURI (150)	COTOVELO 90°	20DN	TÊE PASSAGEM FECHADO	10DN
ULTRA-SÔNICO (100)	TÊE DERIVAÇÃO E REDUÇÃO 150/100mm	30DN	TUBO DE PITOT INSERIDO NA LINHA	35DN
			COTOVELO 90°. (SIFÃO)	48DN
ELETROMAGNÉTICO (100)	COTOVELO 90°	2DN	TUBO DE PITOT INSERIDO NA LINHA	5DN
			COTOVELO 90°. (SIFÃO)	18DN
TUBO DE PITOT (100)	COTOVELO 90°	7DN	COTOVELO 90°. (SIFÃO)	13DN

A figura 4.5 é uma fotografia da bancada de ensaio no momento de um dos ensaios. Na fotografia é possível ver a tubulação de PVC com 100mm de diâmetro, a curva de raio curto de 90°, o medidor eletromagnético com seus cabos de conexão e seu aterramento.

É importante notar o pequeno trecho reto de 20cm deixado entre o medidor e a curva.



Figura 4.5 – Fotografia da configuração M2.

4.1.3 TERCEIRA CONFIGURAÇÃO (M3)

Na configuração “M3” também foi mantida a posição dos medidores de referência.

O Eletromagnético foi instalado 200 mm (2DN) à jusante de duas curvas de raio curto 90° (dois cotovelos 90°) de 100 mm de diâmetro, dispostas ortogonalmente entre si.

A 500 mm (5DN) a jusante do medidor eletromagnético foi instalado o Tubo de Pitot Cole.

A disposição espacial das curvas 90° pode ser vista na figura 4.6 que é uma representação esquemática das duas curvas.

Segundo AWWA (1989), para esta configuração é esperado um escoamento rotacional.

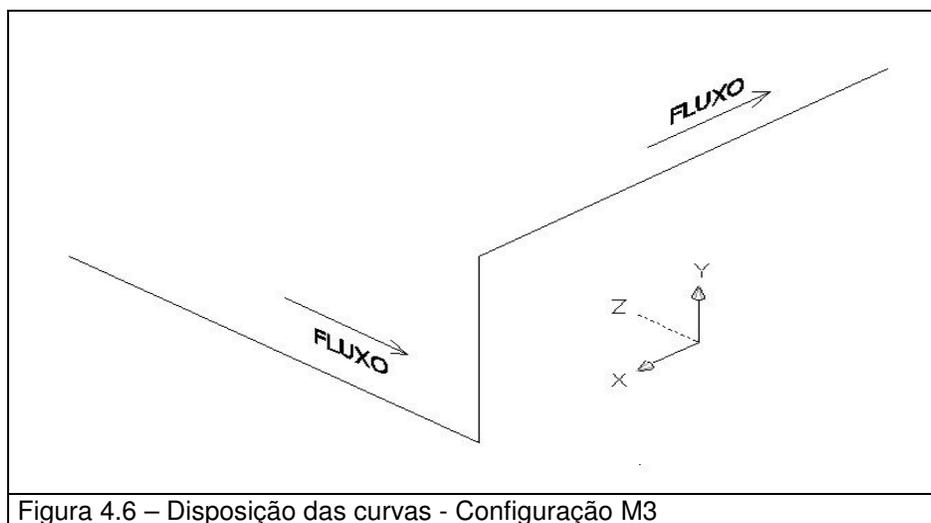


Figura 4.6 – Disposição das curvas - Configuração M3

O objetivo do arranjo “M3” foi de observar o comportamento do medidor eletromagnético em função da deformação do perfil de velocidades em função da singularidade existente, no caso os dois cotovelos 90° ortogonais.

A figura 4.7 mostra um esquema da configuração M3, onde estão as duas curvas, o medidor eletromagnético, o tubo de pitot e a válvula de controle de fluxo. Em alguns ensaios a válvula para controle de fluxo foi opcionalmente instalada após o sifão.

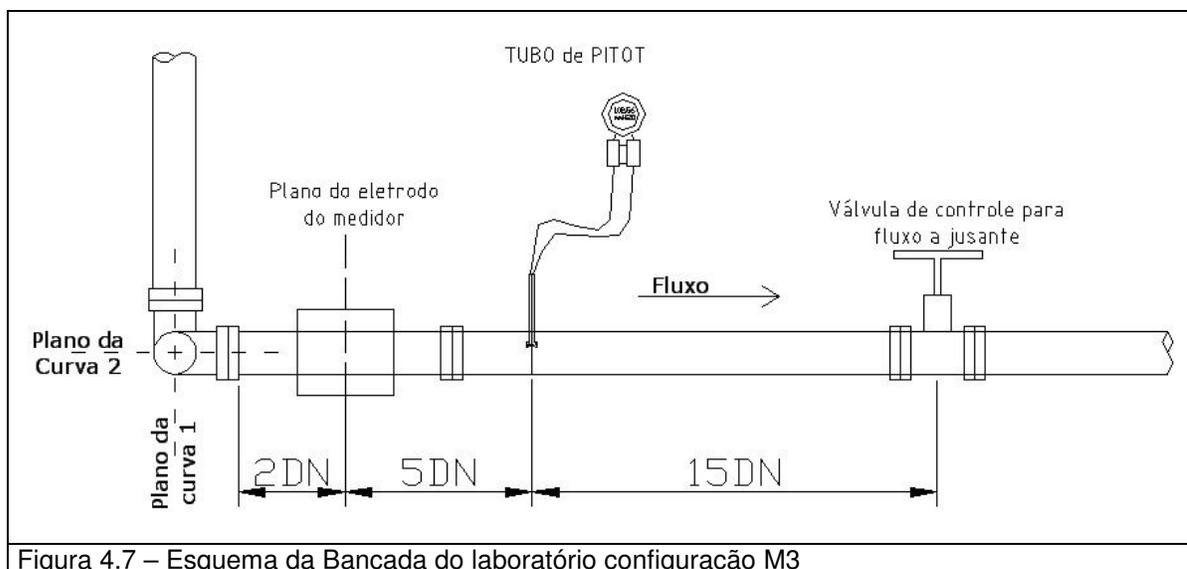


Figura 4.7 – Esquema da Bancada do laboratório configuração M3

A tabela 4.3 mostra de forma simplificada a configuração M3 apresentando todas as distâncias entre os medidores e às singularidades mais próximas. As distâncias foram tomadas sempre em relação às flanges das singularidades.

Os valores estão apresentados em relação ao diâmetro nominal da tubulação em que o medidor está instalado.

Tabela 4.3 – Configuração M3

MEDIDOR DN (mm)	MONTANTE		JUSANTE	
	SINGULARIDADE	TRECHO RETO	SINGULARIDADE	TRECHO RETO
VENTURI (150)	COTOVELO 90°	20DN	TÊE PASSAGEM FECHADO	10DN
ULTRA-SÔNICO (100)	TÊE DERIVAÇÃO E REDUÇÃO 150/100mm	30DN	TUBO DE PITOT INSERIDO NA LINHA	35DN
			COTOVELO 90°. (SIFÃO).	48DN
ELETROMAGNÉTICO (100)	02 COTOVELOS 90°. ORTOGONAIS	2DN	TUBO DE PITOT INSERIDO NA LINHA	5DN
			COTOVELO 90°. (SIFÃO).	18DN
TUBO DE PITOT (100)	02 COTOVELOS 90°. ORTOGONAIS	7DN	COTOVELO 90°. (SIFÃO)	13DN

A figura 4.8 é uma fotografia da bancada de ensaio no momento de um dos ensaios. Na fotografia é possível ver a tubulação de PVC com 100mm de diâmetro, e as duas curvas de raio curto de 90° instaladas ortogonalmente.

É importante notar o pequeno trecho reto de 20cm deixado entre o medidor e a curva.



Figura 4.8 – Fotografia da configuração M3

4.1.4 QUARTA CONFIGURAÇÃO (M4)

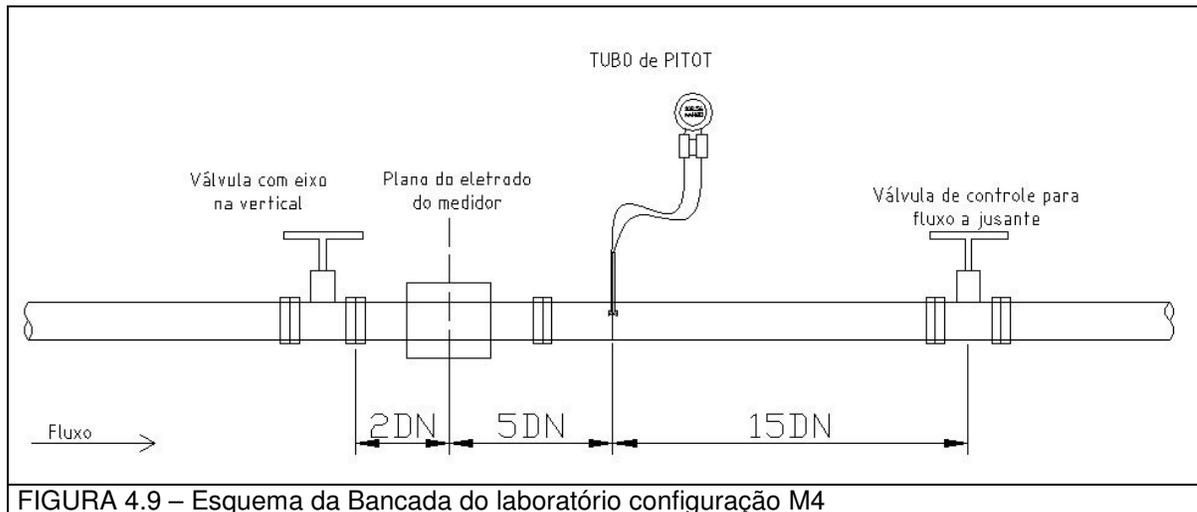
Na disposição “M4” também foi mantida a posição dos medidores de referência.

O Eletromagnético foi instalado 200 mm (2DN) à jusante de uma válvula de gaveta (registro de gaveta) de 100 mm de diâmetro. A 500 mm (5DN) a jusante do medidor eletromagnético foi instalado o Tubo de Pitot Cole.

O objetivo do arranjo “M4” foi de observar o comportamento do medidor eletromagnético em função da deformação do perfil de velocidades em função da singularidade existente, no caso a válvula de gaveta com 50% de abertura.

A figura 4.9 mostra um esquema da configuração M4, sendo que a válvula instalada à montante do medidor eletromagnético não foi utilizada para controlar a vazão da bancada. Para isto foi utilizada a outra válvula à jusante do medidor.

O ensaio foi desenvolvido com 50% de abertura da válvula. Ao final do ensaio foram feitos três ensaios comparativos adicionais, sem levantamento do perfil de velocidades, com 100% de abertura da válvula.



A tabela 4.4 mostra de forma sintética a configuração M4 apresentando todas as distâncias entre os medidores e às singularidades mais próximas.

As distâncias foram tomadas sempre em relação às flanges das singularidades e os valores estão apresentados em relação ao diâmetro nominal da tubulação em que o medidor está instalado.

As figuras 4.10 e 4.11 mostram a válvula de gaveta que foi utilizada nos ensaios, da configuração M4.

Na figura 4.10 a válvula está com 100% de abertura do curso da válvula, e na figura 4.11 com 50% de abertura do curso da válvula.

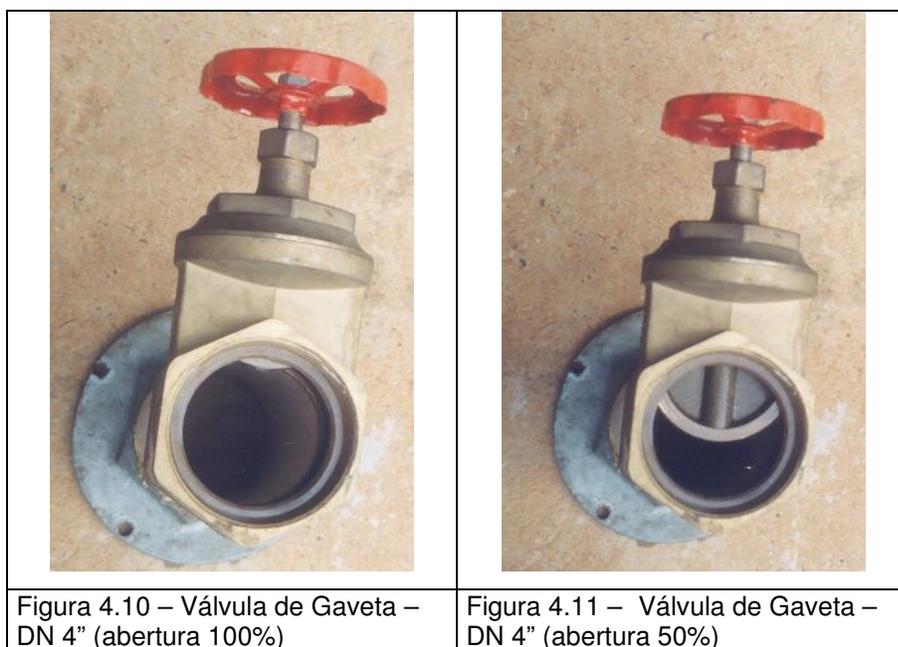


Tabela 4.4 – Configuração M4

MEDIDOR (DN da tubulação (mm))	MONTANTE		JUSANTE	
	SINGULARIDADE	TRECHO RETO	SINGULARIDADE	TRECHO RETO
VENTURI (150)	COTOVELO 90º	20DN	TÊE PASSAGEM FECHADO	10DN
ULTRA-SÔNICO (100)	TÊE DERIVAÇÃO E REDUÇÃO 150/100mm	30DN	TUBO DE PITOT INSERIDO NA LINHA	35DN
			COTOVELO 90º. (SIFÃO)	48DN
ELETROMAGNÉTICO (100)	01 VÁLVULA DE GAVETA 50% DE ABERTURA	2DN	TUBO DE PITOT INSERIDO NA LINHA	5DN
			COTOVELO 90º. (SIFÃO)	18DN
TUBO DE PITOT (100)	01 VÁLVULA DE GAVETA 50% DE ABERTURA	7DN	COTOVELO 90º. (SIFÃO)	13DN

A figura 4.12 é uma fotografia da bancada de ensaio no momento de um dos ensaios. Na fotografia é possível ver a tubulação de PVC com 100 mm de diâmetro, e a válvula de gaveta utilizada no ensaio.

É importante notar o pequeno trecho reto de 20cm deixado entre o medidor e a válvula.

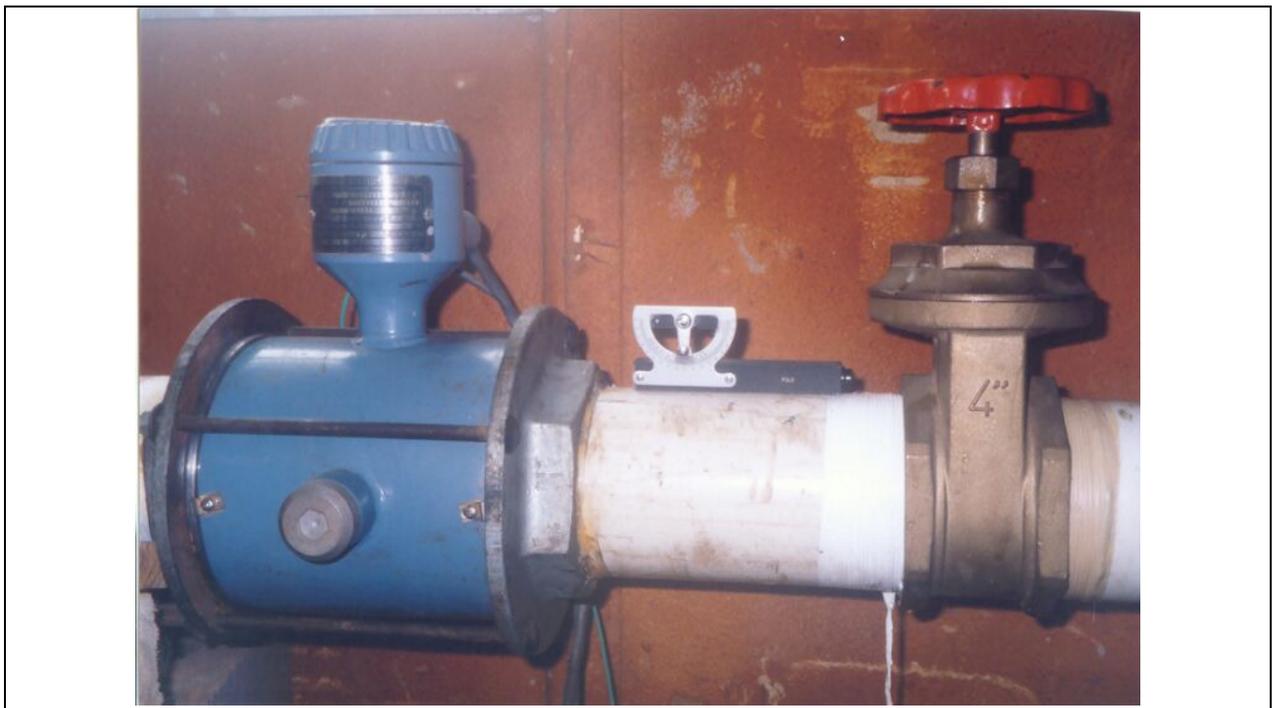


FIGURA 4.12 – Esquema da Bancada do laboratório configuração M4

A tabela 4.5 mostra de forma resumida todas as configurações ensaiadas no laboratório.

Tabela 4.5 – Resumo das configurações ensaiadas.

CONFIGURAÇÃO	SINGULARIDADE	DESCRIÇÃO
M1	sem singularidades	Medidores instalados em série com trecho reto a montante e a jusante adequados com os quatro medidores instalados em condições adequadas
M2	1 cotovelo 90°	Medidores instalados em série com trechos retos adequados para os medidores de vazão de referência (Venturi e Ultra-sônico) e com o medidor de vazão eletromagnético instalado imediatamente após uma curva de raio curto de 90° (cotovelo 90°)
M3	2 cotovelos 90° ortogonais.	Medidores instalados em série com trechos retos adequados para os medidores de vazão de referência (Venturi e Ultra-sônico) e com o medidor de vazão eletromagnético instalado imediatamente após duas curvas de raio curto 90° ortogonais. (cotovelo 90°)
M4	1 válvula	Medidores instalados em série com trechos retos adequados para os medidores de vazão de referência (Venturi e Ultra-sônico) e com o medidor de vazão eletromagnético instalado imediatamente após uma válvula (registro de gaveta) com abertura de 50%.

4.2 MEDIDORES UTILIZADOS

Uma breve descrição e a especificação técnica dos medidores utilizados nos ensaios realizados está apresentada a seguir.

4.2.1 MEDIDOR DE VAZÃO ELETROMAGNÉTICO

O medidor de vazão eletromagnético é montado em sistema de flanges tipo “Waffle”, em que os flanges de ferro galvanizado são rosqueadas à tubulação e o medidor é prensado entre elas por meio de quatro parafusos. A figura 4.13 mostra o elemento primário do medidor, onde é possível visualizar os flanges e os parafusos.

As tabelas 4.6 e 4.7 apresentam as características técnicas dos elementos do medidor eletromagnético. A figura 4.14 é uma foto do elemento secundário do medidor eletromagnético utilizado.

Tabela 4.6 – Medidor de vazão eletromagnético – elemento primário.

ELETROMAGNÉTICO – ELEMENTO PRIMÁRIO	
Tipo	Eletromagnético AC
Marca	Fisher Rosemount
Modelo	570TM
Flow Tube	8712
No. Calibração	1205756811953001
Número de série	100C6SSW252
Série	96 FM - 00312
Material do Eletrodo	Aço Inox 316L
Exatidão	$\pm 0,5\%$ da vazão ($1 < v \leq 10$ m/s)
Exatidão (baixas velocidades)	$\pm 0,0045$ m/s ($v \leq 1$ m/s)
Diâmetro Nominal	100 mm (4")

Tabela 4.7 – Medidor de vazão eletromagnético – elemento secundário.

ELETROMAGNÉTICO – ELEMENTO SECUNDÁRIO	
Marca	Fischer Rosemount
Modelo	8712C
Número de série	SN 64852
Software	5.8.2
Faixa de velocidade de operação	0 – 10 m/s
Faixa de vazão programada	0 – $30 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{s}$ (30l/s)
Faixa de velocidade de utilização	0 – 5 m/s
Instalação	Caixa metálica
Sinal de saída	4 – 20mA (proporcional à vazão)



Figura 4.13 – Elemento Primário do Medidor Eletromagnético



Figura 4.14 – Elemento secundário do Medidor Eletromagnético

4.2.2 MEDIDOR DE VAZÃO ULTRA-SÔNICO

O medidor de vazão Ultra-sônico, utilizado nos ensaios, é do tipo “Clamp-on” instalado externamente a tubulação como pode ser visto na figura 4.15. O sistema de “clamp-on” é muito prático e permite que um mesmo equipamento seja utilizado em tubulações de diferentes diâmetros, de 6,35mm até 9144mm.

Sua instalação também é muito simples e rápida, bastando posicionar corretamente as sondas e seguir a seqüência de etapas de instalação que são informadas no display do medidor. Para o correto funcionamento do medidor deve ser aplicado na sonda um gel específico para que haja continuidade entre a superfície da sonda e a parede da tubulação essa etapa da instalação pode ser visualizada na figura 4.16. A entrada dos dados no medidor deve ser bastante criteriosa, pois os dados da espessura da parede do tubo e do material da tubulação são vitais para o correto funcionamento do medidor.

O medidor tem funcionamento baseado no princípio do tempo de trânsito em que as sondas trabalham como emissoras e receptoras de ondas acústicas ultra-sônicas, onde o tempo decorrido entre a emissão e recepção da onda entre as sondas é proporcional à velocidade do escoamento do fluido.

Na posição de instalação adotada no laboratório as ondas são recebidas diretamente entre as sondas, sem reflexão na parede do tubo. Essa opção foi escolhida dentre outras, tais como em V e W para evitar possíveis amortizações das ondas nas paredes de PVC da tubulação. Caso o ultra-sônico fosse instalado em uma tubulação de aço ou ferro fundido, a configuração em V ou W seria mais adequada. A posição de instalação escolhida é chamada de direta, e pode ser entendida observando-se a figura 4.17.

A especificação técnica do medidor de vazão Ultra-sônico está apresentada nas tabelas 4.8 e 4.9.

O elemento primário pode ser visto na figura 4.15 que é uma foto do medidor instalado na tubulação de PVC e com DN 100mm.

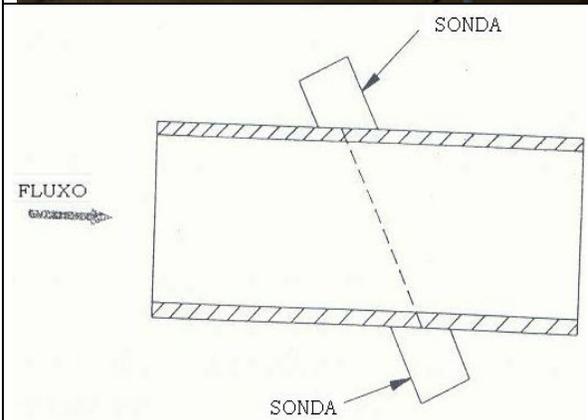
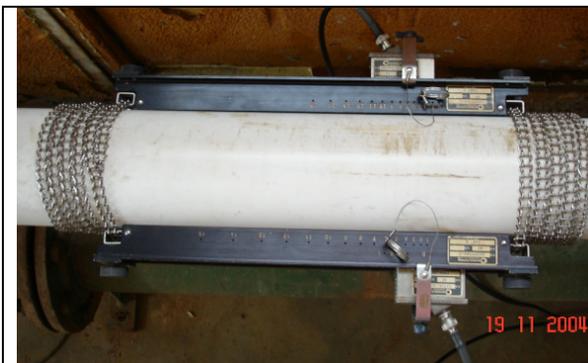


Figura 4.15 – Elemento Primário do Medidor Ultra-sônico – “Clamp-on”

Figura 4.17 – Esquema da posição de instalação direta – Fonte: AWWA (1991)



Figura 4.16 – Aplicação do gel na sonda do medidor.

Tabela 4.8 – Medidor de vazão ultra-sônico – elemento primário.

ULTRA-SÔNICO – ELEMENTO PRIMÁRIO	
Tipo	Tempo de Trânsito
Marca	Controlotron
Modelo	System 990 Uniflow
Número de série	W.O. 950727
Diâmetro Nominal	(6,35 – 9144mm) Clamp On Universal

Tabela 4.9 – Medidor de vazão ultra-sônico – elemento secundário.

ULTRA-SÔNICO – ELEMENTO SECUNDÁRIO	
Marca	CONTROLOTRON
Modelo	System 994 N
Número de série	994N5-D5-301
Faixa de velocidade de operação	0,0003 – 12,192 m/s
Faixa de vazão programada	0 – 30x10 ⁻³ m ³ /s (30l/s)
Faixa de velocidade de utilização	0 – 5 m/s
Instalação	Maleta de campo
Exatidão	1 a 3% da vazão
Exatidão de calibração	0,5% da vazão
Sinal de saída	4 – 20mA (proporcional à vazão)

A figura 4.18 é uma foto do elemento secundário do medidor Ultra-sônico, pode-se ver os terminais de saída, o display de indicação e a esquerda a unidade de controle e display manual.



Figura 4.18 – Elemento secundário do Medidor Ultra-sônico.

4.2.3 TUBO DE VENTURI

O medidor de vazão Tubo de Venturi foi usado como padrão de referência nos ensaios do laboratório. A figura 4.19 é uma foto do tubo de Venturi utilizado, que é do tipo inserido.

Para dar maior segurança aos resultados obtidos, foram utilizados associados ao tubo de venturi três elementos secundários. Dois transdutores de pressão eletrônicos idênticos, denominados neste trabalho por TP2 e TP4, e uma coluna manométrica em “U”. O conjunto de transdutores e coluna manométrica pode ser visto na figura 4.20 que é uma foto tirada no laboratório.

A especificação técnica do medidor de vazão do tipo Tubo de Venturi está apresentada na tabela 4.10 e os elementos secundários nas tabelas 4.11 a 4.13.

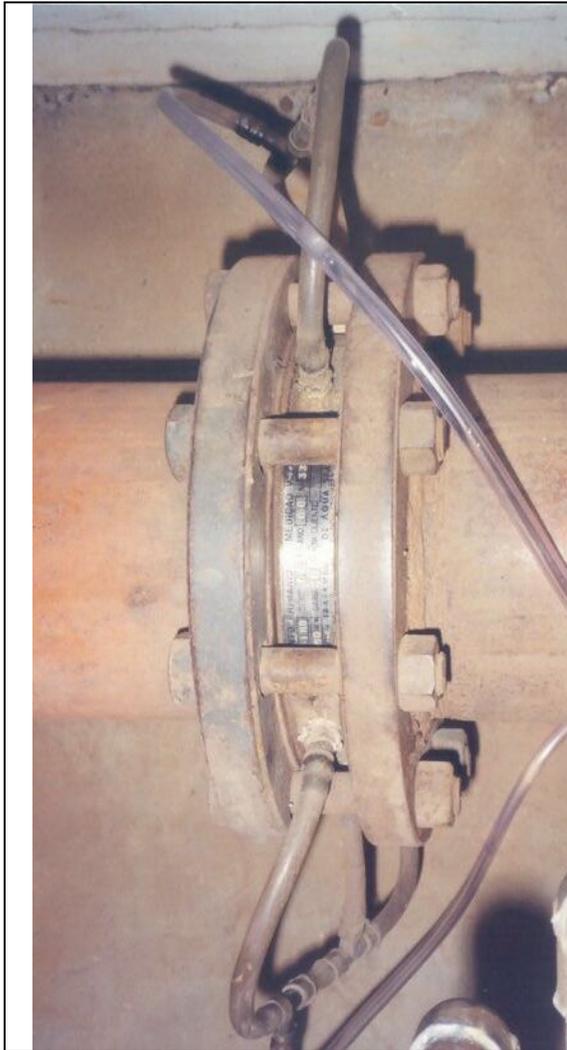


Figura 4.19 – Elemento Primário do Medidor Venturi.

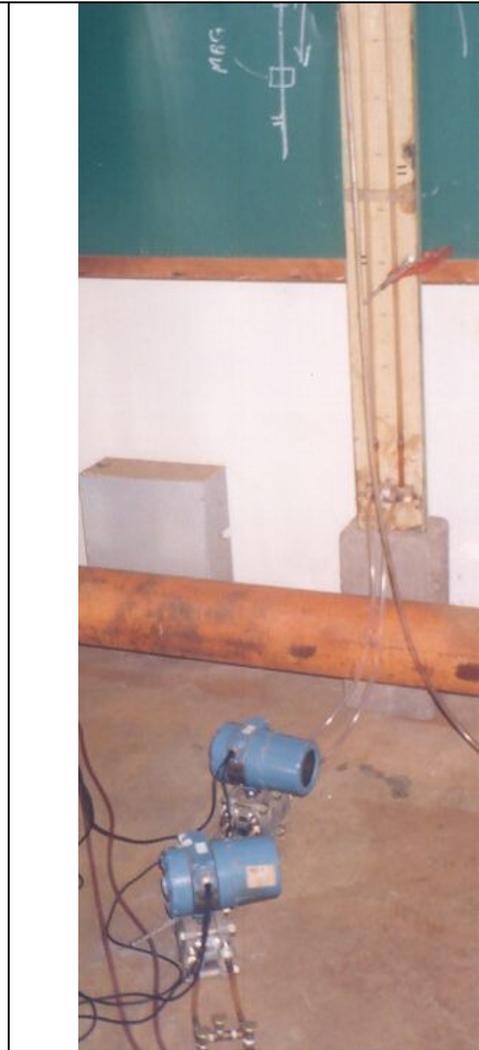


Figura 4.20 – Elementos secundários do Medidor Venturi.

Tabela 4.10 – Elemento Primário do medidor Venturi.

VENTURI – ELEMENTO PRIMÁRIO	
Tipo	Permotube
Marca	Solanil
Modelo	Venturi Inserido
Número de série	GB1 – 1988 N. 33/B
Exatidão	2%
Diâmetro Nominal	150mm

Tabela 4.11 – Elemento secundário do medidor Venturi.

VENTURI – ELEMENTO SECUNDÁRIO 1 (TP2)	
Marca	ROSEMOUNT
Modelo	1151 SMART
Número de série	1979832
Faixa de pressão de operação	0 – 500 mmH ₂ O
Faixa de pressão programada	0 – 500 mmH ₂ O
Faixa de pressão de utilização	0 – 350 mmH ₂ O
Instalação	Fixado em bancada
Exatidão	0,20 % F. E.
Sinal de saída	4 – 20mA (proporcional à pressão)

Tabela 4.12 – Elemento secundário do medidor Venturi.

VENTURI – ELEMENTO SECUNDÁRIO 2 (TP4)	
Marca	ROSEMOUNT
Modelo	1151 SMART
Número de série	1979834
Faixa de pressão de operação	0 – 700 mmH ₂ O
Faixa de pressão programada	0 – 700 mmH ₂ O
Faixa de pressão de utilização	0 – 350 mmH ₂ O
Instalação	Fixado em bancada
Exatidão	0,20 % F. E.
Sinal de saída	4 – 20mA (proporcional à pressão)

Tabela 4.13 – Elemento secundário do medidor Venturi.

VENTURI – ELEMENTO SECUNDÁRIO 3	
Marca	n/d
Modelo	Coluna manométrica
Número de série	CM1
Faixa de pressão de operação	0 – 2000 mmH ₂ O
Faixa de pressão de utilização	0 – 350 mmH ₂ O
Instalação	Fixado em bancada
Exatidão	Leitura visual +/- 1mm
Sinal de saída	Não possui (leitura visual)

4.2.4 TUBO DE PITOT.

O tubo de Pitot utilizado nos ensaios possui duas tomadas de pressão, como pode ser visto na figura 4.21; uma estática e outra total, e uma vez posicionado paralelo ao escoamento, uma das tomadas fica voltada para o escoamento e outra no sentido contrário. O tubo de Pitot é reversível, ou seja, ele pode ser rotacionado em 180° e

continuará a indicar as pressões diferenciais, alterando-se apenas o valor do coeficiente de calibração, em função de pequenas diferenças entre as tomadas de pressão que são fabricadas individualmente.

A leitura da pressão diferencial é feita com dois transdutores de pressão diferencial eletrônicos, sendo um para as pressões até 700mmH₂O, chamado neste trabalho de TP3 e outro para as pressões de até 1500mmH₂O denominado neste trabalho por TP1. A utilização de dois transdutores de pressão ligados em série tem por objetivo reduzir os erros de leitura que são da ordem de 0,20% do fundo de escala Ou seja, para o transdutor com faixa até 700mmH₂O o erro de leitura é de 1,4mmH₂O e para o transdutor com faixa até 1500mmH₂O o erro de leitura é de 3mmH₂O.



Figura 4.21 – Tubo de Pitot Cole.

A especificação técnica do tubo de Pitot está apresentada na tabela 4.14 e a especificação dos transdutores de pressão diferencial estão apresentadas nas tabelas 4.15 e 4.16.

Tabela 4.14 – Elemento Primário do Tubo de Pitot

PITOT – ELEMENTO PRIMÁRIO	
Tipo	Tubo Pitot Cole
Marca	Mecaltec
Número de série	ETA 04 - PP92
Diâmetro das tomadas de pressão (TIP)	4,7mm
Comprimento Nominal	300mm

Tabela 4.15 – Elemento Secundário 1 do Tubo de Pitot

PITOT – ELEMENTO SECUNDÁRIO 1 (TP03)	
Marca	ROSEMOUNT
Modelo	1151 SMART (Pressão Diferencial)
Número de série	1979833
Faixa de pressão de operação	0 – 700 mmH ₂ O
Faixa de pressão programada	0 – 700 mmH ₂ O
Faixa de pressão de utilização	0 – 700 mmH ₂ O
Instalação	Fixado em bancada
Exatidão	0,20 % F. E.
Sinal de saída	4 – 20mA (proporcional à pressão)

Tabela 4.16 – Elemento Secundário 2 do Tubo de Pitot

PITOT – ELEMENTO SECUNDÁRIO 2 (TP01)	
Marca	SMAR
Modelo	LD 301 (Pressão Diferencial)
Número de série	D121506
Faixa de pressão de operação	0 – 5000 mmH ₂ O
Faixa de pressão programada	0 – 1500 mmH ₂ O
Faixa de pressão de utilização	0 – 1500 mmH ₂ O
Instalação	Fixado em bancada
Exatidão	0,20 % F. E.
Sinal de saída	4 – 20mA (proporcional à pressão)

A figura 4.22 mostra os dois transdutores de pressão na bancada do laboratório. Sendo à esquerda o elemento secundário 1, chamado de TP03 e à direita o elemento secundário 2, chamado de TP01.

A bancada dos transdutores de pressão foi montada ao lado do Tubo de Pitot, permitindo que a leitura dos instrumentos fosse feita a qualquer momento.

Todas as conexões dos transdutores foram feitas com tubos transparentes permitindo detectar e eliminar qualquer bolha de ar presente nas tomadas de pressão.



Figura 4.22 – Transdutores de pressão TP03 e TP01.

Seguindo a metodologia proposta neste capítulo, foram iniciados os ensaios com as diferentes configurações. Os resultados estão apresentados no capítulo 5.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Para cada configuração de ensaio, é apresentado o resultado do desvio de indicação do medidor Eletromagnético, em relação aos medidores de referência. Também é apresentada a incerteza relativa da vazão e um gráfico comparativo entre as vazões estimadas pelo Venturi e as estimadas pelo Eletromagnético.

O desvio do medidor eletromagnético será calculado em função do valor indicado pelo medidor de vazão Tubo de Venturi e em relação ao Ultra-sônico, os quais estão em condições de instalação perfeitamente adequadas, sem a interferência de qualquer distúrbio de escoamento. O valor do desvio é dado por:

$$Di = \frac{Qi - Qv}{Qv} \cdot 100 \quad (5.1)$$

em que:

D_i = Desvio de indicação, representa o percentual relativo ao valor de referência, indicado em (%);

Q_i = vazão indicada pelo medidor eletromagnético;

Q_v = vazão verdadeira (medidor de referência)

Sendo que a *vazão indicada* (Q_i), é considerada a vazão de saída do medidor eletromagnético e, a *vazão verdadeira* (Q_v) é a indicação de vazão do medidor de vazão de referência.

A vazão do medidor Venturi foi obtida da seguinte equação:

$$Q = 1,64349 \cdot H^{0,50624} \quad (5.2)$$

em que:

H = diferença de pressão (mmH₂O)

Q=vazão (m³/s) x 10⁻³

Para cada configuração da bancada, foram realizados ensaios em três vazões distintas. A escolha dessas vazões se deu em função das velocidades de escoamento considerando a tubulação de 100 mm, buscando velocidades da ordem de 1,5 m/s; 2,0 m/s e 2,5 m/s, que são velocidades comumente encontradas nos sistemas de abastecimento de água.

Procurou-se evitar velocidades mais baixas do que 1,5 m/s na tubulação de 100 mm, pois a velocidade correspondente na tubulação de 150 mm seria de 0,67 m/s, o que estaria próximo ao limite inferior de funcionamento do tubo de Venturi que é em torno de 0,4 m/s.

Para o medidor eletromagnético, velocidades menores ou iguais a 1,0m/s também não seriam interessantes, pois embora o medidor seja projetado para trabalhar com velocidades a partir de 0,3 m/s a exatidão do medidor fica comprometida.

Desse modo as vazões de ensaio foram ajustadas com base nas vazões de referência, mostradas na tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Vazões de Referência.

Q(m ³ /s)x10 ⁻³	V(m/s) DN 100mm	V(m/s) DN 150mm
11,8	1,5	0,67
15,7	2,0	0,88
19,6	2,5	1,12

A incerteza na vazão do tubo de Venturi, como demonstrado no ANEXO - E, vem da seguinte equação:

$$\Delta Q = \pm \sqrt{\left(\frac{1,1648}{H^{0,49376}}\right)^2} \quad (5.3)$$

em que:

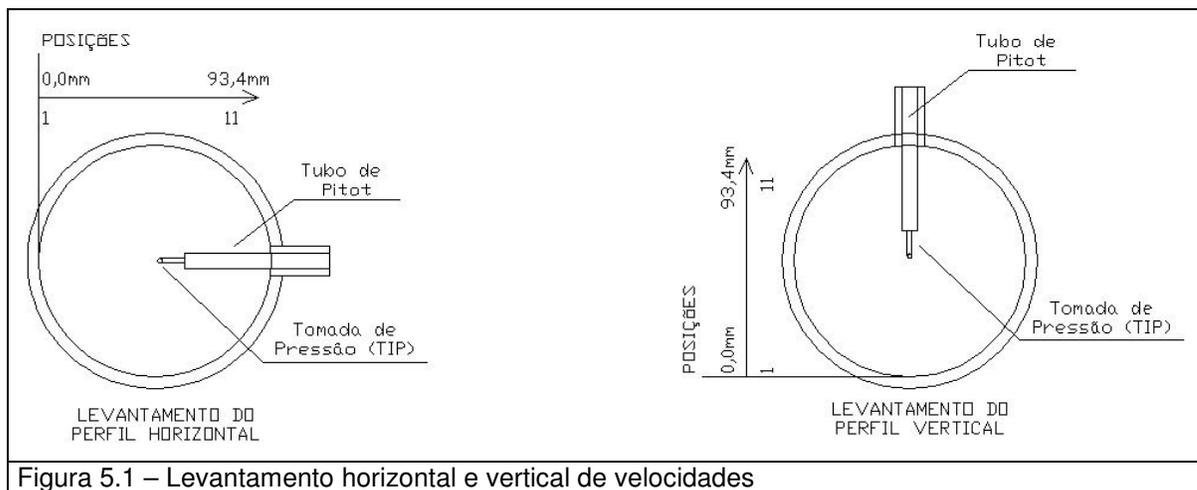
ΔQ : incerteza na vazão do venturi;

H: altura em mm medida pelo diferencial de pressão do Venturi;

Para todas as vazões foi feito o levantamento vertical e horizontal do perfil de velocidade. Os perfis são apresentados em gráficos, nos quais o eixo das abscissas representa as velocidades e o eixo das ordenadas a posição em relação à parede da tubulação. Para os perfis verticais o zero das ordenadas corresponde à parede inferior da tubulação, e para os perfis horizontais corresponde à parede à esquerda do escoamento, como pode ser visto na figura 5.1.

O levantamento do perfil de velocidade, tem por finalidade apenas de dar parâmetros de comparação entre as configurações da bancada, mostrando qual a deformação sofrida pelo perfil em função das singularidades encontradas.

O levantamento de perfil de velocidades não foi utilizado para o cálculo da vazão escoada, pois as incertezas envolvidas nesse cálculo seriam muito altas em função do pequeno diâmetro da tubulação, e da turbulência do escoamento. O ANEXO – D mostra em detalhes como foi feito o levantamento do perfil de velocidades.



Para efeito de comparação, também são apresentados perfis adimensionais, em que as velocidades indicadas no gráfico são relativas à velocidade no centro da tubulação, ou seja:

$$V_{adm} = \frac{v_i}{v_c} \quad (5.4)$$

em que:

V_{adm} = velocidade adimensional;

v_i = velocidade no ponto i ;

v_c = velocidade no centro da tubulação;

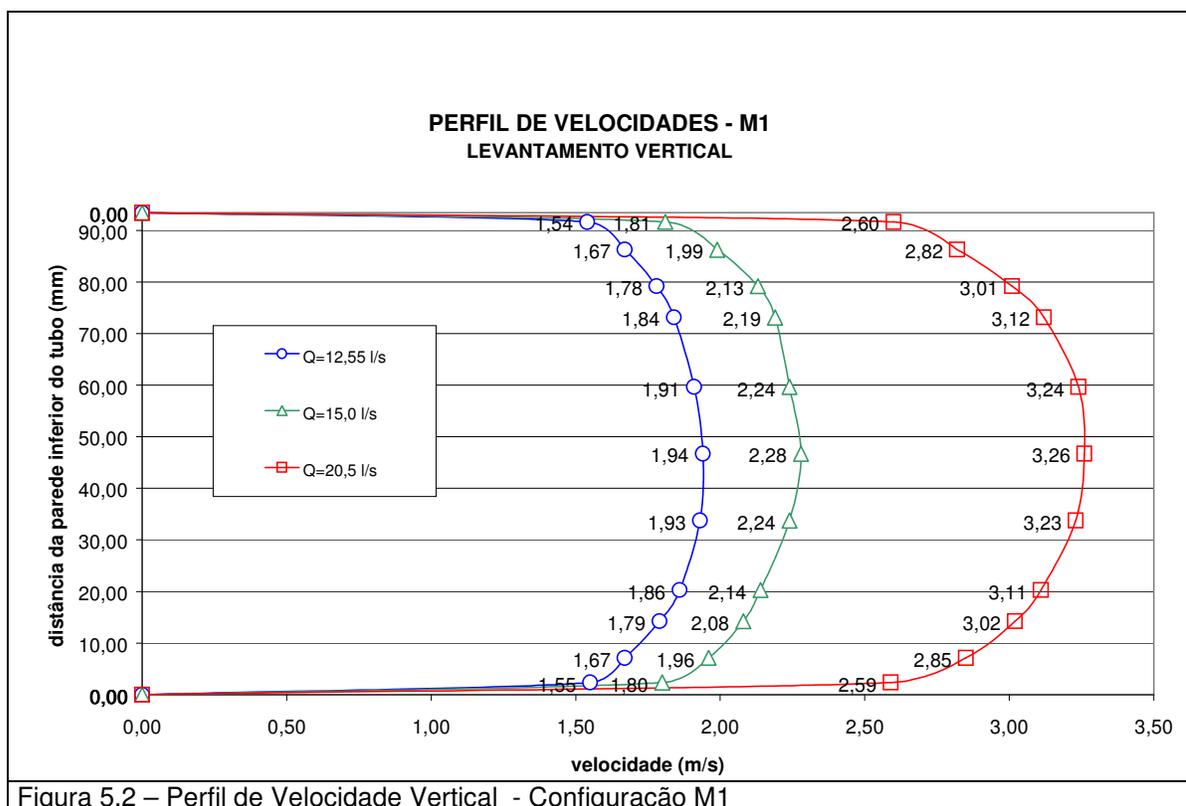
5.1.1 RESULTADOS DA PRIMEIRA CONFIGURAÇÃO (M1)

Para a primeira configuração, todos os medidores estão em condições adequadas de instalação, ou seja o Venturi obedece aos trechos retos mínimos

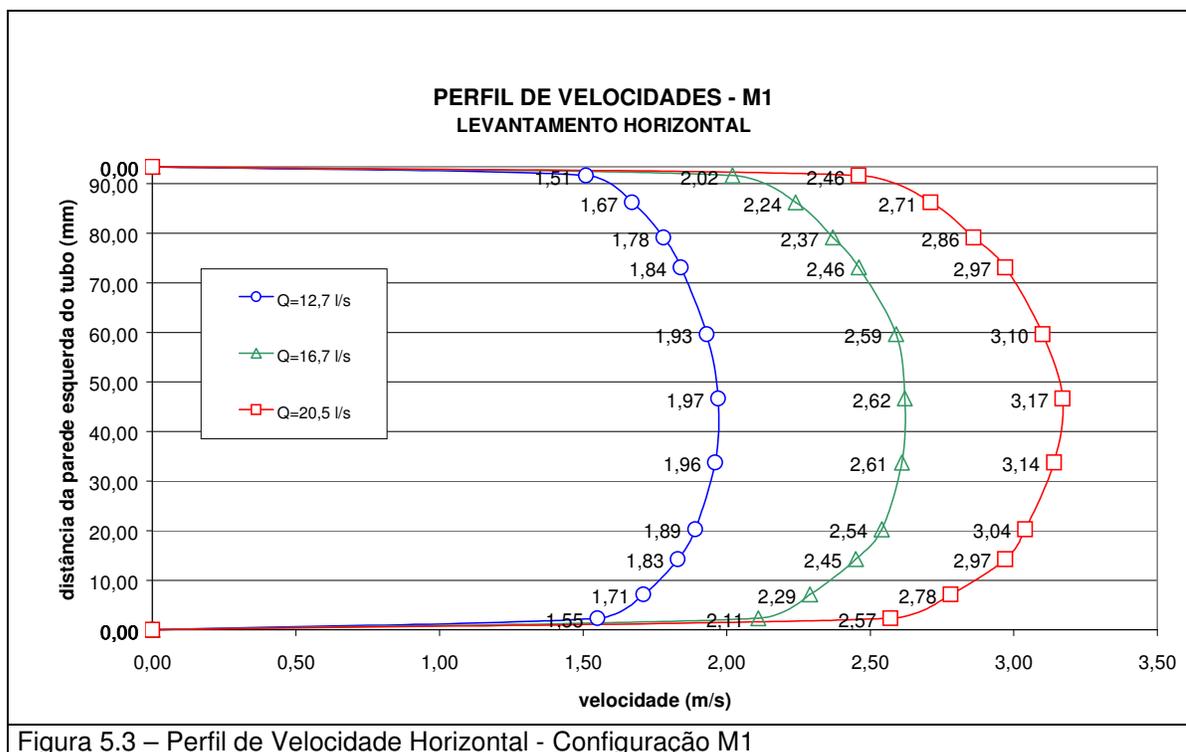
exigidos pela norma **ABNT NBR ISO 5167 (1994)**, o Eletromagnético está instalado de acordo com a norma **ISO 6817 (1980)** e o Pitot de acordo com os trechos retos exigidos na **ISO 3966 (1977)**. Os resultados obtidos são apresentados a seguir.

Os perfis verticais, figura 5.2, foram obtidos para as vazões de 12,55; 15,0 e 20,5 m³/sx10⁻³, e os perfis horizontais, figura 5.3, para as vazões de 12,7; 16,7 e 20,55 m³/sx10⁻³.

Para está configuração, como não existem singularidades próximas à montante, os perfis estão praticamente simétricos em relação ao centro da tubulação, apresentando um desvio mínimo que pode ter se originado com a turbulência do escoamento, e pela influência da inserção da haste do Pitot na tubulação.



Os perfis encontrados a partir do levantamento horizontal estão apresentados na figura 5.3, e também apresentam bastante simetria em relação ao centro da tubulação.



Para o cálculo do desvio de indicação do medidor foram ensaiadas duas vazões adicionais: 26,2 e 29,8 $\text{m}^3/\text{s} \times 10^{-3}$.

Segundo a norma **BS1042 (1973)** para utilização do tubo de Pitot com exatidão definida como Classe A, o diâmetro mínimo da tubulação é de 117,5mm. O diâmetro interno da tubulação, na seção pitométrica é de 93,40mm, sendo assim o Pitot não foi utilizado para determinação da vazão escoada, e portanto não foi utilizado para o cálculo do desvio do medidor eletromagnético sendo usado somente para o levantamento dos perfis de velocidade, para que possa ser determinada a deformação sofrida pelo perfil em função das singularidades.

A tabela 5.2 mostra os desvios de indicação do medidor Eletromagnético em relação aos dois medidores de referência.

O desvio de indicação do Eletromagnético em relação ao Tubo de Venturi de 0,613%, encontrado para a menor vazão de ensaio 12,53 $\text{m}^3/\text{s} \times 10^{-3}$, é o maior desvio

encontrado para esta configuração e se justifica por estar em uma vazão muito baixa para o Tubo de Venturi, com uma velocidade da ordem de 0,7m/s que está praticamente no limite inferior de operação do medidor, correspondendo a um pequeno diferencial de pressão de 55mm. Para as vazões maiores o desvio se reduz significativamente, chegando a praticamente zero para a vazão de $29,8 \text{ m}^3/\text{s} \times 10^{-3}$.

A calibração de fabricação do medidor Ultra-sônico, ao contrário da calibração do Tubo de Venturi, não é realizada em uma tubulação do mesmo diâmetro da utilizada nos ensaios e não leva em consideração a mesma espessura e material da tubulação bancada. Os desvios de indicação do Eletromagnético em relação ao Ultra-sônico encontrados para esta configuração, entre 2 e 4%, são considerados valores altos para uma situação sem singularidades, não podendo ser feita nenhuma afirmação a respeito do funcionamento do Eletromagnético em função disso. Em virtude disso o medidor Ultra-sônico foi utilizado nos ensaios apenas como testemunha, pois seu sinal de resposta é instantâneo, acusando flutuações nas vazões de ensaio. Isso possibilitou refazer alguns pontos, principalmente no levantamento do perfil de velocidade.

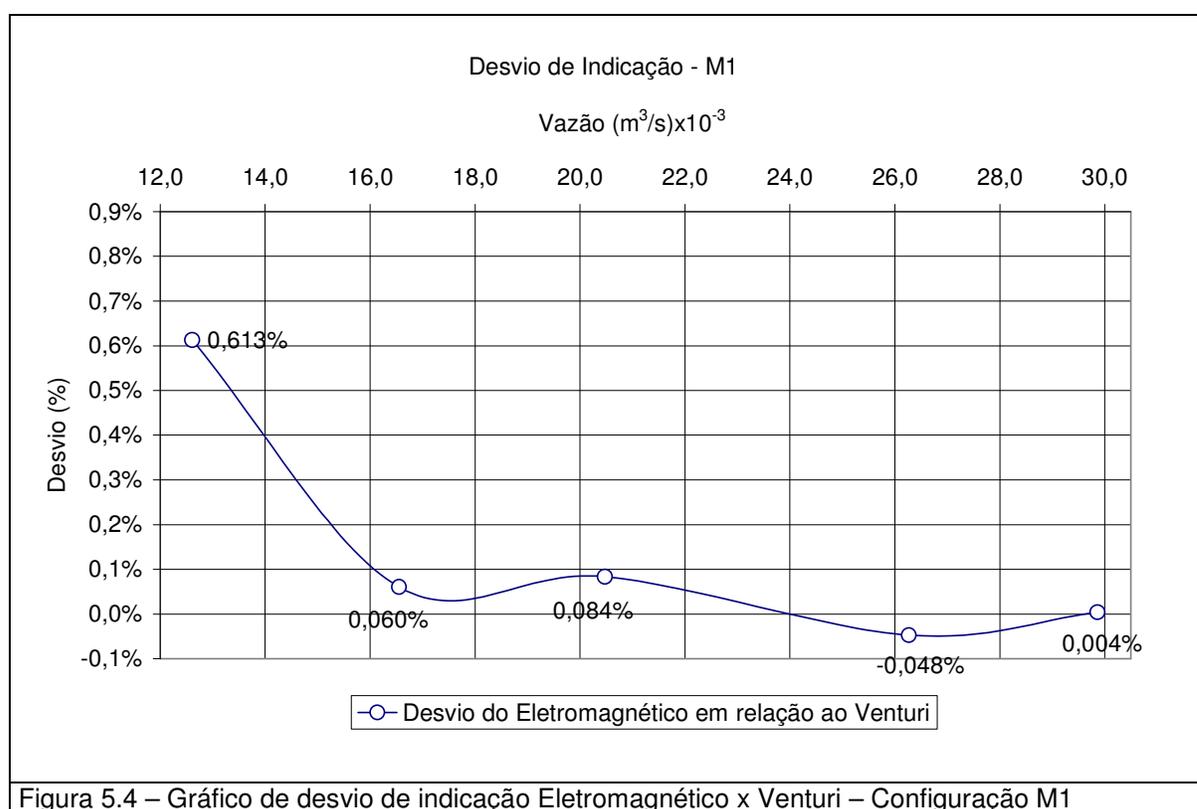
Tabela 5.2 – Desvios de indicação – Configuração M1.

Configuração	Tubo de Venturi		Eletromagnético Q (m ³ /s)x10 ⁻³	Ultra-sônico Q (m ³ /s)x10 ⁻³	Desvio	
	H (mm)	Q (m ³ /s) x10 ⁻³			Em relação ao Venturi	Em relação ao Ultra-sônico
M1	55,33	12,54	12,61	12,37	0,613%	1,934%
	95,72	16,54	16,55	15,91	0,060%	4,027%
	145,61	20,46	20,47	19,78	0,084%	3,521%
	238,86	26,28	26,27	25,77	-0,048%	1,959%
	307,35	29,86	29,86	28,77	0,004%	3,804%

A figura 5.4 mostra os desvios de indicação do medidor Eletromagnético em relação ao medidor Venturi em um gráfico. No eixo *x* estão indicadas as vazões de ensaio, e no eixo *y* os desvios encontrados de acordo com a equação (5.1). Neste

gráfico é possível observar uma tendência de redução do desvio de indicação do medidor com o aumento da vazão, é importante, porém, notar que isso reflete que para maiores as vazões de ensaio ambos medidores estão mais adequados às suas faixas de operação.

É importante analisar estes desvios de indicação em conjunto com as incertezas para as vazões obtidas com o Tubo de Venturi, e não isoladamente. A seguir é apresentada a respectiva incerteza.



A incerteza Relativa da Vazão do tubo de Venturi é apresentada na tabela 5.3 abaixo, e foi calculada conforme o ANEXO - E deste trabalho. Pode-se observar que a incerteza relativa dQ/Q é maior para vazões menores, sendo então menor a incerteza do venturi para as vazões maiores. Por esta razão é mais interessante trabalhar nas vazões próximas da vazão máxima do medidor.

Os resultados da tabela 5.3 estão apresentados no gráfico da figura 5.5. Em que no eixo **x** do gráfico estão apresentadas as vazões de ensaio, e no eixo **y** a incerteza relativa dQ/Q . O gráfico ilustra muito bem a redução da incerteza para as vazões maiores de ensaio.

Tabela 5.3 – Incerteza da Vazão do Tubo Venturi – Configuração M1.

Configuração	Tubo de Venturi						Vazão Eletromagnético
	Diferencial de Pressão	Vazão	Incerteza Relativa	Incerteza	Vazão Máxima	Vazão Mínima	
	H (mmH ₂ O)	Q (m ³ /s)x10 ⁻³	$\Delta Q/Q$	ΔQ (m ³ /s)x10 ⁻³	Q (m ³ /s)x10 ⁻³	Q (m ³ /s)x10 ⁻³	
M1	55,33	12,54	0,0128	0,1606	12,70	12,37	12,61
	95,72	16,54	0,0074	0,1225	16,67	16,42	16,55
	145,61	20,46	0,0049	0,0996	20,56	20,36	20,47
	238,86	26,28	0,0030	0,0780	26,36	26,21	26,27
	307,35	29,86	0,0023	0,0689	29,93	29,79	29,86

Thorton (2002), afirma que o medidor venturi é um medidor normalizado e amplamente documentado na literatura como um medidor bastante adequado, e que a exatidão do medidor Venturi é de $\pm 0,75\%$.

A norma **ABNT NBR ISO 5167 (1994)** define todos os detalhes dos medidores Venturi.

O medidor Venturi utilizado neste ensaio está instalado adequadamente em relação aos trechos retos mínimos declarados pelo fabricante e pela norma **ABNT NBR ISO 5167 (1994)** e por esses motivos a vazão indicada é considerada confiável.

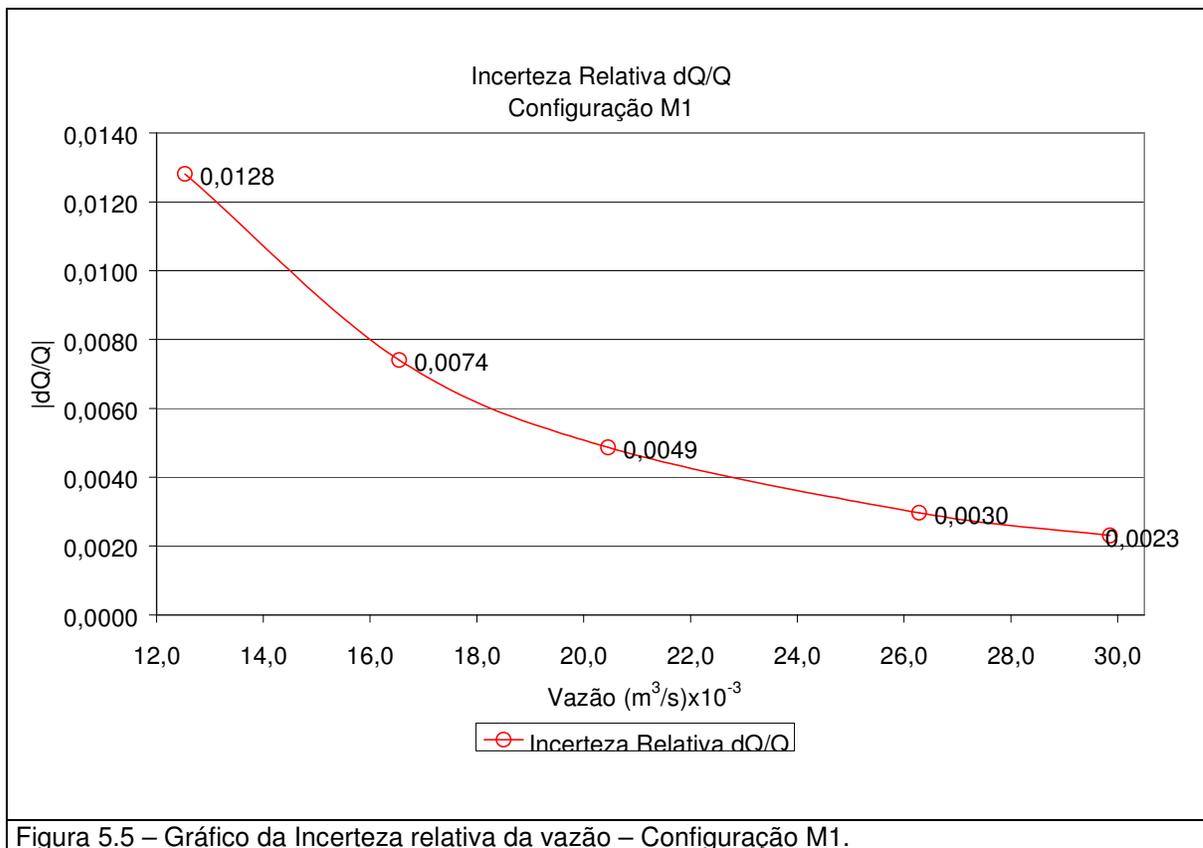
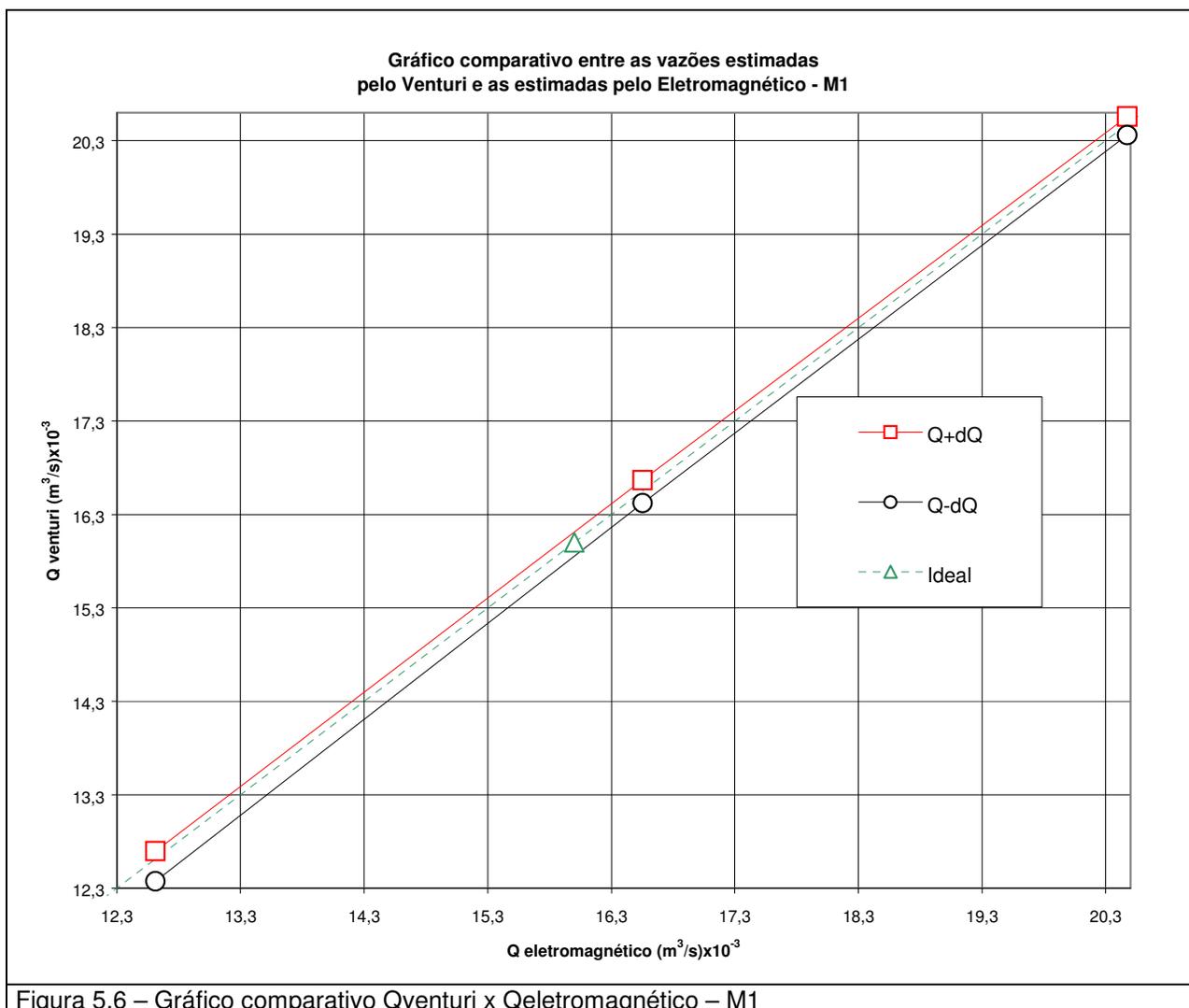


Figura 5.5 – Gráfico da Incerteza relativa da vazão – Configuração M1.

Na Figura 5.6 está apresentada a comparação entre as vazões estimadas pelo Venturi e as estimadas pelo Eletromagnético. A reta $Q+dQ$ corresponde a vazão lida somada a incerteza e a reta $Q-dQ$ a vazão subtraída a incerteza.

A relação ideal é representada pela linha tracejada, e corresponde a uma situação ideal em que a vazão do Venturi é igual a do Eletromagnético.

A partir dos resultados obtidos em laboratório, com o arranjo de instalação da configuração M1, e para as condições de ensaio. Não é possível indicar qualquer desvio do medidor Eletromagnético em relação ao Tubo de Venturi, pois os desvios encontrados são menores que as incertezas relativas encontradas. Sendo assim para as condições apresentadas na configuração M1, baseado nos resultados obtidos, não há desvio entre o Eletromagnético e o Tubo de Venturi.



A tabela 5.4 apresenta um resumo dos resultados obtidos com a configuração M1.

Tabela 5.4 – Resumo dos resultados obtidos - Configuração M1

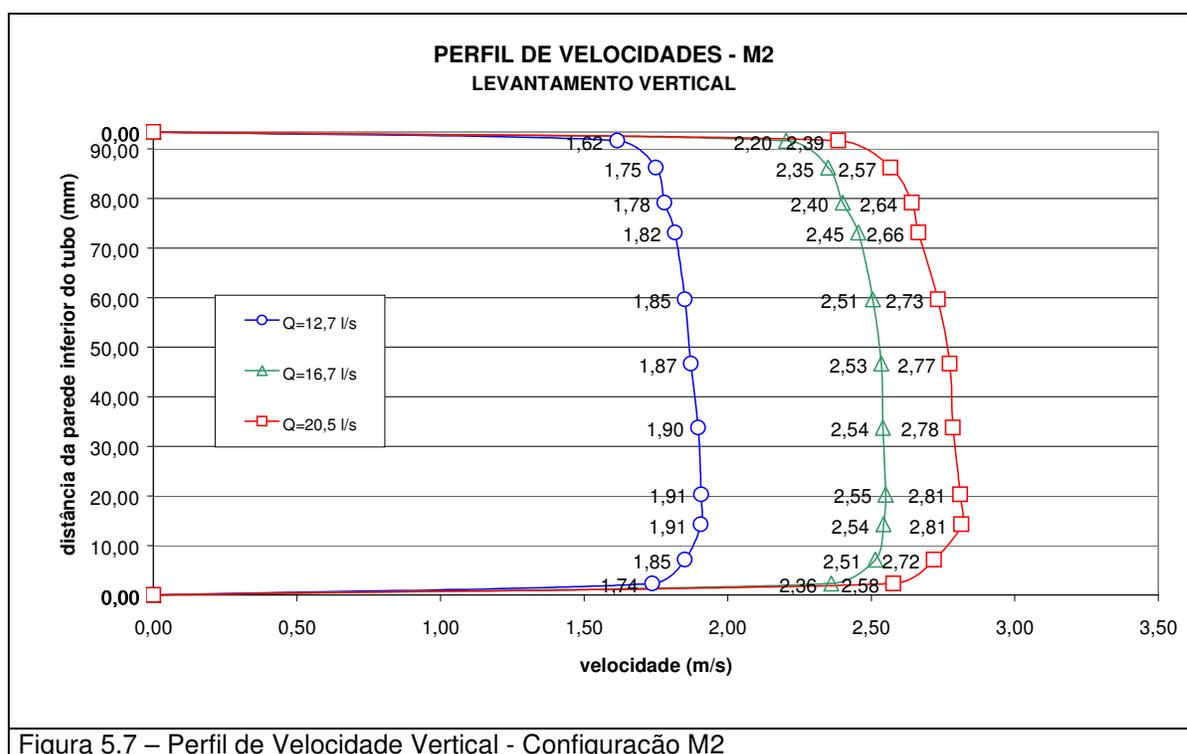
Configuração – M1	Venturi	Eletromagnético	Desvio em relação ao Venturi	Incerteza Relativa $\Delta Q/Q \times 100$
	Q (m^3/s) $\times 10^{-3}$	Q (m^3/s) $\times 10^{-3}$		
	12,54	12,61	0,613%	1,28%
	16,54	16,55	0,060%	0,74%
	20,46	20,47	0,084%	0,49%
	26,28	26,27	-0,048%	0,30%
	29,86	29,86	0,004%	0,23%

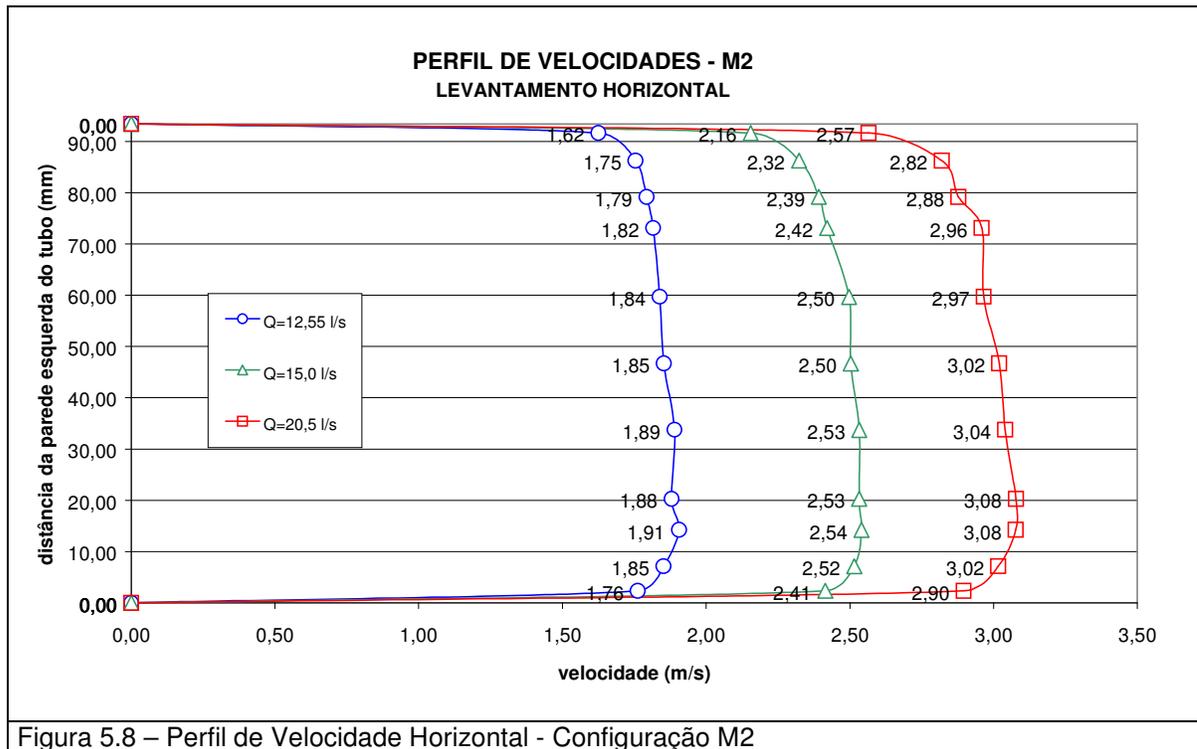
5.1.2 RESULTADOS DA SEGUNDA CONFIGURAÇÃO (M2)

Para a segunda configuração, o medidor eletromagnético está posicionado próximo a uma curva de raio curto de 90°, instalada à 2 DN montante do medidor, não respeitando o trecho reto mínimo especificado pela norma **ISO 6817 (1999)**, que exige 10 DN à montante, nem o fabricante que exige 5 DN. Os demais medidores em condições adequadas de instalação. Os resultados obtidos são apresentados a seguir.

Para esta configuração foram ensaiadas as três vazões de referência, para as quais foram levantados os perfis de velocidade vertical e horizontal, e mais duas vazões adicionais para a verificação do desvio do medidor eletromagnético.

Os perfis de velocidade encontrados a partir do levantamento vertical para cada vazão estão na figura 5.7, e do levantamento horizontal na figura 5.8.





Segundo a norma **BS1042 (1973)** para utilização do tubo de Pitot com exatidão definida como Classe A, o diâmetro mínimo da tubulação é de 117,5mm. O diâmetro interno da tubulação, na seção pitométrica é de 93,40mm.

Além disso o trecho reto à montante da seção pitométrica é de 700mm, e o mínimo estabelecido pela norma **ISO 3966 (1977)** é de 20DN, o que para a tubulação de 100mm resulta em 2000mm.

Sendo assim o Pitot não vai ser utilizado para determinação da vazão escoada, e portanto não vai ser utilizado para o cálculo do desvio do medidor eletromagnético sendo usado para o levantamento dos perfis de velocidade, para que possa ser determinada a deformação sofrida pelo perfil em função das singularidades.

Com informações obtidas em **Thorton (2002)**, e na norma **ABNT NBR ISO 5167 (1994)** que trata dos medidores Venturi, e como o medidor Venturi está instalado

adequadamente em relação aos trechos retos mínimos declarados pelo fabricante e pela norma **ABNT NBR ISO 5167 (1994)** a vazão indicada é considerada confiável.

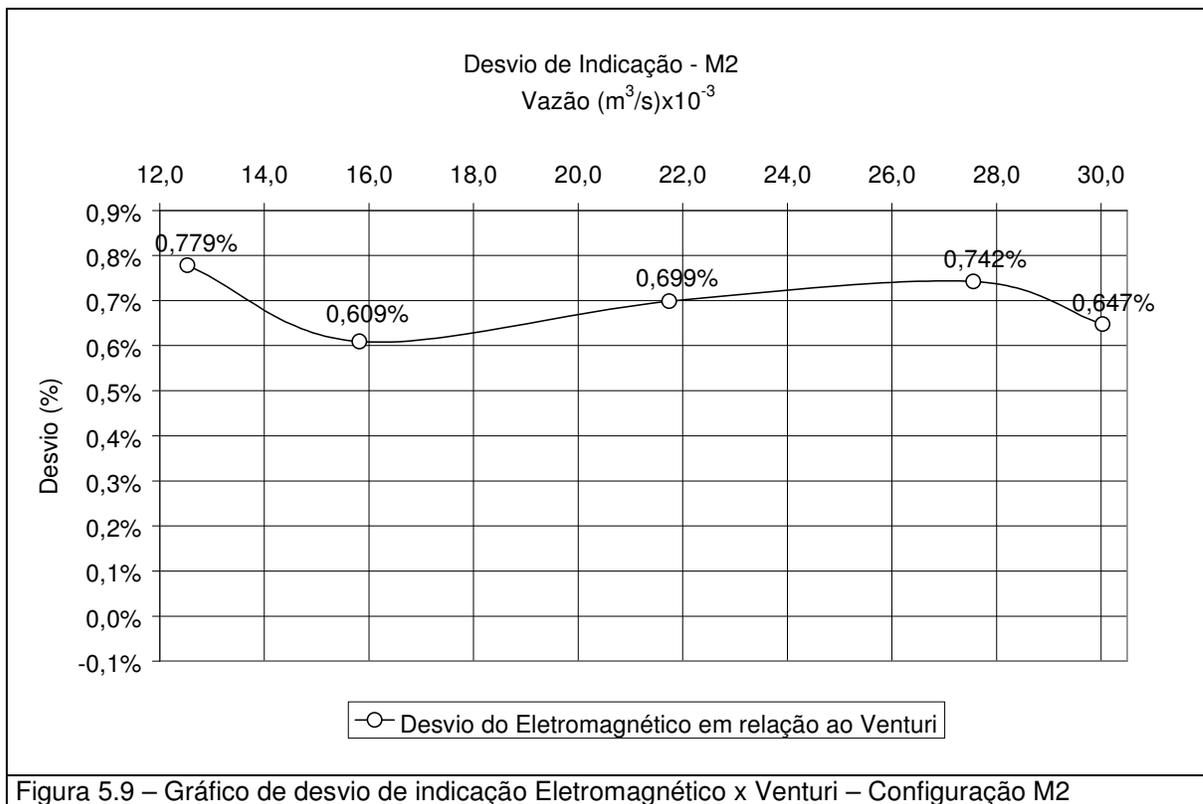
A tabela 5.5 mostra os desvios de indicação do medidor Eletromagnético em relação aos dois medidores de referência.

Tabela 5.5 – Desvios de indicação – Configuração M2.

Configuração	Tubo de Venturi		Eletromagnético Q(m ³ /s)x10 ⁻³	Ultra-sônico Q(m ³ /s)x10 ⁻³	Desvio	
	H (mm)	Q(m ³ /s) x10 ⁻³			Em relação ao Venturi	Em relação ao Ultra-sônico
M2	54,47	12,44	12,53	12,65	0,779%	-0,898%
	86,61	15,73	15,82	15,79	0,609%	0,201%
	162,00	21,60	21,74	21,59	0,699%	0,692%
	258,47	27,35	27,56	27,30	0,742%	0,943%
	306,79	29,83	30,03	29,46	0,647%	1,940%

A figura 5.9 mostra os desvios de indicação do medidor Eletromagnético em relação ao medidor Venturi, em forma de gráfico. No eixo **x** estão indicadas as vazões de ensaio, e no eixo **y** os desvios encontrados de acordo com a equação (5.1).

O medidor de Vazão eletromagnético foi projetado e calibrado em uma condição de instalação obviamente adequada, em que o perfil de velocidade está complementemente desenvolvido, que é o caso da configuração M1. Na configuração M2, a presença de um cotovelo 90° à 2 DN do medidor altera visivelmente o perfil de velocidade, sendo responsável pela alteração do funcionamento do medidor. Dependendo de como os perfis estão desenvolvidos, pode ocorrer um desvio maior ou menor. **Shercliff (1954)** demonstra que se o perfil de velocidade estiver deformado de tal forma que a velocidade esteja próxima de zero em um dos eletrodos, escoando somente próximo ao outro eletrodo, pode ser esperado um desvio da ordem de 200% na sensibilidade do medidor. Os desvios encontrados para esta configuração se justificam devido a deformação do perfil de velocidade.



Os desvios encontrados oscilam em torno de um desvio médio de 0,69%, mostrando valores bem maiores que os desvios encontrados na situação sem singularidades.

Lim e Chung (1999) apresentam um desvio de 0,5% a -2,0% para um medidor eletromagnético instalado a jusante de um cotovelo 90° para os eletrodos do medidor na horizontal. Os resultados foram obtidos a partir de uma simulação computacional e considerou casos de escoamento laminar com Número de Reynolds entre 400 e 700.

O maior desvio encontrado ocorreu na menor vazão de ensaio, sendo imprudente afirmar que essa vazão representa necessariamente a pior situação para o eletromagnético, pois existe o problema da vazão mínima de operação do Venturi.

Os desvios de indicação do Eletromagnético em relação ao Ultra-sônico encontrados para esta configuração, estão entre -1% e +2%, e como a calibração de fabricação do medidor Ultra-sônico, ao contrário da calibração do Tubo de Venturi, não

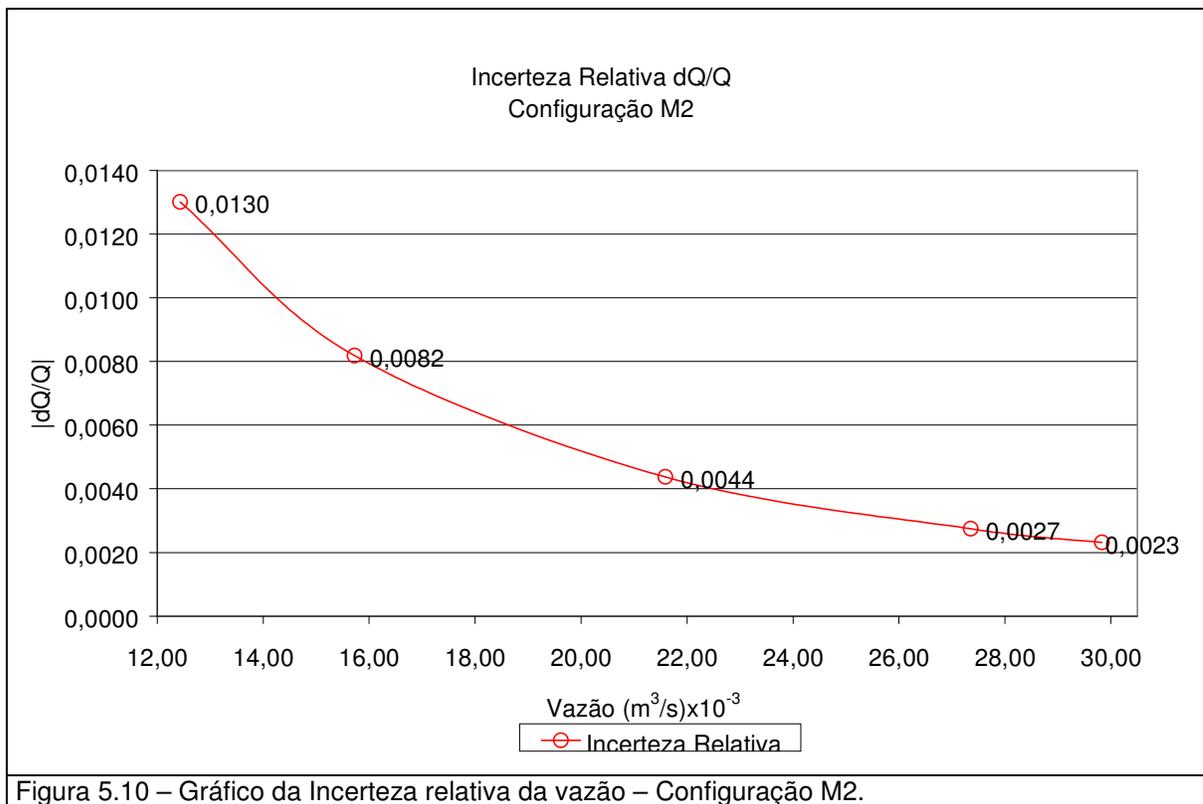
é realizada em uma tubulação do mesmo diâmetro da utilizada nos ensaios e não leva em consideração a mesma espessura e material da tubulação bancada, esses resultados não foram considerados para a avaliação do funcionamento do Eletromagnético. Utilizado o Ultra-sônico apenas como testemunha para acusar flutuações nas vazões de ensaio.

A incerteza Relativa da Vazão do tubo de Venturi é apresentada na tabela 5.6 abaixo, e foi calculada conforme o ANEXO - E deste trabalho.

Tabela 5.6 – Incerteza da Vazão do Tubo Venturi – Configuração M2.

Configuração	Tubo de Venturi						Vazão Eletromagnético
	Diferencial de Pressão	Vazão	Incerteza Relativa	Incerteza	Vazão Máxima	Vazão Mínima	
	H (mm)	Q (m ³ /s)x10 ⁻³	$\Delta Q/Q$	ΔQ (m ³ /s)x10 ⁻³	Q (m ³ /s)x10 ⁻³	Q (m ³ /s)x10 ⁻³	Q (m ³ /s)x10 ⁻³
M2	54,47	12,44	0,0130	0,1618	12,60	12,27	12,53
	86,61	15,73	0,0082	0,1287	15,86	15,60	15,82
	162,00	21,59	0,0044	0,0945	21,69	21,50	21,74
	258,47	27,35	0,0027	0,0750	27,43	27,28	27,56
	306,79	29,83	0,0023	0,0689	29,90	29,76	30,03

Os resultados da tabela 5.6 estão apresentados no gráfico da figura 5.10. Em que no eixo **x** do gráfico estão apresentadas as vazões de ensaio, e no eixo **y** a incerteza relativa dQ/Q . O comportamento da incerteza relativa, obviamente se repete, sendo que a incerteza na determinação da vazão do Venturi é menor para as vazões maiores.

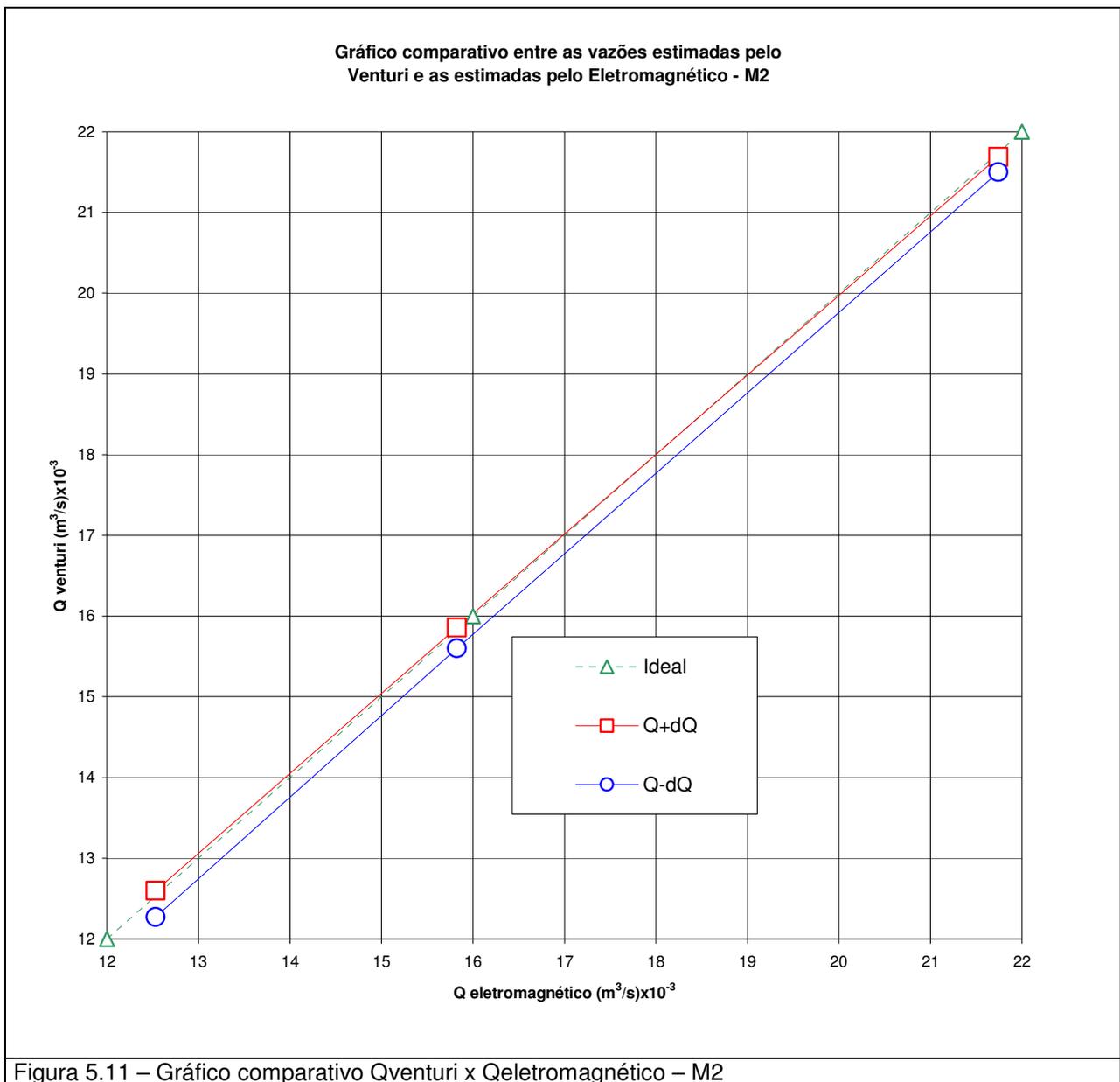


Na Figura 5.11 está apresentada a comparação entre as vazões estimadas pelo Venturi e as estimadas pelo Eletromagnético.

A parcela da incerteza na vazão do Venturi, dQ , é considerada nas duas curvas $Q+dQ$ e $Q-dQ$. Sendo a vazão lida somada à incerteza, chamada de vazão máxima, e a vazão subtraída da parcela da incerteza, vazão mínima do Venturi.

A relação ideal é apresentada pela linha tracejada, e representa uma situação ideal em que a vazão do Venturi é igual a do Eletromagnético.

Os pontos situados abaixo da linha de situação ideal representam que o medidor Eletromagnético esta indicando uma vazão superior à do Venturi.



A tabela 5.7 apresenta um resumo dos resultados obtidos com a configuração M2, apresentando as vazões do Venturi e do Eletromagnético e confrontando os desvios obtidos com a respectiva incerteza no cálculo da vazão do medidor Venturi. Nos casos em que o desvio de indicação é menor que a incerteza relativa calculada, não é possível afirmar que há desvio entre os medidores.

Tabela 5.7 – Resumo dos resultados obtidos - Configuração M2

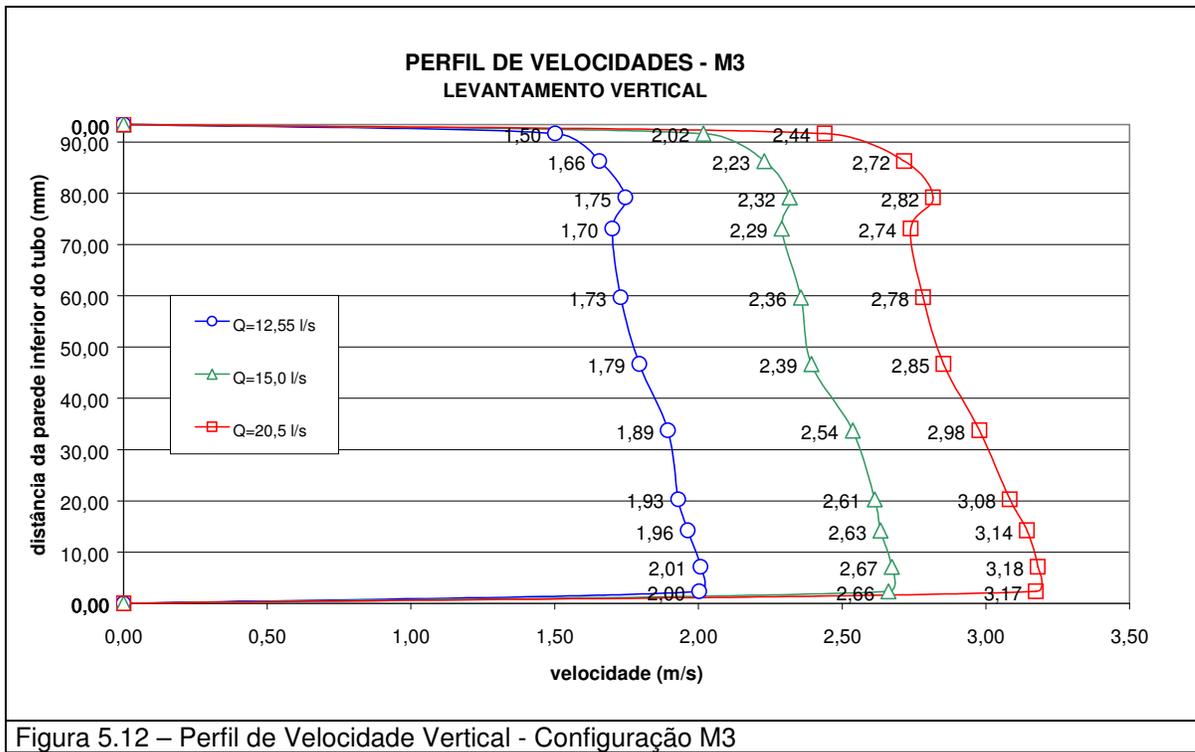
Configuração – M2	Venturi	Eletromagnético	Desvio em relação ao Venturi	Incerteza Relativa $\Delta Q/Q \times 100$
	Q (m ³ /s)x10 ⁻³	Q (m ³ /s)x10 ⁻³		
	12,44	12,53	0,779%	1,30%
	15,73	15,82	0,609%	0,82%
	21,60	21,74	0,699%	0,44%
	27,35	27,56	0,742%	0,27%
	29,83	30,03	0,647%	0,23%

A partir dos resultados obtidos em laboratório, com o arranjo de instalação da configuração M2, e para as condições de ensaio, é possível afirmar que há uma tendência do medidor Eletromagnético em indicar valores maiores de vazão que Tubo de Venturi, pois os desvios encontrados são maiores que as incertezas calculadas, considerando as vazões acima de 15,73 m³/s x 10⁻³. Sendo assim para as condições apresentadas na configuração M2, baseado nos resultados obtidos, o Eletromagnético superestima a vazão medida em relação ao Tubo de Venturi.

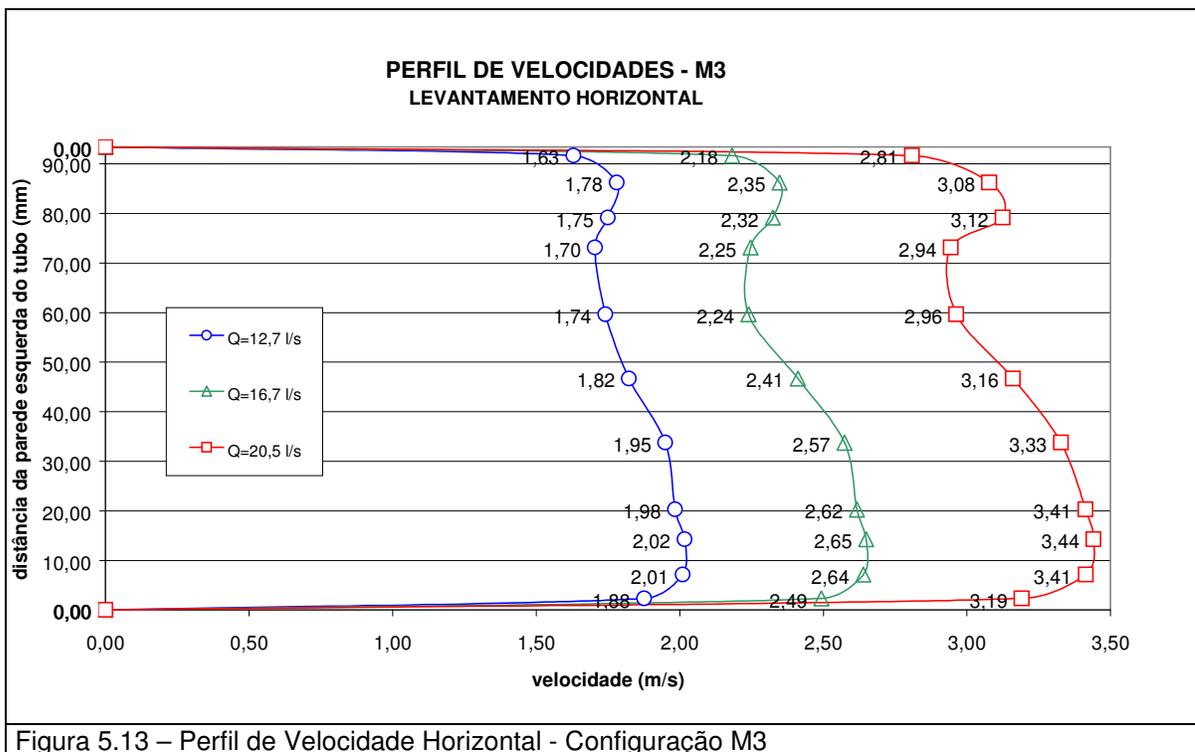
5.1.3 RESULTADOS DA TERCEIRA CONFIGURAÇÃO (M3)

Para a terceira configuração, o medidor eletromagnético está posicionado à jusante de duas curvas de raio curto de 90° dispostas em planos ortogonais entre si, e os demais medidores em condições adequadas de instalação. Ou seja para esta configuração o eletromagnético não está obedecendo a norma **ABNT NBR ISO 6187 (1999)** nem a recomendação do fabricante quanto aos trechos retos mínimos necessários. Para esta configuração foram ensaiadas as três vazões de referência, e mais duas vazões adicionais para a verificação do desvio do medidor eletromagnético.

Os perfis de velocidade encontrados a partir do levantamento vertical para cada vazão estão na figura 5.12.



Os perfis encontrados a partir do levantamento horizontal estão apresentados na figura 5.13.



Segundo a norma **BSI BS1042 (1973)** a seção de medição do Tubo de Pitot deve ser isenta de escoamento rotacional, o que é esperado que ocorra numa seção com duas curvas 90° ortogonais a montante, o que ocorre na seção para a configuração M3. Além disso o trecho reto à montante da seção pitométrica é de 700mm, e o mínimo estabelecido pela norma **ISO 3966 (1977)** é de 20DN, o que para a tubulação de 100mm resulta em 2000mm. Sendo assim o Pitot não vai ser utilizado para determinação da vazão escoada, e portanto não vai ser utilizado para o cálculo do desvio do medidor eletromagnético sendo usado para o levantamento dos perfis de velocidade, para que possa ser determinada a deformação sofrida pelo perfil em função das singularidades.

A tabela 5.8 mostra os desvios de indicação do medidor Eletromagnético em relação aos dois medidores de referência.

Tabela 5.8 – Desvios de indicação – Configuração M3.

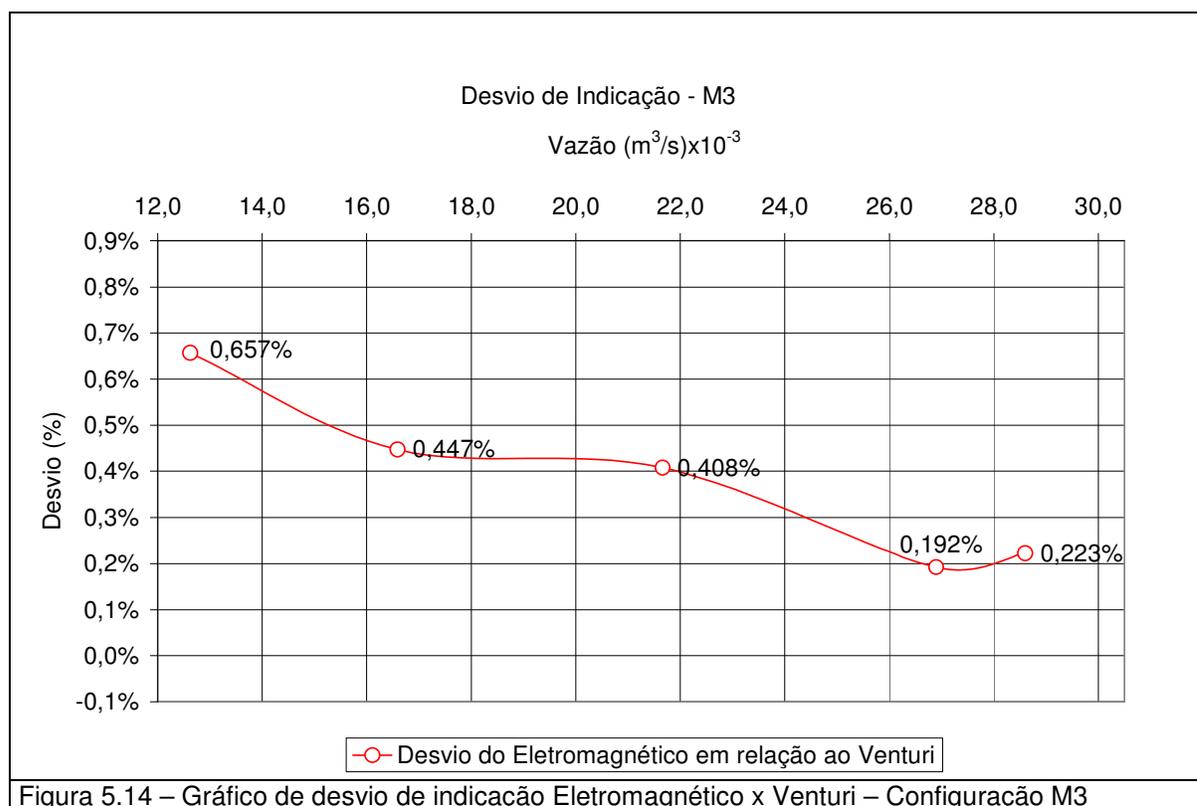
Configuração	Tubo de Venturi		Eletromagnético Q(m ³ /s)x10 ⁻³	Ultra-sônico Q(m ³ /s)x10 ⁻³	Desvio	
	H (mm)	Q(m ³ /s) x10 ⁻³			Em relação ao Venturi	Em relação ao Ultra-sônico
M3	55,35	12,54	12,62	12,22	0,657%	3,232%
	95,35	16,51	16,59	15,75	0,447%	5,302%
	161,70	21,57	21,66	20,58	0,408%	5,257%
	248,93	26,84	26,89	25,81	0,192%	4,184%
	280,98	28,53	28,60	27,43	0,223%	4,266%

Os dados do medidor Venturi foram considerados confiáveis baseado em informações de **Thorton (2002)**, e **ABNT NBR ISO 5167 (1994)** que trata dos medidores Venturi.

O medidor de vazão eletromagnético foi projetado e calibrado em uma condição em que o perfil de velocidade está completamente desenvolvido, na configuração M3, a presença de dois cotovelos 90° à 2 DN do medidor alteram significativamente o perfil de

velocidade, sendo a única variável que se alterou em relação a configuração M1, e portanto a única causa identificada para o desvio de indicação encontrado.

A figura 5.14 mostra os desvios de indicação do medidor Eletromagnético em relação ao medidor Venturi, em um gráfico. No eixo x estão indicadas as vazões de ensaio, e no eixo y os desvios encontrados de acordo com a equação (5.1).



Para o arranjo da configuração M3 o maior desvio de indicação também ocorreu para a menor vazão de ensaio. Isto reforça a idéia de que não é possível afirmar com segurança, baseado apenas nos ensaios realizados, que essa vazão corresponda a pior situação para o medidor Eletromagnético.

Os desvios de indicação do Eletromagnético em relação ao Ultra-sônico ficaram entre 3% e 5%, e não foram considerados para a avaliação do funcionamento do Eletromagnético. O sinal de vazão do Ultra-sônico serviu apenas como testemunha para acusar flutuações nas vazões de ensaio.

A incerteza Relativa da Vazão do tubo de Venturi é apresentada na tabela 5.9 abaixo, e foi calculada conforme o ANEXO - E deste trabalho.

Tabela 5.9 – Incerteza da Vazão do Tubo Venturi – Configuração M3.

Configuração	Tubo de Venturi						Vazão Eletromagnético Q (m ³ /s)x10 ⁻³
	Diferencial de Pressão	Vazão	Incerteza Relativa	Incerteza	Vazão Máxima	Vazão Mínima	
	H (mm)	Q (m ³ /s)x10 ⁻³	$\Delta Q/Q$	ΔQ (m ³ /s)x10 ⁻³	Q (m ³ /s)x10 ⁻³	Q (m ³ /s)x10 ⁻³	
M3	55,35	12,54	0,0128	0,1605	12,70	12,38	12,62
	95,35	16,51	0,0074	0,1227	16,63	16,39	16,59
	161,70	21,57	0,0044	0,0946	21,67	21,48	21,66
	248,93	26,84	0,0028	0,0764	26,91	26,76	26,89
	280,98	28,54	0,0025	0,0720	28,61	28,46	28,60

Os resultados da tabela 5.9 estão apresentados no gráfico da figura 5.15. Em que no eixo **x** do gráfico estão apresentadas as vazões de ensaio, e no eixo **y** a incerteza relativa dQ/Q . O comportamento da incerteza relativa se repete, sendo que a incerteza na determinação da vazão do Venturi é menor para as vazões maiores.

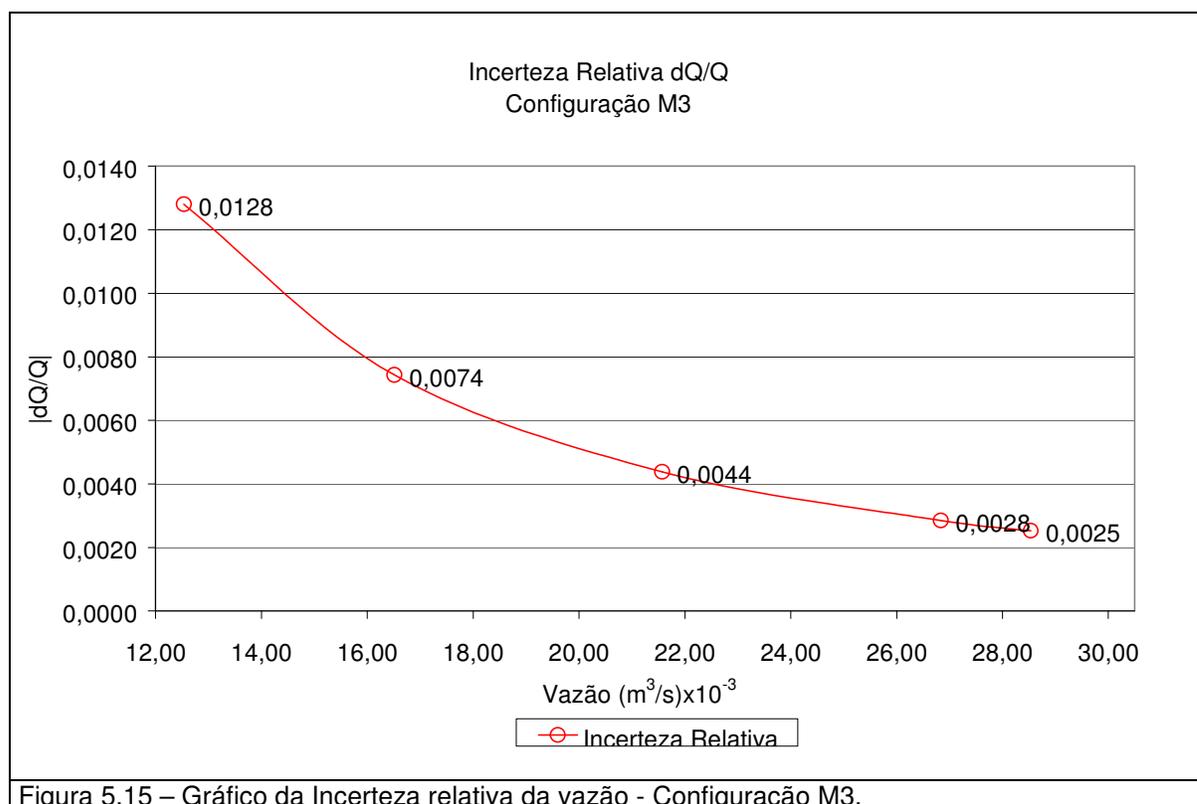


Figura 5.15 – Gráfico da Incerteza relativa da vazão - Configuração M3.

Na Figura 5.16 está apresentada a comparação entre as vazões estimadas pelo Venturi e as estimadas pelo Eletromagnético.

A incerteza na vazão do Venturi, dQ , é considerada nas duas curvas $Q+dQ$ e $Q-dQ$. Sendo a vazão lida somada à incerteza, chamada de vazão máxima, e a vazão subtraída da parcela da incerteza, vazão mínima do Venturi.

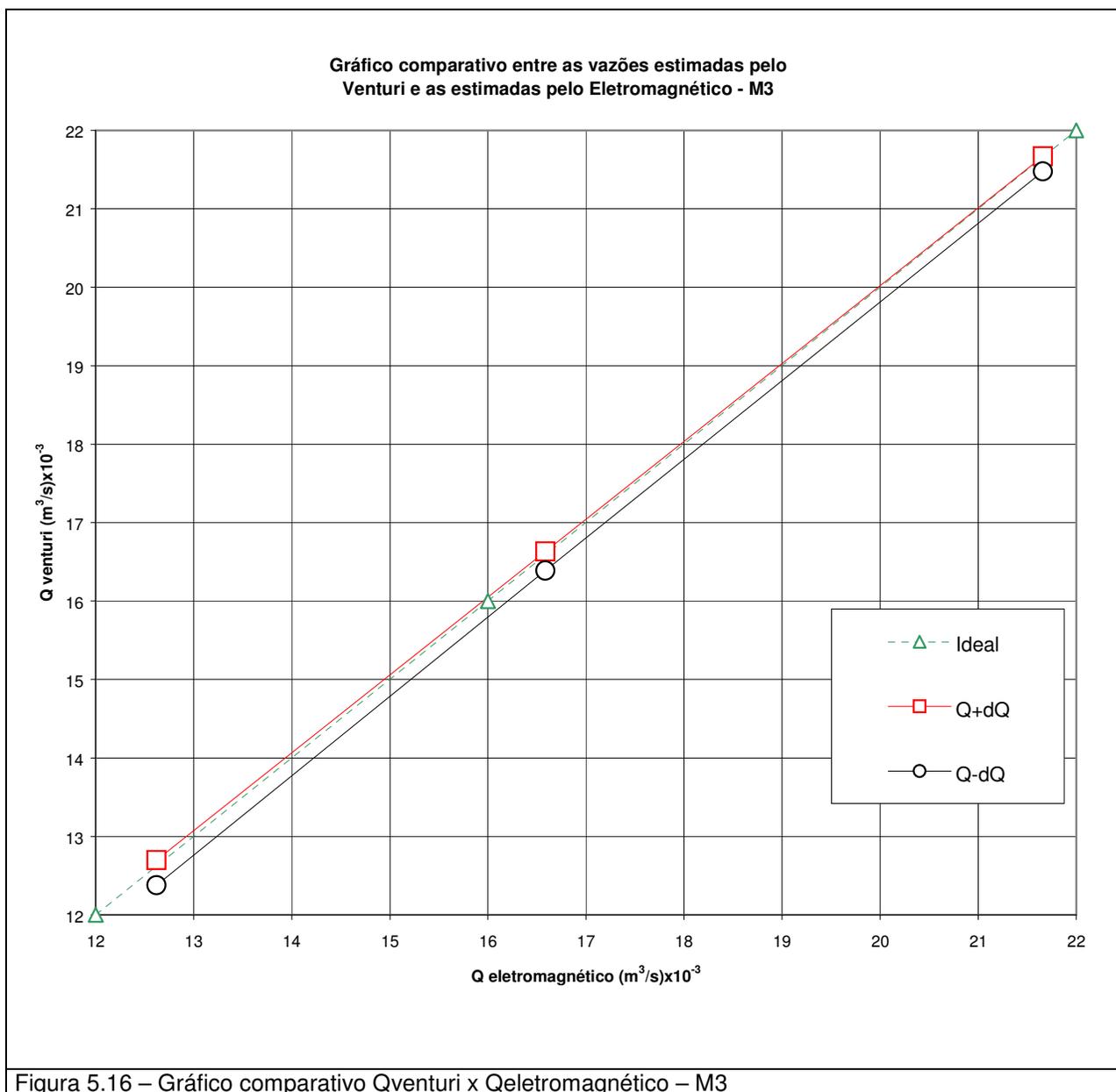
A relação ideal é apresentada pela linha tracejada, e representa uma situação ideal em que a vazão do Venturi é igual a do Eletromagnético.

Os pontos abaixo da reta $y=x$ representam que o Eletromagnético indica vazões maiores do que o Venturi.

A tabela 5.10 apresenta um resumo dos resultados obtidos com a configuração M3, apresentando as vazões do Venturi e do Eletromagnético e confrontando os desvios obtidos com a respectiva incerteza relativa no cálculo da vazão do medidor Venturi. Em todos os casos o desvio de indicação é menor que a incerteza calculada, não sendo possível afirmar que ocorra desvio entre os medidores.

Tabela 5.10 – Resumo dos resultados obtidos - Configuração M3

Configuração – M3	Venturi	Eletromagnético	Desvio em relação ao Venturi	Incerteza Relativa $\Delta Q/Q \times 100$
	Q (m^3/s) $\times 10^{-3}$	Q (m^3/s) $\times 10^{-3}$		
	12,54	12,62	0,657%	1,28%
	16,51	16,59	0,447%	0,74%
	21,57	21,66	0,408%	0,44%
	26,84	26,89	0,192%	0,28%
	28,53	28,60	0,223%	0,25%



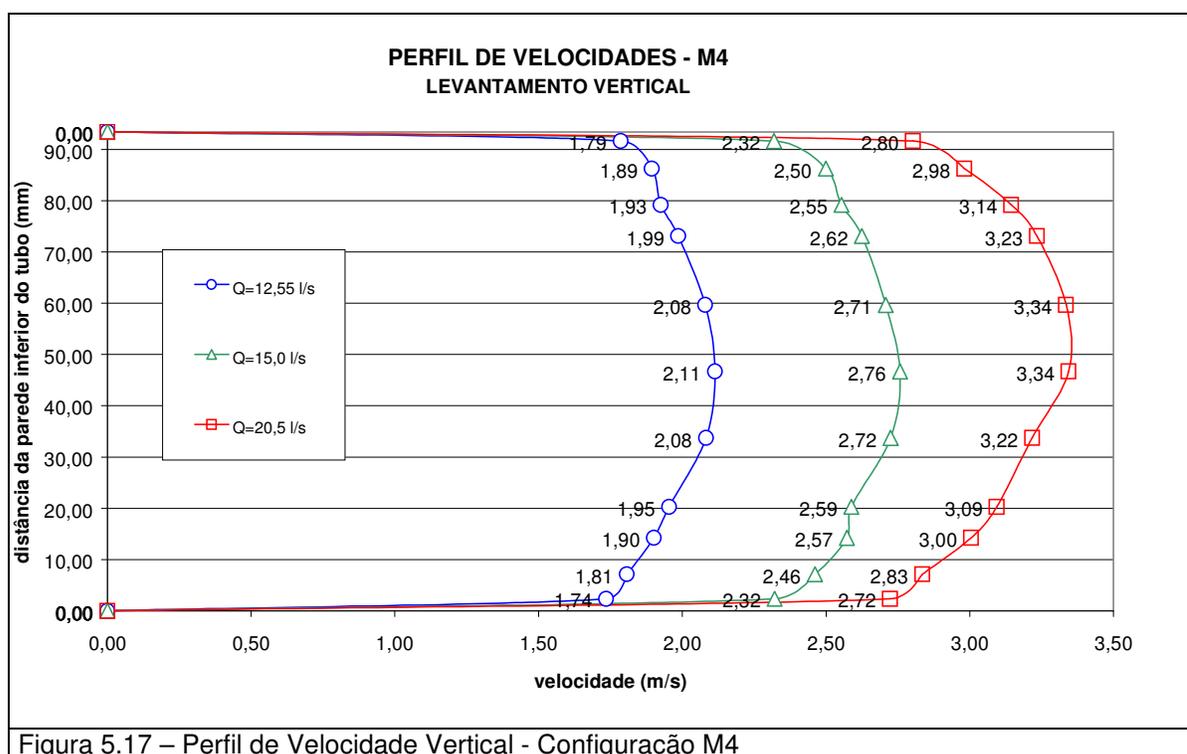
A partir dos resultados obtidos em laboratório, com o arranjo de instalação da configuração M3, e para as condições de ensaio, é possível notar que há uma leve tendência do medidor Eletromagnético em indicar valores maiores de vazão que Tubo de Venturi, porém assim como na configuração M1 os desvios encontrados são menores que as incertezas relativas calculadas. Sendo assim para as condições apresentadas na configuração M3, baseado somente nos resultados obtidos, não é possível afirmar nenhuma tendência do Eletromagnético em relação ao Tubo de Venturi.

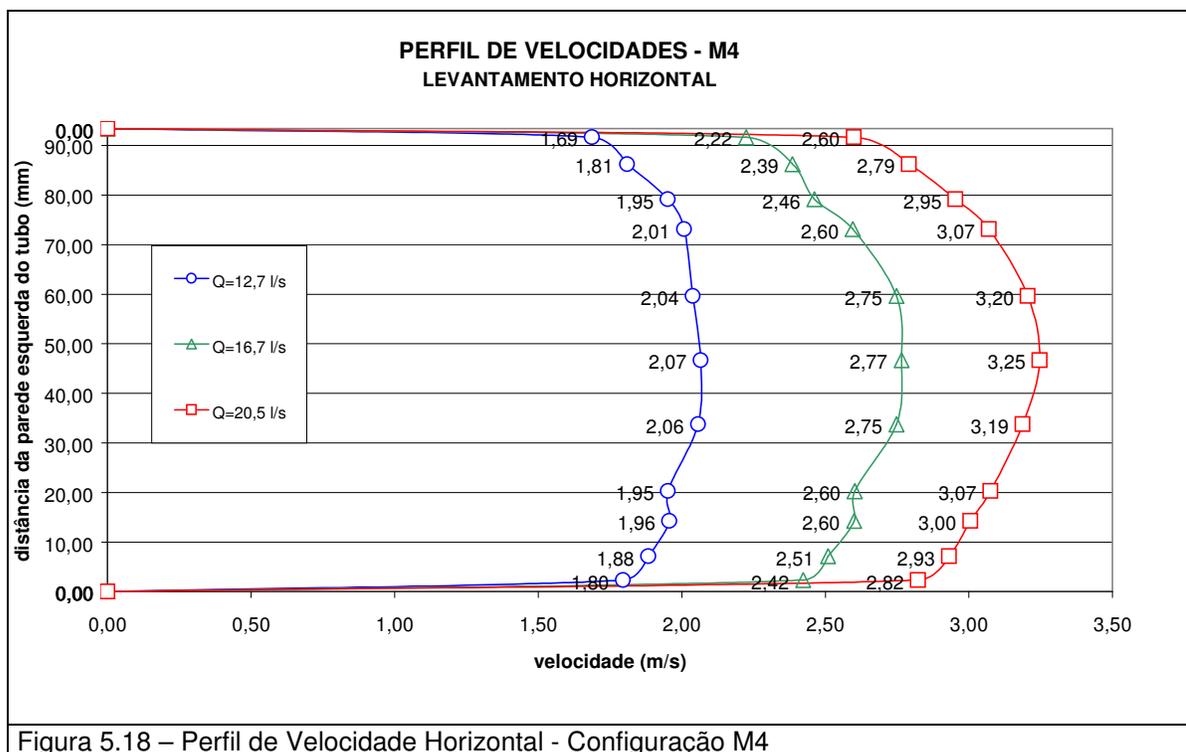
5.1.4 RESULTADOS DA QUARTA CONFIGURAÇÃO (M4)

Para a quarta configuração, o medidor eletromagnético está posicionado a jusante de uma válvula de gaveta, que teve a abertura fixada em 50% do curso e posteriormente em 100%. Os demais medidores estão em condições adequadas de instalação, e os resultados obtidos são apresentados a seguir.

Para esta configuração foram ensaiadas as três vazões de referência, para as quais foram levantados os perfis de velocidade vertical e horizontal, e mais três vazões adicionais para a verificação do desvio do medidor eletromagnético, com a válvula totalmente aberta.

Os perfis de velocidade encontrados a partir do levantamento vertical com 50% de abertura do curso da válvula, estão na figura 5.16, e os perfis encontrados no levantamento horizontal estão apresentados na figura 5.17.





Conforme **BSI BS1042 (1973)** a seção de medição do Tubo de Pitot deve ter escoamento turbulento completamente desenvolvido, o que não era esperado e não foi encontrado na seção para a configuração M4, que tem uma válvula à montante.

A norma **ISO 3966 (1977)** também afirma que à montante da seção pitométrica o trecho reto mínimo estabelecido é de 20DN, o que para a tubulação de 100mm resulta em 2000mm, sendo o trecho disponível de apenas 700mm. Por este motivo o Pitot não vai ser utilizado para determinação da vazão escoada, e conseqüentemente não vai ser utilizado para o cálculo do desvio do medidor eletromagnético sendo usado somente para o levantamento dos perfis de velocidade, para que possa ser determinada a deformação sofrida pelo perfil em função das singularidades.

A tabela 5.11 mostra os desvios de indicação do medidor Eletromagnético em relação aos dois medidores de referência, para a abertura da válvula de 50% e 100%.

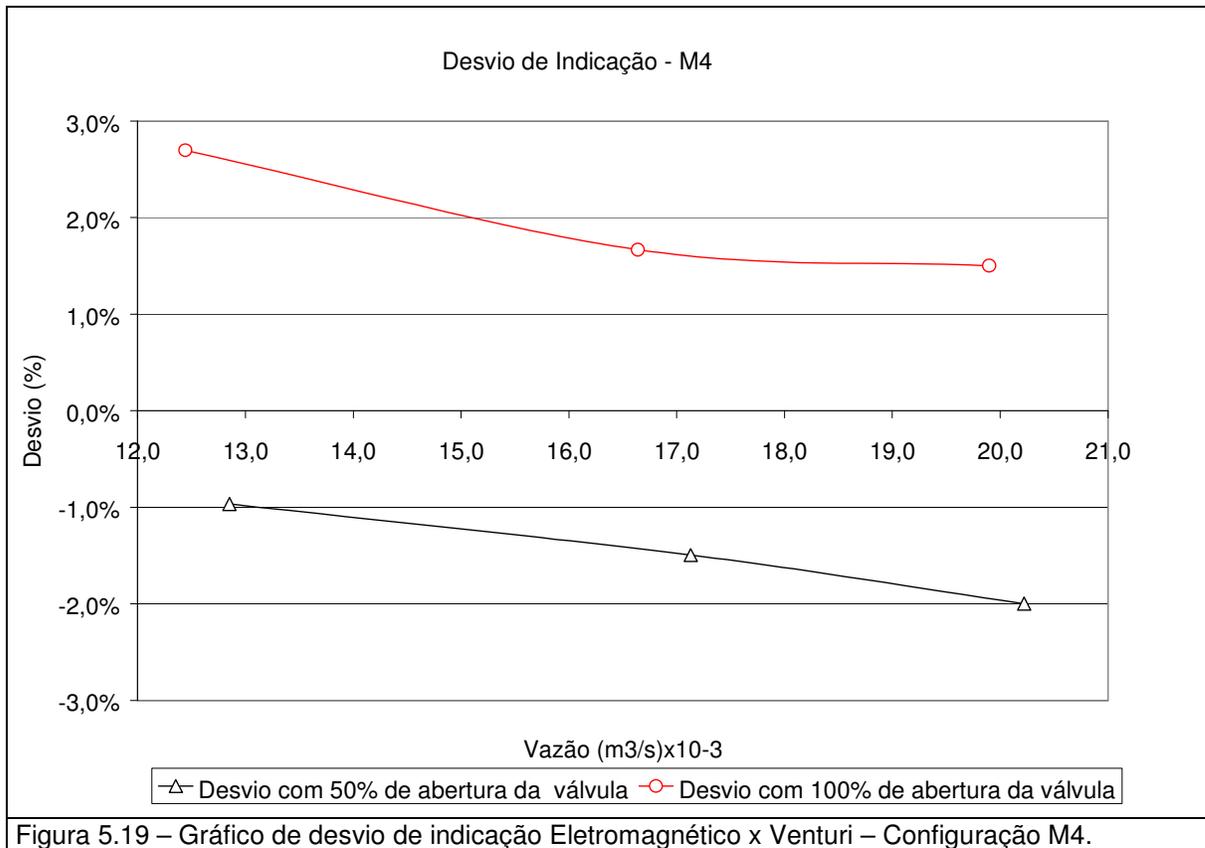
Tabela 5.11 – Desvios de indicação – Configuração M4.

Configuração	Tubo de Venturi		Eletromagnético Q(l/s)	Ultra-sônico Q(l/s)	Desvio	
	M4 H (mm)	Q (l/s)			Em relação ao Venturi	Em relação ao Ultra-sônico
Abertura 50%	58,17	12,86	12,73	12,90	-1,012%	-1,323%
	102,62	17,14	16,87	17,13	-1,541%	-1,477%
	142,45	20,23	19,82	20,12	-2,046%	-1,495%
Abertura 100%	54,57	12,45	12,78	12,61	2,647%	1,287%
	96,91	16,65	16,92	16,71	1,618%	1,252%
	137,97	19,91	20,20	19,87	1,453%	1,649%

A figura 5.18 mostra os desvios de indicação do medidor Eletromagnético em relação ao medidor Venturi, em forma de gráfico. Estão apresentadas duas curvas, uma para a válvula com 50% do curso aberto e outra para 100% de abertura. No eixo x estão indicadas as vazões de ensaio, e no eixo y os desvios encontrados de acordo com a equação (5.1).

Tanto para o Venturi como para o Ultra-sônico é possível observar que o eletromagnético apresenta um mesmo padrão de desvio, marcando para mais quando a válvula estava aberta e para menos quando a válvula estava parcialmente fechada. Para uma afirmação mais segura dessa tendência é preciso considerar a incerteza no cálculo da vazão do Venturi, o que será feito a seguir.

Mesmo tendo o Ultra-sônico apresentado o mesmo padrão de desvios do Eletromagnético que o Venturi, os desvios de indicação do Eletromagnético em relação ao Ultra-sônico, que ficaram entre -1,3% e +1,6%, não foram considerados para a avaliação do funcionamento do Eletromagnético. O sinal de vazão do Ultra-sônico serviu apenas como testemunha para acusar flutuações nas vazões de ensaio.



A incerteza Relativa da Vazão do tubo de Venturi é apresentada na tabela 5.12 abaixo, e foi calculada conforme o ANEXO - E deste trabalho.

Tabela 5.12 – Incerteza da Vazão do Tubo Venturi – Configuração M4.

Abertura da Válvula	Tubo de Venturi						Vazão Eletromagnético Q (m³/s)x10 ⁻³
	Diferencial de Pressão	Vazão	Incerteza Relativa	Incerteza	Vazão Máxima	Vazão Mínima	
	H (mm)	Q (m³/s)x10 ⁻³	$\Delta Q/Q$	ΔQ (m³/s)x10 ⁻³	Q (m³/s)x10 ⁻³	Q (m³/s)x10 ⁻³	
50%	58,17	12,86	0,0122	0,1566	13,01	12,70	12,73
	102,62	17,14	0,0069	0,1184	17,26	17,02	16,87
	142,45	20,23	0,0050	0,1007	20,33	20,13	19,82
100%	54,57	12,45	0,0130	0,1617	12,61	12,29	12,78
	96,91	16,65	0,0073	0,1217	16,77	16,53	16,92
	137,97	19,91	0,0051	0,1023	20,01	19,81	20,20

Os resultados da tabela 5.12 estão apresentados no gráfico da figura 5.19. Em que no eixo x do gráfico estão apresentadas as vazões de ensaio, e no eixo y a incerteza relativa dQ/Q . Neste gráfico também estão apresentadas duas curvas, sendo uma para o ensaio com a válvula 50% aberta e outra para a válvula com 100% de abertura.

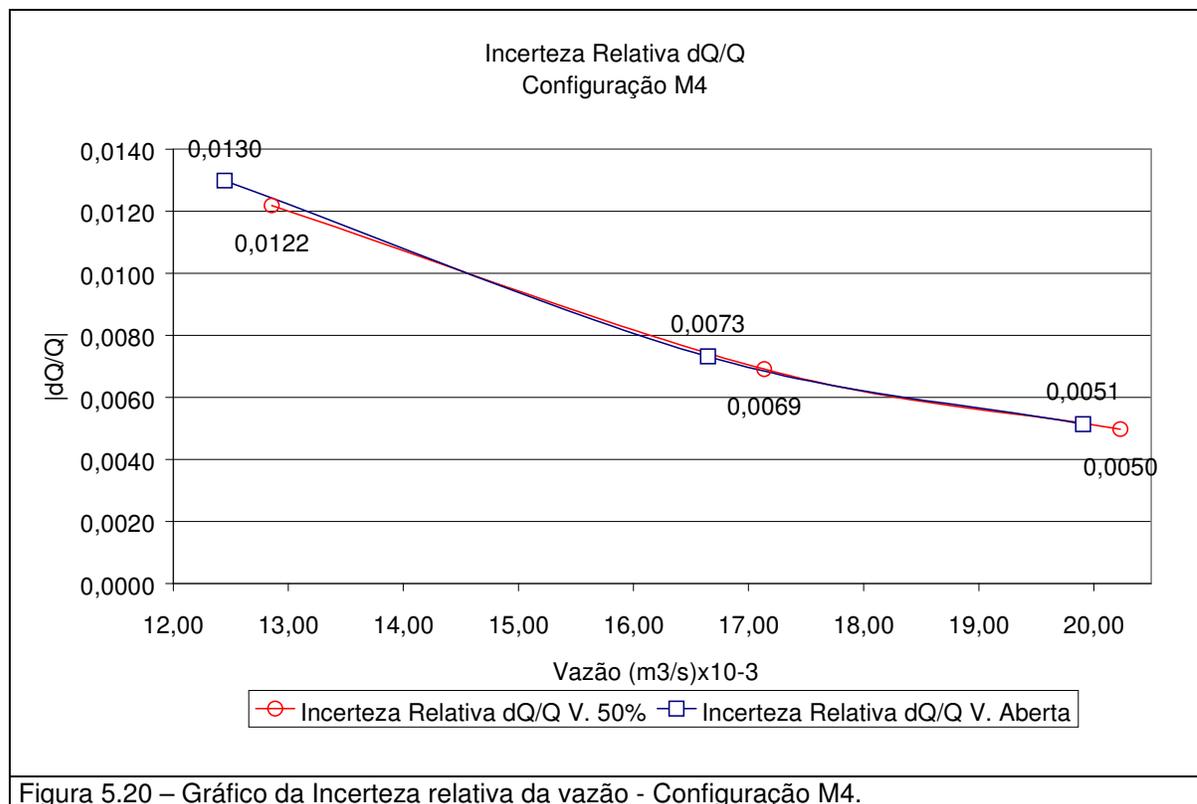


Figura 5.20 – Gráfico da Incerteza relativa da vazão - Configuração M4.

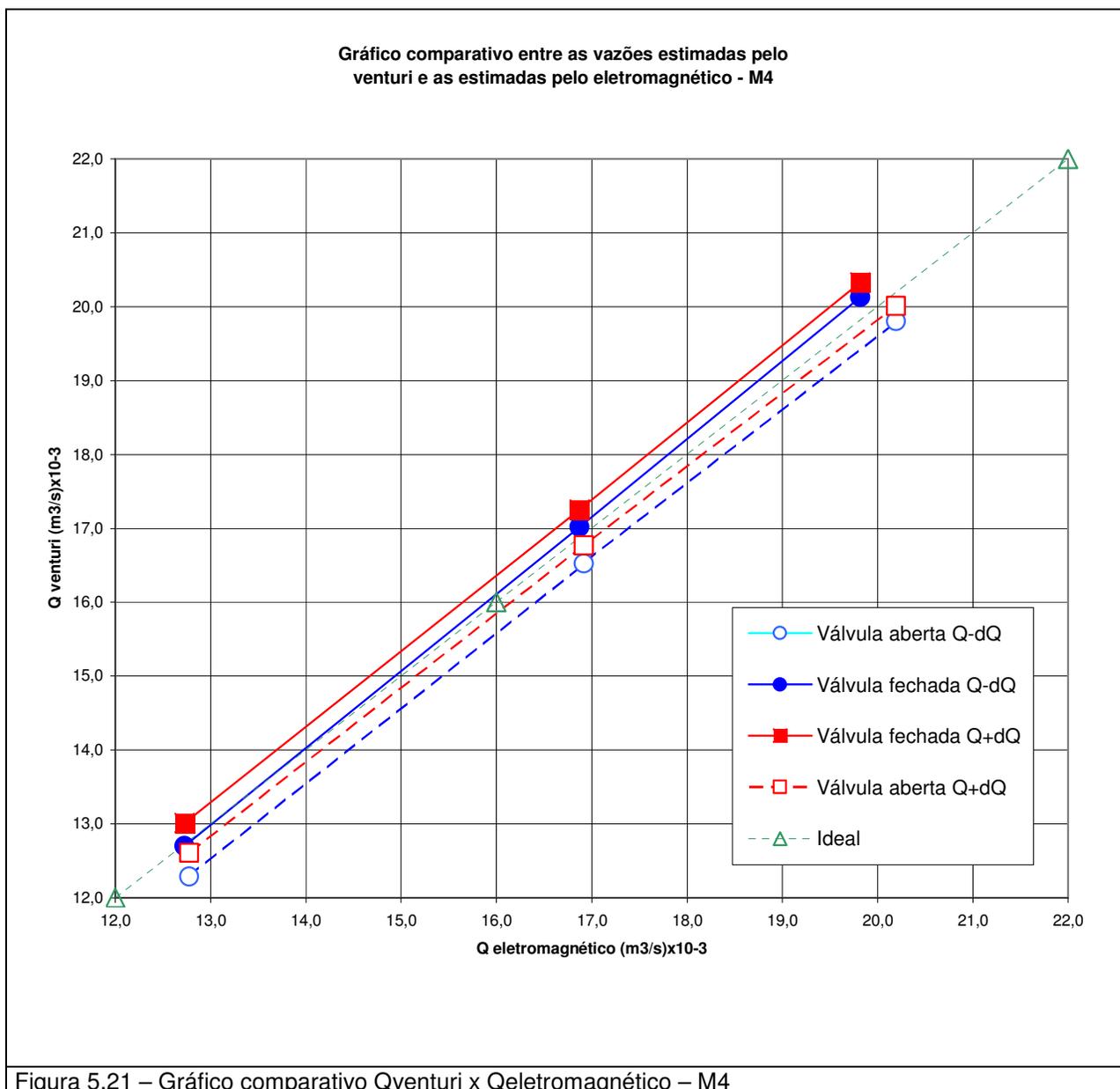
Tanto para a situação com a válvula aberta como para a válvula fechada, como era de se esperar não há alteração no comportamento do tubo de Venturi, mantendo a relação de que quanto maior a vazão menor a incerteza.

Na Figura 5.20 está apresentada a comparação entre as vazões estimadas pelo Venturi e as estimadas pelo Eletromagnético.

A parcela da incerteza na vazão do Venturi, dQ , é considerada nas duas curvas $Q+dQ$ e $Q-dQ$. Sendo a vazão lida somada à incerteza, chamada de vazão máxima, e a vazão subtraída da parcela da incerteza, vazão mínima do Venturi.

A relação ideal é apresentada pela linha tracejada, e representa uma situação ideal em que a vazão do Venturi é igual a do Eletromagnético.

Os pontos abaixo da reta $y=x$ que se refere a situação ideal entre os medidores, representam que o Eletromagnético indica vazões maiores do que o Venturi. E os pontos acima da reta que o Eletromagnético indica vazões menores do que o Venturi.



A tabela 5.13 apresenta um resumo dos resultados obtidos com a configuração M4, apresentando as vazões do Venturi e do Eletromagnético e confrontando os desvios obtidos com a respectiva incerteza no cálculo da vazão do medidor Venturi. Nos casos em que o desvio de indicação é menor que a incerteza calculada, não é possível afirmar que há desvio entre os medidores.

Tabela 5.13 – Resumo dos resultados obtidos - Configuração M4

Configuração – M4	Abertura da Válvula	Venturi	Eletromagnético	Desvio em relação ao Venturi	Incerteza Relativa $\Delta Q/Q \times 100$
		Q (m ³ /s)x10 ⁻³	Q (m ³ /s)x10 ⁻³		
	50%	12,86	12,73	-1,012%	1,22
		17,14	16,87	-1,541%	0,69
		20,23	19,82	-2,046%	0,50
	100%	12,45	12,78	2,647%	1,30
		16,65	16,92	1,618%	0,73
		19,91	20,20	1,453%	0,51

A partir dos resultados obtidos em laboratório, com o arranjo de instalação da configuração M4, e para as condições de ensaio, é possível afirmar que há uma tendência do medidor Eletromagnético em indicar valores 1,5% menores de vazão que Tubo de Venturi quando a válvula esta com abertura de 50% do curso, pois os desvios encontrados são maiores que as incertezas calculadas, exceto para a vazão de 12,857m³/s x 10⁻³. Sendo assim para as condições apresentadas na configuração M4, baseado nos resultados obtidos, o Eletromagnético subestima a vazão medida em relação ao Tubo de Venturi.

Quando a válvula está com 100% é possível afirmar que há uma tendência do medidor Eletromagnético em indicar valores 1,9% maiores de vazão que Tubo de Venturi, pois os desvios encontrados são maiores que as incertezas relativas calculadas. Sendo assim para as condições apresentadas na configuração M4, e para a válvula totalmente aberta, o Eletromagnético superestima a vazão medida em relação ao Tubo de Venturi.

5.2 PERFIS DE VELOCIDADE ADIMENSIONAIS

A seguir são apresentados os perfis de velocidade adimensionais. O objetivo de apresentar os perfis adimensionais e de possibilitar a comparação entre as vazões ensaiadas, que muitas vezes não são exatamente iguais de um ensaio para outro.

A adimensionalização dos perfis, obtida a partir da equação (5.4) permite também a comparação entre os perfis de vazões diferentes, e de arranjos diferentes.

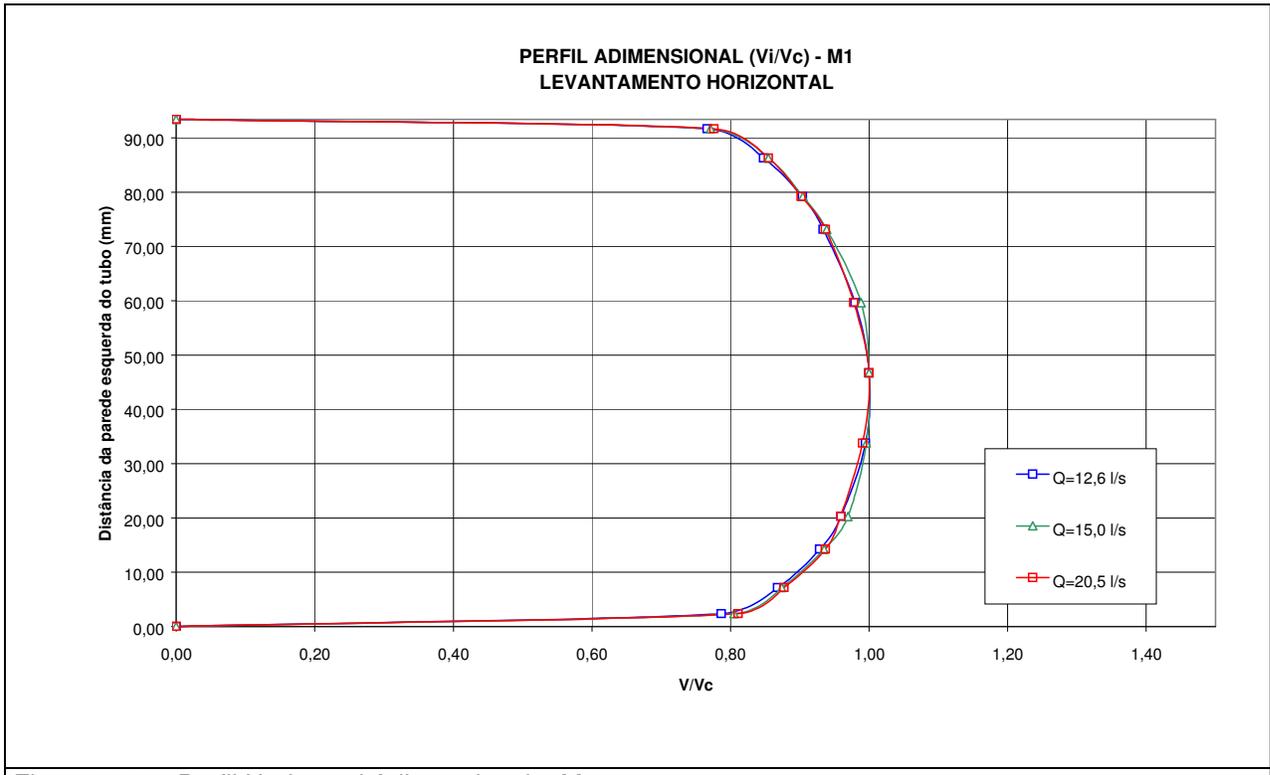
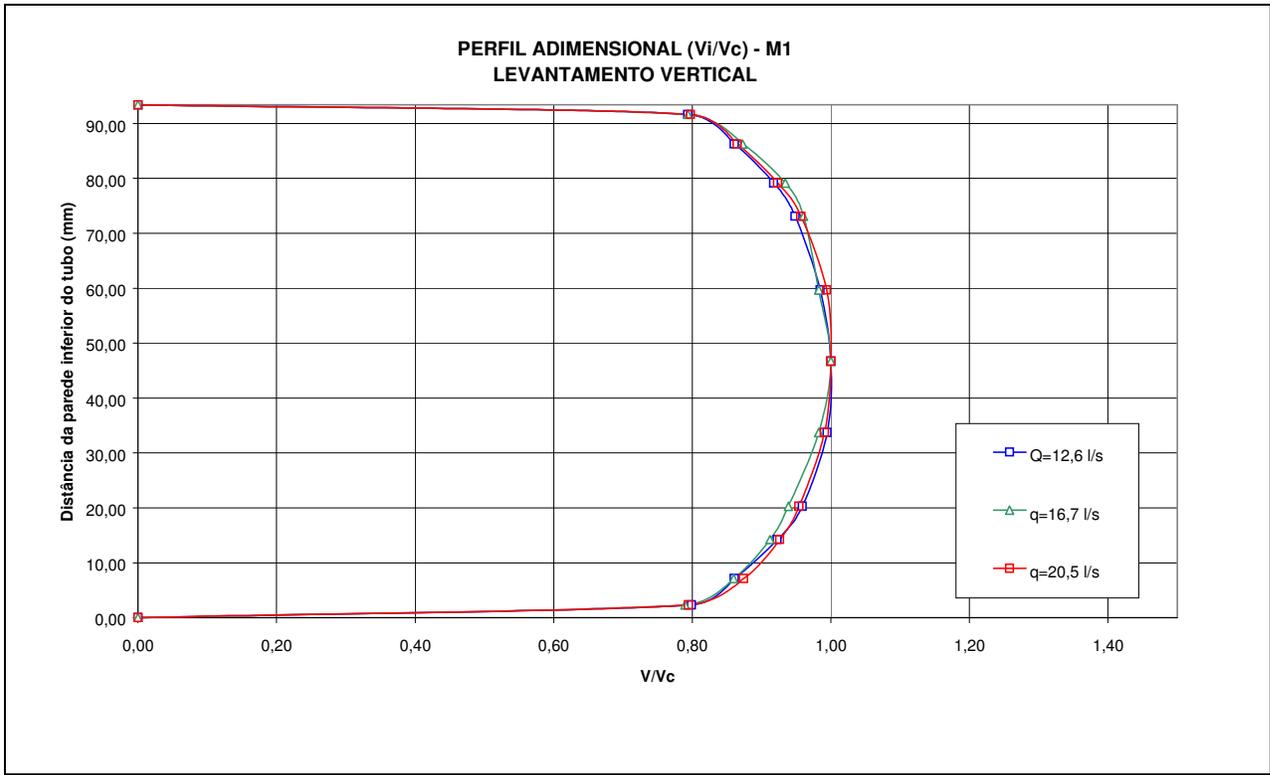
Os perfis estão apresentados seguindo a mesma referência dos ensaios realizados no laboratório, com as configurações M1, M2, M3 e M4.

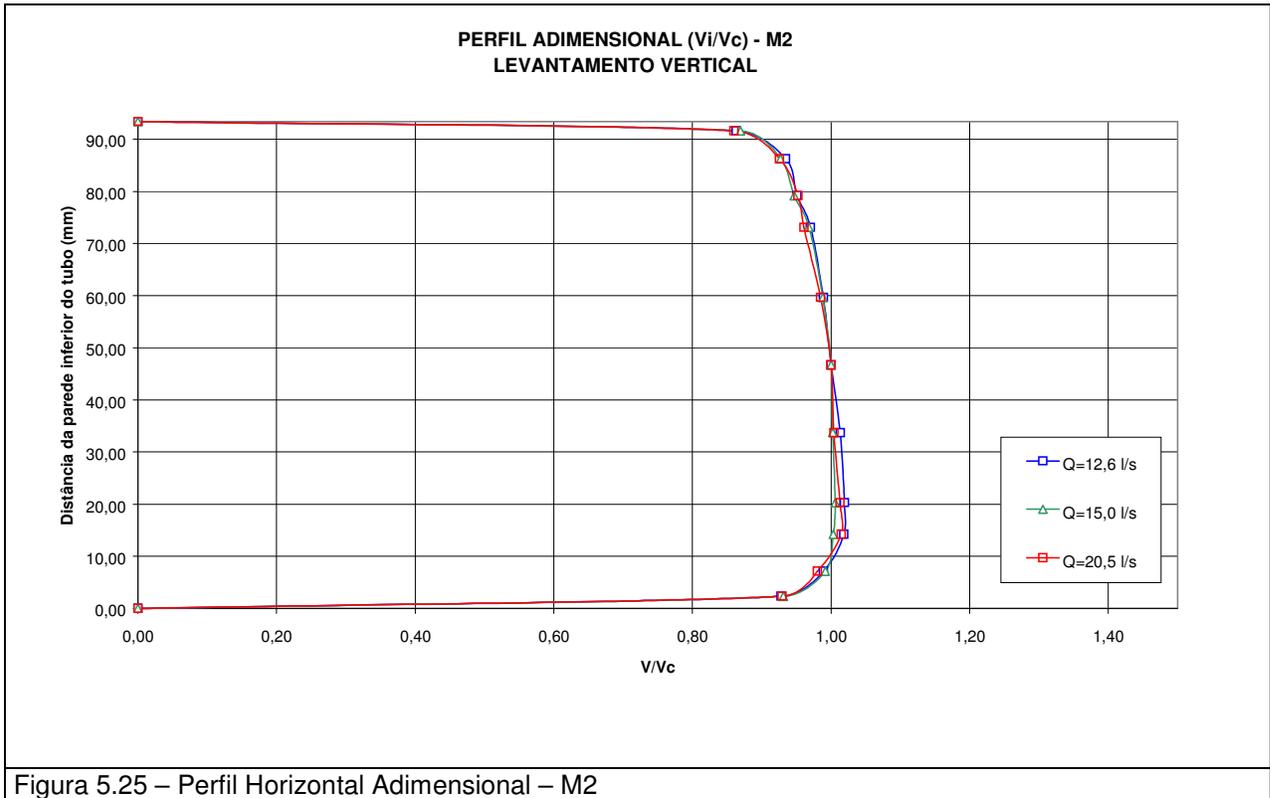
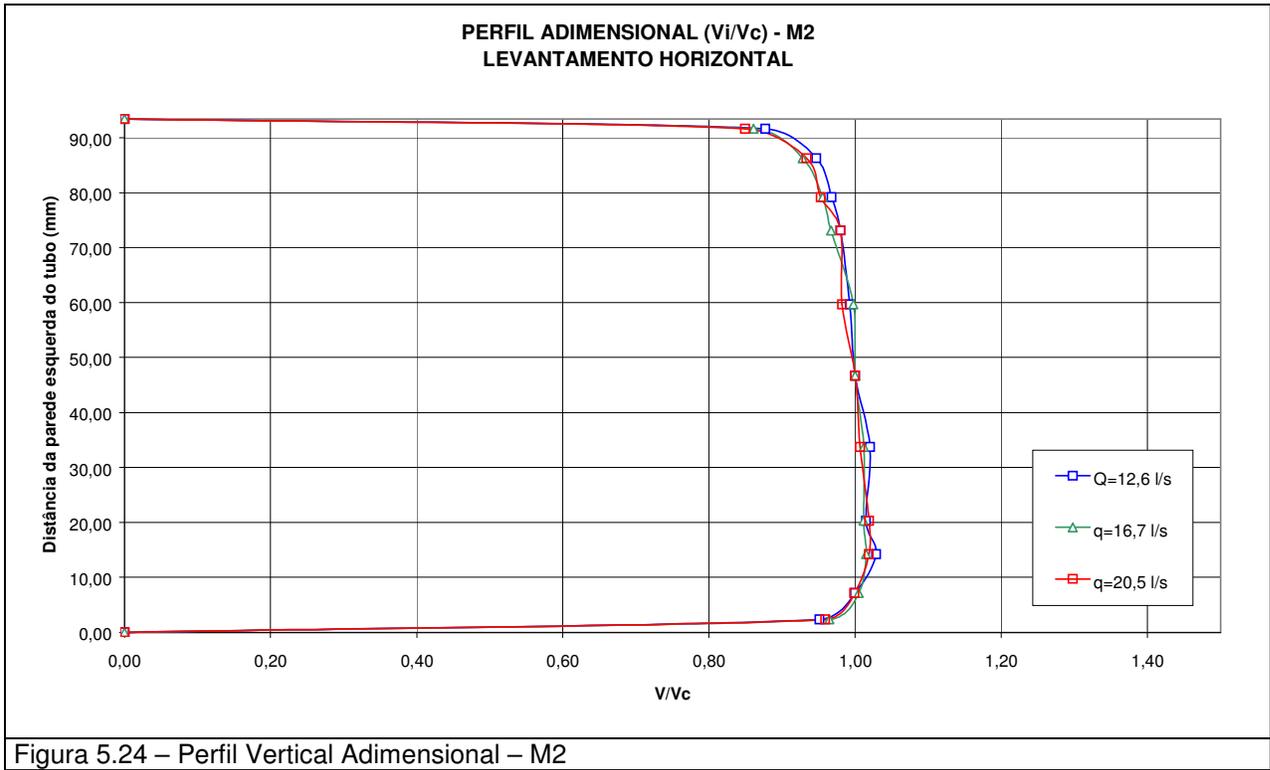
Os perfis adimensionais da configuração M1 estão nas figuras 5.21 e 5.22. Para este arranjo, os perfis estão muito próximos, havendo muito pouca diferença entre os levantamentos nas diferentes vazões.

Os perfis adimensionais da configuração M2 estão nas figuras 5.23 e 5.24. Para este arranjo, os perfis também estão muito próximos, havendo muito pouca diferença entre os levantamentos nas diferentes vazões.

Os perfis adimensionais da configuração M3 estão nas figuras 5.25 e 5.26, e para este arranjo, excetuando-se o perfil horizontal obtido do levantamento com a vazão de $20,5 \text{ m}^3/\text{s} \times 10^{-3}$, os perfis também estão praticamente idênticos, havendo muito pouca diferença entre os levantamentos nas diferentes vazões.

Para a configuração M4 os perfis adimensionais estão nas figuras 5.27 e 5.28. Para este arranjo, os perfis estão com diferenças significativas entre as diferentes vazões. Isto significa que ocorreu uma mudança no padrão do perfil ao longo dos ensaios nesta configuração, causada possivelmente pela oscilação da gaveta da válvula.





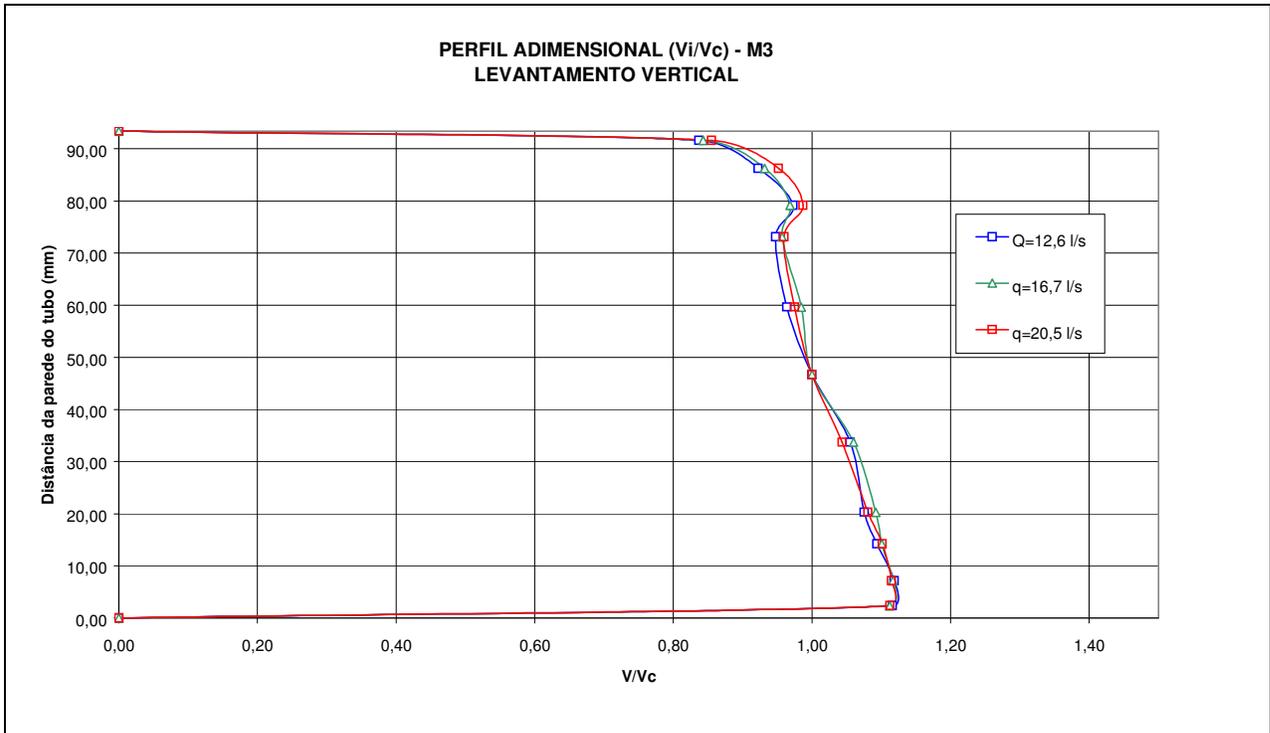


Figura 5.26 – Perfil Horizontal Adimensional – M3

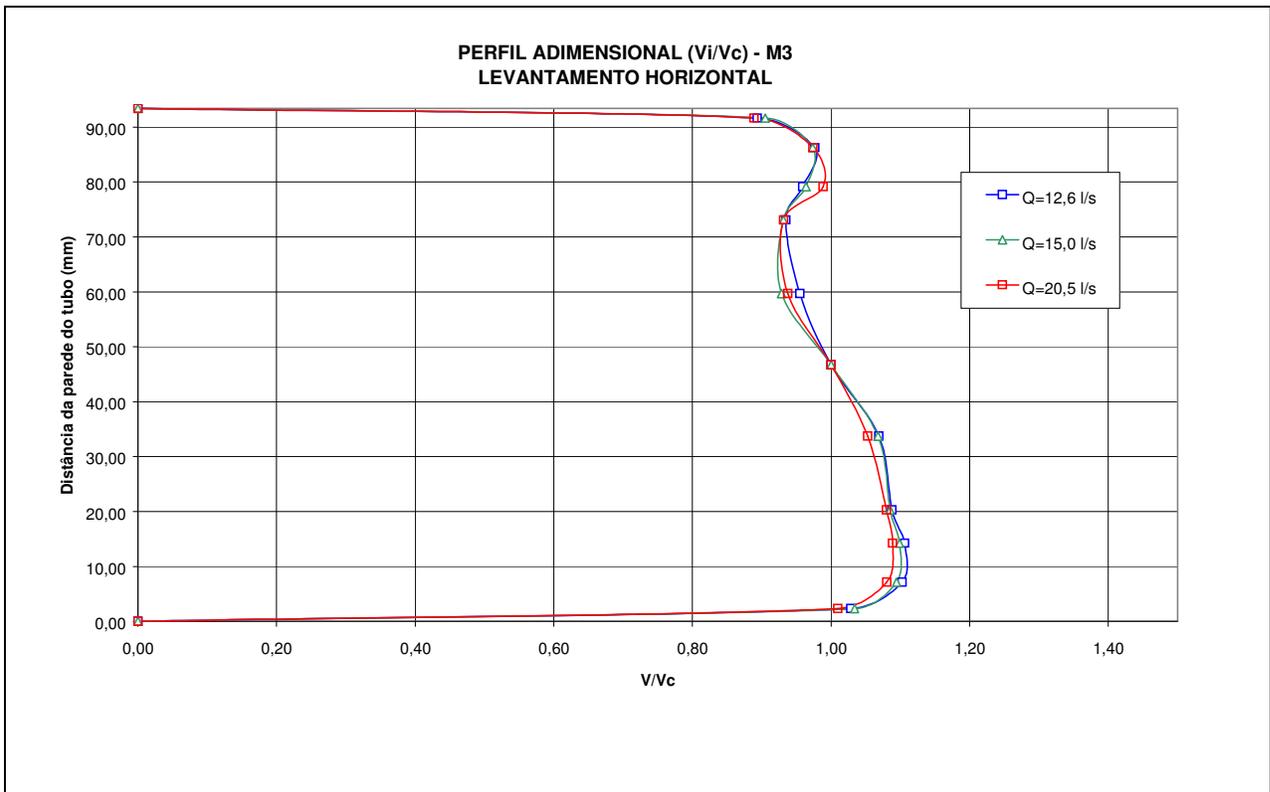
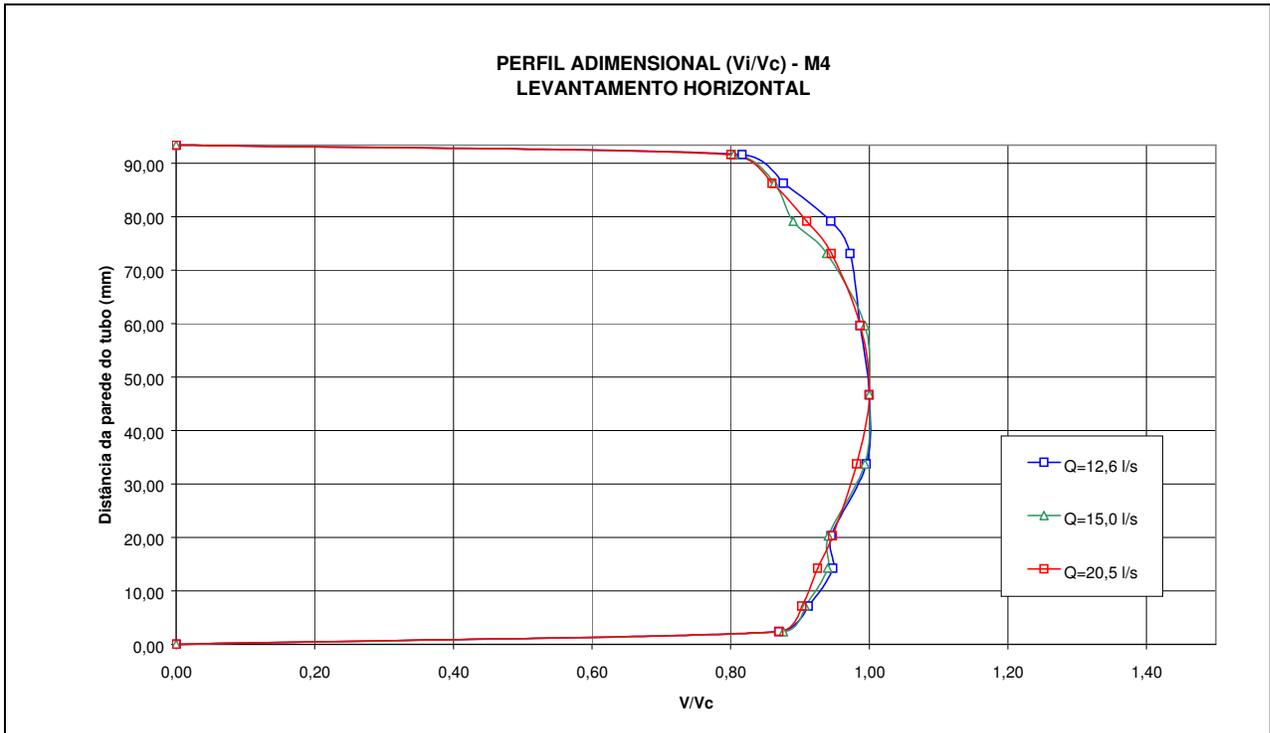
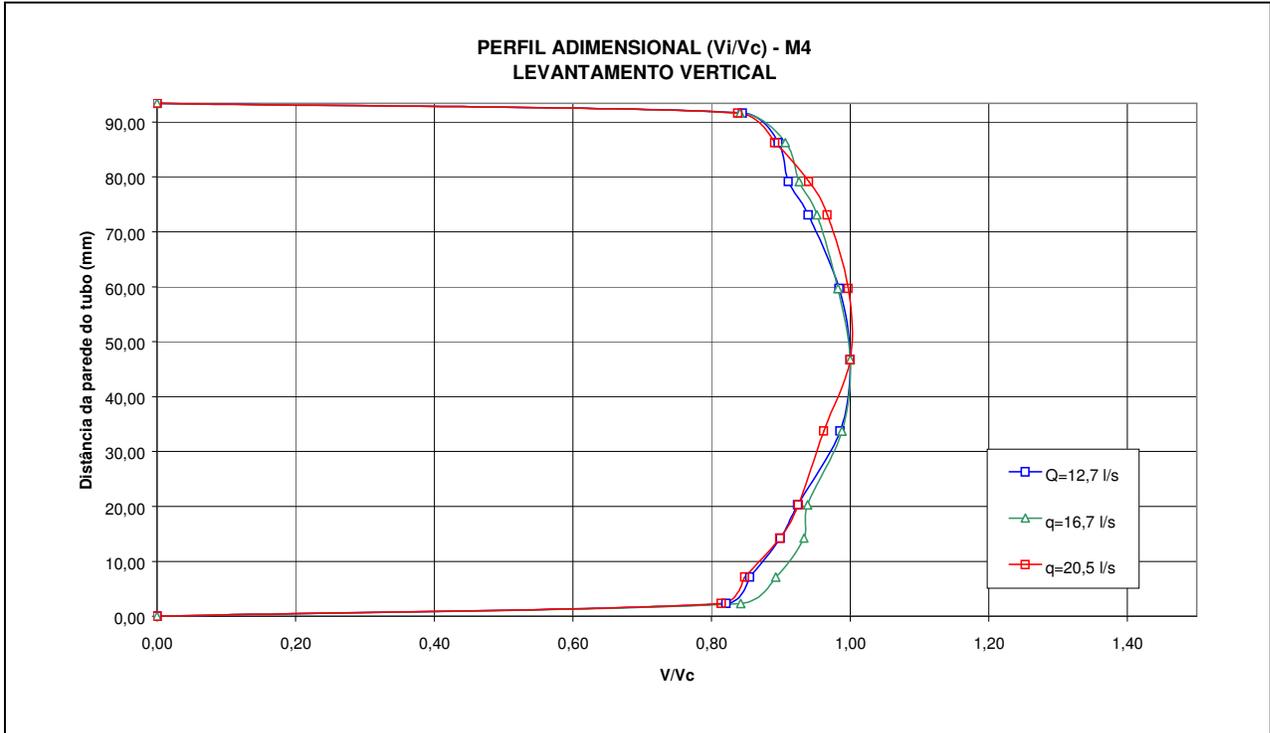


Figura 5.27 – Perfil Horizontal Adimensional – M3



5.3 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Um avanço que poderia ser feito em estudos futuros, que tornaria a avaliação mais abrangente seria de variar a distância entre o medidor eletromagnético e as singularidades. Variando desde zero, com o medidor instalado diretamente na singularidade, sem qualquer trecho reto entre as flanges, até o valor previsto na norma **ISO 6817 (1980)** de 10 diâmetros. Desse modo poderia ser encontrada uma curva relacionando o desvio do medidor em função da distância das singularidades.

Considerado algumas referências bibliográficas, tais como **Bean (1971)** que afirma que um perfil assimétrico pode causar um efeito de até 20% na indicação de medição, e **Cheremisinoff (1979)** que fala em desvios significativos, sem quantificar esses desvios, e **AWWA (1989)** que menciona que podem ocorrer desvios abaixo de níveis aceitáveis, os desvios encontrados nos ensaios realizados, que estão entre -2,0% +2,6% estão muito menores do que o que era esperado.

Uma possível explicação para os desvios encontrados serem menores do que os anunciados é a que a distância entre o medidor eletromagnético e as singularidades, de 2DN (200mm) considera a flange do medidor, ou seja, se considerarmos a distância até os eletrodos do medidor, chegamos a 3DN (300mm), o que está mais próximo da condição de instalação exigida pelo fabricante.

Os dados de vazão do Pitot não foram considerados nos ensaios, pois a norma ISO 3966 (1977) declara que para diâmetros menores do que 100mm (que é o caso dos ensaios) a incerteza será maior que 2%, o que estaria acima dos desvios encontrados nos ensaios (que são da ordem de -2,0 a +2,0%).

O desvio admissível para um medidor de vazão é uma questão subjetiva, que depende da cada situação em particular. Para um sistema em que o medidor é utilizado para contabilizar uma transação comercial entre duas empresas, o valor de

erro máximo deve ser determinado em comum acordo entre as partes. A norma **ABNT NBR 14005** para medidores de vazão velocimétricos de água fria para até 1500m³/h define que o erro máximo admissível é de 5%.

6. CONCLUSÕES

Em qualquer processo industrial, a medição da vazão que entra ou que sai do sistema é importante para o controle operacional do mesmo. Para aplicação dos conceitos da **AWWA – American Water Works Association (1999)** de auditoria da água, em que todas as entradas e saídas do sistema devem ser medidos, de forma a contabilizar todo o processo de utilização da água, a medição de vazão é fundamental. Em uma estação de tratamento de água ou esgoto, ou numa rede de abastecimento público, a medição de vazão determina a eficiência operacional do sistema e identifica as origens das perdas de água e de receita. Nestas situações o medidor de vazão é item fundamental, registrando as quantidades que entram e que saem de um sistema, correspondendo a despesa e receita do sistema.

A condição de instalação de um medidor de vazão é fundamental para o seu perfeito funcionamento e, para a qualidade na medição de vazão. O parque de medidores de vazão existente está instalado, muitas vezes, inadequadamente, formado por um conjunto de instalações que muitas vezes não obedece às orientações presentes nas normas técnicas.

Dentre os medidores de vazão existentes, os mais utilizados para medição de água são Venturis e Eletromagnéticos, pois ambos são normalizados, e já são utilizados há bastante tempo, os Venturis a mais de 100 anos e os eletromagnéticos a

mais de 50 anos. Um outro medidor que, embora seja mais recente, vem ganhando espaço, é o Ultra-sônico, do tipo Clamp-on, conhecido por ser de instalação rápida em praticamente qualquer diâmetro de tubulação.

O objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho de um medidor de vazão eletromagnético quando está instalado em condições práticas reais. Foram utilizadas quatro configurações de instalação. A avaliação foi baseada na comparação dos valores medidos pelo eletromagnético em relação a outros dois medidores: um Tubo de Venturi e um Ultra-sônico. Para cada configuração também foi levantado o perfil de velocidades. O medidor foi instalado primeiramente em uma condição adequada, e na segunda configuração à jusante de uma curva 90°. Na terceira configuração à jusante de duas curvas 90° e na quarta configuração à jusante de uma válvula de gaveta.

Os resultados obtidos para a primeira configuração, na qual todos os medidores estão em condições adequadas, indicaram um desvio máximo de 0,084%, com uma incerteza relativa de 0,49%, não havendo desvio de indicação entre os medidores.

Para a configuração seguinte, o desvio máximo foi de 0,742% , com incerteza de 0,27%. Nesta situação de instalação é possível afirmar que o medidor eletromagnético superestima em 0,742% a vazão em relação ao Venturi.

Para a terceira configuração, na qual o medidor eletromagnético foi instalado à jusante de duas curvas 90° de raio curto, em planos ortogonais, indicaram um desvio máximo de 0,447%, com uma incerteza de 0,74%. Nesta situação de instalação não é possível afirmar que o medidor eletromagnético apresente desvio de vazão em relação ao Venturi. Para esta configuração os perfis de velocidade se mostram significativamente assimétricos, com duas regiões com velocidades maiores a um quarto e três quartos da parede inferior, e com uma região de baixa velocidade a dois quartos da parede.

Para a quarta configuração, na qual o medidor eletromagnético foi instalado à jusante de uma válvula de gaveta, com 50% de abertura da válvula obteve-se um desvio máximo de $-2,046\%$, com uma incerteza de $0,50\%$, indicando que o medidor eletromagnético subestima em $2,046\%$ a vazão em relação ao Venturi. Com a válvula 100% aberta a situação se inverteu, com um desvio máximo de $2,647\%$, com uma incerteza de $1,30\%$, o medidor eletromagnético superestima em $2,647\%$ a vazão em relação ao Venturi. Os perfis encontrados para esta situação se mostraram assimétricos, com deformações significativas.

Os resultados obtidos nos ensaios realizados mostram desvios da ordem de $\pm 2,5\%$, bem menores que os 20% mencionados por alguns autores. Determinar se um desvio dessa magnitude é significativo ou não, cabe ao usuário do medidor; de acordo com sua finalidade, podendo para alguns casos ser um desvio muito alto e para outros sem relevância.

Os objetivos do trabalho, de se obter os desvios de indicação para cada um das configurações previstas, foram amplamente alcançados.

A aplicação dos resultados aqui apresentados em outras instalações existentes deve ser considerada com cautela, pois o desempenho dos medidores depende das condições de instalação, da característica da tubulação, da exatidão dos medidores e das condições do escoamento, devendo a análise ser feita caso a caso, e quando possível com ensaios de avaliação em campo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

ABNT, **NBR ISO5167-1 (1994)** - Medição de vazão de fluidos por meio de instrumentos de pressão - Parte 1: Placas de orifício, bocais e tubos de Venturi instalados em seção transversal circular de condutos forçados, Rio de Janeiro, ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1994

ABNT, **NBR10396 (1988)** - Medidores de vazão de fluidos, Rio de Janeiro, ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1988

ABNT, **NBR10977 (1990)** - Medidor de vazão de fluidos, Rio de Janeiro, ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1989

ABNT, **NBR ISO 9104 (2000)** - Medição de vazão de fluidos em condutos fechados - Métodos para avaliação de desempenho de medidores de vazão eletromagnéticos para líquidos, Rio de Janeiro, ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2000

ABNT, **NBR ISO 6817 (1999)** - Medição de vazão de líquido condutivo em condutos fechados - Método utilizando medidores de vazão eletromagnéticos, Rio de Janeiro, ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2002

ABNT, **NBR 14005 (1997)** - Medidor Velocimétrico para água fria, de 15m³/h até 1500m³/h de vazão nominal, Rio de Janeiro, ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1997

Addison, H., **A Treatise on Applied Hydraulics**. Londres, CHAPMAN & HALL LTD, 1954.

AWWA, **Flowmeters in Water Supply**. 1^a edição, Denver, American Water Works Association, 1989.

AWWA, **Water audits and Leak Detection**. 2^a edição, Denver, American Water Works Association, 1999.

BAKER, R.C., **AN INTRODUCTORY GUIDE TO FLOW MEASUREMENT**. Londres, Mechanical Engineering Publications Limited, 1989.

BATISTA, M., et al., **Fundamentos de Engenharia Hidráulica**. 2^a edição, Belo Horizonte, Ed. UFMG, 2003

BATES, C.J., **Performance of two eletromagnetic flowmeters mounted downstream of a 90° mitre bend/reducer combination**, Measurement, 27, 2000, 197-206.

BATES, C.J., **Upstream installation and misalignment effects on the performance of a modified eletromagnetic flowmeter**, Flow Measurement and Instrumentation, 10, 1999, 79-89.

BATES, C.J.; TURNER, R.B., **Fluid flow studies associated with a new eletromagnetic flowmeter**, Measurement, 33, 2003, 85-94.

BEAN, H.S., **FLUID METERS**. 6^a edição, Nova Iorque, AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS – ASME, 1971.
ASME 1971

BENTLEY, J.P., **Principles of Measurement Systems**, 3^a edição, Essex: Inglaterra, Longman G. L., 1995.

BEZERRA, M. J., **Curso de Matemática**, 29^a edição, São Paulo, Cia Editora Nacional, 1971.

BSI, **BS 1042**, Methods for the Measurement of Fluid Flow in Pipes, British Standards Institution, BSI, 1973.

BSI, **BS 7405**, Guide to selection and application of flowmeters for the measurement of fluid flow in closed conduits, British Standards Institution, BSI, 1991.

CHEREMISINOFF, N.P., CHEREMISINOFF, P. N., **FLOW MEASUREMENT FOR ENGINEERS AND SCIENTISTS**. Nova Iorque, Marcel Dekker Inc., 1988.

CHEREMISINOFF, N.P., CHEREMISINOFF, P. N., **INSTRUMENTATION FOR PROCESS FLOW ENGINEERING**. Nova Iorque, TECHNOMIC PUBLISHING CO., 1987.

CHEREMISINOFF, N.P., **Applied fluid flow Measurement – Fundamentals and Thecnology**. 1^a edição, Nova Iorque, MARCEL DEKKER INC., 1979.

COLE, E. S., **Pitot Tube Practice**, Trans. ASME, vol. 57 (Hyd-57-8), 1935, 281-294.

DALLY, J.W.; RILEY, W.F.; McCONNEL, K.G. **Instrumentation for Engineering Measurements**. 1^a edição Iowa, John Wiley & Sons Inc., 1984

DELMEE, G.J., **Manual de Medição de Vazão**. 2^a edição, São Paulo, Ed. Edgard Blucher, 1983.

DOEBELIN, E., **Measurement Systems: Application and Design**, 2^a edição, Nova Iorque, Mc Graw Hill, 1975.

ELONKA, S. M.; PARSONS, A.R **Manual de Instrumentação**., (Standard Instrumentation Questions and Answers), 1^a edição, volume 1, São Paulo, Mc graw Hill do Brasil Ltda., 1976.

ISMAIL, K.A.R. et al., **INSTRUMENTAÇÃO BÁSICA PARA ENGENHARIA**, 1ª edição, Campinas, Ed. do Autor, 2001.

ISO, **ISO 7194 (1983)** - Measurement of fluid flow in closed conduits -- Velocity-area methods of flow measurement in swirling or asymmetric flow conditions in circular ducts by means of current-meters or Pitot static tubes, International Organization for Standardization – ISO, 1983

ISO, **ISO 6817 (1980)** - Measurement of conductive fluid flowrate in closed conduits Methods using electromagnetic flowmeters, International Organization for Standardization – ISO, 1980

ISO, **ISO 4185 (1980)** - Measurement of liquid flow in closed conduits - Weighing method, International Organization for Standardization – ISO, 1980.

ISO, **ISO 8316 (1987)** - Measurement of liquid flow in closed conduits - Method by collection of the liquid in a volumetric tank, International Organization for Standardization – ISO, 1987.

ISO, **ISO 3966 (1977)** - Measurement of fluid flow in closed conduits – Velocity area method using Pitot static tubes, International Organization for Standardization – ISO, 1977.

ISO, **ISO 7066 (1997)** – Assessment of uncertainty in calibration and use of flow measurement devices, International Organization for Standardization – ISO, 1997.

ISO, **Guia Para a Expressão da Incerteza de Medição**, 2ª edição, Brasil, International Organization for Standardization, 1998.

ISO, **ISO 5167 (1980)** - Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits, International Organization for Standardization – ISO, 1980.

ISO, **ISO 5168 (1978)** - Measurement of fluid flow - Estimation of uncertainty of a flow rate measurement, International Organization for Standardization – ISO, 1978.

ISO, **ISO 4006 (1991)** - Measurement of fluid flow IN Closed Conduits - Vocabulary and Symbols, International Organization for Standardization – ISO, 1991.

INMETRO, **Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia**, 2ª edição, Brasília, Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial -INMETRO , 2000.

HAYWARD, A. T. J., **A Basic Guide and source-book For Users**. 1ª edição, Londres, MACMILLIAN PRESS LTD, 1979.

HEMP, J., **A technique for low cost calibration of large eletromagnetic flowmeters**, Flow Measurement and Instrumentation, 12, 2001, 123-134.

HERSCHY, R.W., **The uncertainty in a current meter measurement**. Flow Measurement and Instrumentation, 13, 2002, 281-284.

KING, H. W., **Handbook of Hydraulics**. Nova Iorque, Mc Graw-Hill, 1963.

LENCASTRE, A., **Handbook of Hydraulic Engineering**. 3^a edição, Londres, Ellis Horwood Limited, 1972.

LIM, K.W.; CHUNG, M.K., **Numerical investigation on the installation effects of eletromagnetic flowmeter downstream of a 90° elbow-laminar flow case**. Flow Measurement and Instrumentation, 10, 1999, 167-174.

LINFORD, A., **Flow Measurement & Meters**. 2^a edição, E&F SPON Ltda., 1961.

MARTIM, P., **Measuring Behavior: An Introductory Guide**. 1^a edição, Londres, Ed. Cambridge Univ., 1988.

MARTINS, N., **Manual de Medição de Vazão**. 1^a edição, Rio de Janeiro, Ed. Interciência, 1998.

MILLER, R.W., **FLOW MEASUREMENT ENGINEERING HANDBOOK**. 2^a edição, Nova Iorque, McGraw Hill, 1996

MORRIS, A.S., **Principles and Practice of Flow Measurement**. Nova Iorque, Perentice Hall, 1988.

PIMENTA, C.F., **Curso de Hidráulica Geral**, 3^a edição, São Paulo, CTH, 1977.

PEDRAZZI, J. A., **Crerios de projeto para um novo tip do Pitot Cole**. Dissertaçã de mestrado, São Paulo, USP, 1992.

SABESP, **Norma Técnica Sabesp NTS 068 – Medidor de Vazão ultra-sônico tipo “Clamp-on”**, 1^a. Revisão, São Paulo, Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo – SABESP, 2001

SABESP, **Norma Técnica Sabesp NTS 066 – Medidor de Vazão eletromagnético para uso em água**, 1^a. Revisão, São Paulo, Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo – SABESP, 2001

SABESP, **Manual de Pitometria** – São Paulo, Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo – SABESP, 1997

SCOTT, R.W.W., **Developments in Flow Measurement** - 1, 1^a edição, Londres, APPLIED SCIENCE PUBLISHERS, 1982.

SHERCLIFF, J.A., **The Theory of Eletromagnetic Flowmeasurement**. 1^a edição, Londres, Ed. Cambridge Univ., 1962.

SHERCLIFF, J.A., **Experiments on the dependence of sensitivity on velocity profile in electromagnetic flowmeters**, Journal of Aplied Physics, 25, 817-818, 1954.

SHERCLIFF, J.A., **Experiments on the dependence of sensitivity on velocity profile in electromagnetic flowmeters**, Journal of Scientific Instruments, 32, 441-442, 1955.

SILVA, T.M., **Medidores de Vazão**. Dissertação de mestrado, São Carlos, USP, 1997.

SPINK, L.K., **The Principles and Praticce of Flow Meter Engineering**. 8^a edição, EUA, Foxboro Co., 1973

TECFLUID, **Manual de instruções medidor de vazão de inserção**, TECFLUID, 2003

THORTON, J., **Water Loss Control Manual**, 1^a Edição, Nova Iorque, McGraw Hill, 2002.

TROSKOLANSKI A. T., **Hydrometry - Theory and Praticce of Hydraulic Measurements**, Oxford, Pergamon Press, 1960

TSUTIYA, M. A. , **Abastecimento de Água**, 1^a edição, São Paulo, PHD-EPUSP, 2003.

UPP, E.L. **Fluid Flow Measurement**. 1^a edição, Houston, Gulf Publishing Company, 1993.

ANEXO – A

DEFINIÇÕES

Amplitude da Faixa de vazão: (Span) Módulo da diferença entre dois limites da faixa de vazão.

Elemento primário: Dispositivo que recebe um estímulo diretamente do fluido que escoar e produz um sinal proporcional a vazão.

Elemento secundário: Dispositivo que recebe o sinal do elemento primário e o transforma em vazão, mostrando, registrando e/ou transmitindo o valor de vazão.

Eletrodo de medição: um ou mais pares de bornes metálicos condutores por meio do qual a tensão induzida é detectada

Escoamento Crítico: Escoamento que ocorre durante a transição de um escoamento laminar para um escoamento turbulento.

Escoamento Laminar: Condições de escoamento onde as forças devidas à viscosidade são significantes em comparação com as forças devidas à inércia, e onde o número de Reynolds é inferior ou igual a 2.000.

Escoamento Turbulento: Condições de escoamento onde as forças devidas à viscosidade são pequenas em comparação com as forças devidas à inércia. Geralmente o número de Reynolds é superior a 4.000.

Exatidão do medidor de vazão: Aptidão de um medidor de vazão de dar indicações próximas ao valor verdadeiro convencional da grandeza medida.

Exatidão: Grau de concordância entre o resultado de medição e o valor verdadeiro convencional da grandeza medida.

Fator de calibração do elemento primário: número que relaciona o sinal de vazão com a vazão escoada (ou velocidade média) dentro das condições de referência definidas para dado valor de sinal de referência.

Fundo de Escala: limite máximo, ou superior do valor de medição que o medidor é capaz de indicar.

Medidor de vazão eletromagnético: medidor de vazão que opera segundo o princípio de indução magnética de Faraday.

Medidor de Vazão: instrumento usado para medir a quantidade de fluido que escoar em determinado conduto por unidade de tempo. Composto de um elemento primário e de um elemento secundário.

Número de Reynolds: Parâmetro adimensional que expressa o quociente entre as forças de inércia e as forças viscosas.

Range: faixa de leitura em que o medidor é capaz de atuar (mínimo - máximo)

Rangeabilidade: é a razão entre a vazão máxima e a vazão mínima que o medidor é capaz de medir.

Repetibilidade: é a capacidade do medidor de vazão em indicar o mesmo valor medido em medições consecutivas sob as mesmas condições.

Singularidade: Todo e qualquer elemento ou configuração que faz com que um conduto difira de um trecho reto.

Span: máximo valor de leitura programado no medidor de vazão.

Trecho reto: Trecho do conduto onde a linha de centro é retilínea e onde a área e a forma da seção transversal são constantes. Sua finalidade é corrigir a assimetria do perfil das velocidades.

Vazão de um medidor: quociente entre a quantidade de fluido que atravessa o medidor (elemento primário) e o tempo de passagem desta quantidade.

Vazão: quantidade de fluido que escoar através da seção transversal de um conduto por unidade de tempo.

ANEXO B

CONCEITOS DE MECÂNICA DOS FLUIDOS

Neste anexo são apresentadas algumas propriedades físicas dos fluidos importantes para o entendimento do trabalho.

B.1 Massa específica

A massa específica é a relação entre a massa do fluido e seu volume, sendo:

$$\rho = \frac{m}{\nabla} \quad (\text{B.1})$$

em que:

ρ = massa específica,

m = massa do fluido,

∇ = volume do fluido.

Nos métodos de calibração gravimétricos, essa relação tem importância fundamental, na medida em que a variação da temperatura provoca mudanças no volume do fluido.

B.2 Peso específico

O peso específico é obtido da relação entre o peso e o volume do fluido:

$$\gamma = \frac{w}{\nabla} \quad (\text{B.2})$$

sendo:

γ = peso específico do fluido

w = peso do fluido

∇ = volume do fluido

Nos métodos de calibração gravimétricos, essa relação tem importância fundamental, na medida em que a variação da temperatura provoca mudanças no volume do fluido.

B.3 Viscosidade

A viscosidade é a resistência do fluido a deformação, devidas principalmente as forças de coesão entre as moléculas, em virtude disso essa propriedade só aparece quando há movimento do fluido, essa propriedade é fundamental para entender porque o perfil de velocidades se deforma, e porque ele tem o formato parabólico, ou plano.

Newton estabeleceu o princípio de que no movimento unidirecional de um fluido, a tensão tangencial de cisalhamento – ou seja, a força de cisalhamento (arrastamento) por unidade de área – é proporcional ao gradiente da velocidade (igual à velocidade de deformação angular)

$$\tau = \mu \cdot \frac{dV}{dy} \quad (\text{B.3})$$

Sendo que o coeficiente de proporcionalidade μ (denominado coeficiente de viscosidade dinâmica, ou simplesmente viscosidade) constante para um determinado fluido em determinadas condições de temperatura e pressão.

A razão entre a viscosidade dinâmica do fluido μ e a sua massa específica ρ é denominada viscosidade cinemática do fluido ν , e é muito utilizada pois os efeitos da viscosidade ficam mais visíveis quanto menor é a inércia do fluido. É devido a esse conceito que o perfil de velocidades para baixas velocidades em escoamentos laminares tem formato parabólico e para altas velocidades tem a forma plana. Essa relação entre inércia e viscosidade é representada pelo número de Reynolds.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (\text{B.4})$$

em que:

ν = viscosidade cinemática;

μ = viscosidade dinâmica;

ρ = massa específica;

B.4 Número de Reynolds

O Número de Reynolds é um número adimensional dado pela relação entre as forças inerciais do escoamento e as viscosas do escoamento, então para maiores velocidades, maior é a quantidade de movimento, maior a inércia do movimento, e tanto maior o número de Reynolds. Nessa situação temos um escoamento turbulento, onde a trajetória das partículas é aleatória, o perfil de velocidades é achatado e sua suscetibilidade às singularidades da tubulação é menor.

Quando temos uma situação onde as velocidades são baixas, a quantidade de movimento é menor, tanto menor são as forças inerciais e, tanto menor é o número de Reynolds. Para números de Reynolds (Re) < 2000 o escoamento é considerado laminar e para $Re > 4000$ é considerado turbulento, há uma faixa de transição não muito definida entre $2000 < Re < 4000$.

$$Re = \frac{U \cdot L}{\nu} = \frac{\rho \cdot U \cdot L}{\mu} \quad (\text{B.5})$$

Sendo que:

U = velocidade média do fluido,

L = dimensão característica do sistema, no qual o escoamento ocorre,

ν = viscosidade cinemática do fluido

μ = viscosidade dinâmica do fluido

ρ = massa específica do fluido

ANEXO C

DETERMINAÇÃO DA VAZÃO

Vazão, segundo a **ABNT NBR 10977 (1990)**, é a quantidade de fluido que escoou através da seção transversal de um conduto por unidade de tempo.

O equacionamento hidráulico nos diz que a vazão Q é o volume de fluido que, na unidade de tempo, atravessa uma dada superfície. Se for \vec{V} a velocidade num dado ponto, o volume de fluido que atravessa uma área elementar dA , no intervalo de tempo dt , é $V \cdot \cos \alpha \cdot dA \cdot dt$, e na unidade de tempo:

$$dQ = \cos \alpha \cdot V \cdot dA = \vec{V} \cdot \vec{n} \cdot dA \quad (\text{C.1})$$

sendo α o ângulo formado entre a velocidade \vec{V} e o vetor \vec{n} normal a dA .

Numa seção reta de um tubo circular de área transversal dA , com um fluxo ortogonal a dA , a vazão é dada por:

$$Q = \int_A \vec{V} \cdot \vec{n} \cdot dA = \int V \cdot dA \quad (\text{C.2})$$

Sendo assim, um medidor de vazão, é um instrumento que determina o volume em função do tempo, este caso é válido somente para medidores de funcionamento volumétrico.

Para medidores de vazão instantânea, o equacionamento é em função da velocidade média e da área, ficando com:

$$Q = V_m \cdot A \quad (\text{C.3})$$

Onde,

V = velocidade média do escoamento,

A = área da seção transversal.

Neste sentido, os medidores de princípio volumétrico são muito menos suscetíveis a desvios, uma vez que, por possuírem um compartimento de volume definido, a incerteza fica apenas em função da determinação do número de preenchimentos do compartimento, e em função da determinação do tempo.

No sistema de vazão instantânea, é preciso determinar a velocidade média do escoamento, valor dependente das características do escoamento e do perfil de velocidades, fatores estes que sofrem influência de eventuais singularidades presentes na tubulação. Além disso podem ocorrer problemas de determinação da área da seção, em virtude de deformações, ovalizações e incrustações na tubulação.

O perfil de velocidades pode assumir duas formas básicas, uma no escoamento laminar e outra no escoamento turbulento, com uma fase de transição entre os dois tipos. No escoamento laminar, a velocidade média do escoamento é baixa, e o fluido se move em laminais paralelamente, com linhas cilíndricas, com maior velocidade no centro e menor nas paredes no tubo, assumindo uma forma parabolóide bem acentuada.

No escoamento turbulento as velocidades médias são altas, e as linhas de fluxo desaparecem, ficando a velocidade mais uniforme, o perfil de velocidade fica achatado próximo ao centro da tubulação, assumindo um perfil retangular. Em instalações industriais e de saneamento o escoamento é turbulento na maioria das vezes. No ANEXO – D o perfil de velocidade é tratado com mais detalhes.

ANEXO – D

LEVANTAMENTO DO PERFIL DE VELOCIDADES

D.1 PERFIL DE VELOCIDADE

Para o levantamento do perfil de velocidades feito neste estudo foi utilizado um Tubo de Pitot Cole inserido na tubulação, como pode ser visto na figura D.1.

O procedimento de ensaio segue as recomendações encontradas nas normas técnicas **ISO 3966 (1977)** da norma **BSI BS 1042 (1973)**.

Segundo a norma **ISO 3966 (1977)** este método de medição tem uma incerteza na vazão calculada de $\pm 2\%$ com um nível de confiança de 95%.

Para diâmetros menores do que 100mm a norma **ISO 3966 (1977)** recomenda considerar criteriosamente os erros devido ao bloqueio da área da seção da tubulação devido a inserção da haste do tubo de pitot.

Segundo **COLE (1935)** os erros para diâmetros menores que 100mm podem ultrapassar os 2%.

A figura D.1, extraída de **SABESP (1997)** mostra um tubo de Pitot inserido na tubulação, e um tubo “U” de líquido manométrico para a determinação da diferença de pressão.

Para este estudo foi utilizado um transdutor de pressão eletrônico para a medição da diferença de pressão dispensando o uso do tubo manométrico.

A figura D.2 mostra uma foto do Pitot utilizado nos ensaios inserido na tubulação, numa vista do interior da tubulação, pouco antes de ser utilizado para um levantamento de perfil horizontal.

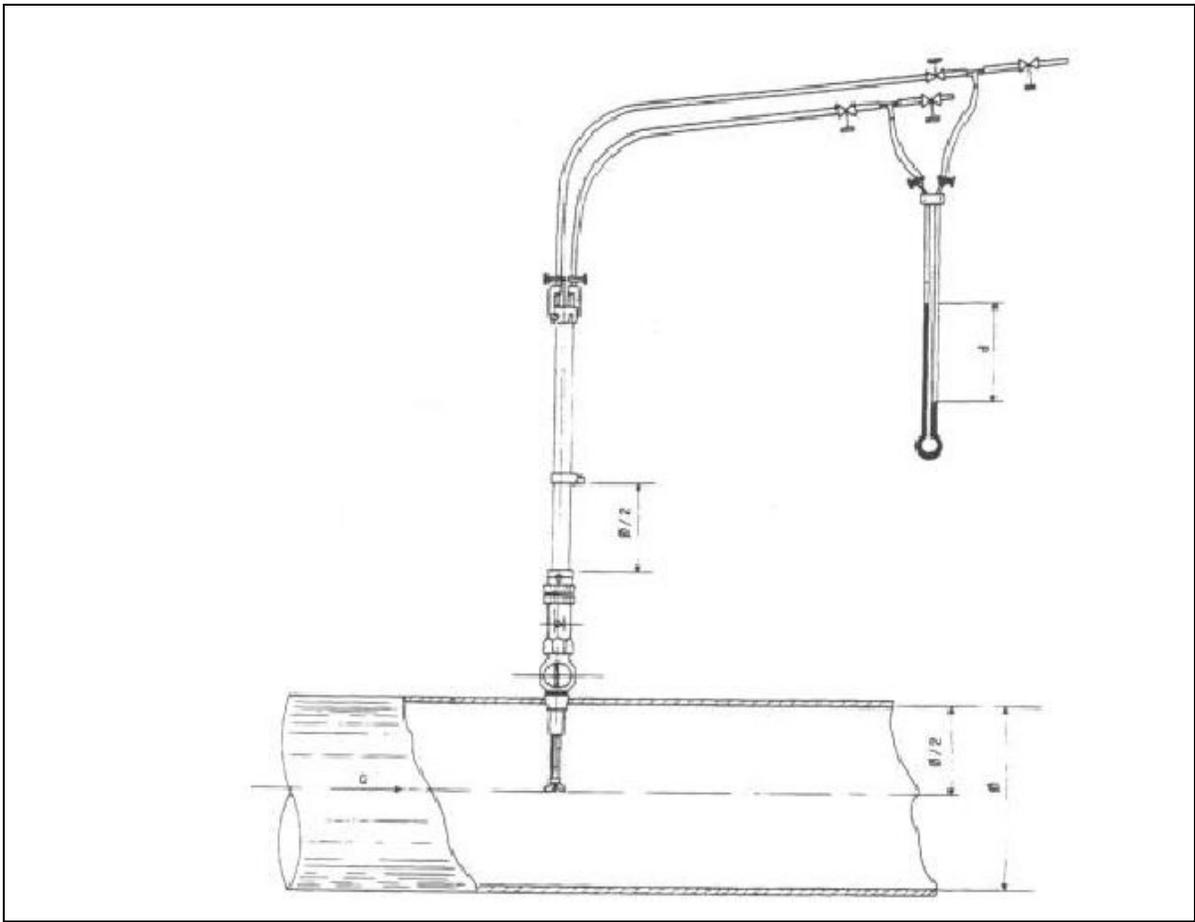


Figura D.1 – Pitot Cole inserido na tubulação. – Fonte: SABESP (1997)

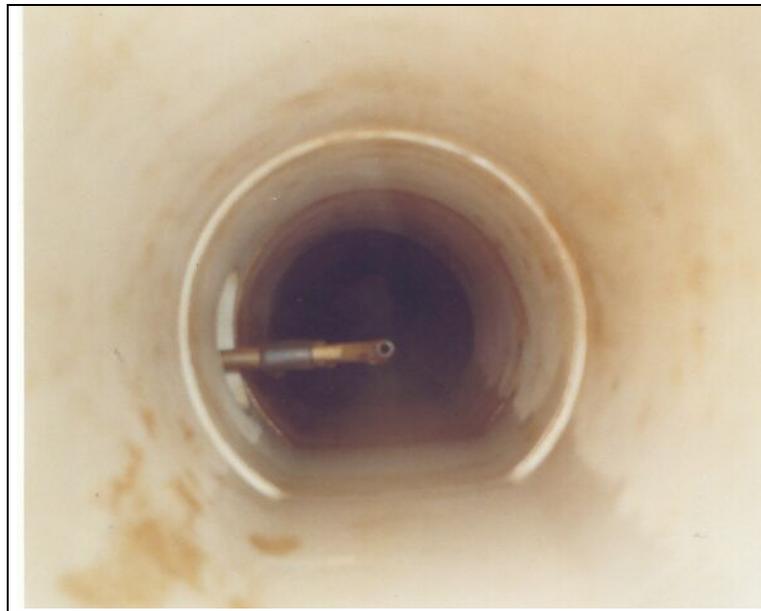


Figura D.2 – Pitot inserido na tubulação.

O perfil de velocidades de um escoamento é um gráfico que mostra como a velocidade varia através do diâmetro da tubulação, este gráfico é elaborado com base nas velocidades medidas ao longo desse diâmetro.

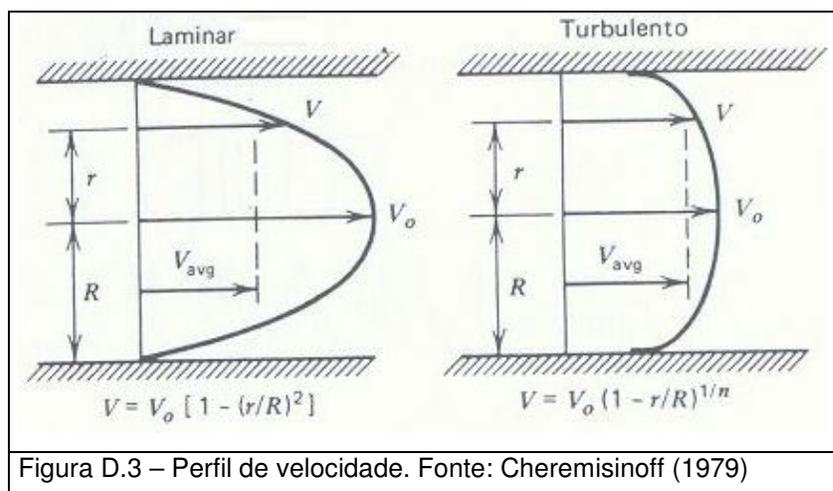
Em um escoamento laminar o perfil de velocidade é uma parábola, e a velocidade no centro do tubo é igual a duas vezes a velocidade média.

$$V_o = 2 \cdot V_{avg} \quad (D.1)$$

Nas instalações usuais em engenharia, o escoamento é em quase todos os casos turbulento, e o perfil de velocidades, para uma seção com um longo trecho reto a montante, é bem mais achatado. Para estes casos a velocidade no centro é igual a 1,2 vezes a velocidade média.

$$V_o = 1,2 \cdot V_{avg} \quad (D.2)$$

A figura D.3 mostra dois perfis de velocidade, um para escoamento laminar e outro para o escoamento turbulento.



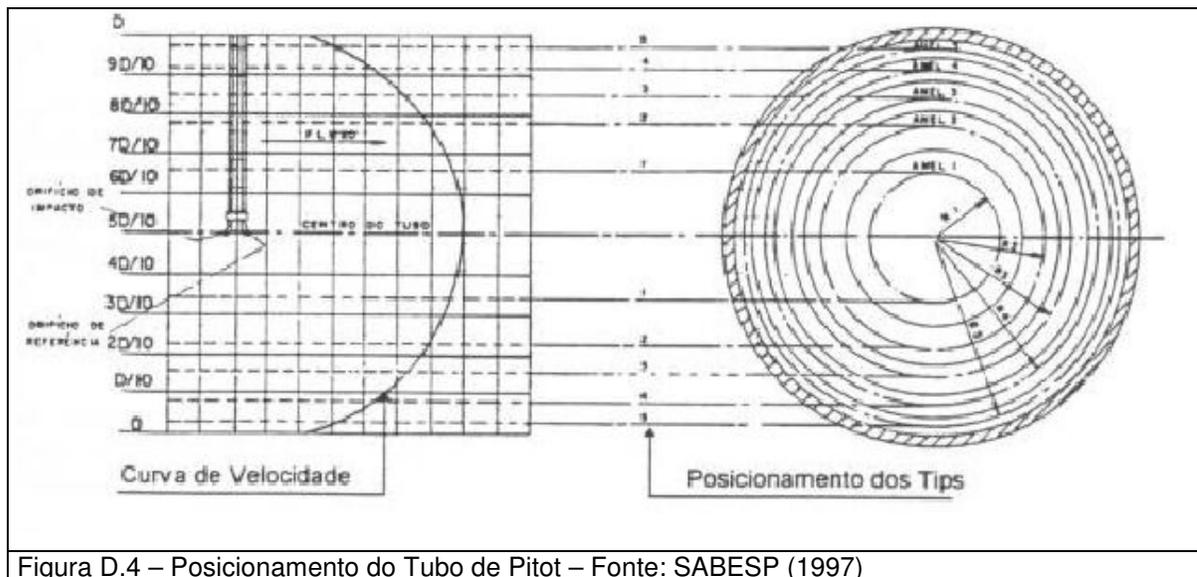
Ocorre, porém, que os perfis de velocidade que encontramos na prática, nem sempre obedecem a essa lei de distribuição.

Quando não é possível considerar que o perfil de velocidade está completamente desenvolvido, em virtude de alguma singularidade próxima ao medidor, é necessário fazer o levantamento do perfil de velocidades. Com o perfil de velocidades determinado, podemos calcular a velocidade média e a vazão escoada.

D.2 POSICIONAMENTO DO PITOT

O tubo de Pitot é um medidor de velocidade local, e para o levantamento do perfil de velocidades é posicionado em algumas posições pré-definidas, determinando a velocidade do escoamento em diferentes pontos ao longo do diâmetro da tubulação.

A figura D.4 mostra o posicionamento do Pitot na tubulação.



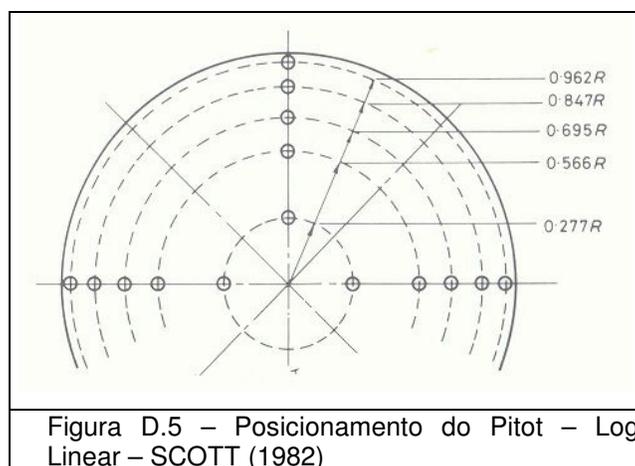
As posições adotadas para levantamento com o Tubo de Pitot obedecem a distribuição de Log Linear, sugerida pela norma ISO 3966 (1977) mostradas na tabela D.1. As posições são dependentes do raio interno da tubulação.

Tabela D.1 – Posicionamento do Tubo de Pitot.

Posição da Tomada	$Y_i \cdot R_i$
1	0,962
2	0,847
3	0,695
4	0,566
5	0,277

Para os ensaios foram adotados então cinco pontos no raio superior e cinco no raio inferior, além de um ponto adicional no centro da tubulação, totalizando 11 posições ao longo do diâmetro.

Para a elaboração do perfil de velocidades, são então utilizadas as 11 velocidades medidas, nos onze pontos especificados.



Em função do diâmetro da tomada de pressão do Pitot (Tip) que tem 4,7mm, a posição do Pitot fica 2,35mm abaixo da posição da velocidade medida, que é o centro da tomada, sendo necessária uma correção da posição da velocidade medida, que é feita somando-se 2,35mm a cada ponto de medição. A

tabela D.2 mostra as posições utilizadas nos ensaios para o levantamento do perfil de velocidades.

Tabela D.2 – Posicionamento do Pitot

Posição	Posição do Pitot (mm)	Distância a partir da parede da tubulação (mm)
11	89,28	91,63
10	83,90	86,25
9	76,81	79,16
8	70,77	73,12
7	57,31	59,66
6	44,35	46,70
5	31,39	33,74
4	17,93	20,28
3	11,89	14,24
2	04,80	7,15
1	00,00	2,35

D.3 CÁLCULO DA VELOCIDADE

A velocidade do escoamento é calculada em função da diferença de pressão medida no transdutor de pressão, que indica a diferença de pressão entre as tomadas, ou “tips” do Pitot, os TIPS podem ser vistos na figura D.6, que é uma foto do pitot utilizado nos ensaios.

A diferença de pressão é proporcional à velocidade do escoamento, na razão de $V \propto \sqrt{\Delta P}$.



Figura D.6 – Tomadas de pressão do Tubo de Pitot (TIP)

As velocidades pontuais são obtidas a partir da equação :

$$V = C_d \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot h}{\rho}} \quad (D.3)$$

Em que:

V: velocidade local do escoamento (m/s);

C_d: fator de calibração do tubo de Pitot (=0,87);

g: aceleração da gravidade (m/s²);

h: diferencial de pressão medido (mmH₂O);

ρ: densidade da água kg/m³

Para este estudo foi utilizado um valor médio para C_d do Pitot, obtido a partir do estudo de PEDRAZZI (1992) e de SABESP (1997), para o tubo de Pitot Cole do fabricante MECALTEC.

D.4 CÁLCULO DA VAZÃO

A vazão é calculada pelo produto da velocidade média do escoamento pela área corrigida da seção transversal da tubulação.

A velocidade média pode ser obtida por um processo de integração gráfica, sendo igual à área da curva do perfil de velocidades dividida pelo diâmetro interno da tubulação, como pode ser visto na figura D.7.

Para o caso da distribuição de Log linear adotado, a velocidade média pode ser obtida pela média aritmética das velocidades calculadas.

A área da seção transversal deve ser corrigida em função do bloqueio causado pela área frontal do tubo de pitot, que uma vez inserido na tubulação provoca uma redução da área total do tubo. Essa correção é tabelada para alguns casos, e foi obtida de SABESP (1997). Para o diâmetro de 93,4mm a área corrigida da seção transversal é de $A_c=0,006524$.

Para o cálculo da velocidade média não é considerada a velocidade no centro.

A relação esperada é a de que a velocidade no centro seja igual a 1,2 vezes a velocidade média. Para efetuar essa comparação calcula-se a velocidade no centro da tubulação e verifica-se qual a distorção do perfil.

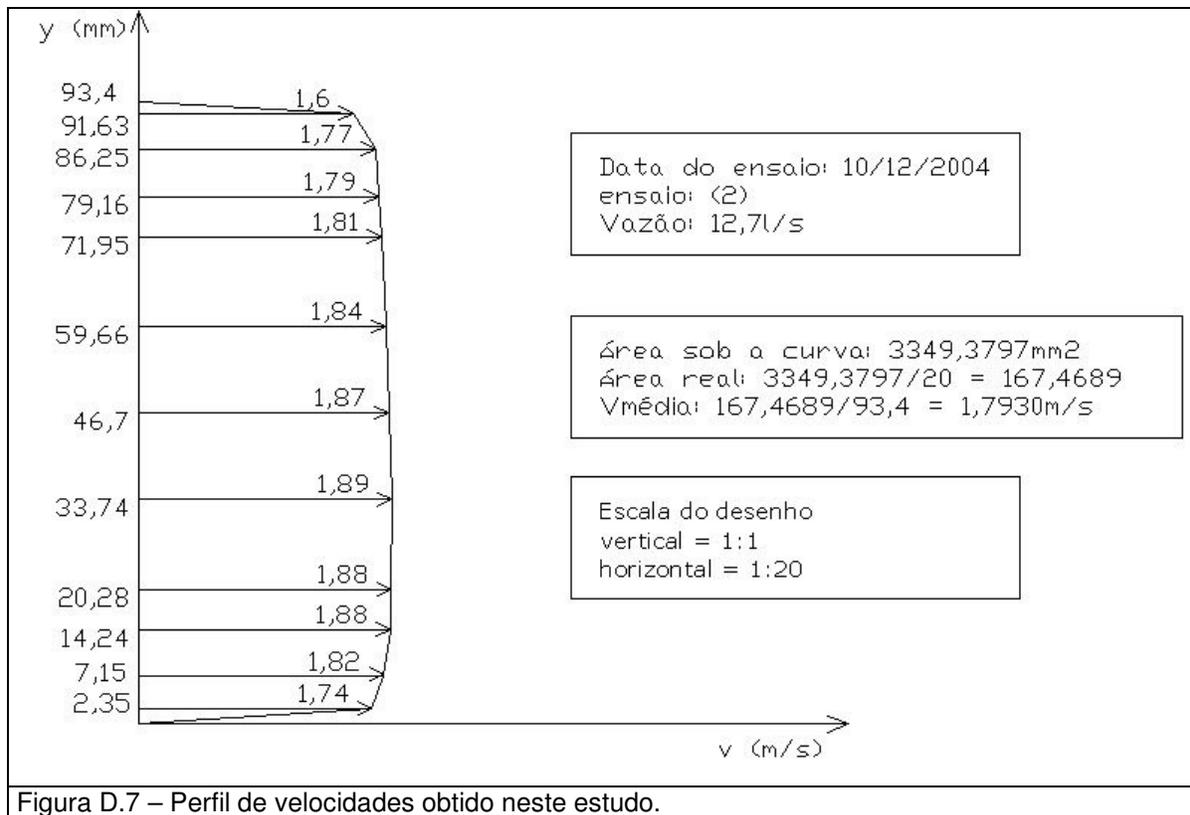


Figura D.7 – Perfil de velocidades obtido neste estudo.

A tabela D.3 mostra um exemplo de cálculo feito neste trabalho, em que na **coluna 1** temos a posição do tubo de pitot, sendo que o mapeamento foi feito pelo menos duas vezes por vazão, sendo que cada ponto foi posicionado duas vezes. Na primeira o pitot foi posicionado na 11^a. Posição e desceu até a 1^a posição, são os pontos identificados pela letra “d”. Em seguida percorreu da 1^a até a 11^a posição, subindo a haste, que são os pontos identificados com a letra “s”.

Na **coluna 2**, está indicada a posição em mm do centro do tubo de Pitot, com referência a parede inferior do tubo de Pitot.

Na **coluna 3** está indicada a velocidade calculada com a equação (D.3) e na **coluna 4** a média das velocidades para cada ponto, ou seja :

$$V_{im} = \frac{V_{is} + V_{id}}{2} \tag{D.4}$$

Na **coluna 5** está apresentado o cálculo da velocidade média do perfil de velocidades, que para o caso da distribuição de Log-Linear, é dada por:

$$V_m = \left(\left(\frac{\sum_{i=1}^{11} V_{ij}}{11} \right) - \frac{V_c}{11} \right) \cdot 1,1 \quad (D.5)$$

A área da corrigida da seção está na **coluna 6**, e a vazão escoada está na **coluna 7**.

D.5 ROTINA DE PROCEDIMENTO UTILIZADO

Os ensaios de levantamento de perfil de velocidades, para cada vazão ensaiada, foram executados com base na seguinte rotina:

- 1 – Determinação das dimensões em estudo (diâmetro interno e área da seção);
- 2 – Definição das posições de medição do Pitot;
- 3 – Instalação dos Transdutores de pressão;
- 4 – Instalação dos Data Loggers para aquisição de dados;
- 5 – Ajuste da vazão;
- 6 – Inserção e posicionamento do Pitot;
- 7 – Medição do diferencial de pressão entre a pressão total e estática, para cada posição do Pitot;
- 8 - Para cada posição são apontados 5 valores de pressão do display do medidor de pressão em uma planilha apropriada, e simultaneamente são adquiridos 30 valores, 1 a cada segundo pelo Data Logger. O Data Logger também adquire os dados dos medidores de vazão simultaneamente;

9 – O levantamento dos perfis é feito com três mapeamentos, ou seja percorre-se os pontos de 1 a 11, de 11 a 1 e de 1 a 11 novamente, para evitar possíveis problemas de histerese, e distorções provocados por turbulência.

10 – Cálculo das velocidades pontuais utilizando a equação (D.3)

11 – Cálculo da vazão escoada, conforme tabela D.3, pelo produto da velocidade média do escoamento pela área corrigida da seção.

Tabela D.3 – Exemplo do cálculo da vazão.

Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5	Coluna 6	Coluna 7
Posição	y(mm)	V (m/s)	Média de V (m/s)	Velocidade de média (m/s)	Área Corrigida da Seção (m ²)	m ³ /s
				3,33	0,006569554	0,0219
11d	91,63	1,60	1,60			
10d	86,25	1,77	1,77			
9d	79,16	1,79	1,79			
8d	73,12	1,81	1,81			
7d	59,66	1,84	1,84			
6d	46,70	1,87	1,87			
5d	33,74	1,89	1,89			
4d	20,28	1,88	1,88			
3d	14,24	1,88	1,88			
2d	7,15	1,82	1,82			
1d	2,35	1,74	1,74			
1s	2,35	1,75				
2s	7,15	1,81				
3s	14,24	1,88				
4s	20,28	1,89				
5s	33,74	1,90				
6s	46,70	1,88				
7s	59,66	1,83				
8s	73,12	1,82				
9s	79,16	1,79				
10s	86,25	1,77				
11s	91,63	1,61				

Média das velocidades na posição :
 $V_{im} = (V_{is} + V_{id}) / 2$

ANEXO - E

DETERMINAÇÃO DA INCERTEZA DA VAZÃO DO VENTURI

Sabe-se que para uma grandeza y qualquer, definida pela função:

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (\text{E.1})$$

A incerteza no valor medido de y é obtido pela equação:

$$\Delta y = \pm \sqrt{\sum_{j=1}^n \left[\frac{\partial y}{\partial x_j} \cdot \Delta x_j \right]^2} \quad (\text{E.2})$$

Para o medidor Venturi, a vazão é obtida a partir da leitura da diferença de alturas manométricas H , na coluna manométrica, ou seja:

$$Q = f(H) \quad (\text{E.3})$$

Definida por uma função de grau n , do tipo:

$$Q = K \cdot H^n \quad (\text{E.4})$$

Para o medidor Venturi utilizado, $K=1,64349$ e $n=0,50624$ ficando a equação:

$$Q = 1,64349 \cdot H^{0,50624} \quad (\text{E.5})$$

A medição da vazão empregando o Venturi (Q) apresenta uma incerteza (ΔQ), de tal modo que a vazão estimada pelo Venturi será dada pela vazão medida mais a parcela da incerteza de Q :

$$Q = Q_0 \pm \Delta Q \quad (\text{E.6})$$

O valor de (ΔQ) é obtido a partir de (E.2), e expressa por:

$$\Delta Q = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial Q}{\partial H} \cdot \Delta H\right)^2} \quad (\text{E.7})$$

Calculando a expressão $\frac{\partial Q}{\partial H} \cdot \Delta H$, sendo $Q = K \cdot H^n$.

Segundo Bezerra(1971) a derivada de uma função $y = u^m$ ($u > 0$) sendo u derivável em um intervalo (a,b) e m um número real qualquer é:

$$y' = m \cdot u^{m-1} \cdot u' \quad (\text{E.8})$$

Ainda segundo Bezerra(1971) a derivada do produto de uma constante por uma função derivável é igual ao produto dessa constante pela derivada dessa função.

Deste modo, chamando de y uma função tal que:

$$y = K \cdot x^n \quad (\text{E.9})$$

E chamando de z , uma função tal que:

$$y = K \cdot z \quad (\text{E.10})$$

A derivada de y é:

$$y' = K \cdot z' \quad (\text{E.11})$$

Calculando a derivada z' :

$$z' = n \cdot x^{n-1} \quad (\text{E.12})$$

E finalmente y' :

$$y' = K \cdot n \cdot x^{n-1} \quad (\text{E.13})$$

Aplicando ao caso do Venturi:

$$\frac{\partial Q}{\partial H} \cdot \Delta H = K \cdot n \cdot H^{(n-1)} \cdot \Delta H \quad (\text{E.14})$$

Utilizando os dados do Venturi utilizado neste estudo:

$$K = 1,64349$$

$$n = 0,50624$$

Substituindo (E.14) em (E.7):

$$\Delta Q = \pm \sqrt{\left(\frac{0,8320 \cdot \Delta H}{H^{0,49376}} \right)^2} \quad (\text{E.15})$$

Considerando que a leitura da altura H é determinada com transdutor de pressão diferencial eletrônico, com exatidão da ordem de 0,2% do fundo de escala ($F.E.$), o valor de ΔH é igual a:

$$\Delta H = 0,2\% \cdot F.E. \quad (\text{E.16})$$

O valor do fundo de escala ($F.E.$) para o transdutor é de $700\text{mmH}_2\text{O}$, isso fornece um valor de $\Delta H = 1,4\text{mm}$.

O valor da incerteza utilizado nos resultados obtidos é determinado pela aplicação da equação E.17:

$$\Delta Q = \pm \sqrt{\left(\frac{1,1648}{H^{0,49376}}\right)^2} \quad (\text{E.17})$$

Em que ΔQ é a incerteza relativa, dada em m³/s.