

UNESP

Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá

Guaratinguetá

1998



CARO LEITOR NÃO
RISQUE O LIVRO

*"Sistematização na Seleção,
Calibração e Aplicação de
Medidor de Vazão – Tipo Placa
de Orifício – Considerações para
Escoamentos Pulsantes "*

ALEXANDRE DIAS PEREIRA CASSIANO

92

1110000378



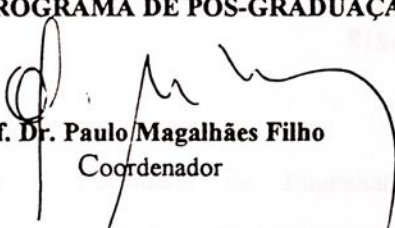
**“SISTEMATIZAÇÃO NA SELEÇÃO, CALIBRAÇÃO E APLICAÇÃO DE MEDIDOR
DE VAZÃO – TIPO PLACA DE ORIFÍCIO – CONSIDERAÇÕES PARA
ESCOAMENTOS PULSANTES”**

ALEXANDRE DIAS PEREIRA CASSIANO

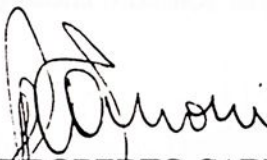
**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”**

**ESPECIALIDADE: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: TRANSMISSÃO E CONVERSÃO DE ENERGIA**

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. Paulo Magalhães Filho
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. LUIZ ROBERTO CARROCCI
Orientador / Unesp-Feg


Prof. Dr. PETRONIO MASANOBU TANISHO
Unesp-Feg


Prof. Dr. MESSIAS BORGES SILVA
Faenquil

Outubro 1998

Alexandre Dias Pereira Cassiano

**Sistematização na Seleção , Calibração e Aplicação
de Medidor de Vazão - Tipo Placa de Orifício.**

Considerações para Escoamento Pulsante.

CARO LEITOR NÃO
RISQUE O LIVRO

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista “ Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para a obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica, Área de Transmissão e Conversão de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Roberto Carrocci

Guaratinguetá

1998

378

378



Cassiano, Alexandre Dias Pereira

C345s Sistematização na seleção, calibração e aplicação de
medidor de vazão – tipo placa de orifício, considerações para
escoamento pulsante / Alexandre Dias Pereira Cassiano. –
Guaratinguetá : [s.n.], 2007

131 f. : il.

Bibliografia: f. 108-110

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2007

Orientador: Prof. Dr. Luiz Roberto Carrocci

1. Escoamento 2. Medidores de fluxo I. Título

CDU 532.546

DADOS CURRICULARES

Alexandre Dias Pereira Cassiano

Nascido em: 1964 28/03 - Guaratinguetá - S.P.

Formação: 1985/1990 Graduação em Engenharia Mecânica
Escola de Federal de Engenharia de Itajubá

1993 Especialização em Qualidade e Produtividade
Escola de Federal de Engenharia de Itajubá

1995 Especialização em Administração Industrial -
Universidade Estadual de Londrina

Experiência: 1990/1993 Cofap Arvin - Engenheiro da Qualidade

1993/1995 Plenogás - Chefe de Operações

1998/ Indústrias Nucleares do Brasil - INB
Garantia da Qualidade - Auditor

Associação: CREA MG 52217/D



Agradecimentos

Dedico este trabalho a todos os que me incentivaram e apoiaram durante todo o desenvolvimento, especialmente aos meus pais, que sempre estiveram presentes para me encorajar e me ajudar em todos os momentos difíceis. Também agradeço aos meus amigos, especialmente aos meus colegas de curso, que me ajudaram a superar as dificuldades e a concluir este trabalho. Agradeço também aos meus professores, especialmente ao prof. Dr. João Carlos de Almeida, que me orientou e me ajudou a desenvolver este trabalho. Agradeço também à FAPESP que financiou a construção do Laboratório de Neurociências e à FUNDUNESP e ao CNPq, que financiaram parte da pesquisa.

Dedico esse trabalho àqueles que tem agredido e incentivado a busca de meus objetivos, especialmente aos meus pais fonte de inspiração nos momentos difíceis e a minha família motivo da busca de um futuro melhor.

Agradecimentos

a Deus fonte de todo o conhecimento,
ao Prof. Carrocci pela oportunidade de desenvolver esse trabalho e as
muitas ajudas que forneceu durante esse período;
aos colegas da pós-graduação, em especial ao Flávio;
aos técnicos dos laboratórios, em especial a Salete pela dedicação;
ao pessoal administrativo;
ao prof. João Andrade que possibilitou a entrada no INPE;
a FAPESP que financia a construção do Laboratório de
Fluidotermodinâmica;
a FUNDUNESP e ao CNPq que financiaram parte da pesquisa.



SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS	10
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	12
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	17
1.1. Revisão do Tema Medição de Vazão	17
1.2. Aspectos da Medição de Vazão com Placa de Orifício	20
1.3 .A Sistematização Desenvolvida	24
CAPÍTULO 2 - CONCEITOS TEÓRICOS.....	27
2.1. Conceitos Fluidotermodinâmicos	27
2.1.1. Conceitos básicos	27
2.1.2. Fatores que influenciam o coeficiente de descarga.....	28
2.1.2 .Características e propriedades dos fluidos utilizados	30
2.1.3 .Equações da conservação.....	32
2.2. Conceitos Experimentais e Estatísticos	42
2.2.1. Coeficiente de descarga.....	42
2.2.2. Calibração e performance do medidor	43
2.2.3. Análise de incerteza na determinação da performance	45



2.3. Escoamento Pulsante.....	50
-------------------------------	----

2.3.1. Problema da medição de vazão	51
---	----

2.3.2. Meios de caracterizar o erro da medição.....	56
---	----

3.1. Resultados da Simulação da Calibração

CAPÍTULO 3 - A SISTEMATIZAÇÃO DESENVOLVIDA	60
---	-----------

3.1. Seleção de Placa de Orifício - Programa BETA	60
---	----

3.1.1 .Subrotina ENTRADA	63
--------------------------------	----

3.1.2 .Cálculo dos coeficientes e fatores de correção	68
---	----

3.1.3 .Subrotina TAPS.....	69
----------------------------	----

3.1.4 . Cálculos finais e relatório.....	71
--	----

3.2 Determinação da Performance como Simulação da Calibração	72
--	----

3.2.1 .Determinação do coeficiente de descarga- SIMULA	73
--	----

3.2.2 .Análise de incerteza para determinação da performance	78
--	----

3.3.Medição em Escoamento Pulsante	81
--	----

CAPÍTULO 4 - APLICAÇÃO DA SISTEMATIZAÇÃO	83
---	-----------

4.1. Aplicação do Programa de Seleção	83
---	----

4.2. Aplicação do Método de Simulação da Calibração	85
---	----

4.2.1. Aplicação do programa SIMULA	86
---	----

4.2.2. Determinação da performance do sistema.....	86
--	----

4.3. Considerações para Aplicação em Escoamento Pulsante.....	94
---	----

CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E COMENTÁRIOS	98
5.1. Apresentação de Resultados da Seleção	98
5.2. Resultados da Simulação da Calibração	100
5.3. Comentários e Sugestões	105
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES	106
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	108
ANEXOS.....	112
A. Relatórios do Programa BETA.....	113
B. Listagem de Subrotinas	120
C. Guia de Orientações	128
RESUMO.....	130
ABSTRACT	131



LISTA DE FIGURAS

1.1 - Placa de orifício concêntrica	22
2.1 - Região da vena contracta	29
2.2 - Perda de carga em diferentes medidores	30
2.3 - Esquema do medidor de vazão por diferencial de pressão	35
2.4 - Volume de controle a montante do medidor	36
2.5 - Erros relacionados com um valor medido	46
2.6 - Relação entre uma variável e o resultado	47
2.7 - Caracterização do escoamento pulsante	50
2.8 - Efeito da forma de onda no erro de medição	55
2.9 - Sistema de Hodgson	57
2.10 - Curva de erro com efeito cutoff	58
3.1 - Estrutura do programa "BETA"	62
3.2 - Estrutura do programa "SIMULA"	73
3.3 - Faixa de aplicação de $C \times R_d$	77
3.4 - Relação entre o erro% da medida e N_H	82
4.1 - Esquema experimental - LAT	87
4.2 - Esquema experimental - LF	87
4.3 - Esquema experimental - LCP	87
4.4 - Histograma de medições -LAT	91
4.5 - Sistema de aquisição de dados - LCP	96
4.6 - Estrutura do programa de aquisição de dados	97
5.1 - Curva de aplicação - LAT	100
5.2 - Curva simulada - LAT	101
5.3 - Curva de aplicação - LF	102
5.4 - Curva simulada - LF	103
5.5 - Curva de aplicação - LCP	104

LISTA DE TABELAS

2.1 - Propriedades dos fluidos utilizados	31
3.1 - Restrições por tipo de tomada de pressão	61
3.2 - Condições físicas	62
3.3 - Parâmetros de entrada	63
3.4 - Materiais utilizados	64
3.5 - Parâmetros vinculados ao fluido	65
3.6 - Fator de correção da viscosidade	66
3.7 - Parâmetros para gás	67
3.8 - Fator de correção para vapor	67
3.9 - Parâmetros para vapor	67
3.10- Localização das tomadas de pressão	69
3.11- Parâmetros dimensionados	71
3.12- Restrições de uso para K_e	74
3.13- Constantes da fórmula ISO	75
3.14- Determinação do erro em C	76
3.15- Determinação do erro em ε	76
4.1 - Condições operacionais dos exemplos	84
4.2 - Condições operacionais dos laboratórios	85
4.3 - Variáveis determinadas pelo programa	86
4.4 - Descrição dos laboratórios	88
4.5 - Instrumentos - LAT	90
4.6 - Instrumentos - LF	90
4.10- Instrumentos - LCP	90
4.11- Classificação dos erros - LAT	92
4.12- Classificação dos erros - LF	93
4.13- Classificação dos erros - LCP	94
5.1 - Seleção do exemplo 4.1	98



5.2 - Seleção do exemplo 4.2	98
5.3 - Seleção do exemplo 4.3	99
5.4 - Seleção do exemplo 4.4	99
5.5 - Seleção para os laboratórios	99
5.6 - Coeficientes de descarga - LAT	100
5.7 - Medidas de vazão - LAT	101
5.8 - Coeficientes de descarga - LF	102
5.9 - Medidas de vazão - LF	103
5.10 - Coeficientes de descarga - LCP	104

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

A- área da seção transversal do tubo	$[m^2]$
B- erro sistemático	$[-]$
C- coeficiente de descarga	$[1]$
D- diâmetro	$[m]$
E- energia,	$[J]$
Eq- Erro Quadrático Médio	$[-]$
F- força	$[N]$
H - diferencial de pressão registrado	$[N/m^2]$
M - massa	$[kg]$
P- pressão,	$[N/m^2]$
P- probabilidade (%)	$[1]$
Q- vazão volumétrica	$[m^3/s]$
Q- vazão em massa	$[kg/s]$
R- constante universal dos gases,	$[kJ/K.kmol]$
R- rugosidade de tubulação	$[mm]$
S- área da seção transversal de um escoamento unidimensional,	$[m^2]$
S- erro aleatório	$[-]$
T- temperatura absoluta,	$[K]$
T- período de pulsação	$[1/s]$
U- velocidade,	$[m/s]$

U- incerteza de medição	[-]
V- volume	[m ³]
d- diâmetro do orifício	[m]
e- energia específica,	[J/kg]
e- erro de medição	[-]
f- frequência de pulsação	[1/s]
g- aceleração da gravidade	[m/s ²]
h- entalpia	[J/kg]
k- coeficiente isentrópico	[1]
l- comprimento	[m]
p- pressão específica	[N/m ² kg]
q- vazão afetada pela pulsação	[kg/s]
q-calor	[J]
s- entropia ,	[J/kg K]
s-razão da duração efetiva de um pulso e o período de pulsação	[1]
t- tempo,	[s]
t-distribuição de Student	[1]
u- componente da velocidade	[m/s]
v- volume específico	[m ³ /kg]
w- componente da velocidade dependente do tempo	[m/s]
w- trabalho	[J]
x- variável deslocamento	[m]



x- número de medidas	[1]
y- variável resultante	[-]
z- variável	[-]

Obs.: As grandezas sem unidade [-] dependem da variável com que se trabalha.

ϵ_h - erro relativo na medida	[1]
ϵ_q - erro relativo no resultado	[1]
μ - viscosidade dinâmica	[N.s/m ²]
ν - viscosidade cinemática	[m ² /s]
ρ - massa específica/ densidade	[kg/m ³]
σ - taxa de aceleração local pela convectiva	[1]
ϕ - taxa de instabilidade (eq.43)	[1]
ω - frequência angular média	[1/s]
γ - peso específico	[N/m ³]
φ - umidade (%)	[1]

Obs.: Nos programas, os símbolos utilizados podem ser diferentes e são definidos no capítulo 3.



Coeficientes

$CE\beta^2\varepsilon$ - coeficiente de vazão	[1]
C - coeficiente de descarga	[1]
Cd - coeficiente de descarga para Rd	[1]
E - coeficiente de forma	[1]
β - relação de diâmetros	[1]
ε - fator de expansão isentrópico	[1]
Fa - fator de dilatação térmica	[1]
Fu - fator de umidade	[1]
Fv - fator de vapor	[1]

Números Adimensionais

N_H - número de Hodgson	[1]
N_S - número de Strouhal	[1]
Re - número de Reynolds	[1]
Rd - número de Reynolds no orifício	[1]
Rcr- número de Reynolds crítico	[1]



ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASME - American Society of Mechanical Engineering

AGA - American Gas Association

API - American Petroleum Institute

DIN - Deutsches Institut für Normung

ISO - International Organization of Standardization

INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial

LAT - Laboratório das Áreas Térmicas - FEG/UNESP

LF - Laboratório de Fluidos - FEG/UNESP

LCP - Laboratório de Combustão e Propulsão - INPE



CAPÍTULO 1- INTRODUÇÃO

1.1 . Revisão do Tema Medição de Vazão

A história da medição de vazão remonta à época da civilização egípcia, sendo referenciada por Frontins no ano de 90 dC. A partir do século XV, diversas pesquisas contribuíram com a técnica, como: do movimento da água de Leonardo da Vinci, da hidrostática de Galileu Galilei e do escoamento livre da água através de orifícios de Torricelli. No século XVIII, pesquisas foram feitas por Bernoulli com o estudo de Hidrodinâmica em 1738 e por Euler com as Equações diferenciais para líquidos perfeitos, utilizadas nas técnicas de medição de vazão. Pitot desenvolveu um dispositivo para medição da velocidade da água em 1732 e Venturi desenvolveu o dispositivo para medição em 1797(Delmée, 1989).

No século XIX os trabalhos sobre viscosidade de Poiseulle, sobre critério das semelhanças hidrodinâmicas de Stokes, sobre regimes turbulentos de Reynolds e os estudos aerodinâmicos de Prandtl e Kàrmàn possibilitaram o desenvolvimento de novas técnicas de medição de vazão. No final do século o tubo de Venturi foi utilizado por Herschel como medidor industrial.

Durante as duas últimas décadas a variedade de medidores de vazão tem aumentado significativamente, de forma que, no início dos anos 90, encontravam-se 15 diferentes técnicas para medição em conduto fechado e vinham aumentando. Segundo o princípio de funcionamento estas técnicas podem ser



classificadas em: elementos por diferencial de pressão, por área variável, tipo turbina, medidor magnético, de vórtices e ultra-sônicos. Dos tipos de medidores que trabalham por diferencial de pressão, são citados: venturi, bocal, tubo de Pitot e a placa de orifício. Conforme as características construtivas da placa de orifício estas podem ser denominadas por: segmental, 1/4, excêntrica e concêntrica. Sendo que esta última obteve maior aplicação industrial desde o início do século.(Ginesi, 1991)

Nos Estados Unidos da América (EUA), Weymeuth utilizou-a para medição de gás natural com tomadas de pressão tipo flange taps em 1903, e Hickstein utilizou-a com tomadas vena contracta taps em 1913, tendo sido ambas normalizadas pela AGA em 1935. Judd utilizou-a com formato excêntrico em 1916. Na Europa a técnica foi utilizada por Witte e Duchêre em 1933 (Delmée, 1989). Sendo que a predominância de uso nos EUA são tomada flange taps, normalizada pela ASME e na Europa são corner e radius taps, normalizadas pela ISO .

Desde então, a placa de orifício obteve crescente aplicação em diversos ramos industriais devido as vantagens apresentadas em relação a outros tipos de medidores de vazão. Nos anos 80 representavam a base mais expressiva de sistemas de medição na indústria química no Brasil, chegando a 80% nestas aplicações (Delmée, 1989). Com o desenvolvimento de outras técnicas, sua predominância vem diminuindo, mas ainda deve dominar esse setor até fins desse século (Ginesi, 1991).

Seja pela grande aplicação industrial ou pela quantidade de informações acumuladas, a placa de orifício tem sido referenciada em diversos



trabalhos. De trabalhos predominantemente teóricos (Valle et al., 1995 e Ferreira et al., 1996) a totalmente experimentais (Teyssandier, 1993), de trabalhos visando melhorar características, tais como performance (Morrison et al., 1993), calibração (Shen, 1989) e exatidão (Morrison et al., 1990) à influência de características próprias, como excentricidade (Miller et al., 1969) e rugosidade do orifício (Benedict et al., 1975). Ou em trabalhos comparativos para validação de métodos ou de coeficientes empíricos (Miller et al., 1974) e utilização em condições adversas, como escoamento pulsante (Arasi, 1992).

Essas informações acumuladas tem gerado diversos manuais, alguns dirigidos à orientação na seleção do medidor (Baker, 1992 e Delmée, 1989); outros sobre condições de medição (Benedict, 1975, Holman e Gajda, 1978). E outros ainda mais específicos, sobre calibração e acessórios (Doebelim, 1990 e Spitzer, 1990) e alguns mais especializados (Miller, 1996 e Spink, 1975).

Outros trabalhos foram feitos visando melhorar as técnicas de calibração, demonstrando preocupação com resultados obtidos na medição, em aspectos como: aquisição de dados (Ferreira et al., 1991), gerando padrões mais confiáveis (Pereira e Taira, 1991) e até mesmo padrões móveis (Shen e Ting, 1989). Nesse aspecto a confiabilidade dos dados gerados deve ser levada em consideração, e conceitos sobre planejamento experimental (Moffat, 1985), análise de incerteza (Lassahn, 1985) e como aplicar (Albernety et al., 1985) podem ser utilizados, tanto em laboratórios (Keyser, 1998) quanto no local onde se aplica o medidor (Ting e Shen, 1989).



Na medição de vazão em condições adversas, os trabalhos de Oppenhein e Chilton (1955), e de Brereton e Manbadi (1995) são referências importantes, e o intervalo entre os dois trabalhos, ou seja 40 anos, demonstra uma lacuna no aprimoramento da técnica com esses medidores. Nos artigos de Ginesi (1991) e de Arasi (1992) verifica-se que as técnicas para se medir adequadamente em escoamento pulsante possuem limitações e restrições. Sendo portanto um caso a ser pesquisado, apesar da existência de medidores específicos que atendem essas condições. Nesses casos alguns cuidados devem ser tomados na medição, desde a especificação do sistema de medição até a aquisição e tratamento dos dados (Maciejowski, 1996). Nos quais deve se levar em consideração a variação temporal e o número de amostras consideradas (Wyler, 1975).

1.2 .Aspectos da Medição de Vazão com Placa de Orifício.

Na seleção e medição de vazão com placa de orifício e similares, deve-se levar em consideração as características do fluido, do processo e da instalação; possibilidade de perda de carga, disponibilidade do diferencial de pressão, exatidão requerida, economia, facilidade de instalação, etc. Sendo que as vantagens apresentadas pela placa de orifício em relação a seus similares são em respeito ao baixo custo, exatidão, simplicidade de fabricação, instalação e de manutem



Todos os medidores descritos anteriormente, incluindo a placa de orifício possuem aplicações bem definidas e as características descritas, permitem uma seleção adequada buscando melhorar a performance. O princípio de cada um, restringe a aplicação para a qual foi concebido, necessitando de um especialista para a seleção do tipo mais adequado (Ginesi, 1991).

O princípio de funcionamento da placa de orifício é baseado na equação de Bernoulli, que do ponto de vista da corrente de fluido, quando esta passa pelo elemento gerador do diferencial de pressão é contraída, e a energia cinética da corrente aumenta em detrimento da energia potencial, então percebida pela pressão estática. Sendo sistemas conservativos as tomadas de pressão que as registram (Teyssandier et al., 1987) são colocadas em posição estratégica em ambos os lados do orifício, que transferem o sinal dessa pressão a um elemento secundário. Podendo o elemento secundário ser um simples manômetro inclinado a transdutores piezoelétricos. Assim a diferença de pressão registrada é relacionada com o quadrado da velocidade do fluido, com as propriedades termodinâmicas do fluido e as características geométricas da placa de orifício na obtenção da vazão (Spink, 1975).

A placa de orifício concêntrica (fig. 1.1) consiste em um disco de espessura (E) com um orifício centrado (d) de espessura (e), muitas vezes com um chanfro (45°), e variando de 0,15 a 0,80 sua relação (β) com o diâmetro interno do tubo (D), para aplicações em escoamentos com Reynolds (Re) variando de 10^4 a 10^7 .

Na prática o dimensionamento do orifício se faz assumindo um diferencial de pressão para a vazão máxima (Spink, 1975).

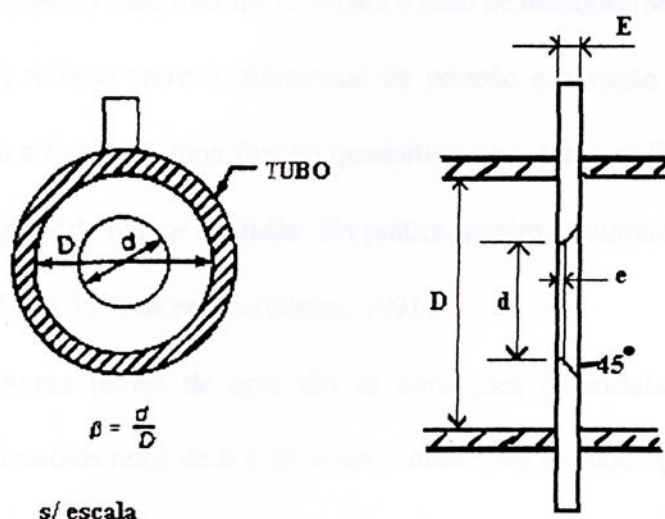


Figura 1.1 – Placa de orifício concêntrica

No entanto, no cálculo da vazão torna-se difícil levar em consideração todos os efeitos de um escoamento compressível e irreversível, o que torna o valor real sempre menor que o valor teórico. Para se obter o valor real, usa-se “o coeficiente de descarga (C)” (Miller e Kneiser, 1974), para corrigir o valor teórico dentro de uma determinada faixa de exatidão (Morrison, 1990). Esse coeficiente pode ser obtido diretamente da calibração do medidor ou de fórmulas empíricas normalizadas (Spitzer, 1990).

Em qualquer trabalho experimental, onde o sistema de medição e as condições operacionais inserem erros, deve se utilizar a análise de incerteza para

verificar se as condições assumidas, os instrumentos utilizados atingirão a exatidão esperada (Coleman, 1989). Alguns trabalhos citam valores de exatidão de 1 a 3% (Ginesi, 1991) para indústrias de um modo geral; no entanto, outros trabalhos tem considerado 5% (INPE) e até mesmo 12% para o caso de misturas (Morris, 1991).

A relação entre o diferencial de pressão e a vazão obtida define a curva que possui a forma de uma função quadrática, que torna as faixas de início e fim da escala regiões de menor exatidão. Na prática, porém costuma-se não fazer uso das regiões de 25% a 35% da escala (Ginesi, 1991).

Outras fontes de erro são as condições de instalação, como por exemplo: comprimentos retos de 6 a 20 vezes o diâmetros da tubulação após curvas de 90° a montante do medidor são recomendados para limitar os efeitos do erro a 0,5%. Opcionalmente faz-se uso de estabilizadores, porém esses causam um perfil não uniforme e mais turbulento aumentando a incerteza de coeficiente de descarga (C) em mais de 1% (Delmée, 1989).

Muitos escoamentos de interesse prático que possuem fenômenos periódicos associados, também podem ser fontes de erro. Por exemplo, escoamentos em compressores, turbinas, ventiladores, máquinas rotativas e motores de combustão interna. Esses escoamentos complexos necessitam de técnicas especiais para obtenção de detalhes a seu respeito; como por exemplo medir as componentes da velocidade simultaneamente com aquisição de dados periódicos e utilizar de análise para extrair detalhes do escoamento. (Menon, 1987)



Diversas normas regem esse tipo de medidores tais como :ASME, ISO, AGA, API, DIN e ABNT(1988 e 1989). Dentre estas, as mais citadas e utilizadas nas referências citadas são as normas: ASME (1971) e ISO (1980), além das normas para termos técnicos (INMETRO, 1995) e de normalização no cálculo de incertezas (ANSI/ASME, 1985). A norma indicada para se fazer medição em condições pulsantes é a ISO Thecnical Report (1978) que faz considerações ao tipo de onda, principalmente a senoidal, e das formas práticas de solucionar o problema da medição.

1.3 A Sistematização Desenvolvida

Sendo parte integrante de um projeto FAPESP, o Laboratório de Ensaio Fluidotermodinâmicos está sendo construído na UNESP - Campus de Guaratinguetá, com a finalidade de tratar de escoamentos reais e obter maiores detalhes a seu respeito. Dando continuidade a um trabalho iniciado desse projeto com medidores de vazão (Carrocci, 1995) desenvolveu-se essa dissertação.

Pretende-se que a sistematização possibilite a técnicos e alunos, acompanhar as diversas etapas da seleção de um medidor levando em consideração as condições reais em que o fluido estará submetido, consistindo na seleção de placa de orifício concêntrica e do tipo da tomada de pressão, com correções necessárias e



limitações de uso para minimizar os erros na obtenção da vazão; incluindo sua calibração e aplicação em condições adversas. Para isso, obtém-se a curva de calibração de maneira simulada, com a determinação do coeficiente de descarga e utilizando da análise de incertezas que considera as possíveis fontes de erro do processo de medição.

Para seleção foi desenvolvido o programa BETA em FORTRAN, que trata nas subrotinas o material da placa, o tipo de fluido, o tipo de tomada de pressão e as limitações de aplicação das condições operacionais considerando as limitações em função da relação de diâmetros (da tubulação e do orifício), do número de Reynolds; no caso de escoamento pulsante será também limitada pelo número de Hodgson.

Uma vez selecionada a placa de orifício, algumas propriedades termodinâmicas e parâmetros geométricos estarão definidos e são utilizados na determinação do coeficiente de descarga e da análise de incerteza, que auxiliarão na determinação da performance do sistema de medição. Na determinação do coeficiente de descarga são selecionadas fórmulas empíricas das normas ASME (FOXBORO) e ISO e empregadas no programa SIMULA de acordo com o tipo de tomada de pressão. Com isso, pode-se gerar uma curva que relaciona, a vazão medida considerando sua performance com o diferencial de pressão em condições operacionais, curva essa denominada curva simulada.

Devido a importância para a indústria, alguns aspectos fundamentais sobre escoamento pulsante serão abordados e suas aplicações sistematizadas através



CAPÍTULO 2 - CONCEITOS TEÓRICOS

Para embasamento da sistematização serão relacionadas algumas definições da termodinâmica e da mecânica dos fluidos, além de conceitos sobre o coeficiente de descarga, a calibração e a análise de incertezas, que serão utilizados para seleção e determinação da performance de placa de orifício. Inicialmente são apresentados conceitos básicos e as equações da conservação, considerando as irreversibilidades que são explicitadas em termos distintos para a equação da energia e da quantidade de movimento. Desconsiderando esses efeitos e em processo adiabático as equações são simplificadas, e com outras considerações obtém-se a equação de Bernoulli para formulação do cálculo de vazão. Por fim, é feita a caracterização do escoamento pulsante de interesse prático e visto que as irreversibilidades inserem erros nas medidas de vazão, para estimar esses erros são apresentados os números de Strohal, de Hodgson e do Erro Quadrático Médio.

2.1. Conceitos Fluidotermodinâmicos

2.1.1. Conceitos básicos

A vazão volumétrica de um escoamento, expressa o volume de fluido por unidade de tempo, sendo que a diferença entre essa vazão teórica e a vazão real pode ser representada pelo coeficiente de descarga (C).



2.1.2. Fatores que influenciam o coeficiente de descarga

Número de Reynolds

O número de Reynolds é uma relação das forças de inércia com as forças viscosas, sendo função da viscosidade, velocidade e diâmetro do tubo. Esse número caracteriza o escoamento, e a partir da definição do valor crítico ($R_{cr} = 5.000$) pode-se delimitar o regime em laminar ou turbulento. É também considerado como parâmetro modificador do coeficiente de descarga (C).

Perfil de Velocidade

O escoamento é freqüentemente medido em termos de velocidade. Quando diferentes porções movem-se em diferentes velocidades, isso afetam a exatidão da medição. O perfil de velocidade depende de uma combinação de fatores, incluindo as forças que agem para manter o movimento do fluido em taxas constantes para que a distribuição de velocidade seja simétrica ao longo do trecho de medição. Por sua vez o número de Reynolds depende da velocidade e consequentemente variando a vazão, o coeficiente de descarga variará.

Vena Contracta

Uma região muito instável se forma a jusante do medidor, conhecida por vena contracta (fig.2.1). A tomada de pressão nessa região deve ser evitada, pois



a pressão nesse ponto é afetada por efeitos viscosos, devido ao atrito com o tubo. A estabilidade somente é restaurada a $8 D$ a jusante (Spink, 1975) do elemento primário.

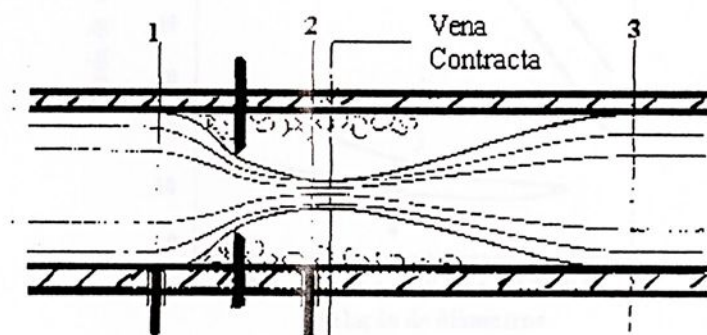


Figura 2.1 - Região da vena contracta

Perda de Carga Permanente

A restrição do elemento por princípio causa uma pressão diferencial entre as seções 1 e 2 (fig.2.1), nessa região o fluido tem um aumento contínuo de aceleração até um valor máximo que ocorre no plano da vena contracta e a partir daí uma deceleração; que faz com que a pressão na seção 3 não mais estabeleça os mesmos valores da seção 1. Esta perda de pressão é conhecida como perda de carga permanente, e pode ser uma limitação do uso desta técnica de medição. Dentre os medidores por pressão diferencial a placa de orifício é a que maior perda de carga apresenta (fig.2.2).

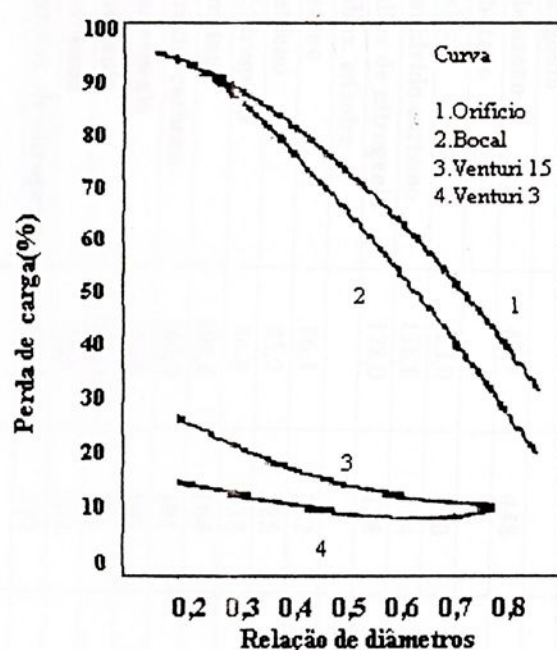


Figura 2.2- Perda de carga em diferentes medidores

2.1.3. Características e propriedades dos fluidos utilizados

A tabela (2.1), fornece as características e propriedades termodinâmicas dos fluidos utilizados, sendo que os três primeiros coeficientes da tabela são: a viscosidade, o coeficiente de Sutherland e o limite segundo a temperatura de trabalho. Utilizados para cálculo da viscosidade pela fórmula de Sutherland, nas condições operacionais. A seguir, para cada fluido são definidas a constante isentrópica, a densidade relativa, a massa específica, a temperatura e pressão críticas.

Tabela 2.1 -Fluidos utilizados

FLUIDO	viscosidade (10-6 N.s/m2)	Cm	LIMITE	k	DENS	RO (KG/M3)	Tc (K)	Pc (kPa)
acetileno				1,26	0,90	1,10	309,5	6250,0
amonia	83,1	503	L1	1,31	0,59	0,72	406,2	11425,0
ar atmosferico	173,0	125	L5	1,40	1,00	1,29	132,4	3771,0
argonio				1,67	1,38		151,2	4905,0
benzeno	67,7	448	L2		2,70		561,6	4833,0
butano				1,09	2,01	2,53	425,2	3797,0
cloro	123,0	350	L3					7977,0
anidrido carbono	138,0	254	L1	1,30	1,52	1,98	304,3	7382,0
diox de nitrogenio	178,0	128	L1					
diox. enxofre					2,21	2,93	430,3	6544,0
etano	86,1	252	L1		1,04	1,28	305,4	7866,9
etileno	83,9	225	L1		0,97	1,25	283,1	4883,0
hidrogenio	84,8	138	L6	1,41	0,07	0,09	33,3	5117,0
metano	100,0	164	L3	1,31	0,55		190,7	1315,0
oxido carbono	166,0	101	L1	1,40	0,97	1,25	134,3	4640,8
nitrogenio	166,0	105	L6	1,40	0,97	1,25	126,1	3499,0
oxigenio	192,0	195	L5		1,10	1,43	154,4	3399,0
propano	75,0	260	L1	1,13	1,52	1,89	370,0	5043,0
protox. de nitrogenio	136,0	210	L1					4249,2
				INF.(oC)	SUPER(oC)			
			L1	20	300			
			L2	130	315			
			L3	20	500			
			L4	300	825			
			L5	15	800			
			L6	20	800			

Fonte:Handbook of Compressed Gases 1990

2.1.4. Equações da conservação.

A equação da conservação da massa (1), para substância homogênea em estado e composição, fica representada por:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{S} \frac{\partial}{\partial x} (\rho U S) = 0 \quad (1)$$

Sendo que os efeitos das irreversibilidades aparecem mais explicitamente apenas na Equação da Quantidade de Movimento (2), representadas por $F_m(x,t)$ segundo Oppenheim e Chilton (1955).

$$\rho \frac{\partial U}{\partial t} + \rho U \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial x} = F_m(x,t) \quad (2)$$

Na equação da energia (3) o termo que representa a transferência de energia devido às reações irreversíveis em processo não adiabático, é representado por $F_e(x,t)$ e a equação diferencial quase-unidimensional derivada da primeira lei da termodinâmica, fica assim:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho e) + \frac{1}{S} \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho U S \left(e + \frac{p}{\rho} \right) \right] = F_e(x,t) \quad (3)$$

onde: $e = e_i + U^2/2$

A equação da energia (3) pode ser expandida em:

$$\rho \frac{\partial e}{\partial t} + \rho U \frac{\partial e}{\partial x} + \frac{1}{S} \frac{\partial}{\partial x} (pUS) + e \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{S} \frac{\partial}{\partial x} (\rho US) \right] = F_e(x, t) \quad (3a)$$

Sendo o termo entre colchetes a equação (1), a expressão (3a) fica:

$$\rho \frac{\partial e_i}{\partial t} + \rho U \frac{\partial U}{\partial t} + \rho U \frac{\partial e_i}{\partial x} + \rho U^2 \frac{\partial U}{\partial x} + U \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{p}{S} \frac{\partial}{\partial x} (US) = F_e(x, t) \quad (3b)$$

A soma dos 2º, 4º e 5º termos dessa expressão é segundo a equação (2) $UF_m(x, t)$ e pela equação (1) o último termo fica:

$$\frac{p}{S} \frac{\partial}{\partial x} (US) = -\frac{p}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + U \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) = \rho p \left(\frac{\partial v}{\partial t} + U \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (4)$$

Sendo os termos entre parênteses derivadas substanciais da energia interna e do volume específico respectivamente, então a equação da energia (3), fica:

$$\left(\frac{\partial e_i}{\partial t} + U \frac{\partial e_i}{\partial x} \right) + p \left(\frac{\partial v}{\partial t} + U \frac{\partial v}{\partial x} \right) = v [F_e(x, t) - UF_m(x, t)] \quad (5)$$

Da 2ª Lei da termodinâmica:

$$T \frac{Ds}{Dt} = \frac{De_i}{Dt} + p \frac{Dv}{Dt} \quad (6)$$

Substituindo os termos à direita (6), pela equação (5) que relaciona os termos irreversíveis, fica:

$$\frac{Ds}{Dt} = \frac{v}{T} [F_e(x, t) - UF_m(x, t)] \quad (7)$$

Desta equação (7) verifica-se que, se os efeitos das irreversibilidades não são considerados e o escoamento é adiabático, então $F_m = F_e = 0$ e a entropia é constante. Este é o caso, obtido diretamente da 2ª Lei para um sistema conservativo que não tem qualquer efeito irreversível (Oppenheim e Chilton, 1955). Nessas condições a equação da energia (8) e a equação da quantidade de movimento (8a), ficam representadas por:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho e) + \frac{1}{S} \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho U S \left(e + \frac{p}{\rho} \right) \right] = 0 \quad (8)$$

$$\rho \frac{\partial U}{\partial t} + \rho U \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad (8a)$$

Formulação para cálculo da vazão.

O esquema de funcionamento de um elemento diferencial de pressão que possui uma restrição na seção de teste (S), com tomadas de pressão nas seções 1 e 2 e que são registrados por um elemento secundário (H), é mostrado na figura (2.3)..

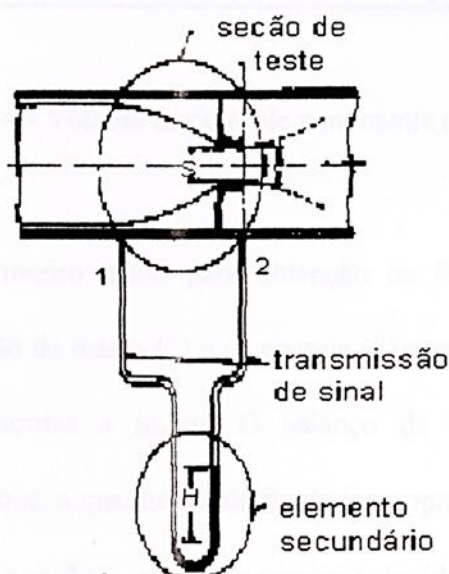


Figura 2.3 - Esquema do medidor de vazão por diferencial de pressão.

Na aplicação das equações de conservação nesse sistema, deve se focar o volume de controle (fig. 2.4) que permanece fixo próximo à restrição, delimitado pelas seções 1 e 2 perpendiculares ao escoamento e à parede do tubo (Spink, 1975).

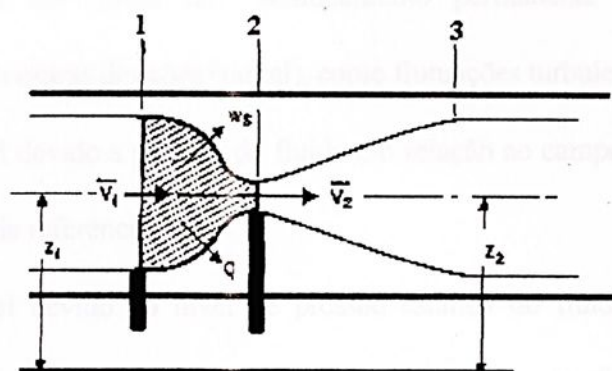


Figura 2.4 - Volume de controle a montante do medidor

O primeiro passo para obtenção da formulação é escrever as equações da conservação de massa (1) e da energia (8) para este volume de controle com as restrições descritas a seguir. O balanço de massa para escoamento permanente estabelece que, a quantidade de fluido incompressível que entra na seção 1 é a mesma que deixa a seção 2, ou seja, possuem velocidade uniforme e sem atrito ao longo de uma linha de corrente de modo que a pressão é uniforme através delas. Assim a equação da continuidade (9) pode ser descrita por:

$$\rho_1 U_1 A_1 = \rho_2 U_2 A_2 \quad (9)$$

Da mesma forma, as restrições para o balanço de energia que atravessa as fronteiras desse volume de controle (fig.2.4) em estado permanente, de forma que tanto o calor (q) quanto o trabalho (w) são considerados como interações, e são devido a quatro principais fatores:

- energia cinética em forma de deslocamento permanente na direção do escoamento e em outras direções (radial), como flutuações turbulentas;
- energia potencial devido a posição do fluido em relação ao campo gravitacional e um certo ponto de referência;
- energia potencial devido ao nível de pressão estática do fluido, considerando também o trabalho necessário para que o fluido atravessasse a superfície de controle;
- energia interna do fluido devido aos movimentos moleculares, sendo função principalmente da temperatura e em gases reais da densidade e pressão.

Assim a equação da energia (8) pode ser simplificada e o balanço dessas energias por unidade de peso pode ser representada pela equação de Bernoulli (10), descrita a seguir:

$$\frac{V_1^2}{2g} + z_1 + \frac{P_1}{\gamma_1} = \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + \frac{P_2}{\gamma_2} \quad (10)$$

Fórmula teórica incompressível.

Partindo das equações da continuidade (9) e de Bernoulli (10), para fluido preenchendo totalmente o tubo e incompressível, e desprezando o desnível entre as tomadas de pressão, ou seja $z_1 = z_2$ (fig. 2.4); podemos obter a

seguinte formulação que relaciona a velocidade na seção 1 com o diferencial de pressão provocado pelo elemento de teste de seção S:

$$U_1 = E\beta^2 \sqrt{2(p_1 - p_2) / \rho} \quad (11)$$

$$\text{onde.. } E = 1 / \sqrt{1 - \beta^4} \quad \beta^2 = S_2 / S_1$$

S_1 - área seção do tubo e S_2 - área da seção do orifício

Sendo a fórmula básica para cálculo da vazão:

$$Q = U.A \quad (12)$$

E substituindo (11) em (12), obtém-se equação (13) que determina a vazão por diferencial de pressão de seção de teste (S):

$$Q_{\text{Incomp}} = E\beta^2 . S_1 \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}} \quad (13)$$

Fórmula teórica compressível.

Quando um fluido passa pela restrição inserida na tubulação, a velocidade aumenta e a pressão diminui acompanhada de uma significativa

mudança na densidade. Isso caracteriza um aumento de energia cinética devido ao decréscimo da energia potencial e também da energia interna.

Esses fatores complicam a obtenção da vazão real, que necessita de informações sobre a pressão e temperatura a montante e a jusante, além do diferencial de pressão. Na prática assume-se que o processo é isentrópico entre as tomadas de pressão e então:

$$p_1 v_1^k = p_2 v_2^k = \text{constante} \quad (14)$$

$$v = \text{constante} / p^{\frac{1}{k}} \quad (14a)$$

O volume específico a montante é calculado usando a equação de estado de gás perfeito (15):

$$Pv = RT \quad (15)$$

Sendo o fluido um gás perfeito e na equação (14):

$$h_1 - h_2 = \int_{p_1}^{p_2} v(dP) \quad (16)$$

Usando a definição de entalpia (17):

$$h = \frac{p}{\gamma} + e_i \quad (17)$$

E considerando que não há variação de energia interna, da equação

(10):

$$h_1 - h_2 = \frac{U_2^2}{2} - \frac{U_1^2}{2} \quad (18)$$

Substituindo essa equação (18) em (16) e integrando:

$$U_2^2 - U_1^2 = 2 \frac{p_1}{\rho_1} \frac{k}{k-1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \quad (19)$$

Da equação da continuidade (9) e da relação de massas específicas:

$$U_1^2 = \beta^4 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{k}} U_2^2 \quad (20)$$

Que introduzida na equação anterior (19), deduz-se o fator de expansão isentrópica definido por:

$$\varepsilon = \left\{ \frac{p_1}{p_1 - p_2} \cdot \frac{1 - \beta^4}{1 - \beta^4 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{2/k}} \cdot \frac{k}{k - 1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{k-1/k} \right] \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{2/k} \right\}^{1/2} \quad (21)$$

Substituindo na equação (13) a expressão de ε obtida em (21) e introduzindo o coeficiente de descarga (C), a fórmula teórica compressível é dada por:

$$Q_{comp} = CE\beta^2 S_1 \varepsilon \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}} \quad (22)$$

Comparando-a com a fórmula incompressível (13) as únicas diferenças são o termo de ε e de C, que com as medidas de pressão e temperatura a montante podem ser calculados. No caso de placas de orifício, onde a expansão é radial e axial; torna-se necessário empregar equações empíricas para cálculo de ε (Miller e Kneiser, 1974).

2.2. Conceitos Experimentais e Estatísticos.

2.2.1. Coeficiente de descarga

O coeficiente de descarga (C) é definido como a relação entre a vazão real e sua correspondente vazão teórica (Miller e Kneiser, 1969). O valor real é determinado pelo peso ou volume de fluido que escoar num intervalo de tempo medido. O valor teórico é calculado pela equação (22) usando o diferencial de pressão e as propriedades do fluido, assim:

$$C = Q_{\text{real}} / Q_{\text{teórica}} \quad (23)$$

O coeficiente de descarga visa transformar adequadamente para uso prático a equação teórica para cálculo de vazão, levando em consideração os parâmetros do escoamento real. Esse coeficiente deve corrigir a equação de vazão teórica (22) devido aos seguintes fatores: geometria do orifício, perda de carga entre as tomadas de pressão, localização dessas tomadas, uniformidade do perfil de velocidade.

Pode-se dizer que C corrige a não unidimensionalidade do escoamento e a existência da camada limite devido a efeitos viscosos não considerados na equação da conservação (Ferreira et al., 1991).



Valores desse coeficiente tem sido amplamente estudados, e determinados experimentalmente, sendo função do diâmetro do tubo, do número de Reynolds e da relação de diâmetros, ou seja:

$$C = f(D, Re, \beta) \quad (24)$$

Para determiná-lo na prática, adota-se um valor usual de vazão para calcular um Re , que por hipótese é o mais freqüente, e quando tratar de valores de vazão maiores ou menores o erro será menor. No entanto, o que deverá determinar com qual exatidão deve se trabalhar é sua aplicação sendo a exatidão dos valores de C publicadas variam de 0,5 a 1,5% dependendo do elemento primário (Ginesi, 1991). Assim, o uso desses valores torna possível obter a vazão baseado na correção dos demais parâmetros sem necessidade de calibração.

2.2.2. Calibração e performance do medidor

Por definição, a calibração do medidor deve estabelecer em condições específicas, a relação entre valores indicados pelo instrumento de medição ou valores representados por um material de referência e os valores correspondentes das grandezas estabelecidos por padrões. Esse procedimento procura reduzir a diferença entre o valor teórico e o valor real, reduzindo os desvios sistemáticos da medição (INMETRO, 1995).



Quando a calibração é feita em laboratórios os equipamentos são mantidos em composição de exatidão, melhores que a exatidão do medidor que está sendo calibrado. Existem laboratórios com dispositivos de calibração para gases com exatidão de 0,5% que operam em até $7 \cdot 10^6$ Re (Spitzer, 1990).

Conceitualmente, uma maneira de calibrar medidores de vazão é fazendo correções na escala de medição, dentro de uma faixa de exatidão preestabelecida para escoamento ideal. Com isso, a composição de exatidão incluem as definições de precisão, linearidade e repetibilidade do medidor em condições de referência.

A exatidão do medidor também é afetada por outros parâmetros, tais como flutuações das condições operacionais e tolerâncias de construção e são considerados a parte na determinação do erro global de medição. Se uma placa é construída de acordo com as dimensões normalizadas e a localização das tomadas de pressão em ponto especificado, então pode-se obter com precisão de 0,4 a 0,8% de valores de C, através de fórmulas, tabelas e gráficos (ASME, 1971).

No entanto, estas condições não são usualmente conseguidas em aplicações industriais por serem freqüentemente impraticáveis e caras, nesses casos correções podem ser feitas por compensação e costumeiramente são utilizados coeficientes empíricos. Estas correções certificam, tão somente, que as medições foram feitas sob condições de escoamento similares à da instalação real. Para certificar que o elemento primário tem um grau de incerteza conhecido mas que não foi verificado experimentalmente com exatidão usa-se o fator de performance



(Sptizer, 1990) função do número de Reynolds equivalente definido teoricamente ou por extrapolação.

Nos casos em que os medidores não são calibrados, a performance é especificada em termos de probabilidade representando a habilidade de resposta do medidor na determinação da vazão. Um exemplo disto, é um medidor cuja performance está dentro de $\pm 1,5\%$ de exatidão com 95% de confiança (Spitzer, 1990).

2.2.3. Análise de incerteza na determinação da performance.

Para se determinar a performance de uma medida, ou seja sua exatidão e o nível de confiança com que essa foi determinada, utiliza-se da análise de incerteza envolvendo os erros de um processo de medição. A obtenção desse erro total pode ser feita por um processo de três etapas: calibração, aquisição de dados e tratamento dos dados. Assim os erros (e) em cada etapa são agrupados e o objetivo passa a ser listar os tipos de erro em cada etapa.

Numa medição, cada erro (e_j) presente combinar-se-á de várias maneiras com outros erros, aumentando sua incerteza.. A estimativa dessa incerteza (U_x), devido a todos esses erros pode ser feita pelo método raiz da soma dos quadrados (RSS) , assim (Moffat, 1985).



$$U_x = \pm [e_1^2 + e_2^2 + e_3^2 + \dots + e_k^2]^{1/2} = \pm \left[\sum_{j=1}^k e_j^2 \right]^{1/2} (P\%) \quad (25)$$

Em condições pré-determinadas, a estimativa estatística do erro total (e) de medição. (fig.2.5) é feita pela soma do erro sistemático (B) e do erro aleatório (S) de um valor medido x' (Figliola, 1991). Assim o valor real (x) relacionado através da incerteza (U_x) é

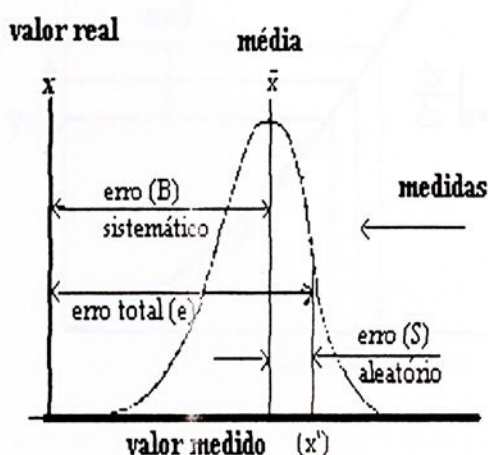


Figura 2.5 -Erros relacionados com um valor medido

Portanto na equação (25), agrupando os erros em sistemáticos e aleatórios (Albernethy, 1985):

$$U_x = \pm [B_x^2 + tS_x^2]^{1/2} (P\%) \quad (26)$$

Muitas vezes uma variável medida (x) vai ser relacionada com outras variáveis para determinar um parâmetro resultante ($\bar{y}$) (fig.2.5), mas as incertezas nas medidas das diversas variáveis afetam a incerteza do parâmetro resultante de maneira a aumentá-la (Moffat, 1988).

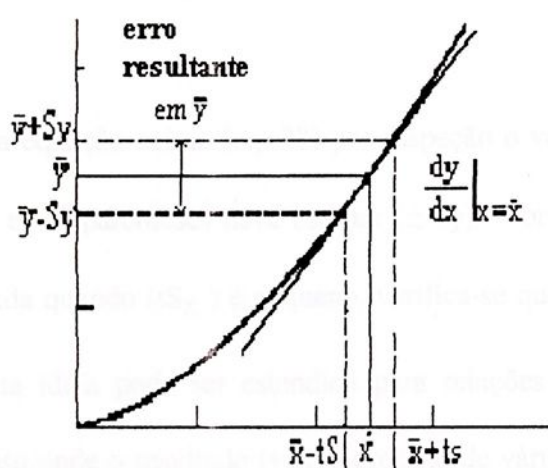


Figura 2.6- Relação entre uma variável e o resultado

Supondo que algumas medidas ($\bar{x}$), tenham sido obtidas nas mesmas condições operacionais e estabelecido seu erro (tS_x) e desprezando outros erros, o valor real de (x) estará dentro do intervalo ($\bar{x} \pm tS_x$). Seria então, razoável esperar que o valor real de y , que é determinado através da variável medida x , encontre-se no intervalo definido por:

$$\bar{y} \pm \delta y = f(\bar{x} \pm tS_x) \quad (27)$$

Que aplicando uma expansão em série de Taylor, fica:

$$\bar{y} \pm \delta y = f(\bar{x}) \pm \left[\left(\frac{dy}{dx} \right) (tS_x) + \frac{1}{2} \left(\frac{d^2y}{dx^2} \right) (tS_x)^2 + \dots \right] \quad (28)$$

Na equação acima (eq. 28) por inspeção o valor para $f(\bar{x})$ deve ser $(\bar{y})$, e o termo entre parênteses deve estimar $(\pm \delta y)$. Por aproximação linear para (δy) , que é válida quando (tS_x) é pequeno, verifica-se que (U_y) será estimado por $(dy/dx)U_x$. Esta idéia pode ser estendida para relações com multivariáveis; considerando um caso onde o resultado (y) é o produto de vários termos (eq.29), os termos da incerteza relativa (eq.29a) podem ser encontrados por $(\delta y/y)$. (Moffat, 1988)

$$y = x_1^a x_2^b \dots x_n^N \quad (29)$$

$$\frac{\delta y}{y} = \left[\left(a \frac{\delta x_1}{x_1} \right)^2 + \left(b \frac{\delta x_2}{x_2} \right)^2 + \dots + \left(N \frac{\delta x_n}{x_n} \right)^2 \right] \quad (29a)$$

Essa equação aplicada a fórmula da vazão (eq. 22) determina a contribuição de cada parâmetro na incerteza final do sistema de medição.



Figura 2.7 - Contribuição de cada variável para a incerteza

De acordo com a equação de propagação de incerteza (eq. 2.1), a incerteza final

é dada pela soma das contribuições de cada variável para a incerteza final do sistema de medição.

2.3. Escoamento Pulsante

Entender o comportamento desse tipo de escoamento pode fornecer informações importantes. Por isso, medições são dependentes da posição aleatória da partícula no escoamento, onde cada ponto corresponde a uma fase particular do processo, por isso deve ser feita uma medição sincronizada com os efeitos periódicos, pois uma medição em tempo médio dissolveria a influência desses efeitos. (Menon, 1987)

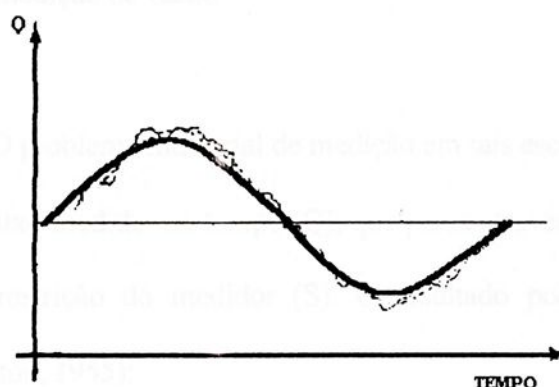


Figura 2.7- Caracterização do escoamento pulsante

Da caracterização de escoamento pulsante (fig.2.7), e desprezando a possibilidade de variação da velocidade com o tempo, para valor médio, define-se:

$$U(x, t) = \bar{U}(x)[1 + w(t)] \quad (30)$$

Onde $w(t)$ função periódica simétrica de tempo, deve satisfazer a seguinte condição:

$$\begin{aligned} \int_0^T w(t) dt &= 0 \\ w(T) - w(0) &= 0 \end{aligned} \quad (31)$$

2.3.1 Problema da medição de vazão

O problema industrial de medição em tais escoamentos consiste na determinação do fluxo medido no tempo (Q), que passa através da seção (A) de um duto e seção de restrição do medidor (S). O resultado pode ser expresso por (Oppenheim e Chilton, 1955):

$$\bar{Q} = \frac{1}{T} \int_0^T \int_A \rho_i U_i dA dt \quad (32)$$

A densidade média a partir da densidade instantânea é :

$$\rho \equiv \frac{1}{A} \int_A \rho_i dA \quad (33)$$

E o escoamento definido a partir da velocidade normal da partícula é:

$$U = \frac{1}{A\rho} \int_A \rho_i U_i dA = \frac{\int_A \rho_i U_i dA}{\int_A \rho_i dA} \quad (33a)$$

Levando estas expressões na equação (32) de $\bar{Q}$, obtém-se:

$$\bar{Q} = \frac{A}{T} \int_0^T \rho U dt \quad (34)$$

Esta aproximação serve para caracterizar as análises deste problema, sendo o sistema unidimensional e considerando somente as equações de escoamento na direção axial expressas em termos de ρ e U ; e desprezando as diferenças entre a quantidade de movimento real e aquelas correspondentes a U , tem-se que:

$$\bar{Q} = K \frac{A}{T} \int_0^T \rho U dt = KA \left(\bar{\rho U} \right)_s \quad (35)$$

onde: $K = \bar{S\bar{Q}} / A\bar{Q}_s$

e $\bar{Q}$ vazão total e $\bar{Q}_s$ vazão na seção S.

Na aplicação desta fórmula, K é um parâmetro que representa os efeitos de irreversibilidades para sistema conservativo e, portanto processo adiabático e de entropia constante. Considerando o escoamento incompressível e redefinindo a equação (35):

$$\bar{Q} = K\sqrt{\bar{H}} \quad (36)$$

$$\text{onde: } K = CA_2 \sqrt{2\rho / 1 - (S_2 / S_1)^2} \quad (37)$$

Porém o resultado da medição de escoamento permanente é:

$$\bar{Q}_m = K'\sqrt{\bar{H}} \quad (38)$$

Da equação (36) assumindo $K'=K$, pode-se estimar o erro no resultado da vazão devido a diferença entre a medida e o valor médio, como:

$$\varepsilon_q = (\bar{Q}_m - \bar{Q}) / \bar{Q} = \sqrt{\bar{Q}^2 / \bar{Q}} - 1 = \sqrt{\bar{H} / H_0} - 1 \quad (39)$$

onde a pressão diferencial correta (H_0) é avaliada por:

$$H_0 = (\sqrt{H})^2 \quad (40)$$

E portanto da equação (38):

$$H_0 = \frac{1}{K^2} (\bar{Q})^2 \quad (41)$$

E o erro na medição de H , devido a diferença entre o valor real e o valor médio correto é:

$$\varepsilon_h = \frac{\bar{H} - H_0}{H_0} = \frac{\bar{Q}^2}{(\bar{Q})^2} - 1 \quad (42)$$

As flutuações da velocidade local nem sempre são conhecidas, e conseqüentemente, a maioria dos trabalhos são voltados para o problema mais prático de determinação do erro de medição devido a influência da pulsação na pressão local, baseado em escoamento quase-permanente. Em geral, esse erro depende da frequência de pulsação e da forma de onda, e somente este último pode ser estudado com base na análise do escoamento quase-permanente, pois quando o termo representante da aceleração local na equação de movimento é desprezado, a frequência é eliminada. Para ondas simétricas e de pequena amplitude da pressão pulsante, o erro de medição é menor que 1% (fig.2.8) e o efeito da forma de onda pode ser desprezado.

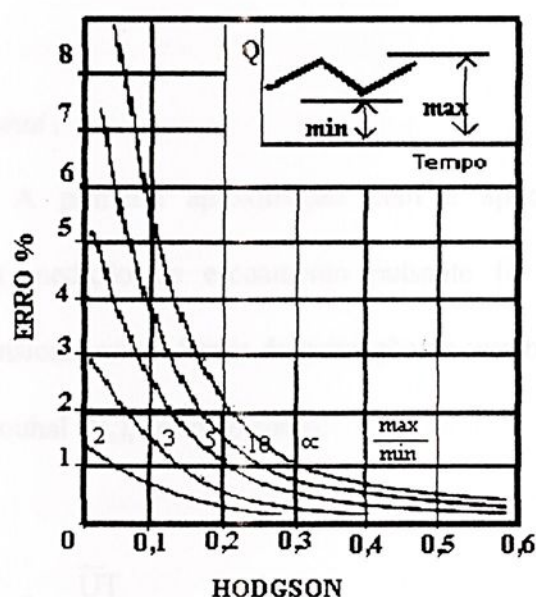


Figura 2.8- Efeito da forma de onda no erro de medição

Fonte: Oppenheim (1955).

A solução requerida para este problema passa a depender do método de registro de dados, sendo possível duas alternativas: medição instantânea ou em tempo médio. Sendo essa última a mais usada, onde a medição pode ser feita com instrumentos existentes para escoamento permanente e o problema é reduzido a determinação do erro introduzido pela pulsação.

2.3.2. Meios de caracterizar o erro na medição

Número de Strouhal.

A primeira aproximação com a aplicação da teoria quase-permanente para medição de escoamento pulsante foi feita introduzindo um parâmetro adimensional como forma de indicação da instabilidade, que é o inverso do número de Strouhal (N_s), definido como:

$$\Phi = \frac{\bar{U}T}{D} \quad (43)$$

O problema aqui passa a ser a especificação dos limites de aplicabilidade da solução permanente em escoamentos não permanentes. A equação da quantidade de movimento (8) sugere como critério uma relação da aceleração local com a aceleração convectiva (σ), e considerando o fluxo de corrente, esta relação pode ser relatada por uma frequência adimensional ou, o número de Strouhal (eq.44), que para aplicação em solução permanente deve ser muito pequeno.

$$N_s(\sigma) \equiv \frac{Df}{\bar{U}} \ll 1 \quad (44)$$

Baseado em experiências, recomenda-se que para $N_s < 2.10^{-3} (\phi \geq 510)$, os efeitos são desprezíveis, isto é, o escoamento pode ser tratado como quase-permanente que para medição recomenda-se o uso de um orifício com um by-pass.

Número de Hodgson

Alguns trabalhos relacionam o erro da medição, visando determinar ou eliminar estes erros em termos de condições locais da medição sem qualquer referência às características da fonte de pulsação baseados em escoamentos incompressíveis quando na verdade são compressíveis. Uma alternativa baseada em trabalhos experimentais tem sido o número de Hodgson, a figura (2.9) mostra as características de um sistema que pode ser representado por este número, e relaciona as variáveis do processo de medição descritas na equação (45).

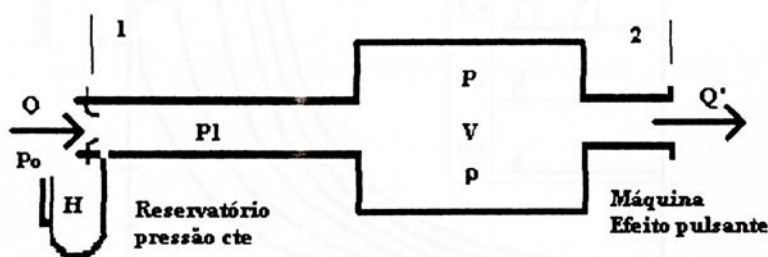


Figura 2.9 - Sistema de Hodgson

$$N_H = \frac{V f \overline{P_o - P}}{\overline{Q} \overline{vP}} \quad (45)$$

O erro do sistema ε_q é mostrado no diagrama (fig.2.10) e inclui o efeito de cutoff (s) relacionados pelo número de Hodgson modificado (eq.46).

$$N_H' = (1-s) \sqrt{2,04 / \varepsilon_q} \quad (46)$$

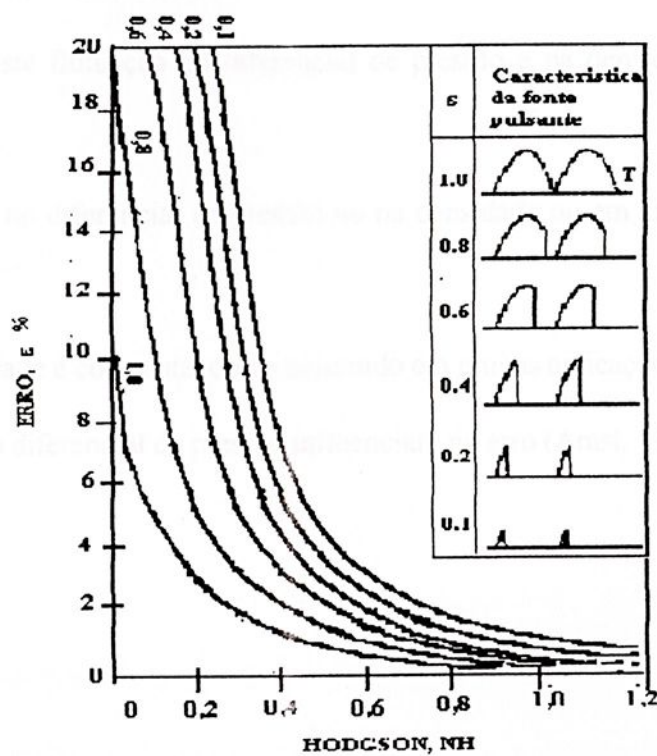


Figura 2.10- Curva de erro com efeito cutoff

Fonte: Oppenheim (1955).

Erro Quadrático Médio

Se medirmos H e ρ num período $(t_2 - t_1)$ e, a variação será determinado pelo o erro quadrático médio:

$$Eq = \sqrt{\left(\frac{1}{2} \sum H_i \rho_i\right) - \frac{1}{2} \sum \sqrt{(H_i \rho_i)}} \quad (47)$$

Matematicamente, demonstra-se que Eq é sempre positivo e pode-se tirar as seguintes conclusões:

- Se não existe flutuação no diferencial de pressão e na densidade, então o erro desaparece.
- Flutuações no diferencial de pressão ou na densidade ou em ambos, influenciam no erro
- Se a densidade é constante, como assumido em muitas aplicações, somente a variação no diferencial de pressão influenciará no erro (Arasi, 1992).

CAPÍTULO 3 - A SISTEMATIZAÇÃO DESENVOLVIDA

O programa BETA em FORTRAN foi desenvolvido para seleção de placa de orifício concêntrica e do tipo da tomada de pressão em condições operacionais e fazendo as correções necessárias para minimizar os erros. Com isso, algumas variáveis termodinâmicas e geométricas são definidas, e utilizadas no programa SIMULA para determinação do coeficiente de descarga e que com a análise de incerteza das demais variáveis determinarão a performance do sistema de medição. Pode-se então gerar a curva da vazão com as incertezas pelo diferencial de pressão nas condições operacionais, além de limitar as variáveis que influenciam no escoamento pulsante, com o número de Hodgson para se estimar o erro associado.

3.1 . Seleção de Placa de Orifício - Programa BETA.

Este método é uma sistematização para a seleção de placas de orifício de acordo com normas internacionalmente adotadas, que tratam com critério as condições termodinâmicas do fluido, de operação e de localização das tomada de pressão, que consistem em restrições (tab. 3.1) em sua aplicação (Baker, 1992; Delmée, 1939; Holm 1973; Sptizer, 1990; Spink, 1975 e Miller, 1996).

378

FACULDADE DE ENGENHARIA
DE GUARATINGUETÁ
BIBLIOTECA



Tabela 3.1 - Restrições por tipo de tomada de pressão.

	Flange	Vena	Radius	Corner	Pipe
β	0,15-0,75	0,10-0,80	0,15-0,75	0,22-0,80	0,20-0,75
DI (mm)	50-760	50-760	50-760	50-1000	50-300
Rd	$8 \times 10^3 - 10^7$	$6 \times 10^3 - 10^7$	$8 \times 10^3 - 10^7$	$5 \times 10^3 - 10^7$	$1,4 \times 10^4 - 10^7$
DI/R >	1000	1000	1000	3400	1000
Dp/p1 $\geq$	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25

Fonte: ASME (1971) e ISO (1980)

O método utiliza de parâmetros tais como diâmetro interno (DI), relação da rugosidade com o diâmetro da tubulação (R/DI), e diferencial de pressão (Dp/p_1); para obter características do escoamento e da geometria da placa, como: número de Reynolds (Re), perda de carga permanente (Δw), coeficiente de vazão ($CE\beta^2\epsilon$), relação de diâmetros (β) e o diâmetro do orifício (d). Para uso de todas informações, foi necessário elaborar o programa em FORTRAN denominado "BETA.FOR", para escoamentos em gases e vapores, com 34 KB do programa fonte e 229 KB do programa executável.

Na estrutura (fig. 3.1) do programa foram utilizadas subrotinas (anexo B) para entrada de dados, escolha do material da placa, do fluido de trabalho e do tipo de tomada de pressão. As condições físicas (Tab.3.2) assumidas para o fluido são definidas como: de projeto ou de processo (p) e as de referência (r).

Tabela 3.2- Condições físicas

Condição	Projeto	Referência
pressão (Pa)	Pp	1.10^5
temperatura (K)	Tp	273,15
umidade (%)	Fi (φ)	0

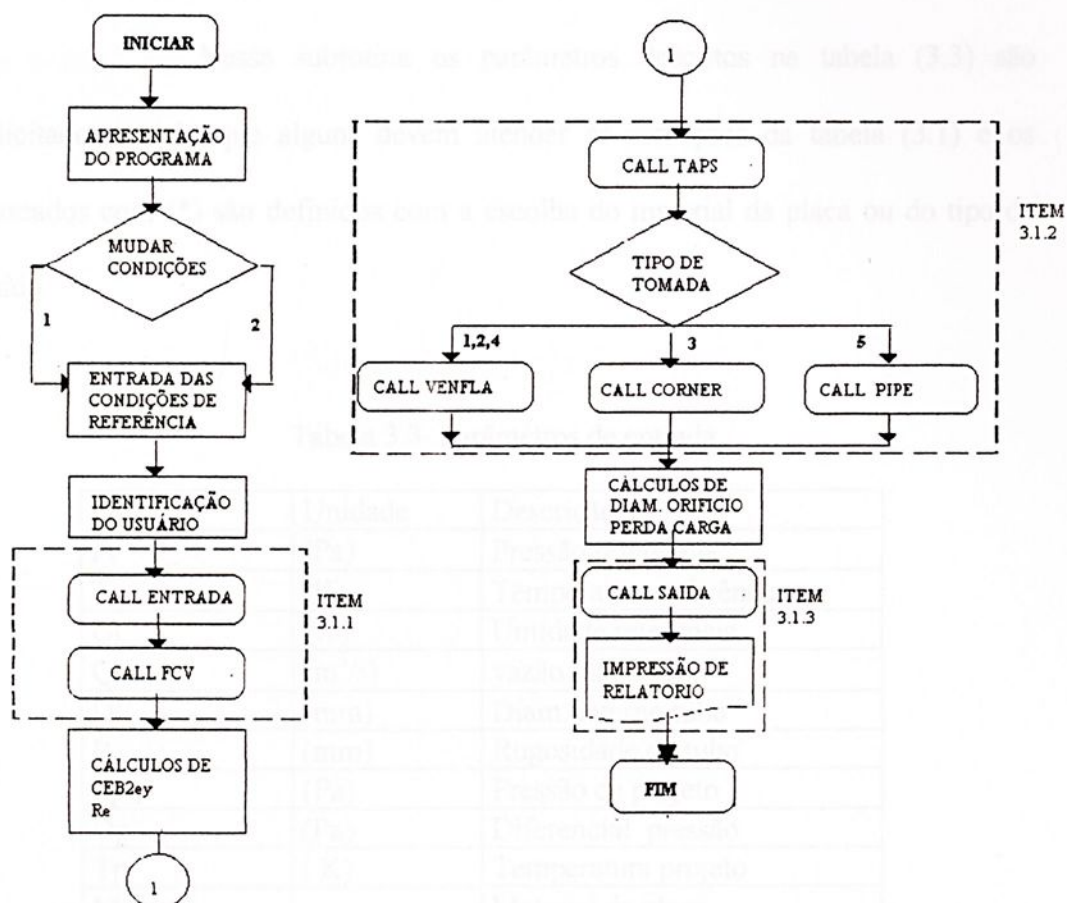


Figura 3.1 - Estrutura do programa "BETA"

Como relatório final (Anexo A), o programa fornece os parâmetros de entrada e os calculados. Para auxiliar na utilização do programa, foi elaborado um

Guia (Anexo C) com as possíveis mensagens de erro e onde encontrar tabelas dos parâmetros utilizados.

3.1.1. Subrotina ENTRADA

Nessa subrotina os parâmetros descritos na tabela (3.3) são solicitados, sendo que alguns devem atender as restrições da tabela (3.1) e os marcados com (*) são definidos com a escolha do material da placa ou do tipo de fluido.

Tabela 3.3- Parâmetros de entrada

Símbolo	Unidade	Descrição
Pr	(Pa)	Pressão referência
Tr	(K)	Temperatura referência.
Ur	(%)	Umidade referência
Qm	(m ³ /s)	vazão máxima
DI	(mm)	Diam. interno tubo
R	(mm)	Rugosidade do tubo
Pp	(Pa)	Pressão de projeto
Dp	(Pa)	Diferencial pressão
Tp	(K)	Temperatura projeto
Mp*	--	Material da placa
Fa *	(1)	Fator dilatação térmica
Vd**	(N.s/m ²)	Viscosidade dinâmica
k **	(1)	coeficiente isentrópico

* valores tabelados

** valores determinados pelo programa.



Escolha do Material

Os materiais mais comumente utilizados na confecção de placas de orifício são apresentados na tabela (3.4), porém outros tipos de materiais em condições específicas podem ser usados. Uma vez selecionado o material, dois parâmetros são definidos: o material da placa (MP) e o valor de lambda (LD) que são usados no cálculo do fator de dilatação (Fa), para temperaturas superiores a 423 K (150 °C).

$$Fa = 1 + (Tp - 293) * 2 * LD \tag{48}$$

Tabela 3.4 - Materiais utilizados

MP	material (MP)	λ (LD).(10 ⁻⁶ 1/°C)
1	aço carbono	14
2	bronze	18,5
3	aço inox 304/316	17
4	aço inox 410/430	11
5	monel	15

Fonte: Delmée (1989)

Tipo de Fluido

Os fluidos de trabalho considerados são apresentados na tabela (2.1, e a escolha de algum define uma série de parâmetros (tab.3.5) apresentados a seguir e utilizados nos cálculos.

Tabela 3.5 - Parâmetros vinculados ao fluido

parâmetro	descrição	unidade
gás	numero referente ao tipo	-
G	Tipo- nome comercial	-
Mi	viscosidade CNTP	N.s/m ²
Cm	coeficiente de Sutherland	(1)
Lim	limite de aplicação pela temperatura	-
k	coeficiente isentrópico	(1)
DR	densidade relativa	(1)
Ro	massa especifica	Kg/m ³
MM	massa molecular	Kg/mol
Tc	Temperatura critica	K
Pc	pressão critica	KPa

Fluido - Gás

Uma vez definido o gás (L=1) como fluido de trabalho, o programa entra na escolha do tipo(G) de gás que fornece a descrição do nome comercial e os parâmetros relacionados(tab.3.5), que servirão para cálculo da viscosidade dinâmica e, da temperatura (TF) e da pressão de referência (PF).

$$VD = Mi * [(Tp)/273]^{-.5} * (273 + Cm)/(Tp + Cm) \quad (49)$$

$$TF = Tp / Tc \quad (50)$$

$$PF = Pp / Pc \quad (51)$$

Definido TF e PF, escolhe-se o fator para correção da viscosidade (FCV) conforme tabela (3.6), sendo que TF deve estar entre 0,8 e 2,8 e PF entre 0,1 e 10, caso contrário FCV é igual a 1,0.

Caso a equação (49) não se aplique em função de Tp ser maior ou menor que os limites relacionados na tab. (2.1), deve-se entrar com o valor de Vd nas condições de projeto. No caso específico do ar atmosférico, esse valor deve estar entre 12 e 40 $(10^{-7} \text{ N.s/m}^2)$.

Tabela 3.6 - Fator de correção da viscosidade

(> TF ≤)	(>PF ≤)	FCV
0,80 - 0,85	0,10 - 0,15	1,20
	0,15 - 0,20	1,40
0,85 - 0,90	0,15 - 0,20	1,15
	0,20 - 0,25	1,30
	0,25 - 0,30	1,45
0,90 - 0,95	0,20 - 0,40	1,30
	0,40 - 0,50	1,60
0,95 - 1,00	0,20 - 0,40	1,15
	0,40 - 0,80	1,50
1,00 - 1,02	0,20 - 0,80	1,25
	0,80 - 1,00	1,75
	1,00	2,60
	1,00 - 1,50	3,60
	1,50 - 2,00	5,00
	2,00 - 3,00	5,50
	3,00 - 5,00	6,50
1,02 - 1,05	0,40 - 0,80	1,20
	0,80 - 1,00	1,40
	1,00 - 1,50	2,40
	1,50 - 2,00	3,80
	2,00 - 5,00	5,00
1,05 - 1,10	0,40 - 0,80	1,20
	0,80 - 1,00	1,40
	1,00 - 1,50	2,00
	1,50 - 2,00	2,80
	2,00 - 5,00	3,80

(> TF ≤)	(>PF ≤)	FCV
1,10 - 1,20	0,40 - 0,80	1,20
	0,80 - 1,00	1,30
	1,00 - 1,50	1,70
	1,50 - 3,00	2,60
	3,00 - 5,00	3,80
1,20 - 1,30	0,50 - 1,00	1,20
	1,00 - 1,50	1,50
	1,50 - 2,50	1,90
	2,50 - 5,00	2,60
1,30 - 1,50	0,50 - 1,00	1,20
	1,00 - 1,50	1,40
	1,50 - 2,50	1,75
	2,50 - 5,00	2,10
1,50 - 2,00	0,70 - 1,00	1,15
	1,00 - 2,00	1,30
	2,00 - 5,00	1,75
2,00 - 2,50	1,00 - 5,00	3,80
	5,00 - 10,0	1,65

Fonte: Delmée(1989)

Então a viscosidade corrigida (eq.52), e os demais parâmetros para gás (tab.3.7) são determinados por:

$$V_d = F_{CV} \cdot V_D \quad (52)$$

Tabela 3.7 - Parâmetros para gás:

Zr *	(1)	fator compressibilidade
Zp	(1)	fator compres. Projeto
Dr **	(1)	Densidade relativa
Fi	(%)	umidade relativa fluido
Ps **	(KPa)	Pressão saturação

Fluido - Vapor

Sendo o fluido escolhido vapor ($L=2$), a sua quantidade estará limitada entre 95 e 99%, para as quais há um fator de correção (tab. 3.8) e os demais parâmetros (tab.3.9).

Tabela 3.8- Fator de correção para vapor

quantidade	FV
95%	1,075
96%	1,061
97%	1,044
98%	1,030
99%	1,014

Fonte: Delmée (1989)

Tabela 3.9- Parâmetros para vapor:

Me*	(N/m ³)	Massa específica
Vc*	(m ² /s)	Viscosidade cinemática
Fv*	(1)	Fator de correção umidade

3.1.2. Cálculos dos coeficientes e fatores de correção

Fator de compressibilidade (Fs) e de umidade (Fu)

$$F_s = \sqrt{Z_r / Z_p}$$

$$P_{vp} = F_i.P_s$$

(53)

$$P_{vr} = U_r.P_s$$

$$F_u = (1 - P_{vp} / P_p) / (1 - P_{vr} / P_r) \cdot \sqrt{(1 + P_{vp} / P_p)} \cdot \sqrt{(0,622 / D_r - 1)}$$

(54)

Fórmula da vazão corrigida.

Considerando todos os fatores de correção na equação (22):

$$Q_{\text{real}} = CE\beta^2 F_a.F_u.F_s.S_1.\varepsilon\sqrt{\frac{2(D_p)}{\rho}} \quad (55)$$

Coeficiente de vazão e Reynolds

• Fórmulas para gases.

$$CE\beta^2\varepsilon = Q_m.Pr(T_p.D_r / P_p.D_p)^{1/2} / 18,8185.DI^2.Tr.F_a.F_s.F_u \quad (56)$$



$$Re = 0,004436(0,7Q_m)Pr.Dr[(P_p - P_{vp}) + (0,622 / Dr)P_{vp}] / [(P_p - P_{vp})Tr.Zr.DI.Vd] \quad (57)$$

• Fórmulas para vapor:

$$CE\beta^2\varepsilon = Q_m.Me / [1,1107.DI^2Fa.(Me.Fv.Dp)^{1/2}] \quad (58)$$

$$Re = 1,273(0,7Q_m)Me / (.DI.Vd) \quad (59)$$

3.1.3. Subrotina TAPS

Descrição dos tipos de tomada de pressão

Os tipos de tomada de pressão (tab.3.10) são baseados na colocação de transmissores de sinal, a montante e a jusante do elemento primário, que registrarão a pressão diferencial.

Tabela 3.10 - Localização da Tomada de Pressão

Tipo	Distância a montante		Distância a jusante	
	pol.	mm	pol.	mm
Flange Taps	1"	25,4	1"(J)	25,4
Vena contracta	½ a 2" D	12,7- 50,8 D	0,34 a 0,84 D	
Corner Taps	junto		junto	
Radius Taps	1" D	25,4D	½" D (M)	12,7 D
Pipe Taps	2 ½" D	63,5	8" D (M)	203,2 D

(M) = medido a partir da montante (J)=a partir da jusante

Fonte: ASME (1971) e ISO(1980)



Considerando a condição de transição (crítica) em Re_{cr} igual a 5000 ou calculando em função de β , e as correções necessárias para o caso de escoamentos reais, o programa passa para a subrotina que utiliza de coeficientes empíricos no cálculo do fator isentrópico. Nessa subrotina o valor de β é calculado iterativamente até que o erro residual seja menor que 10^{-4} .

Fator de expansão isentrópico

- Para tomadas flange, vena contracta ou radius taps

$$\varepsilon = 1 - \left(0,41 + 0,35\beta^4 \left(\frac{Dp}{P_1} \right) \right) \frac{1}{K}. \quad (60)$$

- Para corner taps:

$$\varepsilon = 1 - \left(0,3703 + 0,3184\beta^4 \right) \left[\left(1 - \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{K}} \right]^{0,935} \quad (61)$$

- Para pipe taps:

$$\varepsilon = 1 - \left[0,333 + 1,145(\beta^2 + 0,7\beta^5 + 12\beta^{13}) \left(\frac{Dp}{P_p} \right) \cdot \frac{1}{K} \right] \quad (62)$$

3.1.4. Cálculos finais e relatório.

Diâmetro do orifício e perda de carga

$$d = \beta . Di$$
 (63)

$$\Delta \omega = \left[\left| 1 - CE \beta^2 \varepsilon / \varepsilon \right| / \left| 1 + CE \beta^2 \varepsilon / \varepsilon \right| \right] Dp$$
 (64)

Tabela 3.11 - Parâmetros dimensionados

Mp	-	Material da placa
Tipo	-	tomada de pressão (Taps)
Re	(1)	número de Reynolds
CEβ²ε	(1)	coeficiente de vazão
Δw	(Pa)	perda de carga permanente
β	(1)	Relação de diâmetros
d	(mm)	diâmetro do orifício

Obs.: ver relatório no anexo A

3.2. Determinação da Performance como Simulação da Calibração

A determinação da performance se inicia com o cálculo do coeficiente de descarga através de fórmulas empíricas relacionados às condições operacionais, já determinadas e que aqui estão representadas através do número de Reynolds no orifício (R_d), a partir do qual determina-se o coeficiente de descarga nas condições operacionais (C_d).

A faixa de aplicação para C_d , varia de 10^4 a 10^7 Reynolds, porém para cada número de Reynolds há um coeficiente de descarga correspondente, e para definir um valor do coeficiente de descarga operacional, usa-se uma variação de 0,8% (Doebelim, 1990) a 1,2 % (Ting e Shen, 1989), para os quais os valores encontrados tem-se mostrado consistentes.

Com o coeficiente de descarga, sua faixa de aplicação operacional e os parâmetros determinados (programa BETA), são utilizados na análise de incerteza segundo equação (55) que relaciona as variáveis do processo de medição. determinando-se a sua exatidão e o nível de confiança ou seja, sua performance, que será utilizada para obter a curva simulada.



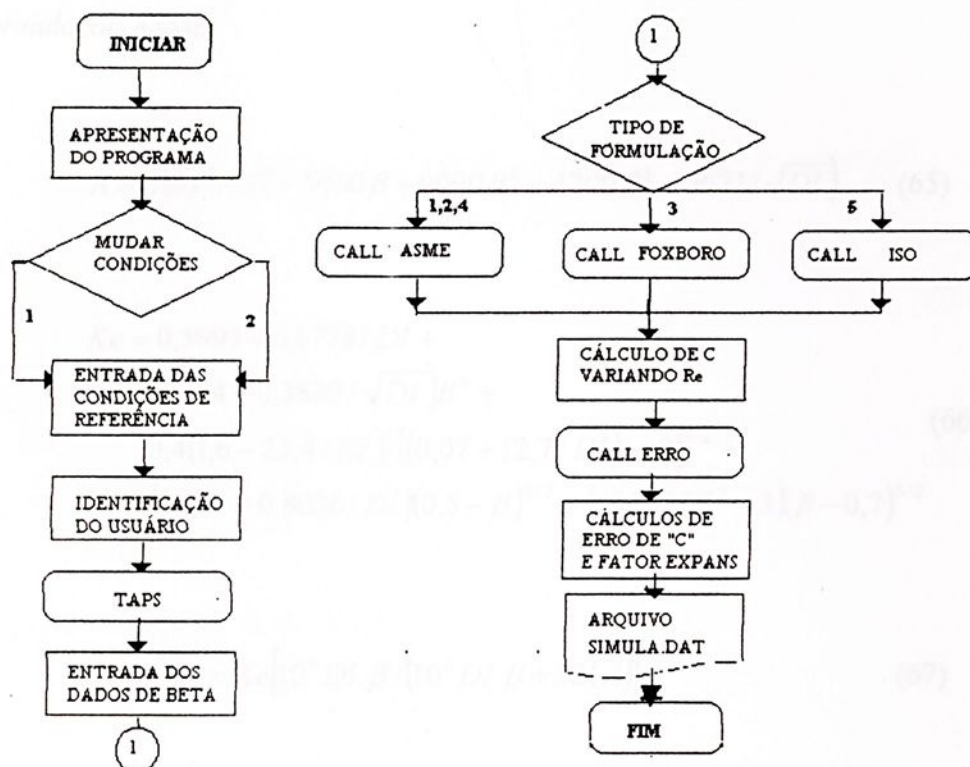


Figura 3.2– Estrutura do programa “SIMULA”

3.2.1. Determinação do coeficiente de descarga - Programa SIMULA.

Para determinação do coeficiente (C) foi elaborado o programa SIMULA em FORTRAN (fig.3.2) com 15 KB de programa fonte e 212 KB executável e utiliza para calcular o erro associado à C e ϵ , as fórmulas das normas: ASME, FOXBORO ou ISO.

Formulação ASME

$$A = d(0,03937 - 5000\beta + 9000\beta^2 - 4200\beta^3 + 2671/\sqrt{DI}) \quad (65)$$

$$\begin{aligned} Ke = & 0,5993 + 0,1778/DI + \\ & (0,364 + 0,3830/\sqrt{DI})\beta^4 + \\ & 0,4(1,6 - 25,4/DI)^5[(0,07 + 12,7/DI) - \beta]^{5/2} - \\ & (0,009 + 0,8036/DI)(0,5 - \beta)^{3/2} + (4935/DI^2 + 3)(\beta - 0,7)^{5/2} \end{aligned} \quad (66)$$

$$Ko = Ke[10^6 DI \cdot \beta / (10^6 DI \cdot \beta + 381A)] \quad (67)$$

$$K = Ko(1 + A/Rd) \quad (68)$$

$$C_{ASME} = K\sqrt{1 - \beta^4} \quad (69)$$

Tabela 3.12 - Restrições de uso para Ke

Termo da equação(66)	usado para β entre
3 ^o - 2 ^a linha	0,15 - 0,32
4 ^o - 3 ^a linha	0,15 - 0,50
5 ^o - 4 ^a linha	$\geq 0,70$

Fonte: ASME (1991)

Formulação FOXBORO (DOWDELL)

$$C_{DOE} = 0,58850 + 0,03396\beta + 0,00175DI \cdot \beta - 0,00389DI \cdot \beta^2 + (372 - 1218\beta + 2127\beta^2) / Rd \quad (70)$$

$$C_{FOX} = C_{DOE} + 0,00052DI \cdot \beta^2 \quad (71)$$

Formulação ISO (equação de Stolz)

- Para Corner e Radius Taps:

$$C = 0,5959 + 0,0314\beta^{2,1} - 0,1840\beta^8 + 0,0029\beta^{2,5} [10^6 / Rd]^{0,75} + AL_1\beta^4(1 - \beta^4)^{-1} - 0,0337L_2\beta^3 \quad (72)$$

Tabela 3.13 - Constantes da fórmula ISO

Para Corner	$L_1=L_2=0$
Para Radius	$L_1=1$
	$L_2=0,47$
Para Flange	$L_1=L_2=25,4/DI$

Fonte: ISO (1980)

Caso L_1 seja maior ou igual que 0,433, então: A é 0,0390, senão A é 0,0900.

- Para Pipe Taps:

$$C = 0,5959 + 0,461\beta^{2,1} - 0,48\beta^8 + 0,0029\beta^{2,5}\left(10^6 / Rd\right)^{0,75} + 0,079\beta^4 / (1 - \beta^4) \tag{73}$$

Determinação do erro de C

Tabela 3.14 - Determinação do erro em C

$\leq \beta <$	Flange	Vena	Radius	Corner	Pipe
0,10-0,20	$\pm 0,8-2,5\beta$	$\pm 0,75-2,5\beta$	$\pm 0,75-2,5\beta$	*	$\pm 1,31-3,75\beta$
0,21-0,70	$\pm 0,3$	$\pm 0,25$	$\pm 0,25$	*	$\pm 0,38$
0,71-0,80	$\pm 2,5\beta-1,45$	$\pm 2,5\beta-1,5$	$\pm 2,5\beta-1,5$	*	$\pm 4,69\beta-3,77$

Fonte: Delmée (1989)

*Para corner , conforme fórmula a seguir:

$$C\% = 0,25\left[1,5 + 2\beta^4 + \beta^2(\log Rd - 6)^2 + 50 / DI\right] \tag{74}$$

Determinação do sobre erro de ϵ

Tabela 3.15 - Determinação do erro em ϵ

$\leq \beta <$	Taps
0,10-0,20	$\pm 4 Dp/Pp$
0,20-0,75	$\pm 2 Dp/Pp$
0,75-0,80	$\pm 4 Dp/Pp$

Fonte: Delmée (1989)

Determinação da Faixa de Aplicação

Para R_d variando de 10^4 a 10^7 obtêm-se valores correspondentes para C , que graficamente apresentam o aspecto como da figura (3.3). Estes valores são encontrados no arquivo *.DAT, exemplo: ASME.DAT, gerado na subrotina.

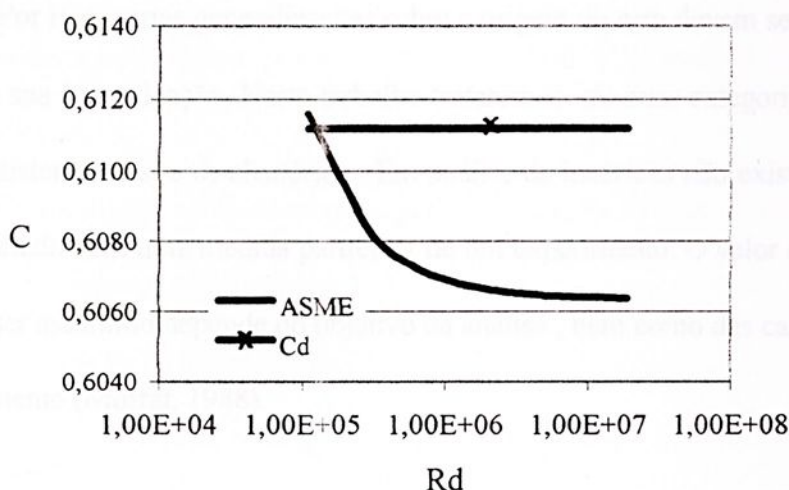


Figura 3.3 - Faixa de aplicação de $C \times R_d$

Para o valor de R_d nas condições operacionais determina-se o coeficiente operacional (C_d) determinando a faixa de aplicação para todos os valores que se encontrem dentro de 0,5 a 1,5 %. No exemplo acima, o valor de C_d poderia ser aplicado de 10^5 a 10^7 .

3.2.2. - Análise de Incerteza para determinação da performance.

A incerteza é uma estimativa do possível valor de um erro no resultado de uma medição e a sistematização na quantificação dos erros é conhecida como análise de incerteza. Nem mesmo uma discussão geral desses erros, poderia levar a uma lista completa de todos os elementos que contribuem na incerteza da medição. Por isso, certas generalizações sobre a origem do erro devem ser feitas para ajudar em sua identificação. Neste trabalho trataremos de duas categorias gerais de erros, os sistemáticos e os aleatórios. Em análise de incerteza não existe um único valor associado com uma medida particular de um experimento. O valor da incerteza que deve ser assumido depende do objetivo da análise, bem como das características do experimento (Moffat, 1988).

Planejamento Experimental

A análise de incerteza orientada pelo planejamento experimental, visa sistematizar o trabalho, sendo parte importante na obtenção das variáveis que influenciam no processo de medição. As seguintes fases serão seguidas (Figliola et al, 1991):



Fase 1 - Identificar as variáveis ou parâmetros pertinentes ao processo que se deseja conhecer.

Fase 2 - Selecionar um método conhecido para realizar os testes com o processo, e controles que devem ser exercidos.

Fase 3 - Definir as faixas necessárias das variáveis principais para descrever o processo e, técnicas de medição e instrumentos.

Fase 4 - Definir a performance requerida e a quantidade de dados para cada faixa de operação.

Fase 5- Definir questões sobre recursos, segurança e disponibilidade de equipamentos e instrumentos selecionados.

Fase 6 - Classificação e análise dos dados.

Com isso, obtém-se as variáveis que serão utilizadas na análise a seguir.

Análise de Incerteza para determinação da performance

Da equação (22) e aplicando a equação (29), tem-se:

$$\frac{dQ}{Q} = \left[\left(\frac{dC}{C} \right)^2 + \left(\frac{d\varepsilon}{\varepsilon} \right)^2 + \left(\frac{1}{2} \frac{dDp}{Dp} \right)^2 + \left(\frac{1}{2} \frac{dp}{p} \right)^2 + \left(-\frac{1}{2} \frac{dT}{T} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (75)$$

Onde os parâmetros fator de forma E e área S da equação (22) estão representados em β (Ting e Shen, 1989); assim como ρ é representada pela pressão p e temperatura T do fluido, pois são dependentes (Benedict, 1977).

Aplicando a equação (75) para os erros sistemáticos (B) e os aleatórios (S), que introduzidos na equação (26), fornecem a equação (76) que estima a incerteza (U_Q) no resultado da medição de vazão:

$$\frac{U_Q}{Q} = \pm \left[\left(\frac{B_Q}{Q} \right)^2 + \left(\frac{tS_Q}{Q} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (76)$$

Critério de distribuição dos erros

Segundo Ting et al. (1989) o critério para distribuição dos erros de C e ϵ , são de 2/3 como sistemático e 1/3 como aleatório. Para as demais variáveis o erro sistemático associado com o registro de dados pode ser determinado pela metade da menor faixa de medição pela escala. E o erro aleatório é definido pela repetibilidade, sendo a relação do desvio padrão com a faixa da escala utilizada.

Critério de validação/aceitação

Para	U_Q/Q	< 5 %	usar sem restrições
Se	$5 \% < U_Q/Q$	< 12 %	usar com restrições
Se	U_Q/Q	> 12 %	voltar ao planejamento

3.3. Medição em Escoamento Pulsante

Tomando a medida de D_p e determinando a correspondente Q , obtém-se um valor muito maior que o real, além da dificuldade causada pela não linearidade e que quando a vazão deve ser totalizada num intervalo de tempo, os efeitos da periodicidade são dissolvidos causando erros. Por isso, fazer medição em condições adversas torna necessário sistema de aquisição de dados apropriado com um filtro passa-baixa (Doebelin, 1990).

Tratando-se de medidores onde a vazão é obtida através do diferencial de pressão, a vazão média (Q) calculada tem uma componente de flutuação (Q') que a sobrepõe. Considerando $Q(t)$:

$$Q(t) = Q + Q' \sin wt \quad \text{com } Q < Q' \quad (77)$$

Se o instrumento possui um filtro passa-baixa, então:

$$D_p = K(Q^2 + Q'^2/2) \quad (78)$$

Dos meios para caracterização das condições pulsantes apresentadas no capítulo 2, o número de Hodgson (eq.45) foi adotado para ser usado aqui por envolver maior número de variáveis do sistema em medição, além de estimar o erro associado, dentro de limites estabelecidos conforme fig.(3.4).



$$N_H = \frac{V f \overline{P_o - P}}{\overline{Q} \overline{vP}} \quad (45)$$

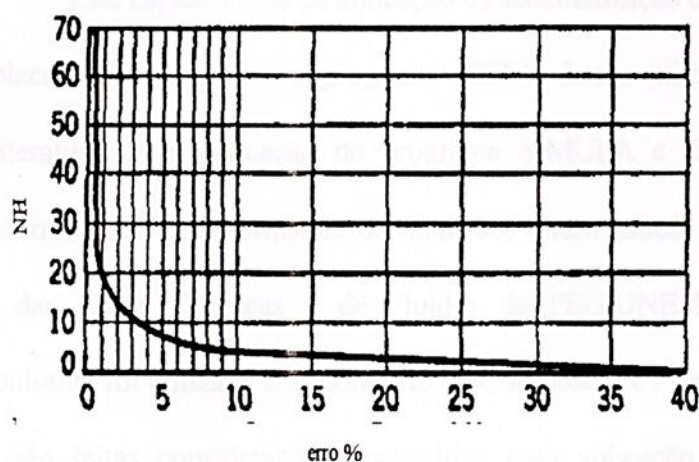


Figura 3.4 - Relação entre N_H e o erro

* Dividir a escala de N_h por 60

Fonte: Brown et al. (1960)

Para efeito de comparação de resultados deve-se usar um outro medidor, tipo turbina para os quais os erros inseridos devido a pulsação em ondas senodais são equacionados. Relacionado ao cutoff e a frequência de pulsação (w), para baixa frequência pode ser desprezado; para medias é dependente exclusivamente da frequência e para altas frequências dependente da intensidade da pulsação (Haalman, 1965).

CAPÍTULO 4 - APLICAÇÃO DA SISTEMATIZAÇÃO

Este capítulo trata da aplicação da sistematização desenvolvida. Na seleção de placa de orifício com o programa BETA, foram utilizados exemplos citados na literatura. Para aplicação do programa SIMULA e da simulação da calibração determinando a performance de medição, foram usados casos reais dos Laboratórios das Áreas Térmicas e de Fluidos da FEG/UNESP. No caso de escoamento pulsante foi utilizado o Laboratório de Combustão e Propulsão do INPE, para o qual são feitas considerações necessárias para aplicação do sistema de Hodgson e do sistema de aquisição de dados.

4.1. - Aplicação do Programa de Seleção.

Para aplicação desse programa foram utilizados três exemplos da literatura (tab. 4.1). O primeiro é aplicado para ar atmosférico com placa em aço carbono e tomadas de pressão vena contracta em condições usuais para indústria (ex.4.1). O segundo utiliza nitrogênio como fluido, com placa de aço inox e condições específicas para tomadas de pressão corner taps (ex.4.2). O terceiro caso utiliza gás seco com tomadas pipe taps (ex. 4.3). No último caso é usado vapor super saturado em condições operacionais bastante específicas (ex. 4.4). Os resultados apresentados no capítulo 5.



Tabela 4.1 – Condições operacionais dos exemplos

variável	unidade (SI)	ex.4.1	ex4.2	ex4.3	ex.4.4
Pr	10^5 (Pa)	1,013	1,01	1,013	1,013
Tr	(K)	288,15	273,15	283,15	288,15
Ur	(%)	0	0		0
Qm	(m ³ /s)	1,0	0,555	1,41	0,91
DI	10^{-3} (m)	202	82,8	102,3	198,5
R	10^{-3} (m)	0,10	0,02	0,02	0,10
Pp	10^3 (Pa)	107,2	439,0	2.450,0	4.300,0
Dp	10^3 (Pa) a 4°C	5,0	16,0	12,225*	12,500
Tp	(K)	323,15	293,15	303,15	713,15
Mp*		aço carb.	inox 304	inox	aço Cr
Fa	*(1)	1,001	1,0	1,0	1,011
Vd**	10^{-6} (N.s/m ²)	19,5	18,5	10,0	25,7
k**	(1)	1,4	1,4	1,4	1,3
Zr *	(1)	0,99958	0,9995	0,993	--
Zp	(1)	0,99987	0,9990	0,873**	--
Dr**	(1)	1,0	0,967	0,90	--
Fi	(%)	80	0	0	--
Ps **	(Pa)	12270	3230	3230	--
Me	(Kg/m ³)	--	--	--	13,718
Vc	10^{-6} (m ² /s)	--	--	--	1,87
Fv	(1)	--	--	--	1,0

* valor a 20 oC ,corrigido para 4 oC 12271 Pa ** peso molecular 26,06

Fonte: Delmée (1989)

Na seleção de placa de orifício para os Laboratórios as condições operacionais são descritos na tabela (4.2), a seguir:

Tabela 4.2 – Condições operacionais dos laboratórios

Condições	(SI)	LAT	LF	LCP
Pr	10^5 (Pa)	1,013	1,013	1,013
Tr	(K)	300,15	300,15	302,15
Ur	(%)	0	0	0
Qm	(m ³ /s)	0,057	0,040	0,033
DI	10^{-3} (m)	80,5	74,0	50,8
R	10^{-3} (m)	0,010	0,002	0,002
Pp	10^5 (Pa)	4,60	1,013	3,33
Dp	(Pa) a 4°C	550	2.450	2.450
Tp	(K)	318,15	300,15	323,15
Mp*		bronze	inox 304	aço
Fa *	*(1)	1,0	1,0	1,0
Vd**	10^{-6} (N.s/m ²)	19,5	17,3	17,3
k **	(1)	1,4	1,4	1,4
Zr *	(1)	0,99852	0,99852	0,99852
Zp	(1)	0,99948	0,99941	0,99941
Dr**	(1)	1,0	1,0	1,0
Fi	(%)	60	60	65
Ps **	(KPa)	12,37	12,32	12,32

Fonte: Laboratórios e tabelas referenciadas no anexo 3.

4.2. Aplicação do método de Simulação da Calibração

Nesse item a aplicação será feita simultaneamente para os três laboratórios (tab. 4.2), uma vez que o planejamento experimental demonstra tratar de condições com parâmetros bastante semelhantes.

4.2.1. Aplicação do programa SIMULA.

Com as condições da tabela (4.2) e utilização do programa SIMULA, determina-se os coeficientes de descarga para Re de 10^4 a 10^7 . No LAT, que usa tomadas radius taps as opções de cálculo, são: ASME e ISO. Para o LF e LCP, utiliza-se flange taps com as formulações ASME e FOXBORO.

Por fim, o programa fornece o número de Rd e os erros associados ao cálculo de β e ϵ (tab. 4.3), utilizados na próxima etapa do método.

$$Rd = \beta.Re \tag{79}$$

$$Cd = f(\beta, DI, Rd) \tag{80}$$

Tabela 4.3 - Variáveis determinadas pelo programa

SIMULA	LAT		LF		LCP	
	ASME	ISO	ASME	FOXB	ASME	FOXB
Rd	$3,5.10^4$	$3,5.10^4$	$1,7.10^4$	$1,7.10^4$	$2,2.10^4$	$2,2.10^4$
C	0,6171	0,6112	0,6060	0,6087	0,6083	0,6110
Faixa (Re)	$3,5.10^4 - 10^7$		$1,7.10^4 - 10^7$		$2,2.10^4 - 10^7$	
C%	0,25		0,30		0,30	
ϵ	0,7071		0,7069		0,7070	
ϵ %	0,24		0,05		0,15	

4.2.2 . Determinação da performance do sistema.

Uma descrição geral dos equipamentos e acessórios utilizados, e das condições ambientais dos laboratórios (fig. 5.1, 5.2 e 5.3) são apresentadas na

seguir (tab. 4.4). Os valores das variáveis utilizados na determinação da performance são descritos pelas condições anteriores (tab.4.2)

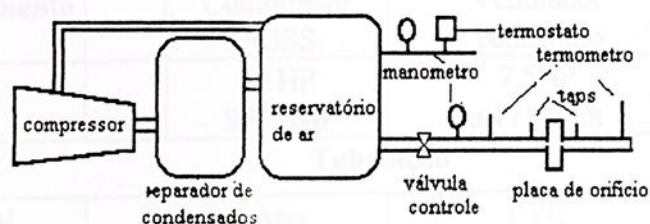


Figura 4.1 - Esquema experimental - LAT

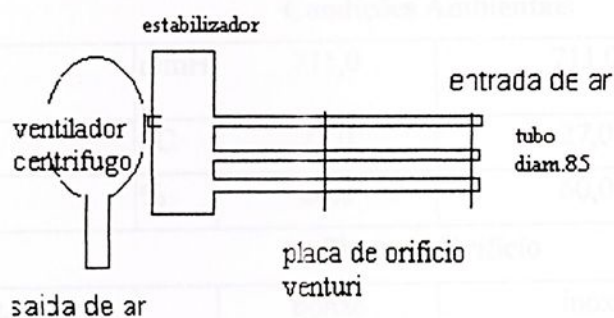


Figura 4.2 - Esquema experimental - LF

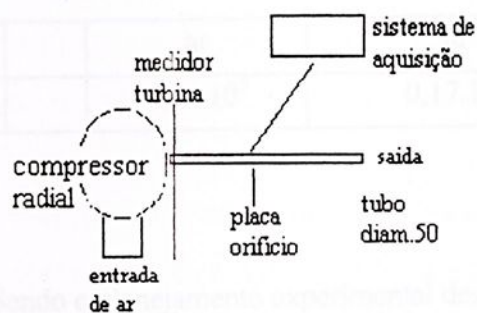


Figura 4.3 - Esquema experimental - LCP

Tabela 4.4 – Descrição dos laboratórios

Descrição		LAT	LF	LCP
Parâmetros				
Equipamento		Compressor HOSS	Ventilador centrífugo	Compressor radial CR-8
Motor		30 HP 975 rpm	7,5HP a 1710rpm	7,5cv a 2915rpm
Tubulação				
Material		Aço	PVC	PVC
D	mm	89,0	76,2	52,0
DI	mm	80,5	74,0	50,8
R	mm	0,01	0,002	0,002
Condições Ambientais				
Pb	mmHg	711,0	711,0	716,0
T	oC	27,0	27,0	29,0
Fi	%	60,0	60,0	65,0
Placa de Orifício				
Mat.		bronze	inox	aço carb.
D	mm	50,0	33,3	25,7
Beta	--	0,6187	0,45 *	0,5068
Tomada		Radius	Flange	Flange
Fluido				
Gás		ar	ar	Ar
Reynolds		$0,34 \cdot 10^5$	$0,17 \cdot 10^5$	$0,22 \cdot 10^5$

*adotada placa existente

Sendo o planejamento experimental descrito a seguir:



Fase 1 - Identificação das variáveis

O processo a ser conhecido são os erros envolvidos na medição de vazão com placa de orifício; que apresentam as seguintes variáveis a serem controladas.

- pressão e temperatura do fluido,
- diferencial de pressão ,
- pressão, temperatura e umidade do ambiente.

Para o LCP , além dessas variáveis faz-se necessário o controle de:

- pressão e temperatura no medidor tipo turbina,
- pressão e temperatura no reservatório do sistema de Hodgson,
- temperatura e frequência do sistema de pulsação.

Fase 2 - Método de Ensaio

- Ligado o equipamento, espera-se a estabilização do fluxo de ar,
- Inicialmente a válvula deve estar totalmente aberta para se obter fluxo máximo, em seguida vai sendo fechada para se obter outras faixas de vazão.
- São feitas medidas nos instrumentos adequados para as variáveis que estão sendo controladas. Para o LCP o registro dos dados é feito pelo sistema de aquisição de dados (item 4.3).
- Deve se controlar as condições dos instrumentos, do operador e operacionais, os quais devem ser os mesmos durante todo o experimento, para se garantir as condições de repetibilidade (Moffat, 1985).



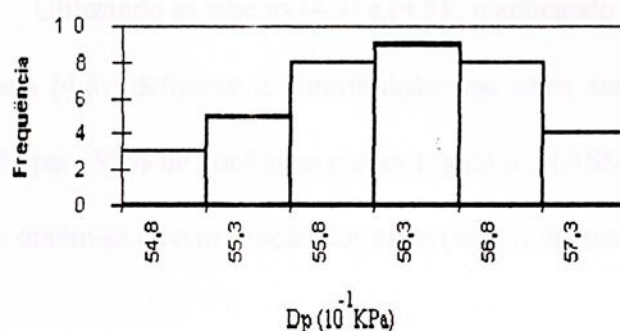


Figura 4.4 - Histograma de medições

Fase 5 - Recursos

O experimento desenvolvido no LAT, utiliza um compressor sendo que todos os equipamentos e instrumentos necessários encontravam-se a disposição.

No LF apesar de possuir um bancada experimental com muitos recursos didáticos, não possui instrumentação adequada para o tipo de experimento planejado. Além da placa de orifício selecionada, haveria necessidade de um válvula solenóide para regular o fluxo de dois medidores usados simultaneamente.

O LCP o mais bem equipado com instrumentos adequados ao experimento e sistema de aquisição de dados. No entanto, somente a análise vai constatar a adequação dos instrumentos para cada caso.

Fase 6 - Classificação e análise de dados

Utilizando as tabelas (4.3) e (4.5), e aplicando a equação (75) para os erros da tabela (4.8), define-se a contribuição dos erros sistemáticos (eq.82) e aleatórios (eq.83) para 95% de confiança e com t igual a 2 (ASME PTC 19.1, 1986) na equação (76), obtém-se a contribuição dos erros (eq.84) de medição para o LAT.

Tabela 4.8 - Classificação dos erros - LAT

Classe	Sistemático (B%)	Aleatório (S%)
coeficiente descarga (C)	0,164	0,083
fator de expansão (ϵ)	0,160	0,080
Relação de diâmetros (β)	0,330	0,167
manômetro montante (p)	1,25	1,5
manômetro diferencial (Dp)	0,33	1,2
termômetro (T)	1,0	2,3

$$\left(\frac{B_Q}{Q}\right)^2 = (0,167^2 + 0,160^2 + 0,33^2 + 0,33^2 + 1,0^2 + 1,0^2) = 2,8, \quad (82)$$

$$\left(\frac{S_Q}{Q}\right)^2 = (0,083^2 + 0,080^2 + 0,167^2 + 1,5^2 + 2,3^2 + 1,2^2) = 9,0, \quad (83)$$

$$\left(\frac{U_Q}{Q}\right) = (2,8 + 4 * 9,0)^{1/2} = 6,2\% \quad (95\%) \quad (84)$$

Da mesma maneira para os erros do LF (tab.4.3 e 4.9) definiu-se a contribuição dos erros sistemáticos (eq.85), aleatórios (eq.86) e resultante (eq.87) no processo de medição.

Tabela 4.9 - Classificação dos erros - LF

Classe	Sistemático (B%)	Aleatório (S%)
coeficiente descarga (C)	0,20	0,10
fator de expansão (ϵ)	0,033	0,017
Relação de diâmetros (β)	0,33	0,17
manômetro montante (p)	0,63	1,5
manômetro diferencial (Dp)	0,63	1,2
termômetro (T)	1,0	2,5

$$\left(\frac{B_Q}{Q}\right)^2 = (0,20^2 + 0,033^2 + 0,33^2 + 0,63^2 + 0,63^2 + 1,0^2) = 1,5, \quad (85)$$

$$\left(\frac{S_Q}{Q}\right)^2 = (0,10^2 + 0,017^2 + 0,17^2 + 1,5^2 + 2,5^2 + 1,2^2) = 9,9, \quad (86)$$

$$\left(\frac{U_Q}{Q}\right) = (1,5 + 4 * 9,9)^{1/2} = 6,4\% \quad (95\%) \quad (87)$$

Para o LCP a contribuição dos erros (tab.4.3 e 4.10) sistemáticos (eq.88), aleatórios (eq.89) e resultante (eq.90).são determinados.

Tabela 4.10 - Classificação dos erros - LCP

Classe	Sistemático (B%)	Aleatório (S%)
coeficiente descarga (C)	0,20	0,10
fator de expansão (ϵ)	0,10	0,05
Relação de diâmetros (β)	0,33	0,17
manômetro montante (p)	1,25	0,6
manômetro diferencial (Dp)	1,25	0,6
termômetro (T)	0,71	0,5

$$\left(\frac{B_Q}{Q}\right)^2 = (0,20^2 + 0,10^2 + 0,33^2 + 1,25^2 + 1,25^2 + 0,71^2) = 3,7, \quad (88)$$

$$\left(\frac{S_Q}{Q}\right)^2 = (0,10^2 + 0,05^2 + 0,17^2 + 0,6^2 + 0,6^2 + 0,5^2) = 1,0, \quad (89)$$

$$\left(\frac{U_Q}{Q}\right) = (3,7 + 4 * 1,0)^{1/2} = 2,8\% \quad (95\%) \quad (90)$$

4.3. Considerações para aplicação em escoamento pulsante.

Especificação do sistema de Hodgson e do sistema pulsante.

Para as condições do LCP descritas na tabela (4.4) especificou-se o sistema de Hodgson conforme descrição do item 3.3, com as seguintes restrições:



- $P_o - P = 0,18 \cdot 10^4 \text{ Pa}$
- $Q_{\max} = 0,033 \text{ m}^3/\text{s} \times 1,098 \text{ Kg}/\text{m}^3 = 0,0362 \text{ kg/s}$
- $v = 0,83 \text{ m}^3/\text{kg}$
- $p = 2500 - 50 = 2450 \text{ Pa}$
- Para erro $< 5 \%$ temos $N_h = 0,12$ (Fig.3.4)
- Frequência de pulsação: $f = 100 \text{ Hz}$
- forma da onda : senoidal
- cutoff : $s = 1$

Na equação (45) obtém-se que o volume necessário para o sistema é de $1,96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$. Adotando comprimento de 0,5 m, temos que o diâmetro do sistema deve ser de 71 mm ($2 \frac{3}{4}$ ") para uma tubulação de 50,8 mm (2 ").

Para controlar a frequência em 100 Hz utiliza-se um sistema no fim da tubulação (fig.4.3) contendo um disco com furos de 2 " igualmente espaçados, acionado por um motor elétrico.

Sistema de Aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados (Fig. 4.5) consiste de um módulo principal com computador HP 9000 série 300 com multiprogramador e placa de aquisição HP 6954. E módulo secundário, um HP 3421-A controlado por um computador HP 75 C, programado para controle de temperatura pelo cartão scanner HP 9753 A. A cada varredura o sistema faz a leitura de quatro transdutores de pressão e de quatro termopares, além da frequência.



Os transdutores de pressão do tipo piezoelétrico Kistler modelo 7261 enviam os sinais para um amplificador de carga do tipo Kistler modelo 5006 com filtro acústico low-pass e são transferidos para um osciloscópio Tektron modelo 7637 para visualização das amplitudes e frequência. No amplificador existem entradas para calibração dos transdutores e para descarga de energia estática, respectivamente os botões charge calibrator e o charge input, além do ajuste de zero que é feito resetando o aparelho com os leds apagados. Os termopares tipo K são acoplados diretamente ao módulo que possui compensação interna, por termistor HP 69753A usado como temperatura de referência.

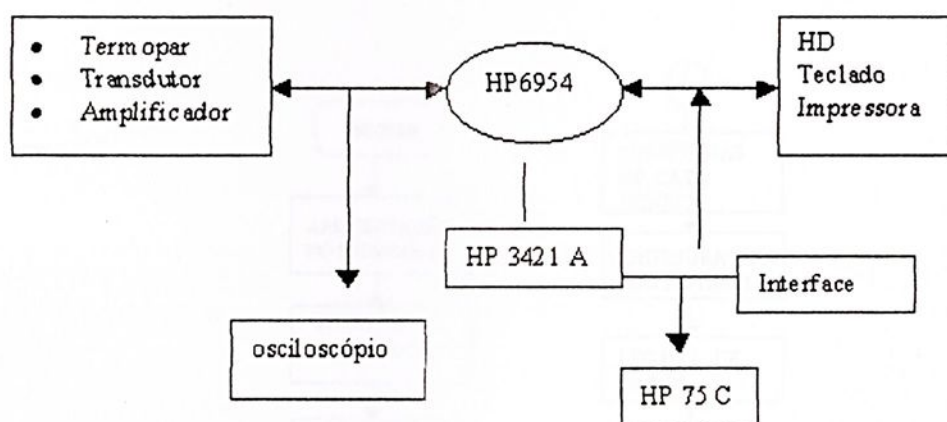


Figura 4.5 - Sistema de aquisição de dados - LCP

Programa de Aquisição de Dados

Na apresentação do programa (fig. 4.6) são solicitados a data e hora atuais para uso na função TIMED. O número do teste de 0 a 9, e indica que o programa registrará durante o tempo de teste, os seguintes dados:

- 04 termopares tipo K conectados aos canais 16 a 19
- 04 sensores de pressão conectados aos canais 28 a 31
- a frequência.

Solicita ainda um nome para o arquivo a ser gerado com os dados lidos. Verifica se a impressora esta ligada e solicita o comando "return" para acionar o aquisitor HP 3421A . Com isso o teclado é desabilitado para registro dos dados e impressão dos gráficos, gerados por subrotinas internas, TOPO, HP e Config. As adaptações necessárias no programa foram as subrotinas e os canais que seriam usados. Caso não ocorra erro no registro dos dados , o sistema os salva no arquivo gerado pelo programa, caso contrário o programa é interrompido.



Figura 4.6 - Estrutura do programa de aquisição de dados.

CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E COMENTÁRIOS

Este capítulo trata dos resultados obtidos na aplicação da sistematização nos exemplos e laboratórios descritos anteriormente. Sendo que os resultados dos exemplos são comparados com a literatura e os resultados do LAT comparado com o resultado de outro tipo de medidor. Os relatórios com os resultados completos estão no apêndice (A) e os resultados da simulação no item (5.2).

5.1. Apresentação de Resultados da Seleção

Para os exemplos citados no item 4.1, os resultados apresentam-se nas tabelas (5.1, 5.2, 5.3 e 5.4) a seguir..

Tabela 5.1 – Seleção do exemplo 4.1

Variáveis Calculadas	Resultado Literatura	Resultado do Método
Tomada de pressão	Vena contracta taps	Vena contracta taps
$CE\beta^2\epsilon$	0,3843	0,3840
Re	$0,21 \cdot 10^6$	$0,29 \cdot 10^6$
β	0,7297	0,7346
D (mm)	147,40	148,0

Tabela 5.2 – Seleção do exemplo 4.2

Variáveis Calculadas	Resultado Literatura	Resultado do Método
Tomada de pressão	Corner taps	Corner taps
$CE\beta^2\epsilon$	0,3240	0,3211
Re	$0,40 \cdot 10^6$	$0,40 \cdot 10^6$
β	0,6890	0,6866
D (mm)	57,0	56,8

Tabela 5.3 – Seleção do exemplo 4.3

Variáveis Calculadas	Resultado Literatura	Resultado do Método
Tomada de pressão	Pipe taps	Pipe taps
$CE\beta^2\varepsilon$	0,2254	0,2233
Re	$1,46 \cdot 10^6$	$1,40 \cdot 10^6$
β	0,5430	0,5414
D (mm)	55,53	55,40

Tabela 5.4 – Seleção do exemplo 4.4

Variáveis Calculadas	Resultado Literatura*	Resultado do Método
Tomada de pressão	taps	-----
$CE\beta^2\varepsilon$	0,6822	0,6812
Re	$3,12 \cdot 10^6$	$2,2 \cdot 10^6$
β	0,8627	0,8630
D (mm)	149,41	-----

* resultados referem-se a medidor bocal

Tabela 5.5 – Seleção para os laboratórios

Variáveis Calculadas	LAT	LF	LCP
Tomada de pressão	Radius taps	Flange taps	Flange taps
$CE\beta^2\varepsilon$	0,2526	0,1685	0,1617
Re	$0,54 \cdot 10^5$	$0,38 \cdot 10^5$	$0,44 \cdot 10^5$
β	0,6187	0,5178	0,5068
D (mm)	49,8	38,3	25,7

5.2. Resultados da Simulação da Calibração

Tabela 5.6– Coeficientes de descarga – LAT

Nº	Rd	ASME	ISO
1	1,00E+04	0,6643	0,6311
2	1,10E+05	0,6116	0,6079
3	3,10E+05	0,6082	0,6054
4	6,10E+05	0,6073	0,6046
5	1,00E+06	0,6069	0,6042
6	1,50E+06	0,6067	0,6040
7	2,10E+06	0,6066	0,6038
8	2,80E+06	0,6066	0,6037
9	3,60E+06	0,6065	0,6037
10	4,50E+06	0,6065	0,6036
11	5,50E+06	0,6064	0,6036
12	6,60E+06	0,6064	0,6035
13	7,80E+06	0,6064	0,6035
14	9,10E+06	0,6064	0,6035
15	1,10E+07	0,6064	0,6035
16	1,20E+07	0,6063	0,6035
17	1,40E+07	0,6063	0,6034
18	1,50E+07	0,6063	0,6034
19	1,70E+07	0,6063	0,6034
20	1,90E+07	0,6063	0,6034
Cd	3,40E+04	0,6171	0,6112

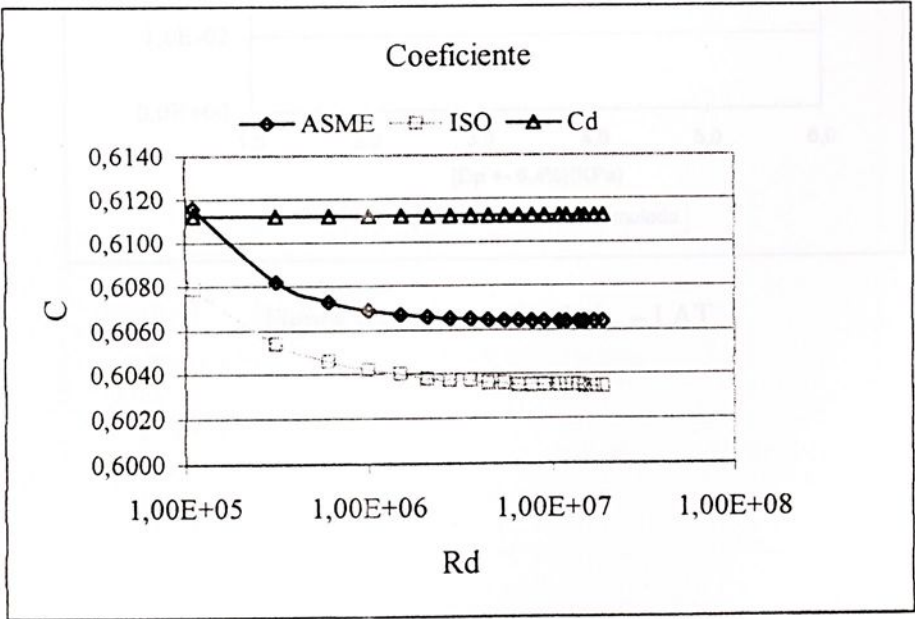


Figura 5.1 - Curva de aplicação – LAT

FACULDADE DE ENGENHARIA
DE GUARATINGUETÁ
BIBLIOTECA

Tabela 5.7– Medidas de vazão – LAT

D_p (10^{-1} KPa)	anemômetro (m ³ /s)	simulada (m ³ /s)
0,56	1,3E-02	1,3E-02
1,07	1,8E-02	1,8E-02
1,58	2,2E-02	2,2E-02
2,09	2,5E-02	2,6E-02
2,55	2,8E-02	2,8E-02
3,11	3,1E-02	3,1E-02
3,57	3,3E-02	3,4E-02
4,08	3,6E-02	3,6E-02
4,59	3,7E-02	3,8E-02
5,00	3,9E-02	4,0E-02
5,71	4,1E-02	4,3E-02

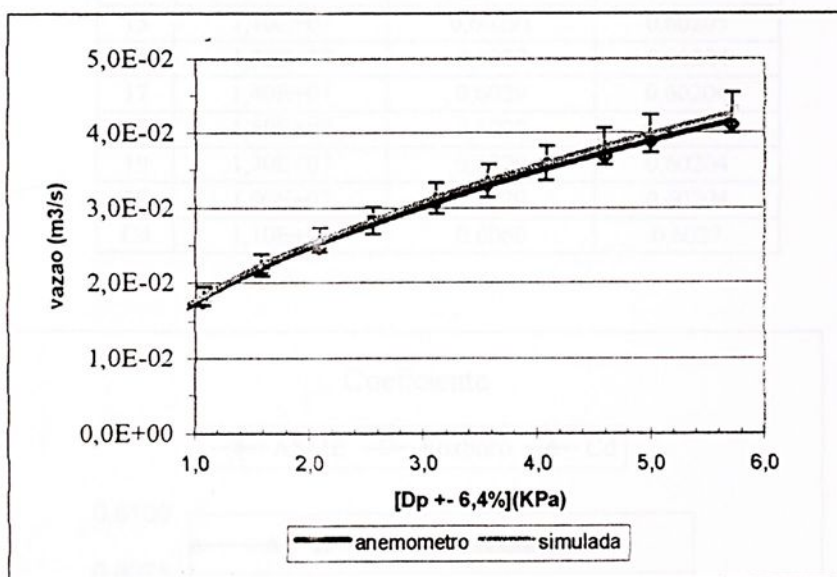


Figura 5.2 – Curva simulada – LAT

Tabela 5.8 - Coeficientes de descarga - LF

Nº	Rd	ASME	FOXBORO
1	1,00E+04	0,62899	0,62748
2	1,10E+05	0,60525	0,60434
3	3,10E+05	0,60372	0,60284
4	6,10E+05	0,60331	0,60244
5	1,00E+06	0,60314	0,60228
6	1,50E+06	0,60305	0,60219
7	2,10E+06	0,60301	0,60214
8	2,80E+06	0,60297	0,60211
9	3,60E+06	0,60295	0,60209
10	4,50E+06	0,60294	0,60208
11	5,50E+06	0,60293	0,60207
12	6,60E+06	0,60292	0,60206
13	7,80E+06	0,60291	0,60206
14	9,10E+06	0,60291	0,60205
15	1,10E+07	0,60291	0,60205
16	1,20E+07	0,6029	0,60204
17	1,40E+07	0,6029	0,60204
18	1,50E+07	0,6029	0,60204
19	1,70E+07	0,6029	0,60204
20	1,90E+07	0,6029	0,60204
Cd	1,10E+04	0,6060	0,6027

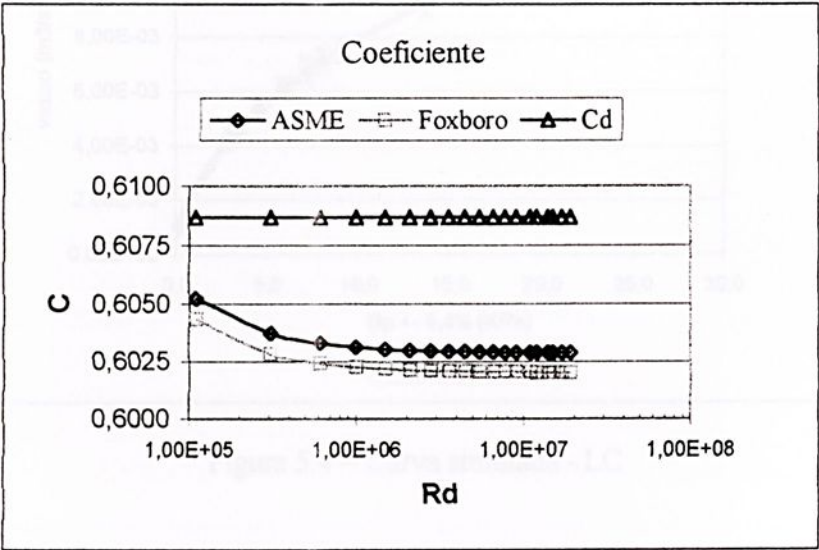


Figura 5.3 - Curva de aplicação - LF

Tabela 5.9 – Medidas de vazão - LF

Dp (10 ⁻¹ KPa)	vazão (m ³ /s)
0,20	1,00E-03
2,63	4,08E-03
3,06	4,39E-03
3,59	4,76E-03
4,54	5,36E-03
5,86	6,08E-03
7,18	6,73E-03
8,01	7,11E-03
9,01	7,54E-03
13,77	9,32E-03
22,33	1,19E-02
25,08	1,26E-02
25,59	1,27E-02
25,90	1,28E-02

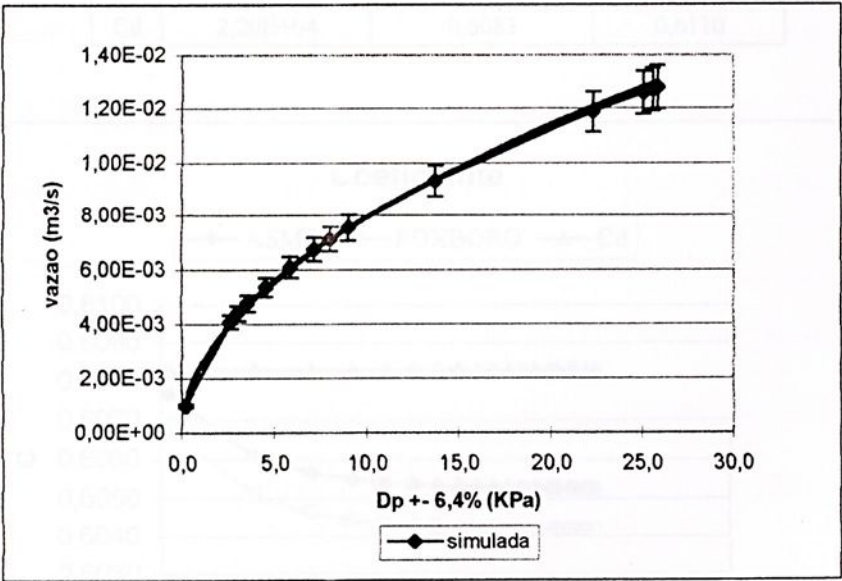


Figura 5.4 – Curva simulada - LC

Tabela 5.10- Coeficientes de descarga - LCP

Nº	Rd	ASME	FOXBORO
1	1,00E+04	0,63064	0,63309
2	1,10E+05	0,60728	0,60654
3	3,10E+05	0,60578	0,60483
4	6,10E+05	0,60537	0,60437
5	1,00E+06	0,6052	0,60418
6	1,50E+06	0,60512	0,60408
7	2,10E+06	0,60507	0,60403
8	2,80E+06	0,60504	0,60399
9	3,60E+06	0,60502	0,60397
10	4,50E+06	0,605	0,60395
11	5,50E+06	0,60499	0,60394
12	6,60E+06	0,60499	0,60393
13	7,80E+06	0,60498	0,60392
14	9,10E+06	0,60497	0,60392
15	1,10E+07	0,60497	0,60392
16	1,20E+07	0,60497	0,60391
17	1,40E+07	0,60497	0,60391
18	1,50E+07	0,60496	0,60391
19	1,70E+07	0,60496	0,6039
20	1,90E+07	0,60496	0,6039
Cd	2,20E+04	0,6083	0,6110

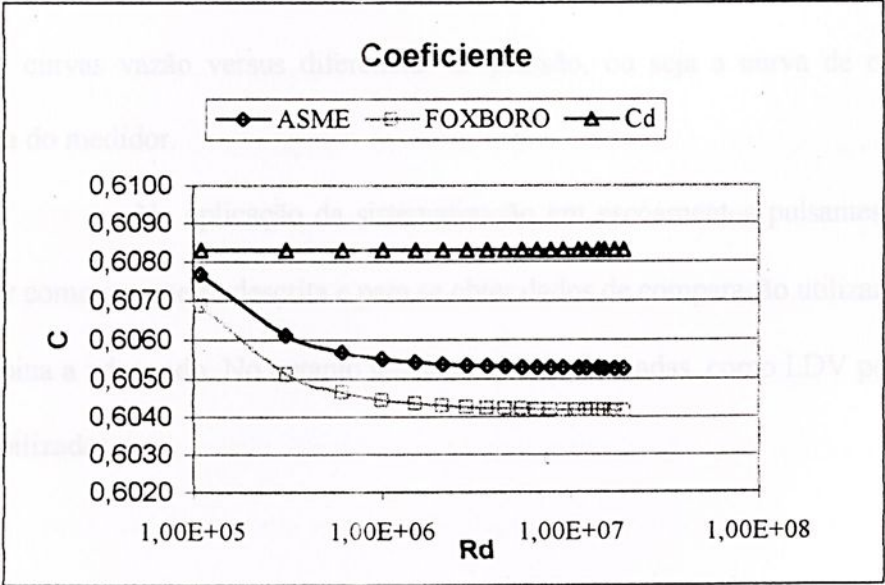


Figura 5.5 - Curva de aplicação - LCP

5.3. Comentários e Sugestões

O programa BETA para seleção de placa de orifício concêntrica nos exemplos comparados (tab. 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4) obteve resultados consistentes. Inclusive no caso do vapor (tab.5.4), como nenhuma das aplicações com placa de orifício foi possível, o mesmo se deu para o exemplo citado, que utilizou outro medidor, tipo bocal. Para ampliar a aplicação do programa poderia se incluir novas subrotinas considerando outros tipos de medidores como: placa excêntrica, segmental, bocal e venturi.

O programa SIMULA para determinação do coeficiente de descarga (C), do fator de expansão (ϵ) e dos erros associados foram de 0,25 a 0,30 respectivamente, apresentando bons resultados e consistentes com os erros apresentados na literatura de 0,24 e 0,25. Deve-se incluir no programa subrotinas para gerar as curvas vazão versus diferencial de pressão, ou seja a curva de calibração simulada do medidor.

Na aplicação da sistematização em escoamentos pulsantes, deve-se proceder como a maneira descrita e para se obter dados de comparação utilizar medidor tipo turbina a adequado. No entanto técnicas mais sofisticadas, como LDV possam ser disponibilizadas.



CAPITULO 6 - CONCLUSÕES

A sistematização para seleção e simulação da calibração de placa de orifício foi realizada dentro dos objetivos, sendo substancialmente embasada na referência bibliográfica. Sua aplicação obteve resultados promissores e favoráveis a utilização no laboratório de Fluidotermodinâmica como era proposta.

O programa de seleção comparado a outros existentes mostrou ser mais abrangente nas considerações utilizadas sendo seu grande diferencial. No entanto por utilizar termos, equações e unidades normalizadas, restringiu-se a apenas um tipo de medidor. Os resultados obtidos ao serem comparados com exemplos referenciados mostraram-se consistentes, sendo que o parâmetro mais importante a relação de diâmetros, variou em média 0,5% e o diâmetro do orifício calculado 0,4%, que para uma tubulação de 50,8 mm (LCP), representa 0,002 mm ou seja, uma variação bem menor que a tolerância exigida em norma.

O método de simulação da calibração que à princípio apresentou maiores dificuldades, foi conseguido embasado na literatura especializada, apesar de se restringir às condições operacionais para o qual foi aplicado. Dentro de 95% de confiança, obteve exatidão de 2,8% (LCP), 6,2% e 6,4% (LAT e LF), sendo aceitável essa performance de medição dentro dos critérios estabelecidos. Quando comparado com outro medidor obteve uma variação de 5%, o que permite afirmar que o método é consistente e deve ser aprimorado. Na análise de incerteza, a consideração das variáveis β e ϵ assim como os erros a elas associados, foram além do que havia sido

feito nas referências e no primeiro artigo publicado com esses dados, no qual as variáveis não são consideradas, no entanto sua contribuição no resultado final mostrou-se significativo uma vez que aumentou a incerteza obtida, e deve ser considerada..

As considerações sobre escoamento pulsante, levantaram a questão da falta de orientação e mostram a forma para o usuário de como proceder para minimizar as fontes de erro na aplicação da placa de orifício. Nesse aspecto foram relevantes as citações sobre os números utilizados para caracterização, como o número de Hodgson e quanto a necessidade de sistemas de aquisição de dados sensíveis a periodicidade.



REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- ABNT, TB - 369 - Medidor de vazão de fluidos - terminologia. Rio de Janeiro, 1989, 9p.
- ABNT, NBR 10396 - Medidores de vazão de fluidos - classificação. Rio de Janeiro, 1988, 16p.
- ANSI/ASME PTC 19.1 - Measurement uncertainty. Part I, instruments and apparatus. 1985.
- ASME Fluid meters, their theory and application. 1971.
- INMETRO. Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia. Duque de Caxias, RJ, 1995, 52p.
- ISO 5167 - Measurement of fluid flow by means of orifice plates, nozzles and venturi tubes inserted in circular cross section conduits running full, 1ª. Ed., London, 1980, 65p.
- ISO Technical report 3313. Measurement of fluid flow by means of orifice plate, nozzles or venturi tubes, in particular in the case of sinusoidal or square wave intermittent periodic type fluctuation, 1978.
- Handbook of compressed gases, 3ª. ed., New York, Gas Association Inc., Van Nostrand, Reinhold, 1990, 657 p.
- Abernethy, R.B., Benedict R.P. & Dowdell, R.B. ASME measurement uncertainty. *Journal of Fluids Engineering*, vol. 107, p. 161-164, 1985.
- Arasi, J.A. Results mixed from pulsating flow tests of orifice plate meters. *Oil & Gas Journal*, v. 90, p. 77-82, 1992
- Baker, R.C. An introductory guide to flow measurement. Mechanical Engineering Publications Limited, London, 1992, 148p.
- Benedict, R. P., Wyler, J.S. & Brandt, G.B. The effect of edge sharpness on the discharge coefficient of an orifice. *Journal of Engineering for Power*, p. 576-582, 1975
- Benedict, R. P. Fundamentals of temperature, pressure and flow measurements. 2ª Ed., USA, J. Wiley, 1977, 517 p.

- Brereton, G.J. e Mankbadi, R.R. Review of recent advances in the study turbulent internal flows. *Applied Mechanical Review, ASME*, v.48 no.4, p.189-212, 1995.
- Brown, G.G., Katz, D. e Schneidewind, R. Unit operations: measurement of fluid flow, 7^a. ed., New York, J. Wiley, 1960, 611p.
- Carrocci, L.R. e Inforsati, M. Um método computacional para calcular e calibrar placa de orifício para medir vazão de ar.. In: IV Congresso de Iniciação científica da UNESP. Araçatuba SP, 1992.
- Carrocci, L.R. e Cassiano, A.D.P. Um método computacional para determinação de medidores de vazão - tipo placa de orifício. In: IV ELAF - Encontro Latino-Americano de Fluidotermodinâmica. Itajubá MG, 1997, p.86-90
- Coleman, H.W. e Steele, W.G. Experimentation and uncertainty analysis for engineers. New York, J. Wiley, 1989, 205 p.
- Delmée, G.J. Manual de medição de vazão. 2^a. ed., São Paulo, Edgard Blücher, 1989, 476p.
- Doebelin, E.O., Measurement system : application and design. 4^a.ed, New York, McGraw-Hill, 1990, 960 p.
- Ferreira, V.C.S, Souto, S.L.L. e Schuller, M.B., Medidores de fluxo: obtenção da curva de calibração via terminal inteligente, In: XI COBEM, Dezembro 1991, São Paulo, p.49-52.
- Ferreira, V.C.S. e De Bortoli, A.L., Numerical and experimental study for the flow through an orifice plate, In: IV CEM-NNE, 1996, p.773-778
- Figliola, Richard S. & Beasley, Donald E. Theory and design for mechanical measurements. New York, J. Wiley , 1991, 516 p.
- Ginesi, D. Choices flow, *Chemical Engineering*, v.98, p. 88-100, 1991.
- Haalman, A. Pulsation errors in turbine flowmeters. *Control Engineering*, p.89-91, 1965.
- Holmann, J.P. e Gajda, W.J. Experimental methods for engineering. 3^a. ed.,Tokyo, McGraw-Hill Kogakusha, 1978, 493p.
- Keyser, D.R. The systematic uncertainty of laboratory flow calibrations. *Journal of Fluids Engineering*, v.120, p.19-22, 1998.



- Lassahn, G.D. Uncertainty definition. *Journal of Fluids Engineering*, vol.107, p. 179, 1985.
- Maciejowski, P.K. Elements of an approach to the assessment of random uncertainty in transient measurements. *Journal of Fluids Engineering*, v.118, p. 91-95, 1996.
- Menon, R.K. LDV measurements in periodic flows. In: *Flow Lines*, Fall, 1987, p. 3-17.
- Miller, R.W. e Kneisel, O. Experimental Study of the effects of orifice plate eccentricity on flow coefficients. *Journal of Basic Engineering*, p. 121-131, 1969.
- Miller, R.W. e Kneisel, O. A comparison between orifice and flow nozzle laboratory data and published coefficients. *Journal of Fluid Engineering*, p. 139-149, 1974.
- Miller, R.W. *Flow measurement engineering handbook*, 3^a. ed., USA, McGraw-Hill, 1996, 950 p.
- Moffat, R.J. Describing the uncertainties in experimental results. *Experimental Thermal and Fluid Science*, p.3-17, 1988.
- Moffat, R.J. Using uncertainty analysis in the planning of an experiment, *Journal of Fluids Engineering*, v.107, pp173-178, 1985.
- Morris, S. D. Compressible gas-liquid flow through pipeline restrictions. *Chemical Engineering and Processing*, v. 30, p.39-44, 1991.
- Morrison, G.L., DeOtte Jr., R.E, Panak, D.L. e Nail, G.H. The Flow field inside an orifice flowmeter. *Chemical Engineering Progress*, p. 75-80, 1990.
- Morrison, G.L., Panak, D.L. e DeOtte Jr., R.E. Numerical study of the effects of upstream flow condition upon orifice flow meter performance. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, v.115, p. 213-218, 1993.
- Oppenheim, A.K. e Chilton, E.G. Pulsating flow measurement. A literature survey. *Transactions Of the ASME*, p. 231-245, 1955
- Pereira, M.T. e Taira, N.M., Desenvolvimento de um venturi sônico como padrão para medição de Vazão, In: XI COBEM, São Paulo, p.61- 64 , 1991.



- Shen, J.J.S., Ting, V.C., e Jones Jr., E.H. Application of sonic nozzles in field calibration of natural gas flows. *Journal of Energy Resources Technology*, v.111, p. 205-213, 1989.
- Spink, L.K. Principles and practice of flow meter engineering, 9^a.ed., USA, The Foxboro Company, 1975, 557p.
- Spitzer, D.W. Industrial flow measurements. Resources for measurement and control. - sries ISA, 2^a.ed , North Caroline. 1990, 441p.
- Teyssandier, R.G. e Husain, Z. D. Experimental investigation of an orifice meter pressure gradient. *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, v.109, p.144-148, 1987.
- Teyssandier, R.G. e Beaty, R. New orifice meter standards improve gas calculations. *Oil & Gas Journal*, v.91, p. 40-42, 1993
- Trengrouse, G.H., Imrie, B.W. & Male, D.H. Comparison of unsteady flow discharge coefficients for sharp-edged orifices with steady flow values, *Journal Mechanical Engineering Science*, vol.8 n. 3, p. 322- 329, 1966.
- Ting, V.C. & Shen, J.J.S. Field calibration of orifice meters for natural gas flow, *Journal of Energy Resources Technology*, vol.111, p.22-33, 1989.
- Valle, R.M e Maliska, C.R. Análise numérica e experimental de um escoamento pulsante laminar através de uma placa de orifício. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseno en Ingenieria*, v.11,1, p.657-668, 1995.
- Wyler, J.S. Estimating the uncertainty of spacial and time average measurements. *Journal of Engineering for Power*, p. 473-476, 1975.



Anexo A-Exemplo 4.1

UNESP-UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
 Departamento de Energia
 NESTORINO - ALEXANDRE CASSIANO

PLACA DE CR. FACH. CONCENTRICA AOME/140

Quarteto: 031

Placa: 031

Materiais da Placa: 031

ANEXOS

A. Relatórios gerados pelo programa BETA

B. Subrotinas dos programas BETA e SIMULA

C. Guia de orientações para o programa BETA

Nome do arquivo	031-01
Nome do arquivo	031-02
Nome do arquivo	031-03
Nome do arquivo	031-04
Nome do arquivo	031-05
Nome do arquivo	031-06
Nome do arquivo	031-07
Nome do arquivo	031-08
Nome do arquivo	031-09
Nome do arquivo	031-10
Nome do arquivo	031-11
Nome do arquivo	031-12
Nome do arquivo	031-13
Nome do arquivo	031-14
Nome do arquivo	031-15
Nome do arquivo	031-16
Nome do arquivo	031-17
Nome do arquivo	031-18
Nome do arquivo	031-19
Nome do arquivo	031-20
Nome do arquivo	031-21
Nome do arquivo	031-22
Nome do arquivo	031-23
Nome do arquivo	031-24
Nome do arquivo	031-25
Nome do arquivo	031-26
Nome do arquivo	031-27
Nome do arquivo	031-28
Nome do arquivo	031-29
Nome do arquivo	031-30
Nome do arquivo	031-31
Nome do arquivo	031-32
Nome do arquivo	031-33
Nome do arquivo	031-34
Nome do arquivo	031-35
Nome do arquivo	031-36
Nome do arquivo	031-37
Nome do arquivo	031-38
Nome do arquivo	031-39
Nome do arquivo	031-40
Nome do arquivo	031-41
Nome do arquivo	031-42
Nome do arquivo	031-43
Nome do arquivo	031-44
Nome do arquivo	031-45
Nome do arquivo	031-46
Nome do arquivo	031-47
Nome do arquivo	031-48
Nome do arquivo	031-49
Nome do arquivo	031-50
Nome do arquivo	031-51
Nome do arquivo	031-52
Nome do arquivo	031-53
Nome do arquivo	031-54
Nome do arquivo	031-55
Nome do arquivo	031-56
Nome do arquivo	031-57
Nome do arquivo	031-58
Nome do arquivo	031-59
Nome do arquivo	031-60
Nome do arquivo	031-61
Nome do arquivo	031-62
Nome do arquivo	031-63
Nome do arquivo	031-64
Nome do arquivo	031-65
Nome do arquivo	031-66
Nome do arquivo	031-67
Nome do arquivo	031-68
Nome do arquivo	031-69
Nome do arquivo	031-70
Nome do arquivo	031-71
Nome do arquivo	031-72
Nome do arquivo	031-73
Nome do arquivo	031-74
Nome do arquivo	031-75
Nome do arquivo	031-76
Nome do arquivo	031-77
Nome do arquivo	031-78
Nome do arquivo	031-79
Nome do arquivo	031-80
Nome do arquivo	031-81
Nome do arquivo	031-82
Nome do arquivo	031-83
Nome do arquivo	031-84
Nome do arquivo	031-85
Nome do arquivo	031-86
Nome do arquivo	031-87
Nome do arquivo	031-88
Nome do arquivo	031-89
Nome do arquivo	031-90
Nome do arquivo	031-91
Nome do arquivo	031-92
Nome do arquivo	031-93
Nome do arquivo	031-94
Nome do arquivo	031-95
Nome do arquivo	031-96
Nome do arquivo	031-97
Nome do arquivo	031-98
Nome do arquivo	031-99
Nome do arquivo	031-100

Nome do arquivo	031-101
Nome do arquivo	031-102
Nome do arquivo	031-103
Nome do arquivo	031-104
Nome do arquivo	031-105
Nome do arquivo	031-106
Nome do arquivo	031-107
Nome do arquivo	031-108
Nome do arquivo	031-109
Nome do arquivo	031-110
Nome do arquivo	031-111
Nome do arquivo	031-112
Nome do arquivo	031-113
Nome do arquivo	031-114
Nome do arquivo	031-115
Nome do arquivo	031-116
Nome do arquivo	031-117
Nome do arquivo	031-118
Nome do arquivo	031-119
Nome do arquivo	031-120
Nome do arquivo	031-121
Nome do arquivo	031-122
Nome do arquivo	031-123
Nome do arquivo	031-124
Nome do arquivo	031-125
Nome do arquivo	031-126
Nome do arquivo	031-127
Nome do arquivo	031-128
Nome do arquivo	031-129
Nome do arquivo	031-130
Nome do arquivo	031-131
Nome do arquivo	031-132
Nome do arquivo	031-133
Nome do arquivo	031-134
Nome do arquivo	031-135
Nome do arquivo	031-136
Nome do arquivo	031-137
Nome do arquivo	031-138
Nome do arquivo	031-139
Nome do arquivo	031-140
Nome do arquivo	031-141
Nome do arquivo	031-142
Nome do arquivo	031-143
Nome do arquivo	031-144
Nome do arquivo	031-145
Nome do arquivo	031-146
Nome do arquivo	031-147
Nome do arquivo	031-148
Nome do arquivo	031-149
Nome do arquivo	031-150
Nome do arquivo	031-151
Nome do arquivo	031-152
Nome do arquivo	031-153
Nome do arquivo	031-154
Nome do arquivo	031-155
Nome do arquivo	031-156
Nome do arquivo	031-157
Nome do arquivo	031-158
Nome do arquivo	031-159
Nome do arquivo	031-160
Nome do arquivo	031-161
Nome do arquivo	031-162
Nome do arquivo	031-163
Nome do arquivo	031-164
Nome do arquivo	031-165
Nome do arquivo	031-166
Nome do arquivo	031-167
Nome do arquivo	031-168
Nome do arquivo	031-169
Nome do arquivo	031-170
Nome do arquivo	031-171
Nome do arquivo	031-172
Nome do arquivo	031-173
Nome do arquivo	031-174
Nome do arquivo	031-175
Nome do arquivo	031-176
Nome do arquivo	031-177
Nome do arquivo	031-178
Nome do arquivo	031-179
Nome do arquivo	031-180
Nome do arquivo	031-181
Nome do arquivo	031-182
Nome do arquivo	031-183
Nome do arquivo	031-184
Nome do arquivo	031-185
Nome do arquivo	031-186
Nome do arquivo	031-187
Nome do arquivo	031-188
Nome do arquivo	031-189
Nome do arquivo	031-190
Nome do arquivo	031-191
Nome do arquivo	031-192
Nome do arquivo	031-193
Nome do arquivo	031-194
Nome do arquivo	031-195
Nome do arquivo	031-196
Nome do arquivo	031-197
Nome do arquivo	031-198
Nome do arquivo	031-199
Nome do arquivo	031-200

Nome do arquivo	031-201
Nome do arquivo	031-202
Nome do arquivo	031-203
Nome do arquivo	031-204
Nome do arquivo	031-205
Nome do arquivo	031-206
Nome do arquivo	031-207
Nome do arquivo	031-208
Nome do arquivo	031-209
Nome do arquivo	031-210
Nome do arquivo	031-211
Nome do arquivo	031-212
Nome do arquivo	031-213
Nome do arquivo	031-214
Nome do arquivo	031-215
Nome do arquivo	031-216
Nome do arquivo	031-217
Nome do arquivo	031-218
Nome do arquivo	031-219
Nome do arquivo	031-220
Nome do arquivo	031-221
Nome do arquivo	031-222
Nome do arquivo	031-223
Nome do arquivo	031-224
Nome do arquivo	031-225
Nome do arquivo	031-226
Nome do arquivo	031-227
Nome do arquivo	031-228
Nome do arquivo	031-229
Nome do arquivo	031-230
Nome do arquivo	031-231
Nome do arquivo	031-232
Nome do arquivo	031-233
Nome do arquivo	031-234
Nome do arquivo	031-235
Nome do arquivo	031-236
Nome do arquivo	031-237
Nome do arquivo	031-238
Nome do arquivo	031-239
Nome do arquivo	031-240
Nome do arquivo	031-241
Nome do arquivo	031-242
Nome do arquivo	031-243
Nome do arquivo	031-244
Nome do arquivo	031-245
Nome do arquivo	031-246
Nome do arquivo	031-247
Nome do arquivo	031-248
Nome do arquivo	031-249
Nome do arquivo	031-250

Anexo A-Exemplo 4.1

UNESP-UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Departamento de Energia
MESTRADO : ALEXANDRE CASSIANO

PLACA DE ORIFICIO CONCENTRICA ASME/ISO

Usuario: `ex41`
Fluido: `ar`
Material da Placa: `aco`
Tomada de Pressao: VENA CONTRACTA TAPS

VARIAVEIS UTILIZADAS:

Vazao Maxima (m3/s):	.10E+01
Diametro interno do tubo (m):	.20E+00
Rugosidade do tubo (m):	.10E-03
Diferencial de pressao (Pa):	.50E+04
Pressao de projeto (Pa):	.11E+06
Temperatura de projeto (K):	323.15
Fator de dilatacao termica:	1.0010
Viscosidade dinamica (N.s/m ²):	.20E-05
Constante isentropica:	1.4000
Fator de compressibilidade de referencia :	.99958
Fator de compressibilidade de projeto:	.99987
Pressao de saturacao do vapor na temperatura do fluido (Pa):	.12E+05
Umidade relativa do fluido:	.800
Densidade relativa:	1.000

RESULTADOS:

Numero de REYNOLDS:	.29E+06
CEB2ey:	.384236
Perda de carga (Pa):	.22E+04
Beta:	.734551

DIAMETRO DO ORIFICIO (m): .148E+00
=====



Anexo A - Exemplo 4.2

UNESP-UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Departamento de Energia
MESTRADO : ALEXANDRE CASSIANO

PLACA DE ORIFICIO CONCENTRICA ASME/ISO

Usuario: `ex42`
Fluido: `nitrogenio`
Material da Placa: `inox`
Tomada de Pressao: CORNER TAPS

VARIAVEIS UTILIZADAS:

Vazao Maxima (m3/s):	.56E+00
Diametro interno do tubo (m):	.83E-01
Rugosidade do tubo (m):	.20E-04
Diferencial de pressao (Pa):	.16E+05
Pressao de projeto (Pa):	.44E+06
Temperatura de projeto (K):	293.15
Fator de dilatacao termica:	1.0000
Viscosidade dinamica (N.s/m ²):	.19E-05
Constante isentropica:	1.4000
Fator de compressibilidade de referencia :	.99950
Fator de compressibilidade de projeto:	.99900
Pressao de saturacao do vapor na temperatura do fluido (Pa):	.32E+04
Umidade relativa do fluido:	.000
Densidade relativa:	.967

RESULTADOS:

Numero de REYNOLDS:	.40E+06
CEB2ey:	.321089
Perda de carga (Pa):	.81E+04
Beta:	.686462

DIAMETRO DO ORIFICIO (m): .568E-01
=====



Anexo A - Exemplo 4.3

UNESP-UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Departamento de Energia
MESTRADO : ALEXANDRE CASSIANO

PLACA DE ORIFICIO CONCENTRICA ASME/ISO

Usuario: `ex43`
Fluido: `gas`
Material da Placa: `inox`
Tomada de Pressao: PIPE TAPS

VARIAVEIS UTILIZADAS:

Vazao Maxima (m3/s):	.14E+01
Diametro interno do tubo (m):	.10E+00
Rugosidade do tubo (m):	.20E-04
Diferencial de pressao (Pa):	.12E+05
Pressao de projeto (Pa):	.25E+07
Temperatura de projeto (K):	300.15
Fator de dilatacao termica:	1.0000
Viscosidade dinamica (N.s/m ²):	.10E-05
Constante isentropica:	1.4000
Fator de compressibilidade de referencia :	.99300
Fator de compressibilidade de projeto:	.87300
Pressao de saturacao do vapor na temperatura do fluido (Pa):	.32E+04
Umidade relativa do fluido:	.000
Densidade relativa:	.900

RESULTADOS:

Numero de REYNOLDS:	.14E+07
CEB2ey:	.223345
Perda de carga (Pa):	.78E+04
Beta:	.541435

DIAMETRO DO ORIFICIO (m): .554E-01
=====



Anexo A - Exemplo 4.4

UNESP-UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Departamento de Energia
MESTRADO : ALEXANDRE CASSIANO

PLACA DE ORIFICIO CONCENTRICA ASME/ISO

Usuario: `ex44`
Fluido: `vapor`
Material da Placa: `aco`
Tomada de Pressao: `Não é adequado`

VARIAVEIS UTILIZADAS:

Vazao Maxima (m3/s):	.91E+00
Diametro interno do tubo (m):	.20E+00
Rugosidade do tubo (m):	.10E-03
Diferencial de pressao (Pa):	.12E+05
Pressao de projeto (Pa):	.43E+07
Temperatura de projeto (K):	713.15
Fator de dilatacao termica:	1.0110
Viscosidade dinamica (N.s/m ²):	.26E-05
Constante isentropica:	1.3000
Massa especifica (kg/m3):	13.7180
Viscosidade cinematica (m2/s):	.19E-01
Fator de correcao de umidade:	1.00000

RESULTADOS:

Numero de REYNOLDS:	.22E+07
CEB2ey:	.681221
Perda de carga (Pa):	.24E+04
Beta:	.863334

DIAMETRO DO ORIFICIO (m): -----
=====



Anexo A - LAT

7

UNESP-UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Departamento de Energia
MESTRADO : ALEXANDRE CASSIANO

PLACA DE ORIFICIO CONCENTRICA ASME/ISO

Usuario: 'LAT'
Fluido: 'AR'
Material da Placa: 'BRONZE'
Tomada de Pressao: RADIUS TAPS

VARIAVEIS UTILIZADAS:

Vazao Maxima (m3/s):	.73E-01
Diametro interno do tubo (m):	.80E-01
Rugosidade do tubo (m):	.10E-04
Diferencial de pressao (Pa):	.55E+03
Pressao de projeto (Pa):	.46E+06
Temperatura de projeto (K):	318.15
Fator de dilatacao termica:	1.0000
Viscosidade dinamica (N.s/m ²):	.20E-05
Constante isentropica:	1.4000
Fator de compressibilidade de referencia :	.99852
Fator de compressibilidade de projeto:	.99948
Pressao de saturacao do vapor na temperatura do fluido (Pa):	.12E+05
Umidade relativa do fluido:	.600
Densidade relativa:	1.000

RESULTADOS:

Numero de REYNOLDS:	.54E+05
CEB2ey:	.252638
Perda de carga (Pa):	.33E+03
Beta:	.618707

DIAMETRO DO ORIFICIO (m): .498E-01
=====



Anexo A - LF

UNESP-UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Departamento de Energia
MESTRADO : ALEXANDRE CASSIANO

PLACA DE ORIFICIO CONCENTRICA ASME/ISO

Usuario: `LF`
Fluido: `AR`
Material da Placa: `INOX`
Tomada de Pressao: FLANGE TAPS

VARIAVEIS UTILIZADAS:

Vazao Maxima (m3/s):	.40E-01
Diametro interno do tubo (m):	.74E-01
Rugosidade do tubo (m):	.20E-05
Diferencial de pressao (Pa):	.25E+04
Pressao de projeto (Pa):	.10E+06
Temperatura de projeto (K):	300.15
Fator de dilatacao termica:	1.0000
Viscosidade dinamica (N.s/m ²):	.17E-05
Constante isentropica:	1.4000
Fator de compressibilidade de referencia :	.99852
Fator de compressibilidade de projeto:	.99941
Pressao de saturacao do vapor na temperatura do fluido (Pa):	.12E+05
Umidade relativa do fluido:	.600
Densidade relativa:	1.000

RESULTADOS:

Numero de REYNOLDS:	.38E+05
CEB2ey:	.168425
Perda de carga (Pa):	.17E+04
Beta:	.517756

DIAMETRO DO ORIFICIO (m): .383E-01
=====



Anexo A - LCP

UNESP-UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Departamento de Energia
MESTRADO : ALEXANDRE CASSIANO

PLACA DE ORIFICIO CONCENTRICA ASME/ISO

Usuario: `LCP`
Fluido: `AR`
Material da Placa: `ACO`
Tomada de Pressao: FLANGE TAPS

VARIAVEIS UTILIZADAS:

Vazao Maxima (m3/s):	.33E-01
Diametro interno do tubo (m):	.51E-01
Rugosidade do tubo (m):	.20E-05
Diferencial de pressao (Pa):	.25E+04
Pressao de projeto (Pa):	.33E+06
Temperatura de projeto (K):	323.15
Fator de dilatacao termica:	1.0000
Viscosidade dinamica (N.s/m ²):	.17E-05
Constante isentropica:	1.4000
Fator de compressibilidade de referencia :	.99852
Fator de compressibilidade de projeto:	.99941
Pressao de saturacao do vapor na temperatura do fluido (Pa):	.12E+05
Umidade relativa do fluido:	.650
Densidade relativa:	1.000

RESULTADOS:

Numero de REYNOLDS:	.44E+05
CEB2ey:	.161710
Perda de carga (Pa):	.18E+04
Beta:	.506770

DIAMETRO DO ORIFICIO (m): .257E-01
=====



ANEXO B - SUBROTINAS

Subrotinas do Programa BETA

```
SUBROUTINE VENFLA
  REAL H,k,DP
  H=.99999
  A=FUN1(H)
  IF(A.LT.0)THEN
    SIS='      O VALOR DE BETA NAO E APROPRIADO PARA USO DA
@ PLACA DE ORIFICIO'
    B=0
    GO TO 130
  END IF
  C=0
  D=H
  PRE=.0001
140 XM=(C+D)/2
  ERRO=ABS(C-D)/2
  A1=FUN1(C)*FUN1(XM)
  IF(ERRO.LT.PRE)THEN
    B=XM
    GOTO 130
  ELSE
    IF(A1.GT.0)THEN
      C=XM
      GOTO 140
    ELSE
      IF(A1.LT.0)THEN
        D=XM
        GOTO 140
      ELSE
        B=XM
        END IF
      END IF
    END IF
  END IF
130 ey=FUN10(B)
  IF(J.EQ.1)THEN
    RL=1300*B**2
    IF(RL.LT.5000)THEN
      RL=5000
    END IF
  ELSE
    RL=64000*B**2
    IF(RL.LT.5000)THEN
      RL=5000
    END IF
  END IF
```



```

RETURN
END
FUNCTION FUN1(X)
  FUN1=.61*X**2*(1-(.41+.35*X**4)*DP*.00009996/(Pp*k))/SQRT(1-X*
!*4)-CEB2ey
  RETURN
FUNCTION FUN10(X)
  FUN10=1-(.41+.35*X**4)*DP*.00009996/(Pp*k)
  RETURN
END

```

SUBROUTINE CORNER (CEB2ey,DP,Pp,K,B,S,RL,ey)

```

  CHARACTER S*100
  REAL K
  FN3(X)=.61*X**2/SQRT(1-X**4)
  FN4(X)=(1-(.3707+.3184*X**4)*(1-((Pp-DP*.00009996)/Pp)**(1/K)))**.
!935)
  FUN2(X)=FN3(X)*FN4(X)-CEB2ey
  B=.9999999
  A=FUN2(B)
  IF(A.LT.0)THEN
    S='      OSISTEMA NAO Eh APROPRIADO PARA CONTROLE DE VAZ
!AO COM PLACA DE ORIFICIO'
    B=0
    GOTO 150
  END IF
  C=0
  D=B
  PRE=.0001
160 XM=(C+D)/2
  ERRO=ABS(D-C)/2
  A1=FUN2(C)*FUN2(XM)
  IF(ERRO.LT.PRE)THEN
    B=XM
    GOTO 150
  ELSE
    IF(A1.GT.0)THEN
      C=XM
      GOTO 160
    ELSE
      IF(A1.LT.0)THEN
        D=XM
        GOTO 160
      ELSE
        B=XM
      END IF
    END IF
  END IF
END IF

```

```

150 ey=FN4(B)
    RL=14000*B**1.3
    IF(RL.LT.5000)THEN
    RL=5000
    END IF
    RETURN
    END

```

SUBROUTINE PIPE (CEB2ey,DP,Pp,K,Re,DI,B,S,ey)

```

    CHARACTER S*100
    REAL K
    FN9(X)=SQRT((.25-X)**5*A2)
    FN5(X)=1-(.333+1.145*(X**2+.7*X**5+12*X**13))*DP*.00009996/(Pp*K)
    FN6(X)=.03937*DI*X*(905-5000*X+9000*X**2-4200*X**3+22225/DI)
    FN7(X)=(.5925+.4623/DI+(.44-1.524/DI)*X**2+(.935+5.715/DI)*X**5+1
    #.35*X**14+(7.207/SQRT(DI))*FN9(X))/(1+.000015*(905-5000*X+9000*X**
    #2-4200*X**3+22225/DI))
    FN8(X)=FN7(X)*(1+FN6(X)*X/Re)
    FUN3(X)=FN8(X)*FN5(X)*X**2-CEB2ey
    A2=0
    H=.9999
    A=FUN3(H)
    IF(A.LT.0)THEN
    S='          OSISTEMA NAO Eh APROPRIADO PARA CONTROLE DE VAZ
!AO COM PLACA DE ORIFICIO'
    B=0
    GOTO 170
    END IF
    C=.0001
    D=H
    PRE=.0001
180 XM=(C+D)/2
    IF(XM.GT..25)THEN
    A2=0
    ELSE
    A2=1
    END IF
    ERRO=ABS(D-C)/2
    A1=FUN3(C)*FUN3(XM)
    IF(ERRO.LT.PRE)THEN
    B=XM
    GOTO 170
    ELSE
    IF(A1.GT.0)THEN
    C=XM
    GOTO 180
    ELSE
    IF(A1.LT.0)THEN

```



```

D=XM
GOTO 180
ELSE
B=XM
END IF
END IF
END IF
170 ey=FN5(B)
RETURN
END

```

Subrotinas do Programa SIMULA

SUBROUTINE ASME (DI,B,RE,CASME)

C Declaração de Variáveis

REAL DI, B, Ke1, Ke2, Ke3, Ke4, Ko, Ke, Ku, CASME

DIMENSION C(20), Rd(20), CASM(20), CA(20)

C -----CALCULO DO COEFICIENTE-----

$A = 0.03937 * B * DI * (830 - 5000 * B + 9000 * B^2 - 4200 * B^3 + 2671 / DI^{0.5})$

$Ke1 = 0.5993 + (0.1778 / DI) + (0.364 + 0.3830 / DI^{0.5}) * B^4$

IF(B.GE.0.15.AND.B.LE.0.32)THEN

$Ke2 = (0.4 * (1.6 - 25.4 / DI)^{0.5}) * (.07 + (12.7 / DI - B)^{2.5})$

ELSE

 Ke2=0

ENDIF

IF(B.GE.0.15.AND.B.LE.0.5)THEN

$Ke3 = (0.009 + 0.8636 / DI) * (0.5 - B)^{1.5}$

ELSE

 Ke3=0

ENDIF

IF(B.GE.0.70.AND.B.LE.0.75)THEN

$Ke4 = (41935 / DI^2 + 3) * (B - 0.7)^{2.5}$

ELSE

 Ke4=0

ENDIF

$Ke = Ke1 - Ke2 + Ke3 + Ke4$

$Ko = Ke * (10^6 * DI * B / (10^6 * DI * B + 381 * A))$

i=0

C-----CALCULO DO COEFICIENTE VARIANDO REYNOLDS DE 10E4 A 10E7----

Rd(1)=10**4

OPEN(UNIT=2,FILE='ASME.DAT')

DO 20 i=1,20

 C(i)=A/Rd(i)

 CA(i)=Ko*(1+C(i))

 CASM(i)=CA(i)*SQRT(1-B**4)

Write(2,100)i,Rd(i),CASM(i)

Rd(i+1)=Rd(i)+i*10**5 !aproximadamente 20 pontos



20 CONTINUE
100 FORMAT(2X,I3,2X,E8.2,8X,F7.5)

$Ku = K_o * (1 + A / (RE))$! CALCULO DE C PARA RE DE PROCESSO
CASME = $Ku * \sqrt{1 - B^{**4}}$
RETURN
END

SUBROUTINE FOXBORO(DI,B,RE, CFOX)

C ESTE PROGRAMA CALCULA O COEFICIENTE DE DESCARGA PARA
TOMADA
C SEGUNDO A EQUACAO EMPIRICA DE DOWDELL, COM CORRECOES DA
C FOXBORO

C Declaração de Variáveis
REAL DI, B ,CFOX, CDO, CD
DIMENSION Rd(100), CFOXB(100), CDOW(100)

C
C ----- IDENTIFICACAO-----
C

WRITE(*,*) ESTE PROGRAMA CALCULA O COEFICIENTE DE DESCARGA'
WRITE(*,*) SEGUNDO A EQUACAO EMPIRICA DE DOWDELL, COM AS '
WRITE(*,*) CORRECOES DA FOXBORO.'

C-----CALCULO DO COEFICIENTE-----

$CD = 0.58850 + 0.03396 * B + 0.6889E-5 * DI * B - 1.5315E-4 * DI * B^{**2}$

C-----COEFICIENTE VARIANDO REYNOLDS-----

Rd(1)= 10^{**4}
OPEN(UNIT=2,FILE='FOXB.DAT')
DO 20 i=1,20
CDOW(i)= $CD + (372 - 1218 * B + 2127 * B^{**2}) / Rd(i)$
CFOXB(i)= $CDOW(i) + 2.0472E-5 * DI * B^{**2}$

Write(2,100)i,Rd(i),CFOXB(i)
Rd(i+1)= $Rd(i) + i * 10^{**5}$!aproximadamente 20 pontos

20 CONTINUE
100 FORMAT(2X,I3,2X,E8.2,8X,F7.5)

$CDO = CD + (372 - 1218 * B + 2127 * B^{**2}) / RE$
 $CFOX = CDO + 2.0472E-5 * DI * B^{**2}$

RETURN



END

SUBROUTINE ISO (DI,B,RE,TOM, CISO)

C Declaração de Variáveis

REAL L2L, CL, RE, L1

INTEGER TOM

DIMENSION Rd(100), CIS(100)

IF(TOM.EQ.1)THEN !CORNER TAPS

 L1=0

 L2L=0

 OPEN(UNIT=2,FILE='CORNER.DAT')

ELSE

 IF(TOM.EQ.2)THEN !RADIUS TAPS

 L1=1

 L2L=0.47

 OPEN(UNIT=2,FILE='RADIUS.DAT')

 ELSE

 IF(TOM.EQ.3)THEN !FLANGE TAPS

 L1=25.4/DI

 L2L=25.4/DI

 OPEN(UNIT=2,FILE='FLANGE.DAT')

 IF(L1.GT.0.4333)THEN

 CL=(0.0390*L1*B**4.)*(1-B**4.)**(-1.)

 ELSE

 CL=(0.0900*L1*B**4.)*(1-B**4.)**(-1.)

 ENDIF

 ELSE

 IF(TOM.EQ.4)THEN

 GOTO 121 !PIPE TAPS

 OPEN(UNIT=2,FILE='PIPE.DAT')

 ENDIF

 ENDIF

ENDIF

ENDIF

 Rd(1)=10**4

 DO 30 I=1,30

 CIS(i)=0.5959+0.0312*B**2.1-0.1840*B**8+0.0029*B**2.5*(10**6/Rd(i
#))**0.75+CL-0.0337*L2L*B**3

 WRITE(2,100)i,Rd(i),CIS(i)

 Rd(i+1)=Rd(i)+i*10**5

 30 CONTINUE

 CISO=0.5959+0.0312*B**2.1-0.1840*B**8+0.0029*B**2.5*(10**6/RE
1)**0.75+CL-0.0337*L2L*B**3

 GOTO 50

121 Rd(1)=10**4 !PIPE

 DO 40 I=1,50

 CIS(i)=0.5959+0.461*B**2.1+0.48*B**8+0.0029*B**2.5*(10**6/Rd(i))
1 **0.75+0.079*B**4/(1-B**4)

```

WRITE(2,100)i,Rd(i),CIS(i)
Rd(i+1)=Rd(i)+i*10**5
40 CONTINUE
100 FORMAT(2X,I3,2X,E8.2,8X,F7.4)
CISO=0.5959+0.461*B**2.1-0.48*B**8+0.0029*B**2.5*(10**6/RE)
1 **0.75+0.079*B**4/(1-B**4)
50 CONTINUE
RETURN
END

```

ANEXO C - Guia de Orientações

GUIA DE ORIENTAÇÕES PARA PROGRAMA BETA

- Mensagens

As mensagens estão relacionadas as restrições de aplicação da placa de orifício segundo tabela 3.1.

- 1) Se o diferencial de pressão for maior que 25% da pressão de projeto.

“Diferencial de pressão fora do limite de aplicação.”

- 2) A escolha do tipo de gás (tab.2.1) define um limite de aplicação em função da temperatura. Caso esse limite não se verifique, deve-se entrar com a viscosidade dinâmica nas condições de projeto.

“A fórmula de Sutherland não se aplica:

Definir nova temperatura de projeto ou

Entrar com a viscosidade dinâmica nas condições de projeto.”

- 3) Se a relação do diâmetro interno do tubo (DI) com sua rugosidade forem maior que 3400 para tomada tipo corner e maior que 1000 para demais casos.

“A tubulação é inadequada para medição com placa de orifício.”

- 4) Caso a relação de diâmetros não se encontre no intervalo de 0,15 a 0,80.

“A relação beta calculada não é apropriada para medição com placa de orifício.”

Ou “Tomada de pressão inadequada”

- 5) Se o número de Reynolds calculado (Re) for menor que o Reynolds de Transição (RL).

“Tomada de pressão inadequada em função do número de Reynolds”



TABELAS DO PROGRAMA BETA

As tabelas a seguir são referenciadas pelo programa BETA e devem ser consultadas em um dos manuais referenciados ou nas seguintes tabelas do manual do Delmée (1989) indicadas abaixo do número das tabelas a seguir:.

Tabela 1 - Rugosidade de tubos - Coolebrook
(Tabela - pg. Delmée, 1989)

Tabela 2 - Referencial do diferencial de pressão
(Tabela - pg. Delmée, 1989)

Tabela 3 - Fator de compressibilidade
(Tabela - pg. Delmée, 1989)

Tabela 4 - Pressão de saturação para gás
(Tabela - pg. Delmée, 1989)

Tabela 5 - Massa específica para vapor
(Tabela - pg. Delmée, 1989)

Tabela 6 - Viscosidade cinemática
(Tabela - pg. Delmée, 1989)

Tabela 7 - Fator de umidade para vapor
(Tabela - pg. Delmée, 1989)

Tabela 8 - Número de Reynolds
(Tabela - pg. Delmée, 1989)



CASSIANO, A.D.P. Sistematização na seleção, calibração e aplicação de medidor de vazão- tipo placa de orifício. Considerações para escoamento pulsante. Guaratinguetá, 1998, 131 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho".

RESUMO

A sistematização consiste em estabelecer uma rotina para seleção e calibração de placa de orifício concêntrica, tratando com critério as diversas variáveis que influenciam sua aplicação em escoamento pulsante. Para seleção da placa de orifício nas condições operacionais foi desenvolvido o programa BETA em FORTRAN, cuja as subrotinas selecionam o material da placa com correção da dilatação, o tipo de fluido com correções de viscosidade e umidade, e do tipo de tomada de pressão; verificando as limitações de aplicação do método. Selecionada a placa de orifício alguns parâmetros termodinâmicos e geométricos estarão definidos e serão utilizados no programa SIMULA para determinação do coeficiente de descarga e na análise de incerteza considerando as demais variáveis, definindo assim a performance do sistema de medição e definindo para as condições operacionais a curva da vazão medida com sua performance pelo diferencial de pressão. O programa SIMULA para determinação do coeficiente de descarga utiliza fórmulas empíricas segundo normas ASME e ISO, de acordo com o tipo de tomada de pressão. Em escoamento pulsante é utilizado o número de Hodgson para caracterizar e determinar o erro associado na aplicação de placa de orifício, além de descrever os cuidados necessários na aquisição de dados.

Palavras-chave: medição de vazão, calibração e escoamento pulsante.



CASSIANO, A.D.P. Systematisation in the choice, calibration and application of flowmeter - type orifice plate. Consideration about pulsating flow. Guaratinguetá, 1998, 131 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho".

ABSTRACT

This dissertation is a routine in the choice, calibration and application of concentric hole plate in pulsating flow. The choice of the hole plate is made in the flows operational conditions by BETA program. In the subroutines, they are choice the plate material, the fluid used and the taps pressure. The restriction of method are checked, as respect the diameters relationship, pressures relationship, sharpness and the number of Reynolds. As the hole plate choice will be defined some thermodynamic and geometric parameters, that they will be used for determination of the measuring system performance. This is made using the discharge coefficient and uncertainty analysis with the other variables. The program "SIMULA" for determination of the discharge coefficient it uses empirical equation by the ASME and ISO rules, by accord the taps pressure. The flow and associated uncertainty are relationship with the pressure drop in the operational conditions, and denominated simulated curve. The number of Hodgson is used to characterize and to determine the associated errors in the application of hole plate, besides describing the necessary cares in the data acquisition by pulsating flow.

Keywords: Flow measurement, calibration and pulsating flow.



