

UNIVERSIDADE METODISTA DE PIRACICABA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA E DE PRODUÇÃO
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**INVESTIGAÇÃO DA FLUTUAÇÃO DA VAZÃO COMO COMPONENTE DA
INCERTEZA DE MEDIÇÃO, NA CALIBRAÇÃO DE MEDIDORES DE ÁGUA
VELOCIMÉTRICOS.**

ADRIANO FERNANDES DE OLIVEIRA

ORIENTADORA: PROF^a. DR^a. ROXANA M. M. ORREGO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós –
Graduação em Engenharia de Produção, da
Universidade Metodista de Piracicaba –
UNIMEP, como requisito para obtenção do
Título de Mestre em Engenharia de Produção.

SANTA BÁRBARA D'OESTE

2006

**INVESTIGAÇÃO DA FLUTUAÇÃO DA VAZÃO COMO
COMPONENTE DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO, NA
CALIBRAÇÃO DE MEDIDORES DE ÁGUA VELOCIMÉTRICOS.**

ADRIANO FERNANDES DE OLIVEIRA

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada, em 29 de agosto de 2006, pela
Banca Examinadora constituída pelos Professores:

Prof^a. Dr^a Denise P. V. Sato

Prof^o. Dr. Rubens Gedraite

Prof^a. Dr^a Roxana M. M. Orrego

AGRADECIMENTOS

A Deus pela energia, para vencer este desafio.

A minha esposa Christiane e filha Beatriz, pelo apoio incondicional.

A Octávio Calligaris, por tornar-se a minha referência.

À indústria Actaris pelas informações e apoio financeiro.

Ao INMETRO, especialmente ao Eng^o M_{sc} Renato Lazari.

À Prof^a. Dr^a Roxana pela orientação e incentivo.

RESUMO

OLIVEIRA, A.F. (2006). *Investigação da Flutuação da Vazão como Componente da Incerteza de Medição, na Calibração de Medidores de Água Velocimétricos*. Santa Bárbara D'Oeste, 113p. Dissertação (Mestrado), Universidade Metodista de Piracicaba.

Esta dissertação investiga e estima a influência da flutuação da vazão como uma componente da incerteza de medição no processo de calibração de um medidor de água, velocimétrico, multijato, com vazão máxima de 3,0m³/h e classe C. As principais motivações para elaboração deste estudo foram originadas pela observação de situações contraditórias existentes entre a recomendação contida nas especificações de um modo geral e a aplicação destas práticas na calibração de medidores de água.

A metodologia utilizada parte da indução de uma variação da vazão, para mais e para menos, em torno de uma vazão definida como ponto de calibração. Ao provocar tal variação, realiza-se a calibração do medidor de água e determina-se o erro relativo de volume. Primeiramente, a incerteza de medição é estimada para o erro relativo de volume e vazão, considerando somente as componentes tradicionais.

Posteriormente, com ajuda de uma análise de variância, estabelecem-se critérios para identificar a necessidade de considerar ou não a influência da flutuação da vazão na incerteza de medição dos erros relativos de volume ao longo da faixa de medição do medidor de água. Os resultados neste trabalho mostraram que apenas para vazões em torno de 15 L/h, a influência da flutuação aumenta consideravelmente, em 120%, a incerteza de medição do erro relativo do volume.

A metodologia aplicada e os resultados obtidos permitiram o aperfeiçoamento da sistemática de cálculo da incerteza de medição, que atualmente não prevê esta componente, a análise crítica dos limites estabelecidos nas normas atuais e dos equipamentos de indicação de vazão, além da análise de ações que possam ser aplicadas para redução da flutuação da vazão durante calibração.

Palavras-Chave: Vazão, Medidor de Água, Incerteza de Medição

ABSTRACT

OLIVEIRA, A.F. (2006). *Investigation of the flow fluctuation as a component of the measurement uncertainty by calibrating velocimetric water meters*. Santa Bárbara D'Oeste, 113p. Master's degree thesis – Universidade Metodista de Piracicaba.

This work studies and quantifies the influence of the flow fluctuation as a measurement uncertainty source of velocimetric multijet water meter, class C, with a maximum flow of 3,0m³/h. The goals of this study were originated by the observation of contradictions between the specifications of actual standards and the calibration praxis applied for water meters in industry.

A variation of the flow was induced around defined nominal flows (calibrations points) and the water meters were then calibrated, calculating its relative volume errors. The measurement uncertainties of relative volume errors and flow were then estimated, considering first only the traditional uncertainty components. Further, the results were statistically analyzed using analyze of variance (ANOVA) in order to identify the necessity of considering the flow variation influence for the estimation of the final water meter uncertainty.

The results obtained in this work showed a significant flow variation influence only at flows around 15 L/h, where the expanded uncertainty of the relative volume errors increased 120%.

The methodology applied in this study and its results allowed the improvement of the uncertainty estimation method for water meter that actually does not include the flow fluctuation as a source, the critical analysis of the limits established in actual standards and of the equipments used to indicated the flow and the analysis of equipment and the analysis of actions that could be used to reduce the flow fluctuation during a calibration process.

Keys Words: Flow, Water Meter, Measurement Uncertainty

SUMÁRIO

Resumo.....	i
Abstract.....	ii
Sumário.....	1
Lista de Abreviaturas e Siglas.....	3
Lista de Símbolos.....	4
Lista de Figuras.....	6
Lista de Tabelas.....	9
Capítulo 1 Introdução.....	11
Capítulo 2 Calibração e Incerteza de Medição de Medidores de Água – Especificações e Práticas Atuais.....	17
2.1 Medidores de Água.....	17
2.2 Calibração de Medidores de Água.....	23
2.2.1 Vazão, Erro de Indicação e Tolerância de Calibração.....	24
2.2.2 Pontos de Calibração.....	32
2.2.3 Flutuação da Vazão e sua Tolerância.....	37
2.3 Tipos de Bancadas de Calibração.....	42
2.3.1 Bancada de Calibração com Princípio Volumétrico....	42
2.3.2 Bancada de Calibração com Princípio Gravimétrico...	43
2.3.3 Bancada de Calibração com Princípio Eletrônico.....	44
2.4 Incerteza de Medição em Medidores de Água.....	45
2.4.1 Definições Gerais.....	46
2.4.2 Componentes de Incerteza de Medição em Medidores de Água.....	50

Capítulo 3	Proposta para Determinação da Influência da Flutuação da Vazão.....	58
Capítulo 4	Planejamento e Realização dos Testes Experimentais.....	61
4.1	Seleção do Tipo de Bancada de Calibração.....	61
4.2	Definição da Quantidade de Medidores e suas Características.....	61
4.3	Definição da Quantidade de Pontos de Calibração.....	62
4.4	Definição da Tolerância de Calibração para Erro de Volume em um Medidor de Água.....	63
4.5	Definição da Tolerância da Flutuação da Vazão.....	63
4.6	Seleção de Medidor de Vazão.....	65
4.7	Posicionamento dos Medidores de Água e Equipamentos Auxiliares.....	66
4.8	Programação na Bancada de Calibração Eletrônica.....	68
Capítulo 5	Resultados e Discussões.....	71
5.1	Realização do Cálculo da Incerteza de Medição para Volume e Vazão.....	71
5.2	Realização da Análise de Variância (Teste F).....	86
5.3	Cálculo da Incerteza de Medição, Acrescentando a Componente de Incerteza de Medição Flutuação da Vazão.....	94
Capítulo 6	Conclusão.....	98
Referências Bibliográficas.....		101
Anexo 1	Distribuição t de Student.....	109
Anexo 2	Distribuição F.....	110
Anexo 3	Resultados da Calibração, Erro Relativo de Volume, com Flutuação da Vazão Forçada.....	111
Anexo 4	Resultados da Medição da Vazão.....	112
Anexo 5	Resultados da Medição da Temperatura.....	113

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANSI – *American National Standards Institute*

AWWA – *American Water Works Association*

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial

ISO – *International Organization for Standardization*

NBR – Norma Brasileira

NM – Norma Mercosul

OIML – *Organisation Internationale de Métrologie Légale*

SANS – *South African National Standard*

UKAS - *United Kingdom Accreditation Service*

LISTA DE SÍMBOLOS

A – Área da secção.

a - Metade da amplitude para a variação de um fator de influência.

C_i – Coeficiente de Sensibilidade.

E – Erro

E_{MC} – Erro médio do volume corrigido.

E_{VC} – Erro médio da vazão corrigida.

E_{BPA} – Erro médio da bancada de calibração eletrônica, modelo BPA.

F – Análise de variância para determinar se as médias de duas ou mais populações são iguais (Teste F).

gl_n – Graus de liberdade do numerador

gl_d – Graus de liberdade do denominador

k – Fator de abrangência (incerteza de medição) ou número de amostras (teste estatístico F)

L_f – Leitura final.

L_i – Leitura inicial.

L_1 – Leitura n° 1.

L_2 – Leitura n° 2.

L_3 – Leitura n° 3.

m – Massa.

M_1 – Medidor de Água n° 1.

M_2 – Medidor de Água n° 2.

M_3 – Medidor de Água n° 3.

n – Número de leituras.

nv – Número de voltas da turbina.

Q_C – Vazão corrigida.

Q_m – Vazão mássica.

$Q_{máx}$ ou $q_{máx}$ ou q_s ou Q_4 – Vazão máxima ou vazão de sobrecarga

Q_{min} ou q_{min} ou Q_1 – Vazão mínima.

Q_t ou q_t ou Q_2 – Vazão de transição.

Q_n ou q_n ou Q_p ou q_p ou Q_3 – Vazão nominal ou vazão permanente

Q_R – Vazão

Q_V – Vazão volumétrica.

R_p – Resolução do padrão de referência.

s ou s_j – Desvio padrão amostral.

s_{po} – Desvio padrão combinado.

s^2 - Variância

S_{w^2} - Estimativa da variância dentro das amostras

S_{b^2} - Estimativa da variância entre as amostras

t – Tempo

U – Incerteza de Medição Expandida

u_A - Componente de incerteza de medição tipo A, repetitividade.

u_{amp} - Maior amplitude entre os três pontos de calibração que compõe um agrupamento.

u_C – Incerteza de Medição Combinada

u_h – Componente de incerteza de medição relacionada ao certificado de calibração do padrão de referência (Incerteza Herdada).

u_{BR} – Componente de incerteza de medição tipo B, resolução.

u_{Bt} – Componente de incerteza de medição tipo B, relacionada a temperatura.

u_{Buh} – Componente de incerteza de medição tipo B, incerteza herdada.

u_{Buht} – Componente de incerteza de medição tipo B, incerteza herdada do termômetro digital.

u_{Bvc} – Componente de incerteza de medição tipo B, volume cíclico.

u_{BFV} – Componente de incerteza de medição tipo B, flutuação da vazão.

\bar{v} – velocidade média

V – Volume

V_c – Volume cíclico

V_e – Volume escoado

V_{eff} – Graus de liberdade efetivo

v_i ou v_j – Graus de liberdade

ΔT – Variação de Temperatura.

$\Delta \gamma$ – Variação entre coeficientes de expansão térmica volumétrica.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Mecanismos de medidores de água com princípio volumétrico, segundo Elmore E. (1972).....	19
Figura 2	Exemplos conceituais adaptados do princípio de funcionamento de medidores de água velocimétrico, segundo Elmore (1972).....	20
Figura 3	Medidor de Água Velocimétrico, monojato com transmissão magnética.....	21
Figura 4	Medidor de Água Velocimétrico, multijato com transmissão magnética.....	21
Figura 5	Diferentes classes metrológicas, para um mesmo medidor de água.....	22
Figura 6	Tolerância do erro relativo de volume (eixo y) característica do medidor de água $Q_{m\acute{a}x}$ 3m ³ /h e classe C, conforme Portaria INMETRO n ^o 246 (2000) e segundo norma NBR NM 212 (1999).....	27
Figura 7	Tolerância da flutuação da vazão (eixo x) para medidor de água $Q_{m\acute{a}x}$ 3m ³ /h e classe C, conforme Portaria INMETRO n ^o 246 (2000).....	39
Figura 8	Desenho esquemático da bancada de calibração volumétrica.....	43
Figura 9	Desenho esquemático da bancada de calibração gravimétrica.....	44
Figura 10	Bancada de Calibração Eletrônica: 1) Reservatório de água; 2) Monitor, indica o resultado da medição; 3) Painel operacional para abertura e fechamento da linha e início ou interrupção do teste; 4) Sensor infra-vermelho 5) Medidor de água.....	45
Figura 11	Representação esquemática de alguns tipos de distribuição de probabilidade, conforme norma ISO 5168(2005).....	49
Figura 12	Pressão do fluido em cada medidor de água, durante calibração no ponto de 3000 L/h, devido a perda de carga.....	52

Figura 13	Diagrama de causa e efeito, com as componentes de incerteza de medição e equações aplicadas no cálculo de incerteza de medição expandida de um medidor de água $Q_{m\acute{a}x}$ 3m ³ /h e classe C.....	57
Figura 14	Representação esquemática dos critérios para a consideração da flutuação da vazão como componente da incerteza de medição.....	59
Figura 15	Pontos de calibração e pontos extremos provocados pela flutuação forçada no limite superior e inferior da tolerância....	66
Figura 16	Bancada de calibração eletrônica e equipamentos posicionados: 1) Medidores de Água; 2) Termômetro Digital; 3) Medidor de Vazão Eletromagnético, 4) Válvula Tipo Agulha e 5) Mancal com Comprimento maior que 5*D.....	67
Figura 17	Válvula tipo agulha utilizada para ajuste fino da vazão.....	68
Figura 18	Representação do resultado da calibração, no medidor de água objeto de estudo.....	79
Figura 19	Resultados de calibração de medidores de água submetidos a flutuação forçada nas vazões de 3150L/h, 3000L/h e 2850L/h não rejeita H_0 , médias iguais.....	89
Figura 20	Resultados de calibração de medidores de água submetidos a flutuação forçada nas vazões de 1575L/h, 1500L/h e 1475L/h não rejeita H_0 , médias iguais.....	90
Figura 21	Resultados de calibração de medidores de água submetidos a flutuação forçada nas vazões de 787,5 L/h, 750 L/h e 712,5 L/h não rejeita H_0 , médias iguais.....	90
Figura 22	Resultados de calibração de medidores de água submetidos a flutuação forçada nas vazões de 393,8 L/h, 375 L/h e 356,2 L/h não rejeita H_0 , médias iguais.....	91
Figura 23	Resultados de calibração de medidores de água submetidos a flutuação forçada nas vazões de 210 L/h, 200 L/h e 190 L/h não rejeita H_0 , médias iguais.....	91
Figura 24	Resultados de calibração de medidores de água submetidos a flutuação forçada nas vazões de 105 L/h, 100 L/h e 95 L/h não rejeita H_0 , médias iguais.....	92

Figura 25	Resultados de calibração de medidores de água submetidos a flutuação forçada nas vazões de 23,06 L/h, 22,5 L/h e 21,94 L/h não rejeita H_0 , médias iguais.....	92
Figura 26	Resultados de calibração de medidores de água submetidos a flutuação forçada nas vazões de 15,37 L/h, 15 L/h e 14,62 L/h rejeita H_0 , médias diferentes.....	93
Figura 27	Medidor de vazão eletromagnético, indicando vazão instantânea.....	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Comparação dos pontos de calibração e tolerâncias do erro relativo de volume entre ISO 4064-1 (2005) e ISO 4064-1 (1993).....	28
Tabela 2	Pontos de calibração e tolerâncias de erro relativo de volume recomendados pela OIML R 49-1 (2003).....	29
Tabela 3	Pontos de calibração e tolerâncias do erro relativo de volume, conforme ANSI / AWWA C708-1 (2005).....	30
Tabela 4	Pontos de calibração e tolerâncias do erro relativo de volume do medidor de água $Q_{máx}$ 3m ³ /h e classe C, conforme SANS 1529-1 (2003).....	31
Tabela 5	Opções de tolerância de calibração para erro relativo de volume, para medidor de água $Q_{máx}$ 3m ³ /h e classe C.....	31
Tabela 6	Definição de vazões nominais (Q_n), de transição (Q_t) e mínima (Q_{min}) em função da classe metrológica em medidores de água, adaptado da Portaria INMETRO n° 246 (2000)..	32
Tabela 7	Definição dos pontos de calibração para fabricação, conforme OIML R49-1(2003).....	34
Tabela 8	Características de Operação, adaptação da norma ANSI /AWWA C708 (2005).....	35
Tabela 9	Definição das vazões em função da classe metrológica do medidor de água, adaptada da norma SANS 1529-1 (2003)	36
Tabela 10	Opções de pontos de calibração sob o ponto de vista de fabricação e aprovação de modelo.....	37
Tabela 11	Normas, países e tolerâncias de flutuação de vazão no campo superior e inferior de medição.....	41
Tabela 12	Vazão e perda de carga em um medidor de água do tipo estudado.....	53
Tabela 13	Componentes da incerteza de medição de medidores de água, classificadas por tipo de bancada de calibração.....	55

Tabela 14	Pontos de calibração, pontos extremos na máxima e na mínima da tolerância de flutuação da vazão, no campo superior de medição.....	64
Tabela 15	Pontos de calibração, pontos extremos na máxima e na mínima da tolerância de flutuação da vazão, no campo inferior de medição.....	64
Tabela 16	Informações utilizadas na programação da bancada eletrônica.....	69
Tabela 17	Cálculo de incerteza de medição expandida do volume.....	72
Tabela 18	Cálculo da incerteza de medição do medidor de água em relação ao volume.....	77
Tabela 19	Cálculo da incerteza de medição expandida da vazão.....	80
Tabela 20	Cálculo da incerteza de medição da bancada de calibração eletrônica, com foco na vazão.....	84
Tabela 21	Resultado do Teste F, para cada ponto de calibração e respectivos pontos extremos.....	88
Tabela 22	Cálculo da incerteza de medição no medidor de água, acrescentando a componente da flutuação da vazão apenas no ponto de calibração de 15 L/h, 15,37 L/h e 14,62 L/h	95
Tabela 23	Comparativo entre cálculo de incerteza de medição antes e após inserção da componente flutuação da vazão.....	97

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de um produto, segundo Slack (1997), tem como princípios gerais: a geração do conceito, a triagem, o projeto preliminar, a avaliação, o melhoramento e por fim a prototipagem e o projeto final.

A prototipagem e o projeto final são constituídas de ações que têm como objetivo validar determinado protótipo por meio de testes, que geralmente envolvem algum tipo de medição. Com os resultados desses testes e medições torna-se possível a melhoria e a conclusão do projeto. Porém, sempre que se realiza uma medição, os resultados têm associada uma incerteza de medição, definida internacionalmente, como um parâmetro que caracteriza a dispersão de valores que poderiam ser razoavelmente atribuídos ao mensurando (VIM, 2003).

Se o produto desenvolvido é um instrumento de medição, sua principal função é medir, portanto, os parâmetros críticos da qualidade a serem testados sempre envolvem métricas de desempenho em medição, dentre as quais a própria incerteza de medição. Nestes casos, a fase de maior interesse no processo de fabricação é justamente o processo de calibração do produto fabricado, pois através dele se estimam as suas características metrológicas, incluindo erros e incertezas de medição.

Por outro lado, o conhecimento das componentes da incerteza de medição e de suas respectivas influências é da maior relevância no desenvolvimento e projeto de instrumentos, porque torna possível avaliar, de uma forma mais abrangente e objetiva, a potencialidade de melhoria do produto, de seu processo de fabricação e do seu controle durante a fabricação.

O foco principal desta dissertação, é a incerteza de medição de um instrumento de medição, denominado medidor de água (ou hidrômetro). Sua principal função é medir o volume (m^3) de água consumido por residências, indústrias ou estabelecimentos comerciais. Segundo o IBGE (2000), somente no Brasil, no conjunto dos 8656 distritos com rede geral, a distribuição de água é feita através de 30,58 milhões de ligações prediais, sendo que 25 milhões destas

possuem medidores de água de diferentes classes. Considerando que a água potável é um recurso natural esgotável, é fácil inferir a importância da qualidade dos medidores de água, na quantificação do volume de água realmente consumido, visando um mínimo de desperdício.

O princípio de funcionamento de um medidor de água é relativamente simples, o fluido água ao escoar internamente pelo medidor, movimenta uma turbina que transmite o movimento rotativo através de um ímã para um dispositivo indicador, que por sua vez tem a função de indicar o volume (m^3) escoado. (Castro, 2004).

Para realizar a calibração de um medidor de água, vários tipos de sistemas de medição foram desenvolvidos ao longo dos anos, entre eles pode-se citar: a bancada de calibração com princípio volumétrico, a bancada de calibração com princípio gravimétrico e a bancada de calibração com princípio eletrônico (Castro, 2004). Cada bancada possui sua particularidade construtiva e conseqüentemente, componentes de incerteza de medição que podem ser comuns ou exclusivas de cada sistema de medição (Castrup, 2004).

Ao submeter o medidor de água a um processo de calibração, compara-se o volume escoado pelo medidor com o volume armazenado em uma medida padronizada de volume, ou com o valor indicado por uma balança, ou ainda, com o volume deslocado por um pistão (bancada eletrônica).

As normas atuais, nacionais e internacionais (NBR NM 212, 1999; Portaria INMETRO nº246, 2000; OIML R49-1, 2003; SANS 1529-1, 2003; ISO 4064-1, 2005 e ANSI/AWWA C708-1, 2005) definem determinadas vazões (pontos de calibração) para calibração dos medidores de água. Estes pontos são normalizados em função da faixa de indicação de vazão do medidor em questão. Pelo fato da grandeza física ser vazão e o resultado da medição ser expresso em unidade relativa de volume (%), algumas normas definem tolerância de vazão em cada ponto de calibração e tolerância da flutuação da vazão durante o ensaio.

De um modo geral, quando estudados os parâmetros e procedimentos para calibração de medidores de água durante sua fabricação, estabelecidas nas normas citadas anteriormente, observam-se contradições entre suas

recomendações e especificações e a aplicação destas práticas na calibração de medidores de água.

Por exemplo, na Portaria INMETRO n° 246 (2000), vigente no Brasil, define-se que a variação relativa da vazão durante cada ensaio não deve exceder o intervalo de valores $\pm 2,5\%$ para vazões compreendidas entre a vazão mínima (Q_{\min}) e a vazão de transição (Q_t) inclusive, e $\pm 5,0\%$ para vazões entre Q_t e a vazão máxima (Q_{\max}). No entanto, este documento não estabelece a forma ou método utilizado para controlar a variação (flutuação) da vazão, e atualmente, as bancadas de calibração de medidores de água no Brasil, e segundo a literatura disponível também no mundo, não estão equipadas, com um sistema que permita medir esta variação durante a calibração.

Dentre outros aspectos, tem-se também que a norma NBR NM 212 (1999) recomenda a utilização de um medidor de vazão com erro máximo admissível para medição da vazão de $\pm 2\%$ do ponto de calibração. Porém, quando se analisam as tolerâncias de flutuação da vazão permitidas, tanto no campo superior de medição como no inferior, a regra geral aplicada em metrologia para seleção de equipamentos, na qual a soma quadrática do erro mais a incerteza de medição do equipamento deve ser de 1/5 a 1/10 da tolerância do processo a ser medida, não é atendida.

Outro fato importante observado é que, nestes documentos, não existem exemplos específicos para o cálculo da incerteza de medição de medidores de água, nem se faz menção às fontes de erros e incertezas que devem ser consideradas na análise.

Esta lacuna é encontrada também, em normas internacionais específicas, para avaliação de incertezas na medição de vazão (ISO 5168, 2005), onde não há exemplos específicos de cálculo de incerteza de medição para medidores de água, ou ainda, em guias para cálculo de incertezas, como por exemplo, o Guia para Expressão da Incerteza da Medição (INMETRO,2003), onde não há exemplos correlatos à área em questão.

Na prática atual, segundo Castro (2004), as componentes de incerteza de medição em medidores de água são definidas para bancada de calibração volumétrica como sendo: a repetitividade, a resolução devido à leitura inicial e

final da indicação do medidor de água, à resolução e a incerteza herdada do padrão de referência, porém, não define componentes de incerteza de medição em bancadas de calibração gravimétrica, eletrônica ou ainda, outras componentes aplicáveis ao medidor de água e ao próprio sistema tais como, drift, inércia da turbina, vibração, turbulência gerada pelo diâmetro interno ou distância dos mancais, massa da água evaporada, variação de pressão x quantidade de medidores na bancada e flutuação da vazão.

Isto leva a refletir sobre aspectos importantes:

Como saber, por exemplo, que os limites de flutuação de vazão estabelecidos em normas não estão sendo ultrapassados?

É realmente significativa a influência desta componente, na determinação da incerteza de medição dos medidores de água?

Quais são as conseqüências desta prática?

Ainda refletindo sobre a terceira questão, ao ser quantificada a influência da flutuação da vazão e se a mesma tiver significância em todas as vazões, poderia este fato ser associado com o tema perda de água, denominada pelas Companhias de Saneamento como submedição? Neste sentido, a preocupação aumenta, para dimensões de economia de água para um país, uma vez que a idéia passa a ser de relacionar a incerteza de medição do produto à perda de desempenho provocada pela influência específica desta componente de incerteza de medição, no medidor instalado em campo.

O objetivo desta dissertação é elucidar as duas primeiras questões, dando suporte para avaliar a terceira em algum outro momento, ou seja, neste trabalho se investiga a influência da flutuação da vazão como componente da incerteza de medição final de medidores de água multijato, velocimétricos, com vazão máxima 3,0 m³/h e classe metrológica C, no processo de calibração.

Para atingir este objetivo desenvolveram-se várias etapas. Primeiramente, além das normas nacionais e internacionais estudadas, realizou-se uma pesquisa bibliográfica na busca de trabalhos de pesquisa específicos envolvendo a calibração e incerteza de medição de medidores de água. Os trabalhos encontrados não tratam especificamente sobre medidores de água, e

sim, de grandezas e aspectos correlatos à medição de volume de gás, medição de vazão de água ou óleo e calibração de padrões de referência de volume.

Em seguida, submeteu-se os medidores a verificação e ajuste em bancada de calibração eletrônica no setor produtivo. Os medidores de água aprovados foram submetidos a uma calibração sob condições de controle de vazão em laboratório.

A calibração foi realizada em pontos de calibração pré-definidos com base nas normas citadas anteriormente e através de uma válvula, forçou-se a flutuação da vazão até os limites tolerados por norma.

Determinou-se o erro relativo de volume médio (%), a vazão média (L/h) para cada medidor de água e, com base no Guia para Expressão da Incerteza da Medição (INMETRO,2003), calculou-se a incerteza de medição para cada ponto de calibração e seus respectivos pontos extremos forçados positivamente e negativamente, tanto para o eixo x (vazão , L/h) como para o eixo y (erro relativo de volume, %).

Os resultados obtidos foram agrupados da seguinte maneira: um ponto de calibração, um ponto extremo gerado pela flutuação forçada positivamente e mais um ponto extremo gerado pela flutuação forçada negativamente.

Com base na necessidade de estabelecer critérios, citado por Morinaka (2003), a média (erro relativo de volume) dos três pontos que formam um agrupamento, foram avaliadas se as mesmas, eram iguais ou diferentes entre si, dado um nível de significância.

Nestes agrupamentos, aplicou-se nos erros relativo médio de volume a análise de variância (Teste F) e verificou-se para cada agrupamento composto por três pontos, a aceitação ou não da hipótese H_0 , ou seja, se as médias eram significativamente não diferentes ou diferentes, respectivamente.

Desta maneira identificou-se o ponto de calibração onde a influência da componente de incerteza flutuação da vazão foi significativa, em seguida a mesma foi estimada aplicando-se um modelo matemático e, finalmente, calculou-se a incerteza de medição acrescida da componente de incerteza de medição flutuação da vazão.

O presente trabalho está dividido em 6 capítulos. No presente capítulo apresentam-se a justificativa e a contextualização do tema, declarando-se a motivação e o objetivo para realização deste trabalho.

No Capítulo 2 apresenta-se os resultados do estudo das normas correspondentes e da pesquisa bibliográfica em associação com os fundamentos teóricos necessários ao desenvolvimento e compreensão do tema.

No Capítulo 3, apresenta-se a proposta para determinação da influência da flutuação da vazão, e discutem-se aspectos importantes da metodologia aplicada para atingir o objetivo do trabalho.

No Capítulo 4, descrevem-se os testes experimentais, as dificuldades, as soluções encontradas e a seqüência das ações que permitiram a obtenção de dados para análise e discussão.

No Capítulo 5, são apresentados os resultados e sua discussão e, no capítulo 6 fazem-se as conclusões do trabalho e apresentam-se sugestões para pesquisas futuras.

CAPÍTULO 2 – CALIBRAÇÃO E INCERTEZA DE MEDIÇÃO DE MEDIDORES DE ÁGUA – ESPECIFICAÇÕES E PRÁTICAS ATUAIS.

Tendo como objetivo desta dissertação a investigação da flutuação da vazão, como uma componente da incerteza de medição de medidores de água velocimétricos, foi realizado primeiramente um estudo detalhado das normas mais importantes utilizadas no Brasil e no mundo, como guias para a calibração destes instrumentos.

Além das comparações destas propostas, analisou-se como se realiza sua aplicação na prática, a partir da experiência na área do autor e de discussões com um especialista (R. Lazari, 03/2006) do INMETRO.

A busca bibliográfica, realizada à procura de trabalhos que relatem estudos semelhantes ou correlatos à pesquisa da flutuação de vazão como componente da incerteza de medição em medidores de água, mostrou que não existem estudos específicos, exceto a citação genérica de algumas componentes de incerteza de medição, aplicáveis em medidores de água.

Os trabalhos encontrados, como será visto posteriormente, referem-se principalmente à calibração e incerteza de medição aplicada a medidores de vazão, medidores de volume de gás e padrão de volume.

Neste capítulo apresentam-se, além dos resultados das comparações entre normas, e entre as suas propostas e a prática, conceitos gerais relacionados aos princípios físicos do funcionamento de medidores de água, à calibração e ao cálculo de incerteza de medição.

2.1 MEDIDORES DE ÁGUA

A Portaria INMETRO n° 246 (2000) define um medidor de água ou hidrômetro como um instrumento destinado a medir e indicar continuamente, o volume de água que o atravessa.

A definição de volume é dado por Troskolanski (1962) como sendo a parte do espaço limitado por uma superfície fechada. Em um corpo retangular de

referência (X, Y, Z), o volume (V) de um sólido, que possa quebrar-se em paralelepípedos elementares, é o limite da soma dos volumes destes paralelepípedos, quando os comprimentos de suas bordas tendem para zero.

Unidades de medida do volume empregadas geralmente nas medições hidráulicas são: o metro cúbico (um m³ equivale a mil litros) e o litro.

Os métodos de medição de volume são divididos em dois grupos principais: aqueles que usam o enchimento de um reservatório com determinado volume de água (método estático) e aqueles que usam o volume de um líquido que escoar (método cinético).

Castro (2004) descreve que os medidores de água são classificados em dois grupos, conforme seu princípio de funcionamento: *Medidor de Água Volumétrico e Medidor de Água Inferencial ou de Velocidade*.

Um medidor de água volumétrico é formado por uma câmara de volume conhecido e de um mecanismo que se move devido ao fluxo de água. A cada volta deste mecanismo, a câmara enche e esvazia-se de água.

O volume que passou pelo medidor, é então determinado, multiplicando o número de voltas pelo volume conhecido da câmara, até que o mecanismo no interior da câmara, realize uma volta completa.

A figura 1 ilustra quatro tipos de medidores de água volumétricos: pistão alternado, disco nutativo, pistão oscilante e cilindro rotativo.

Um medidor de água inferencial, ou de velocidade, consiste de um conjunto de elementos que se movem, devido à ação da velocidade do fluxo de água. O movimento destes elementos (rotor ou turbina) transmite o movimento por princípio mecânico ou magnético para um dispositivo indicador, no qual o volume é registrado.

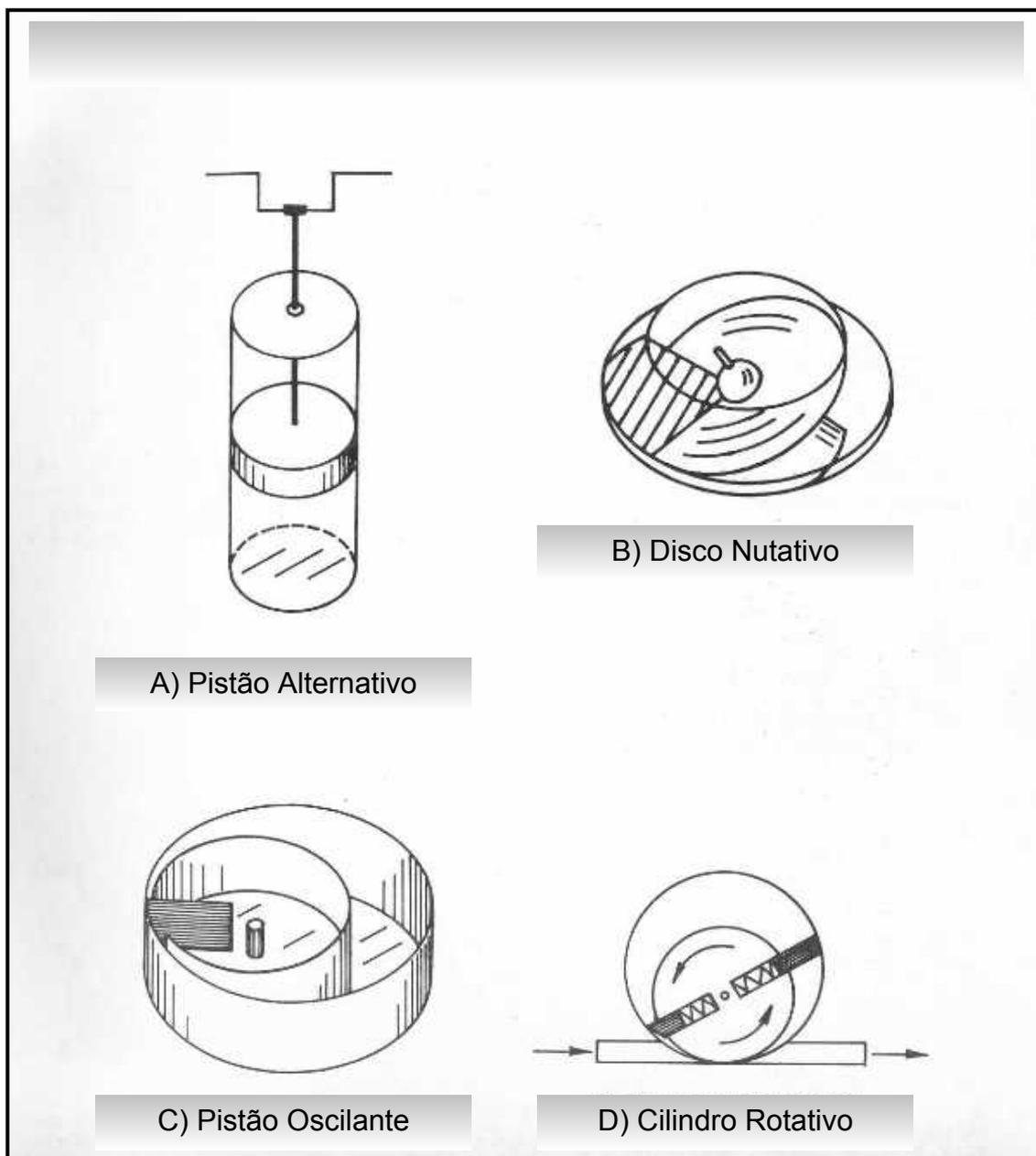


Figura 1 – Mecanismos de medidores de água com princípio volumétrico, segundo Elmore E. (1972).

A figura 2 ilustra o princípio de funcionamento de um medidor de água velocimétrico e os elementos que determinam a totalização do volume em um medidor de água velocimétrico.

A determinação do volume é dada pela equação (1), onde, V é o volume totalizado pelo medidor de água, K é uma constante estabelecida pela relação

de área por onde passa o fluxo de água e o diâmetro da turbina e N é o número de voltas.

$$V = K \cdot N \quad (1)$$

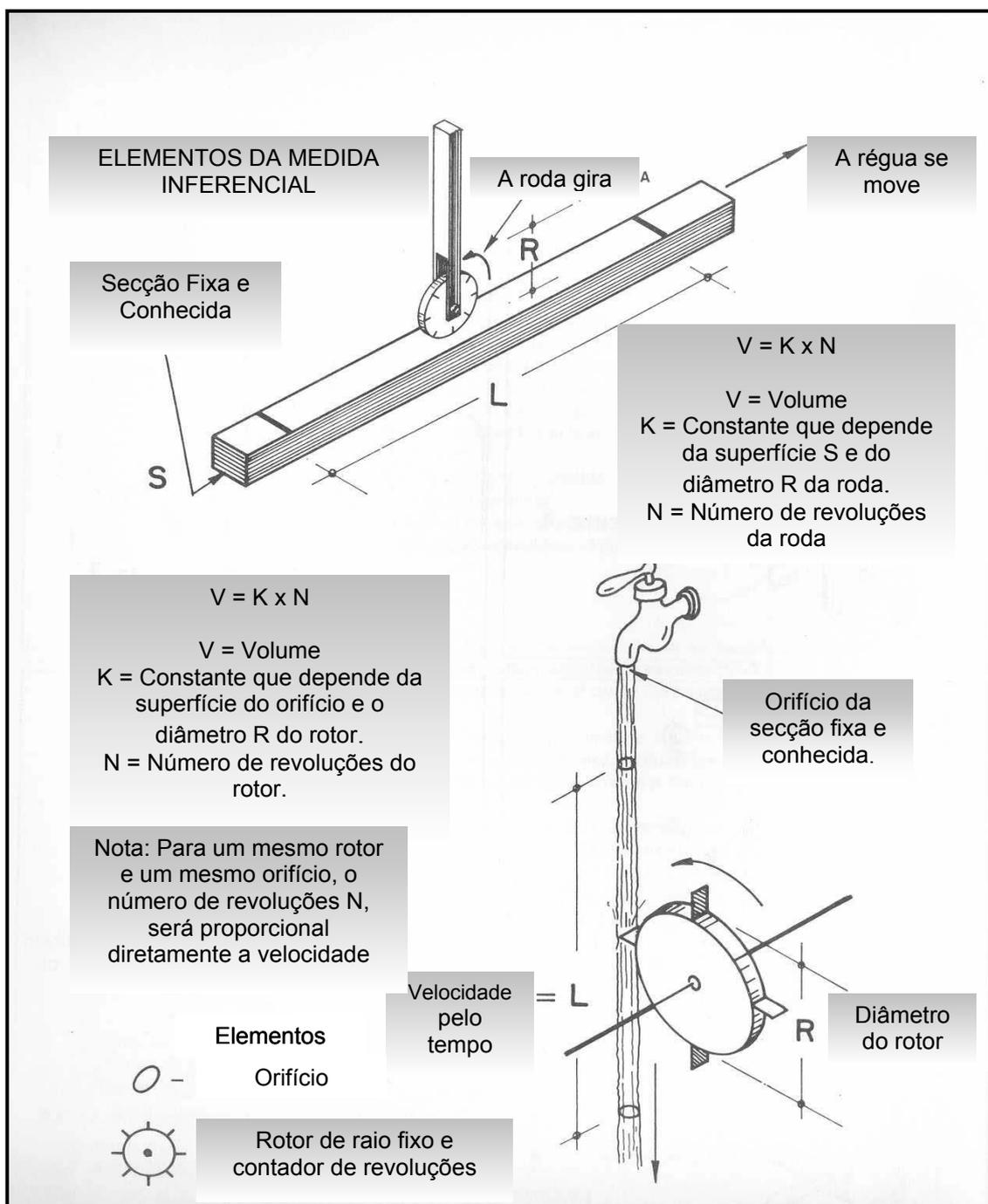


Figura 2 – Exemplos conceituais adaptados do princípio de funcionamento de medidores de água velocimétrico, segundo Elmore E. (1972).

As figuras 3 e 4, ilustram dois tipos de medidores de água dos mais utilizados atualmente: *monojato* e *multijato* com transmissão magnética, respectivamente.

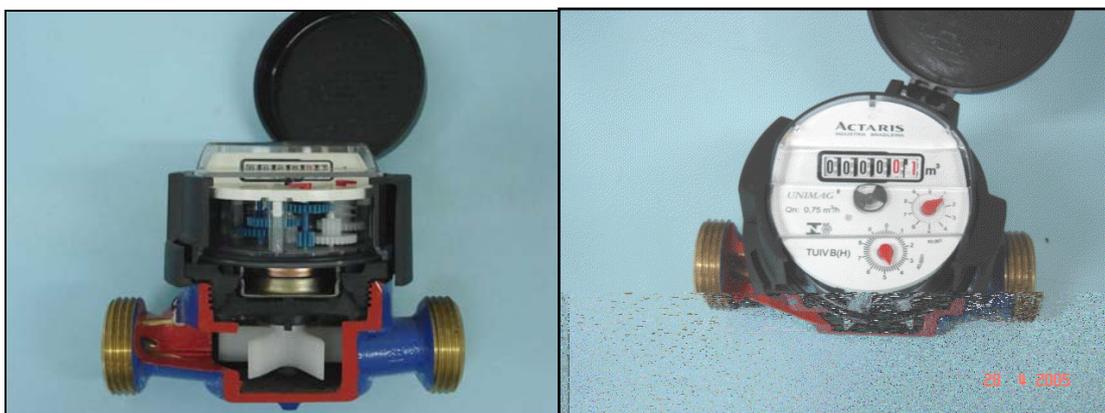


Figura 3 – Medidor de Água Velocimétrico, monojato com transmissão magnética.

O medidor de água velocimétrico é classificado como monojato, quando possui apenas um furo na entrada e um furo de saída em um mesmo plano. Isto implica em um único jato de água incidindo sobre a turbina.

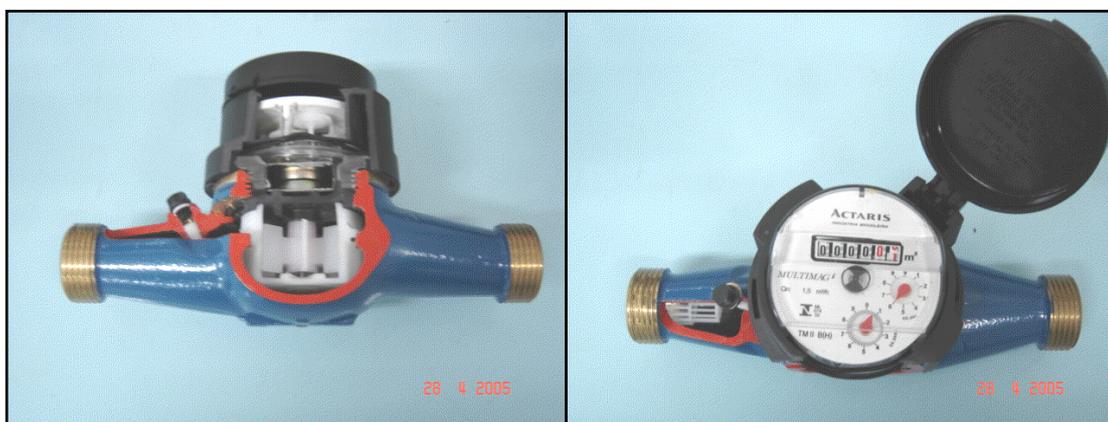


Figura 4 – Medidor de Água Velocimétrico, multijato com transmissão magnética.

O medidor de água velocimétrico é classificado como multijato, quando possui mais de um furo de entrada e saída e em planos diferentes. Isto implica em vários jatos de água incidindo sobre a turbina.

O conceito da medição de um medidor de água velocimétrico, é justamente a relação entre velocidade da turbina gerada pelo volume que escoou sobre determinado tempo (vazão), na unidade de medida m^3/h (um m^3/h equivale a

mil L/h) ou L/h, e a indicação do volume em m³ registrada no dispositivo indicador.

Cada volta da turbina desloca um volume de água denominado volume cíclico. Este volume cíclico é o valor inverso à redução de rotação entre a turbina e o conjunto de engrenagens do dispositivo indicador.

A rotação da primeira engrenagem, denominada industrialmente como pinhão central é a mesma da turbina. As demais engrenagens têm a função de reduzir esta velocidade no dispositivo indicador, até que o erro relativo de volume, esteja conforme os limites normalizados de fabricação do medidor de água.

A Portaria INMETRO n° 246 (2000) descreve também que os medidores de água multijatos ou monojatos são classificados metrologicamente em função da menor vazão, na qual o medidor de água fornece indicações que não possuam erros superiores aos erros admissíveis (vazão mínima). Então, um medidor de água projetado para uma determinada condição de utilização, nas quais o mesmo é exigido para funcionar de maneira satisfatória dentro dos erros máximos admissíveis (vazão nominal), pode ter três classificações metrológicas: classe A, B ou C.

A figura 5, ilustra a diferença entre as classes metrológicas A, B e C, na vazão mínima, para um medidor de água com vazão máxima de 3000 L/h.

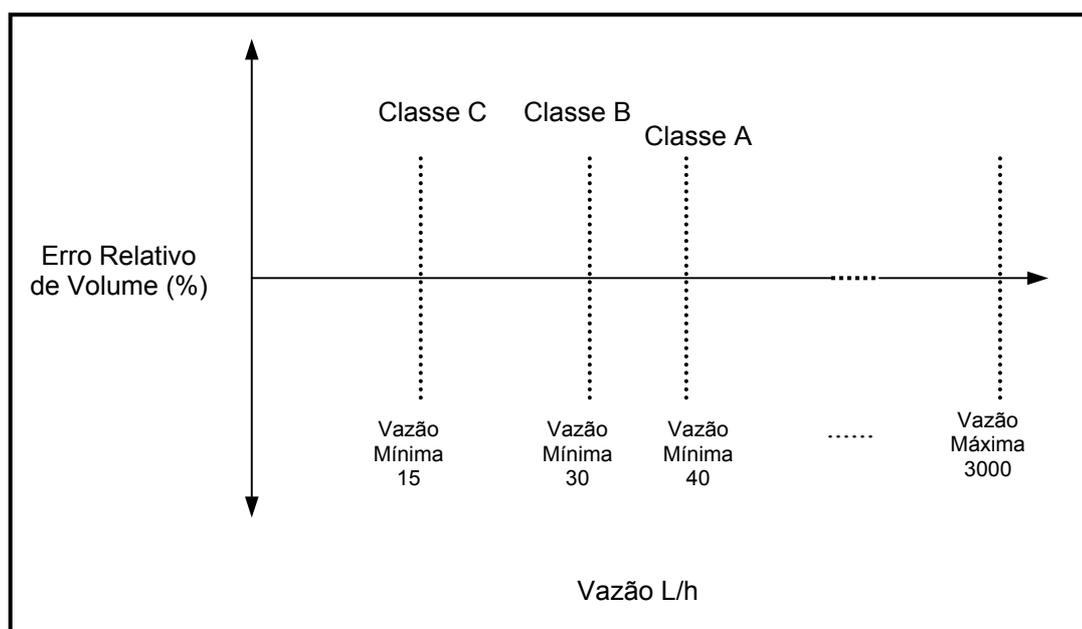


Figura 5 – Diferentes classes metrológicas, para um mesmo medidor de água.

O medidor de água quando classificado como classe C, deve cumprir um dos requisitos normalizados que é de atender as especificações de erro relativo de volume em uma vazão de 15 L/h, isto significa que um medidor classe C possui maior exatidão que um medidor classe B, pois exige-se deste as mesmas especificações, porém numa vazão de 30 L/h. O conceito que suporta esta afirmação é que quanto menor a vazão aplicada à turbina do medidor de água, menor será sua rotação e mais próximo estará da região de zona morta (VIM, 2003).

O medidor de água, foco desta dissertação, possui as seguintes características, segundo a Portaria INMETRO n°246 (2000): Medidor velocimétrico, $Q_{\text{máx}} 3\text{m}^3/\text{h}$, multijato, com transmissão magnética, diâmetro nominal 20mm e classe metrológica C (figura 4).

2.2 CALIBRAÇÃO DE MEDIDORES DE ÁGUA

São várias as normas utilizadas hoje no mundo como base para calibração de medidores de água, dentre elas destacam-se a OIML R-49, uma recomendação internacional adotada mundialmente, a ISO 4064, norma aplicada por países membros da ISO e principalmente na Europa, a AWWA C-708 adotada nos Estados Unidos, a SANS 1529 adotada na África do Sul, a NBR NM 212 adotada pelos países membros do Mercosul e por último tem-se que no Brasil a calibração é realizada com base na Portaria INMETRO n° 246 (2000).

Nestes documentos encontram-se as definições relacionadas ao processo de calibração, assim como detalhes sobre os padrões de referência a serem utilizados.

A seguir apresentam-se as definições e conceitos gerais que fundamentam, desde um ponto de vista teórico, o processo de calibração de medidores de água. Também discutem-se as diferenças e aspectos comuns das normas estudadas.

2.2.1 VAZÃO, ERRO DE INDICAÇÃO E TOLERÂNCIA DE CALIBRAÇÃO

Para uma melhor compreensão do tema se faz necessário definir, primeiramente o que é vazão, uma vez que todo o processo de calibração de medidores de água e o próprio funcionamento dos mesmos, baseia-se neste conceito.

Vazão é uma grandeza física definida por Souza (1986), como o volume de um fluido que atravessa uma secção em determinado tempo. Outras definições de vazão são encontradas dependendo do enfoque ao qual se destina. Por exemplo, para área de medidores de água, a definição de vazão encontrada na Portaria INMETRO n° 246 (2000) “*é o quociente do volume de água escoado através do medidor de água pelo tempo do escoamento deste volume, expresso em metros cúbicos por hora (m³/h).*”

No aspecto metrológico da vazão, segundo Pinheiro (2004), o termo medição de vazão pode ser atribuído a seis finalidades diferentes:

1ª Medição Pontual de Velocidade: instrumentos que medem a velocidade de um fluido num ponto específico, por exemplo, anemômetros que medem velocidades de correntes de vento e medidores de inserção que medem velocidades em determinados pontos dentro de um tubo.

2ª Medição de Velocidade Média: instrumentos que medem a velocidade média associando-a à vazão volumétrica Q_v , assumindo que o perfil de velocidades corresponde à situação de fluxo turbulento dentro de uma área de secção reta, conforme a equação (2), onde, \bar{v} é a velocidade média, Q_v é a vazão volumétrica e A é a área da secção.

$$\bar{v} = \frac{Q_v}{A} \quad (2)$$

3ª Medição de Velocidade Volumétrica: instrumentos que medem vazão volumétrica Q_v , definida como a passagem de um dado volume de fluido em um

dado intervalo de tempo t , é representada pela equação (3), onde, Q_v é a vazão volumétrica, V é o volume e t é o tempo.

$$Q_v = \frac{V}{t} \quad (3)$$

4ª Medição de Volume Total: instrumentos que indicam o volume total que passou até um determinado momento.

5ª Medição de Vazão Mássica: instrumentos que medem vazão mássica Q_m definida como a passagem de uma dada massa de fluido em um dado intervalo de tempo; normalmente são empregados instrumentos que medem diretamente a massa do fluido, é representada na equação (4), onde, Q_v é a vazão volumétrica, V é o volume e t é o tempo.

$$Q_m = \frac{m}{t} \quad (4)$$

6ª Medição de Massa Total: instrumentos que indicam a massa total que passou até um determinado momento. Este método difere do quarto método, pois o instrumento de medição pesa o fluido e utiliza a massa específica do mesmo, para transformar a massa medida em volume.

A Portaria INMETRO n° 246 (2000) define que, no setor produtivo, o medidor de água deve ser verificado no mínimo em três vazões de referência:

Vazão nominal (Q_n): maior vazão nas condições de utilização, nas quais um medidor é exigido para funcionar de maneira satisfatória, dentro dos erros máximos admissíveis. Esta vazão é denominada também como vazão permanente (Q_p) ou Q_3 .

Vazão de transição (Q_t): vazão, em escoamento uniforme, que define a separação de campos de medição inferior e superior. Também denominada como Q_2 .

Vazão mínima (Q_{min}): menor vazão, na qual o hidrômetro fornece indicações que não possuam erros superiores aos erros máximos admissíveis.

A determinação dos erros de indicação de um medidor de água consiste em comparar as indicações de volume do mesmo, com a indicação de um padrão de referência.

Para a representação dos erros de indicação de um medidor de água, utiliza-se o erro relativo (percentual) apresentado pelo medidor. Este erro é calculado conforme a equação (5), onde, E é o erro relativo em porcentagem (%), L_i é a leitura inicial do medidor de água, L_f é a leitura final do medidor de água e V_e é o volume escoado, posteriormente recolhido em um padrão de referência.

$$E = \frac{(L_f - L_i) - V_e}{V_e} \cdot 100 \quad (5)$$

A curva de erros de volume (calibração) de um medidor de água é levantada dentro de uma determinada faixa de vazão, na qual o erro relativo de volume é determinado utilizando-se uma determinada bancada de calibração.

Essa faixa de vazão varia em função da vazão máxima ($Q_{m\acute{a}x}$) do medidor e de sua respectiva classe metrológica.

Os limites normalizados para o erro relativo de volume em um medidor de água variam dependendo de cada país. Segundo a Portaria INMETRO n° 246 (2000), um medidor de água com as características vazão máxima ($Q_{m\acute{a}x}$) 3 m³/h e classe C, deve ser fabricado com erro relativo igual ou menor a $\pm 2\%$ nas vazões compreendidas entre 3000 L/h vazão máxima ($Q_{m\acute{a}x}$) a 22,5 L/h vazão de transição (Q_t , inclusive) e igual ou menor a $\pm 5\%$ para vazões compreendidas entre 22,5 L/h (Q_t , exclusive) e 15 L/h vazão mínima ($Q_{m\acute{i}n}$).

Estas tolerâncias para o erro relativo de volume (%) são representadas no eixo y, na figura 6, na cor verde para a faixa de 22,5 L/h (inclusive) a 3000 L/h definido como campo superior de medição e na cor azul para faixa de 15 L/h a 22,5 L/h (exclusive), definido como campo inferior de medição.

A norma NBR NM 212 (1999), utilizada pelos países participantes do Mercosul, define a mesma tolerância para erro relativo do medidor de água em questão.

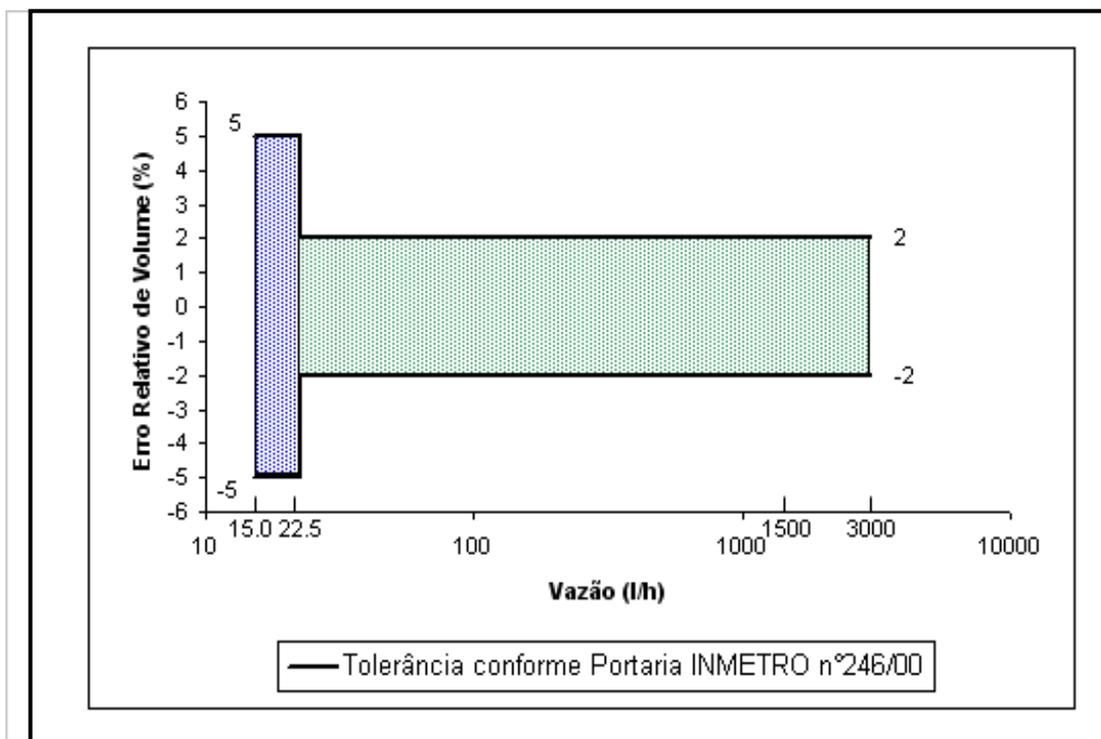


Figura 6 – Tolerância do erro relativo de volume (eixo y) característica do medidor de água $Q_{m\acute{a}x}$ 3m³/h e classe C, conforme Portaria INMETRO n°246 (2000) e segundo norma NBR NM 212 (1999).

A norma ISO 4064-1 (1993) possui as mesmas tolerâncias definidas na Portaria INMETRO n°246 (2000) e na norma NBR NM 212 (1999). No entanto, a norma ao ser revisada em outubro de 2005, altera os pontos de calibração e o conceito da definição destas vazões.

A vazão de transição (Q_2) conceitualmente possui o mesmo significado que a vazão de transição (Q_t), porém a vazão é diferente em função da alteração da metodologia de cálculo.

Também a vazão mínima (Q_1) possui o mesmo conceito que a vazão mínima (Q_{min}), porém assim como para a vazão de transição, foi feita alteração na metodologia para seu cálculo, conforme recomendado pela OIML R49-1.

As diferenças entre as versões de 1993 e 2005 da norma ISO 4064-1 nos pontos de calibração e respectivas tolerâncias, podem ser visualizadas na tabela 1.

Tabela 1 – Comparação dos pontos de calibração e tolerância do erro relativo de volume entre as normas ISO 4064-1 (2005) e ISO 4064-1 (1993).

ISO 4064 (2005)	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4
Vazão (L/h)	15,6	25,0	2500	3125
Tolerância (%) \pm	5	2	2	2

ISO 4064 (1993)	Q_{min}	Q_t	Q_n
Vazão (L/h)	15,0	22,5	1500
Tolerância (%) \pm	5	2	2

Ao comparar as versões de 2005 e 1993 identificam-se diferenças, a primeira é o aumento de um ponto de calibração e a segunda é a alteração dos valores dos pontos de calibração. Estas alterações ocorrem na vazão de Q_t , onde o valor da vazão que era de 22,5 L/h, passa para 25 L/h (Q_2). O mesmo ocorreu para Q_{min} e Q_1 , a vazão é de 15 L/h e 15,6 L/h, respectivamente.

A classificação de um medidor de água avaliado sob a norma ISO 4064-1 (2005), é definida através da escolha de um valor para a razão Q_3 / Q_1 . Os valores são: 10; 12,5; 16; 20; 25; 31,5; 40; 50; 63; 80; 100; 125; 160; 200; 250; 315; 400; 500; 630 ou 800.

Para valor igual a duzentos e cinquenta (250), implica numa vazão Q_1 igual a 10,0 L/h e para um valor de sessenta e três (63), implica numa vazão Q_1 de 39,7 L/h. Ao realizar a analogia com a norma ISO 4064-1 (1993), observa-se que a vazão mínima (Q_{min}) para um medidor classe A é de 40 L/h, para um medidor classe B é de 30 L/h, para um medidor classe C é de 15 L/h e para um medidor classe D é de 11,25 L/h.

A faixa de vazão da nova versão (2005) possui Q_1 compreendida entre 10,0 L/h e 39,7 L/h, com sete opções de definição da vazão Q_1 , em virtude da possibilidade de escolha dos números 63, 80, 100, 125, 160, 200 ou 250. A versão de (1993) possui Q_{min} compreendida entre 11,25 L/h e 40 L/h, com quatro opções de definição da vazão Q_{min} em virtude das classes A, B, C e D.

Portanto, conclui-se que a nova revisão da norma permite aumentar a quantidade de classificações de medidores de água para sete opções, não restringindo-se somente a quatro classes metrológicas A, B, C e D, como

descrito anteriormente. De uma maneira geral, com estas mudanças, os fabricantes de medidores de água podem demonstrar aos seus clientes tendências de melhoria em seus produtos já homologados, com maior facilidade.

A recomendação da Organização Internacional de Metrologia Legal através do documento R 49-1 (2003), descreve a tolerância do medidor de água $Q_{m\acute{a}x}$ $3m^3/h$ e classe C, como precisão classe 2. Para esta classe, o máximo erro permitido para a zona superior de vazão ($Q_2 \leq Q \leq Q_4$) é de $\pm 2\%$ para temperaturas entre $0,3^\circ C$ até $30^\circ C$ e $\pm 3\%$ para temperaturas superiores a $30^\circ C$.

O máximo erro permitido para zona inferior de vazão ($Q_1 \leq Q < Q_2$) é $\pm 5\%$.

A tabela 2 resume os pontos de calibração e respectivas tolerâncias com base na recomendação da OIML R-49-1 (2003).

Tabela 2 – Pontos de calibração e tolerâncias de erro relativo de volume recomendados pela OIML R 49-1 (2003).

OIML R 49-1	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4
Vazão (L/h)	15,6	25,0	2500	3125
Tolerância (%) \pm	5	2	2	2

A norma ANSI/AWWA C708-1 (1996) define a tolerância de $\pm 1,5\%$ nos limites de vazão normal e de $\pm 3\%$ na vazão mínima em temperatura menor ou igual a $27^\circ C$.

Após revisão da norma, a versão atual ANSI/AWWA C708-1 (2005) não alterou características e condições metrológicas, portanto define os mesmos pontos de calibração, a mesma tolerância e temperatura de trabalho. O enfoque da revisão da norma abrangeu principalmente cinco itens: Correção da equivalência métrica do medidor de $5/8"$; Adição de uma seção para materiais; Adição de uma seção sobre medidores utilizados no serviço de apagar incêndios; Adição de uma seção sobre tipos de dispositivos indicadores e adição de uma seção que define cores dos registradores.

A tabela 3, mostra os pontos de calibração e as tolerâncias de um medidor de água com características próximas ao medidor definido como foco desta dissertação.

Tabela 3 – Pontos de calibração e tolerâncias de erro relativo de volume, conforme ANSI / AWWA C708-1 (2005).

ANSI / AWWA C708-1 (2005)	Mínima	Faixa de Vazão		
		Normal	Normal	Normal
Vazão (L/h)	60	200	2300	4500
Tolerância (%) \pm	3	1,5	1,5	1,5

A norma SANS 1529-1 (2003) define tolerância de $\pm 2\%$ nas vazões compreendidas entre 3000 L/h (q_s) e 22,5 L/h (q_t , inclusive) e igual ou menor a $\pm 5\%$ para vazões compreendidas entre 22,5 L/h (q_t , exclusive) e 15 L/h (q_{min}).

A simbologia muda sensivelmente, onde a vazão geralmente representada pela letra Q (maiúscula) é trocada pela letra q (minúscula). Outra alteração na simbologia é que ao invés de $Q_{m\acute{a}x}$, utiliza-se q_s (vazão de sobrecarga).

Esta norma define, também, um afastamento máximo do erro relativo médio de volume, obtido através da realização de três leituras, em determinado ponto de calibração.

Para uma vazão menor ou igual a q_t , o afastamento deve ser não maior que 1,0% e para uma vazão maior que q_t , não maior que 0,5%. Segundo esta norma, a temperatura da água durante a calibração deve estar compreendida entre 0°C a 30°C. De uma maneira geral as tolerâncias de temperatura durante calibração estão definidas entre 0 a 30°C após publicação da revisão da recomendação da OIML R49-1 (2003).

No Brasil e países que utilizam portarias ou normas com ano de publicação anterior a 2003, de uma maneira geral utiliza-se, como tolerância de temperatura, uma faixa compreendida entre 1°C a 40°C e ainda, que a variação da temperatura não deve exceder a 5°C durante a calibração (Portaria n° 246, 2000).

Observa-se na tabela 4, que as vazões $q_{(1)}$ e $q_{(2)}$ foram definidas segundo norma SANS 1529-1 (2003).

Tabela 4 – Pontos de calibração e tolerâncias do erro relativo de volume do medidor de água $Q_{m\acute{a}x}$ 3m³/h e classe C, conforme SANS 1529-1 (2003).

ISO 4064 (2005)	q_{min}	q_t	$q_{(1)}$	$q_{(2)}$	$0,5q_p$	q_p	q_s
Vazão (L/h)	15,0	22,5	120	375	750	1500	3000
Tolerância (%) \pm	5	2	2	2	2	2	2

A tabela 5 mostra um resumo das principais normas, portarias e respectivas tolerâncias, aplicadas para fabricação de medidores de água no mundo.

Tabela 5 – Opções de tolerância de calibração para erro de volume em medidor de água $Q_{m\acute{a}x}$ 3m³/h e classe C.

Portaria / Norma	Tolerância de Calibração
Portaria INMETRO n° 246 (2000)	$\pm 2\% Q_{m\acute{a}x}$ até Q_t (inclusive) e $\pm 5\% Q_t$ (exclusive) até Q_{min}
NBR NM 212 (1999)	$\pm 2\% Q_{m\acute{a}x}$ até Q_t (inclusive) e $\pm 5\% Q_t$ (exclusive) até Q_{min}
ISO 4064-1 (1993)	$\pm 2\% Q_{m\acute{a}x}$ até Q_t (inclusive) e $\pm 5\% Q_t$ (exclusive) até Q_{min}
ISO 4064-1 (2005)	$\pm 2\% Q_4$ até Q_2 (inclusive) e $\pm 5\% Q_2$ (exclusive) até Q_1
OIML R49-1 (2003)	$\pm 2\% Q_4$ até Q_2 (inclusive) e $\pm 5\% Q_2$ (exclusive) até Q_1
ANSI / AWWA C708-1 (1996)	$\pm 1,5\%$ Vazão Normal de Teste e $\pm 3\%$ para Vazão Mínima
ANSI / AWWA C708-1 (2005)	$\pm 1,5\%$ Vazão Normal de Teste e $\pm 3\%$ para Vazão Mínima
SANS 1529-1 (2003)	$\pm 2\% Q_{m\acute{a}x}$ até Q_t (inclusive) e $\pm 5\% Q_t$ (exclusive) até Q_{min}

A norma ANSI/AWWA C708 é a única que define uma tolerância diferenciada para os medidores de água, não define classes e ainda, define a menor vazão igual a 60 L/h, valor quatro vezes maior que a vazão mínima de 15 L/h definido em outras normas e portaria para um medidor $Q_{m\acute{a}x}$ 3m³/h classe C. Isto significa que a tolerância de $\pm 3\%$ não exige necessariamente melhor desempenho dos medidores de água no mundo, pois outros dois fatores estão envolvidos: classe e vazão mínima.

As demais normas possuem especificações semelhantes e tendo em vista que elas representam as especificações aplicadas na maioria dos países do mundo, adotou-se para as especificações de tolerância de calibração, a Portaria INMETRO n°246 (2000).

2.2.2 PONTOS DE CALIBRAÇÃO

A seguir são analisados normas nacionais e internacionais quanto aos pontos de calibração, sob o ponto de vista da fabricação e de aprovação de modelo de um novo medidor de água.

Esta análise permitirá a elaboração de um resumo com as opções de pontos de calibração e posteriormente auxiliar na definição dos mesmos, no teste experimental proposto nesta dissertação.

A Portaria INMETRO n° 246 (2000), regulamento técnico aplicado no território nacional, determina que medidores de água fria de vazão nominal (Q_n) compreendida entre 0,6 m³/h e 15,0 m³/h, devem ser verificados durante o processo de fabricação, no mínimo, nas vazões relacionadas na tabela 6 a seguir.

Tabela 6- Definição de vazões nominais (Q_n), de transição (Q_t) e mínima (Q_{min}) em função da classe metrológica em medidores de água, adaptado da Portaria INMETRO n° 246 (2000).

Classes Metrológicas		Vazão Nominal (m ³ /h)									
		0,6	0,75	1,0	1,5	2,5	3,5	5,0	6,0	10,0	15,0
A (m ³ /h)	Q _{min}	0,024	0,030	0,040	0,040	0,100	0,140	0,200	0,240	0,400	0,600
	Q _t	0,060	0,075	0,100	0,150	0,250	0,350	0,500	0,600	1,000	1,500
B (m ³ /h)	Q _{min}	0,012	0,015	0,020	0,030	0,050	0,070	0,100	0,120	0,200	0,300
	Q _t	0,048	0,060	0,080	0,120	0,200	0,280	0,400	0,480	0,800	1,200
C (m ³ /h)	Q _{min}	0,006	0,0075	0,010	0,015	0,025	0,035	0,050	0,060	0,100	0,150
	Q _t	0,009	0,0110	0,015	0,0225	0,0375	0,0525	0,075	0,090	0,150	0,225

Outra situação onde tem-se definidos pontos de calibração é quando um novo produto passa por um processo de homologação junto ao INMETRO. Esta mesma Portaria define os pontos mínimos de calibração para aprovação de modelo, como sendo:

- a) Entre Q_{min} e $1,1 Q_{min}$
- b) Entre Q_t e $1,1 Q_t$
- c) Entre $0,225 Q_{máx}$ e $0,25 Q_{máx}$
- d) Entre $0,45 Q_{máx}$ e $0,50 Q_{máx}$
- e) Entre $0,90 Q_{máx}$ e $Q_{máx}$.

A norma utilizada nos países membros do Mercosul é a NBR NM 212 (1999), determina pontos de calibração idênticos às normas ISO 4064 (1993) e Portaria INMETRO n°246 (2000), porém não determina pontos de calibração focados para aprovação de modelo.

Os pontos de calibração determinados pela OIML R49-1 (2003) e ISO 4064 (2005), são: vazão de sobrecarga (Q_4), vazão permanente (Q_3), vazão de transição (Q_2) e vazão mínima (Q_1).

Os pontos Q_4 , Q_3 , Q_2 e Q_1 são definidos da seguinte forma:

1° Os valores de Q_3 devem ser escolhidos conforme valores expressos em m^3/h desta lista: 1; 1,6; 2,5; 4; 6,3; 10; 16; 25; 40; 63; 100; 160; 250; 400; 630; 1000; 1600; 2500; 4000 e 6300.

2° O valor da razão Q_3/Q_1 deve ser escolhido da seguinte lista: 10; 12,5; 16; 20; 25; 31,5; 40; 50; 63; 80; 100; 125; 160; 200; 250; 315; 400; 500; 630 e 800.

3° A razão Q_2/Q_1 deve ser 1,6. Entretanto, para um período de transição de 5 anos, Q_2/Q_1 pode ser 2,5, ou 4, ou 6,3 contanto que $Q_3/Q_2 > 5$.

4° A razão Q_4/Q_3 deverá ser de 1,25.

A tabela 7, define vazões Q_4 , Q_3 , Q_2 e Q_1 , considerando os quatro passos descritos anteriormente, as dez primeiras opções de Q_3 (verificar 1° item) e a razão Q_2/Q_1 de 1,6 (verificar 3° item).

A OIML R49-1 (2003) define pontos mínimos de calibração, quando o enfoque é aprovação de modelo; são eles:

- a) Entre Q_1 e $1,1 Q_1$
- b) Entre $0,5 (Q_1 + Q_2)$ e $0,55 (Q_1 + Q_2)$, somente para $Q_2/Q_1 > 1,6$
- c) Entre Q_2 e $1,1 Q_2$
- d) Entre $0,33 (Q_2 + Q_3)$ e $0,37 (Q_2 + Q_3)$
- e) Entre $0,67 (Q_2 + Q_3)$ e $0,74 (Q_2 + Q_3)$
- f) Entre $0,9 Q_3$ e Q_3
- g) Entre $0,95 Q_4$ e Q_4

Tabela 7 – Definição dos pontos de calibração para fabricação, conforme OIML R49-1 (2003)

		Vazão Q_3 (m ³ /h)									
Vazão		1,0	1,6	2,5	4,0	6,3	10,0	16,0	25,0	40,0	63,0
$Q_3/Q_1=$ 10	Q ₁	0,100	0,160	0,250	0,400	0,630	1,000	1,600	2,500	4,000	6,300
	Q ₂	0,160	0,256	0,400	0,640	1,008	1,600	2,560	4,000	6,400	10,08
	Q ₄	1,250	2,000	3,125	5,000	7,875	12,50	20,00	31,25	50,00	78,75
$Q_3/Q_1=$ 12,5	Q ₁	0,080	0,128	0,200	0,320	0,504	0,800	1,280	2,000	3,200	5,040
	Q ₂	0,128	0,205	0,320	0,512	0,806	1,280	2,048	3,200	5,12	8,064
	Q ₄	1,250	2,000	3,125	5,000	7,875	12,50	20,00	31,25	50,00	78,75
$Q_3/Q_1=$ 16	Q ₁	0,062	0,100	0,156	0,250	0,394	0,625	1,000	1,562	2,500	3,938
	Q ₂	0,099	0,160	0,250	0,400	0,630	1,000	1,600	2,499	4,000	6,301
	Q ₄	1,250	2,000	3,125	5,000	7,875	12,50	20,00	31,25	50,00	78,75
$Q_3/Q_1=$ 20	Q ₁	0,050	0,080	0,125	0,200	0,315	0,500	0,800	1,250	2,000	3,150
	Q ₂	0,080	0,128	0,200	0,320	0,504	0,800	1,280	2,000	3,200	5,040
	Q ₄	1,250	2,000	3,125	5,000	7,875	12,50	20,00	31,25	50,00	78,75
$Q_3/Q_1=$ 25	Q ₁	0,040	0,064	0,100	0,160	0,252	0,400	0,640	1,000	1,600	2,520
	Q ₂	0,064	0,102	0,160	0,256	0,403	0,640	1,024	1,600	2,560	4,032
	Q ₄	1,250	2,000	3,125	5,000	7,875	12,50	20,00	31,25	50,00	78,75
$Q_3/Q_1=$ 31,5	Q ₁	0,032	0,051	0,079	0,127	0,200	0,317	0,508	0,794	1,270	2,000
	Q ₂	0,051	0,082	0,126	0,203	0,320	0,507	0,813	1,270	2,032	3,200
	Q ₄	1,250	2,000	3,125	5,000	7,875	12,50	20,00	31,25	50,00	78,75
$Q_3/Q_1=$ 40	Q ₁	0,025	0,040	0,062	0,100	0,158	0,250	0,400	0,625	1,000	1,575
	Q ₂	0,040	0,064	0,099	0,160	0,253	0,400	0,640	1,000	1,600	2,520
	Q ₄	1,250	2,000	3,125	5,000	7,875	12,50	20,00	31,25	50,00	78,75
$Q_3/Q_1=$ 50	Q ₁	0,020	0,032	0,050	0,080	0,126	0,200	0,320	0,500	0,800	1,260
	Q ₂	0,032	0,051	0,080	0,128	0,202	0,320	0,512	0,800	1,280	2,016
	Q ₄	1,250	2,000	3,125	5,000	7,875	12,50	20,00	31,25	50,00	78,75
$Q_3/Q_1=$ 63	Q ₁	0,016	0,025	0,040	0,063	0,100	0,159	0,254	0,397	0,635	1,000
	Q ₂	0,026	0,040	0,064	0,100	0,160	0,254	0,406	0,635	1,016	1,600
	Q ₄	1,250	2,000	3,125	5,000	7,875	12,50	20,00	31,25	50,00	78,75
$Q_3/Q_1=$ 80	Q ₁	0,012	0,020	0,031	0,050	0,079	0,125	0,200	0,312	0,500	0,788
	Q ₂	0,019	0,032	0,050	0,080	0,126	0,200	0,320	0,500	0,800	1,261
	Q ₄	1,250	2,000	3,125	5,000	7,875	12,50	20,00	31,25	50,00	78,75
$Q_3/Q_1=$ 100	Q ₁	0,010	0,016	0,025	0,040	0,063	0,100	0,160	0,250	0,400	0,630
	Q ₂	0,016	0,026	0,040	0,064	0,100	0,160	0,256	0,400	0,640	1,008
	Q ₄	1,250	2,000	3,125	5,000	7,875	12,50	20,00	31,25	50,00	78,75
$Q_3/Q_1=$ 125	Q ₁	0,008	0,013	0,020	0,032	0,050	0,080	0,128	0,200	0,320	0,504
	Q ₂	0,013	0,021	0,032	0,051	0,080	0,128	0,205	0,320	0,512	0,806
	Q ₄	1,250	2,000	3,125	5,000	7,875	12,50	20,00	31,25	50,00	78,75
$Q_3/Q_1=$ 160	Q ₁	0,006	0,010	0,016	0,025	0,039	0,062	0,100	0,156	0,250	0,394
	Q ₂	0,010	0,016	0,025	0,040	0,062	0,099	0,160	0,250	0,400	0,630
	Q ₄	1,250	2,000	3,125	5,000	7,875	12,50	20,00	31,25	50,00	78,75
$Q_3/Q_1=$ 200	Q ₁	0,005	0,008	0,012	0,020	0,032	0,050	0,080	0,125	0,200	0,315
	Q ₂	0,008	0,013	0,019	0,032	0,051	0,080	0,128	0,200	0,320	0,504
	Q ₄	1,250	2,000	3,125	5,000	7,875	12,50	20,00	31,25	50,00	78,75
$Q_3/Q_1=$ 250	Q ₁	0,004	0,006	0,010	0,016	0,025	0,040	0,064	0,100	0,160	0,252
	Q ₂	0,006	0,010	0,016	0,026	0,040	0,064	0,102	0,160	0,256	0,403
	Q ₄	1,250	2,000	3,125	5,000	7,875	12,50	20,00	31,25	50,00	78,75

A norma ANSI/AWWA C708 (2005) utilizada pelos Estados Unidos, define os pontos de calibração em vazão mínima e vazão normal, mais três pontos de calibração, o primeiro sendo a máxima vazão recomendada para operação

contínua e os outros dois pontos como limites inferior e superior da vazão normal.

Esta mesma norma define vazão normal como a faixa entre duas vazões pré-estabelecidas e vazão mínima como a menor vazão de teste.

As características dos medidores e pontos de calibração estão definidos na tabela 8. Esta norma não prevê pontos de calibração para aprovação de modelo e não define classe metrológica.

A própria dimensão do medidor é informação suficiente para que os pontos de calibração sejam estabelecidos.

Tabela 8 – Características de Operação, adaptação da norma ANSI/AWWA C708 (2005).

Dimensão do Medidor		Capacidade Máxima de Operação		Máxima vazão recomendada para operação contínua		Teste Vazão Mínima		Limites Teste da Vazão Normal	
in.	(mm)	gpm	(m ³ /h)	gpm	(m ³ /h)	gpm	(m ³ /h)	gpm	(m ³ /h)
5/8	15	20	4,5	10	2,3	¼	0,06	1-20	0,2-4,5
5/8 x 3/4	15x20	20	4,5	10	2,3	¼	0,06	1-20	0,2-4,5
3/4	20	30	6,8	15	3,4	½	0,11	2-30	0,5-6,8
1	25	50	11,4	25	5,7	¾	0,17	3-50	0,7-11,4
1 ½	40	100	22,7	50	11,3	1 ½	0,34	5-100	1,1-22,7
2	50	160	36,3	80	18,1	2	0,45	8-160	1,8-36,3

A revisão anterior desta norma, a ANSI/AWWA C708 (1996), difere em relação a este assunto somente no diâmetro nominal dos medidores, cita 16mm ao invés de 15mm.

A norma SANS 1529-1 (2003) utilizada pela África de Sul, define os pontos de calibração em vazão de sobrecarga q_s , vazão de transição q_t e vazão mínima q_{min} . A vazão de sobrecarga q_s é definida como uma vazão que é igual a $2 \cdot q_p$, que representa uma alta vazão na que o medidor deve operar de uma maneira satisfatória, por um curto período de tempo¹, sem se deteriorar. Esta definição acrescenta a informação da relação existente entre q_p e q_s .

Para realização da inspeção ou teste de desempenho inicial dos medidores define-se os pontos de calibração: 3000, 1500, 750, 22,5, 15 L/h e mais duas vazões entre q_s e q_{min} .

Na tabela 9, apresentam-se as classes, a vazão mínima e a vazão de transição para medidores com vazão permanente menor, igual e maior que $10\text{m}^3/\text{h}$.

Tabela 9 – Definição das vazões em função da classe metrológica do medidor de água, adaptada da norma SANS 1529-1 (2003).

Classe Metrológica de Medidores de Água				
Classes dos Medidores	Para q_p menor ou igual $10\text{m}^3/\text{h}$		Para q_p maior que $10\text{m}^3/\text{h}$	
	Vazão mínima q_{\min}	Vazão de Transição q_t	Vazão mínima q_{\min}	Vazão de Transição q_t
A	$0,04 q_p$	$0,10 q_p$	$0,08 q_p$	$0,3 q_p$
B	$0,02 q_p$	$0,08 q_p$	$0,03 q_p$	$0,2 q_p$
C	$0,01 q_p$	$0,015 q_p$	$0,006 q_p$	$0,015 q_p$
D	$0,0075 q_p$	$0,0115 q_p$	---	---

As tabelas 6, 7, 8 e 9 encontradas ao longo deste item, possuem uma região destacada em cinza, indicando as vazões correspondentes às características do medidor de água $Q_{\max} 3\text{m}^3/\text{h}$ e classe metrológica C.

Na tabela 8, observa-se que as vazões não são compatíveis com a característica do medidor objeto de estudo. A vazão máxima indicada é de $4,5\text{m}^3/\text{h}$, enquanto a vazão mínima é de $0,060\text{m}^3/\text{h}$, valores que são semelhantes ao medidor com $Q_{\max} 5\text{m}^3/\text{h}$. Isto se deve, a que nos Estados Unidos, os medidores residenciais são encontrados a partir de $Q_{\max} 4,5\text{m}^3/\text{h}$, enquanto em países que utilizam as outras normas citadas, encontram-se medidores residenciais a partir de $Q_{\max} 1,2\text{m}^3/\text{h}$.

Esta diferença ocorre, basicamente, em função de dois diferentes sistemas de alimentação. Países que optam por um sistema com caixa de água (caixa elevada) em residências, tendem a optar por medidores com maior sensibilidade, conseqüentemente com vazão máxima a partir de $1,2\text{m}^3/\text{h}$. Por outro lado, países que optam por um sistema de alimentação direto, ou seja, sem intermediação da caixa de água, tendem a optar por medidores de água com menor sensibilidade, visando reduzir os custos.

A tabela 10 resume as normas e portaria discutidas até o momento, e também relaciona os pontos de calibração sob o ponto de vista da fabricação e de aprovação de modelo.

¹ A norma SANS 1529-1 (2003), não define o tempo em que o medidor de água pode ficar submetido à vazão de sobrecarga.

Tabela 10 – Opções de pontos de calibração sob o ponto de vista de fabricação e aprovação de modelo.

Opções de Pontos de Calibração, considerando medidor de água velocimétrico Q_{\max} 3,0m³/h e Classe Metrológica C.		
Portaria / Norma	Pontos de Calibração para Fabricação (L/h)	Pontos de Calibração (L/h) Aprovação de Modelo
Portaria INMETRO n° 246 (2000)	1500; 22,5; 15	3000, 1500, 750, 22,5 e 15
NBR NM 212 (1999)	1500; 22,5; 15	não menciona
ISO 4064-1 (1993)	1500; 22,5; 15	não menciona
ISO 4064-1 (2005)	3125; 2500; 25; 15,6	não menciona
OIML R49-1 (2003)	3125; 2500; 25; 15,6	3125; 2500; 1780; 884; 25; 15,6
ANSI / AWWA C708-1 (1996)	não aplicável	não aplicável
ANSI / AWWA C708-1 (2005)	não aplicável	não aplicável
SANS 1529-1 (2003)	3000; 22,5 e 15	3000; 1500; 750; 22,5; 15 e mais duas vazões compreendidas entre q_s e q_{\min} a ser definida pelo laboratório

Nas normas analisadas, observa-se que a avaliação da calibração com enfoque na aprovação de modelo é sempre mais criteriosa ou mais exigente do que na fabricação, devido à maior quantidade de pontos de calibração. Isto se deve ao fato de que o objetivo da aprovação de modelo acompanhada por um órgão governamental, é de validar determinado produto, de acordo com a especificação técnica vigente naquele país.

As normas NBR NM 212, ISO 4064 e ANSI/AWWA C708 não mencionam pontos de calibração com enfoque para aprovação de modelo para o medidor de água a ser testado, enquanto a OIML R49, SANS 1529 e Portaria INMETRO n° 246 determina de cinco a seis pontos de calibração.

2.2.3 FLUTUAÇÃO DA VAZÃO E SUA TOLERÂNCIA

Sendo a flutuação da vazão o foco principal deste trabalho, como componente de incerteza de medição, alguns esclarecimentos específicos se fazem necessários.

Ao definir um ponto de calibração, define-se uma vazão em que o medidor de água será submetido a uma comparação entre o volume indicado por um dispositivo indicador e uma medida materializada de volume, denominada também como padrão de referência.

Esta vazão ao ser ajustada por meio de válvulas, deve manter-se estável durante o processo de calibração.

A falta desta estabilidade é denominada *instabilidade ou flutuação da vazão* e pode ocorrer por várias razões: rotâmetro, instrumento de medição que indica a vazão, com impurezas dificultando a movimentação do componente flutuador que tem a função de indicar a vazão, a inclinação inadequada do próprio rotâmetro, ou ainda o sistema de alimentação que interliga as bancadas de calibração não são independentes. Entretanto, mesmo que todos os itens citados sejam controlados, a principal causa é o próprio sistema de alimentação de água na bancada de calibração.

Para a geração de altas vazões utiliza-se uma bomba centrífuga e para geração de baixas vazões utiliza-se uma caixa elevada. Tanto a variação de rotação do rotor da bomba como a redução do nível de água da caixa elevada, causa flutuação da vazão.

A Portaria INMETRO n° 246 (2000) declara para todos os medidores até $Q_{m\acute{a}x}$ 15m³/h que: “A variação relativa do valor das vazões durante cada ensaio não deve exceder a $\pm 2,5\%$ para vazões compreendidas entre Q_{min} e Q_t , inclusive, e $\pm 5,0\%$ para vazões entre Q_t e $Q_{m\acute{a}x}$.”

A figura 7 ilustra a tolerância da flutuação da vazão (no eixo x), sob enfoque da Portaria citada acima. O campo superior de medição é definido entre a vazão de transição inclusive até a vazão máxima, enquanto o campo inferior de medição é definido entre a vazão mínima até a vazão de transição exclusive.

Um exemplo de um ponto de calibração nominal no campo inferior e superior de medição, com suas respectivas tolerâncias, podem também ser visualizados de forma ampliada na figura 7.

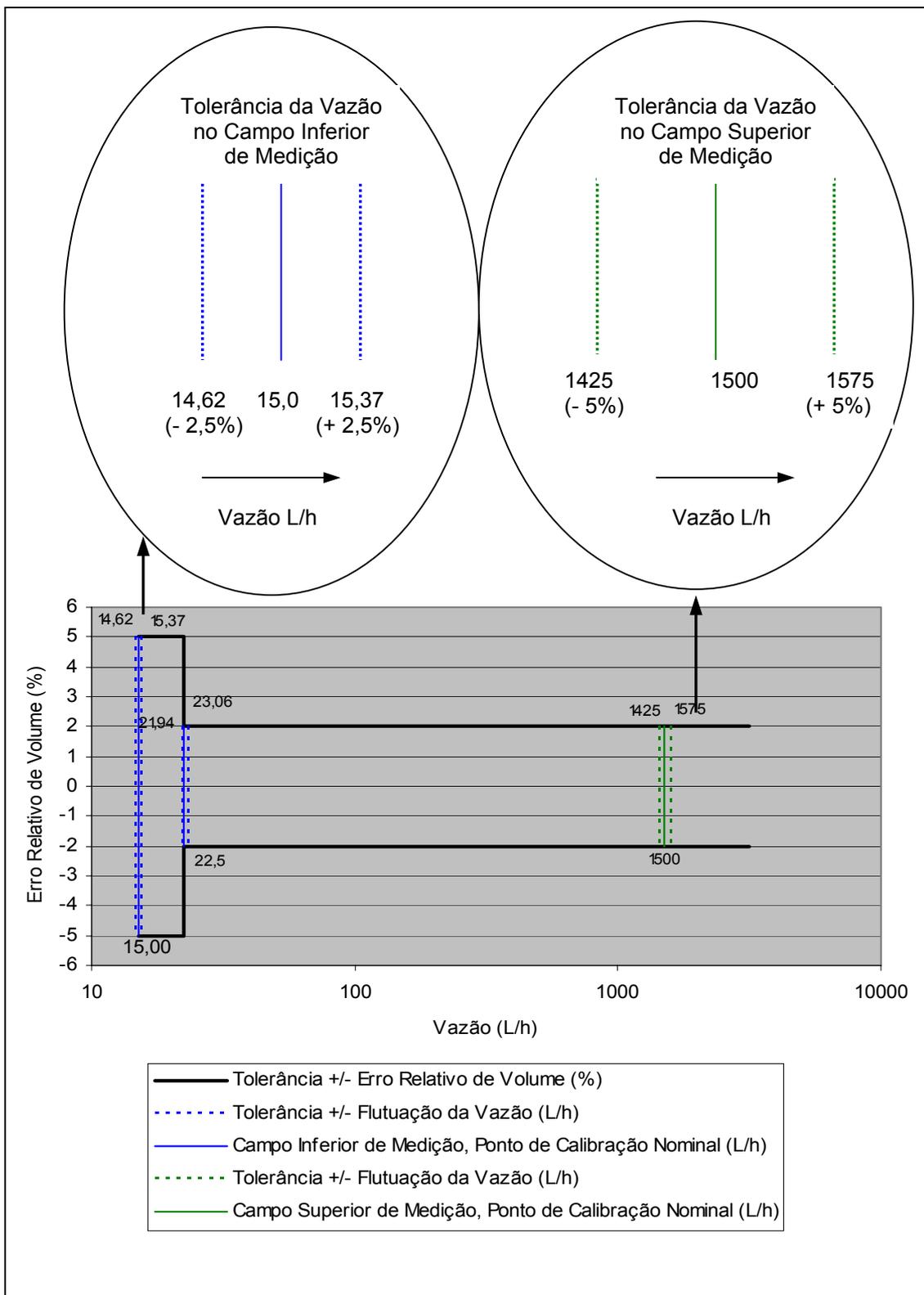


Figura 7 – Tolerância da flutuação da vazão (eixo x) para medidor de água $Q_{m\acute{a}x}$ 3m³/h e classe C, conforme Portaria INMETRO n°246 (2000).

A norma NBR NM 212 (1999), descreve tolerância para flutuação da vazão da seguinte forma: “A alimentação da bancada deve ser suficientemente estável de modo que durante os ensaios a variação da vazão seja inferior a $\pm 5,0\%$ na faixa q_t e $q_{m\acute{a}x}$, inclusive, e $\pm 2,5\%$ na faixa entre q_{min} e q_t , inclusive.

A norma ISO 4064-3 (1999) define que “A variação relativa da vazão durante cada teste (sem incluir início e parada) não deve exceder: $\pm 2,5\%$ de q_{min} até q_t (exclusive) e $\pm 5,0\%$ de q_t (inclusive) até q_s .”

A versão atualizada da norma ISO 4064-3 (2005) define que “A variação relativa da vazão durante cada teste (sem incluir início e parada) não deve exceder: $\pm 2,5\%$ de Q_1 até Q_2 (exclusive) e $\pm 5,0\%$ de Q_2 (inclusive) até Q_4 .”

A norma ANSI/AWWA C708 (1996) e a versão atualizada do ano de 2005, não contêm informações relacionadas com flutuação de vazão durante ensaio de calibração.

A norma SANS 1529-1 (2003) define: “Vazão estável para condições de referência durante um teste é definida como uma variação de vazão não maior que $\pm 3,0\%$ do valor escolhido...”

E ainda: “ A variação relativa da vazão durante cada teste (sem incluir início e parada) não deve exceder: a) $\pm 2,5\%$ para vazões menores que q_t e $\pm 5,0\%$ para vazões não menores que q_t .

A norma ISO 5168 (2005), faz breve citação da importância da flutuação da vazão, no entanto não define tolerância.

Na tabela 11, resumem-se as principais tolerâncias de flutuação de vazão estabelecida nas normas citadas até aqui, no campo superior e inferior de medição.

Como se pode observar na tabela, a principal diferença entre as normas está relacionada com a vazão de transição (Q_t), *incluída ou não no campo inferior de medição*. A Portaria INMETRO n° 246 (2000) e a NBR NM 212 (1999) estabelecem uma tolerância menor ($\pm 2,5\%$) de flutuação de vazão na Q_t , enquanto as normas ISO 4064-3 (2005) e SANS 1529-1 definem a tolerância da flutuação da vazão para Q_t no campo superior de medição de $\pm 5\%$.

Tabela 11: Normas, países e tolerâncias de flutuação de vazão no campo superior e inferior de medição.

Norma	País ou Região	Tolerância de Flutuação Campo Superior de Medição (Q_1 a Q_4)	Tolerância de Flutuação Campo Inferior de Medição (Q_{min} a Q_t)	Estabilidade de Vazão
Portaria INMETRO n° 246 (2000)	Brasil	$\pm 5\%$	$\pm 2,5\% Q_t$ incluído	Não define
NBR NM 212 (1999)	Países membros Mercosul	$\pm 5\%$	$\pm 2,5\% Q_t$ incluído	Não define
ISO 4064-3 (1999)	Países membros ISO	$\pm 5\%$	$\pm 2,5\% Q_t$ não incluído	Não define
ISO 4064-3 (2005)	Países membros ISO	$\pm 5\% Q_2$ até Q_4	$\pm 2,5 Q_1$ até Q_2 não incluído	Não define
ISO 5168 (2005)	Países membros ISO	Não define	Não define	Não define
SANS 1529-1 (2003)	África do Sul	$\pm 5\%$	$\pm 2,5\% Q_t$ não incluído	$\pm 3\%$
AWWA C708 (1996)	EUA	Não define	Não define	Não define
AWWA C708 (2005)	EUA	Não define	Não define	Não define

Outro aspecto observado é a tolerância de $\pm 3\%$ de estabilização da vazão, proposta pela norma SANS 1529-1. Este valor tolerado está relacionado com o sistema de alimentação de água potável na bancada de calibração descrito anteriormente.

A maioria das normas discutidas, definem algum tipo de tolerância para flutuação da vazão, porém não definem os meios de controle para atingir a finalidade de controlar estes limites pré-estabelecidos.

Uma inferência que pode explicar esta lacuna é a constatação de que conceitualmente, os padrões de referência e sistemas de alimentação foram projetados a mais de vinte anos, época em que o desenvolvimento tecnológico dos medidores de água residenciais especificamente no Brasil, eram classificados como classe A e B, com Q_{min} de 40 L/h e 30 L/h, respectivamente. Nesta época os projetos previam, com certa reserva, a questão da estabilização da vazão e a tratavam adequadamente, porém com o passar do tempo e o aumento crescente da exigência de melhoria no desempenho na Q_{min} , por exemplo medidor de água classe C com Q_{min} a 15 L/h, o aumento do

risco potencial da ocorrência de instabilidade ou flutuação da vazão tornou-se eminente.

2.3 TIPOS DE BANCADAS DE CALIBRAÇÃO

Um medidor de água pode ser verificado, ajustado e ou calibrado utilizando-se de uma bancada de calibração com princípio de medição volumétrico, gravimétrico ou eletrônico.

2.3.1 BANCADA DE CALIBRAÇÃO COM PRINCÍPIO VOLUMÉTRICO.

Uma bancada com princípio de medição volumétrica é constituída de válvulas, para regular a vazão; mancais, para sustentar os medidores de água; rotâmetros ou indicadores de vazão para indicar ao operador a vazão instantânea; a medida padronizada de volume para armazenar a água que escoar pelo medidor de água; um sistema de alimentação por gravidade (caixa elevada) e bomba centrífuga ligada em série, para geração de vazões no campo inferior e superior de medição.

Em geral, até 10 medidores de água são posicionados em série e podem ser calibrados simultaneamente.

A calibração com princípio volumétrico baseia-se em comparar o volume totalizado que passou pelos medidores de água, com o volume indicado na medida materializada de volume, denominada industrialmente como: tanque padrão.

O fluido água circula por um sistema fechado, como ilustrado na figura 8, toda a água escoada até a medida padrão de volume é direcionada posteriormente, para um reservatório inferior. Este volume de água, é bombeado então para uma caixa elevada, e o ciclo de alimentação recomeça, automaticamente, sempre que o nível de água atinge determinada posição na caixa elevada.

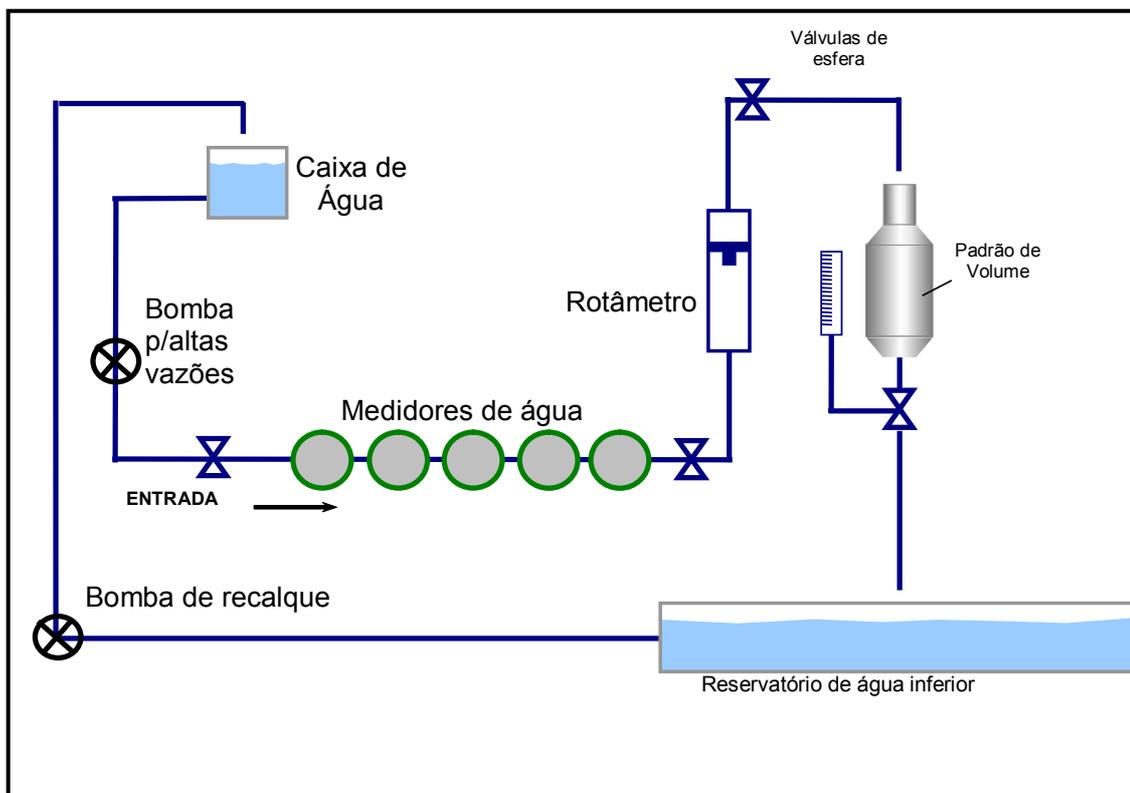


Figura 8 – Desenho esquemático da bancada de calibração volumétrica

2.3.2 BANCADA DE CALIBRAÇÃO COM PRINCÍPIO GRAVIMÉTRICO

Na figura 9, ilustra-se uma bancada com princípio gravimétrico.

A diferença com a bancada anterior (figura 8), radica no uso de um recipiente para armazenar a água escoada colocado sobre uma balança, que por sua vez, pesa a quantidade de água escoada pelo medidor.

Neste caso, também, podem ser posicionados até dez (10) medidores em série para serem calibrados simultaneamente.

O princípio de calibração gravimétrico está baseado em comparar o volume totalizado que passou pelos medidores de água, com o peso indicado na balança. Este peso é transformado em volume, dividindo-se o valor pela massa específica da água a uma determinada temperatura.

Da mesma forma que na bancada volumétrica, o fluido água circula em uma espécie de sistema fechado, uma vez que toda água escoada até o recipiente sobre a balança é direcionada posteriormente para um reservatório inferior, e

novamente é bombeado para uma caixa elevada, recomeçando o ciclo de alimentação automaticamente, quando o nível de água atinge determinada posição na caixa elevada.

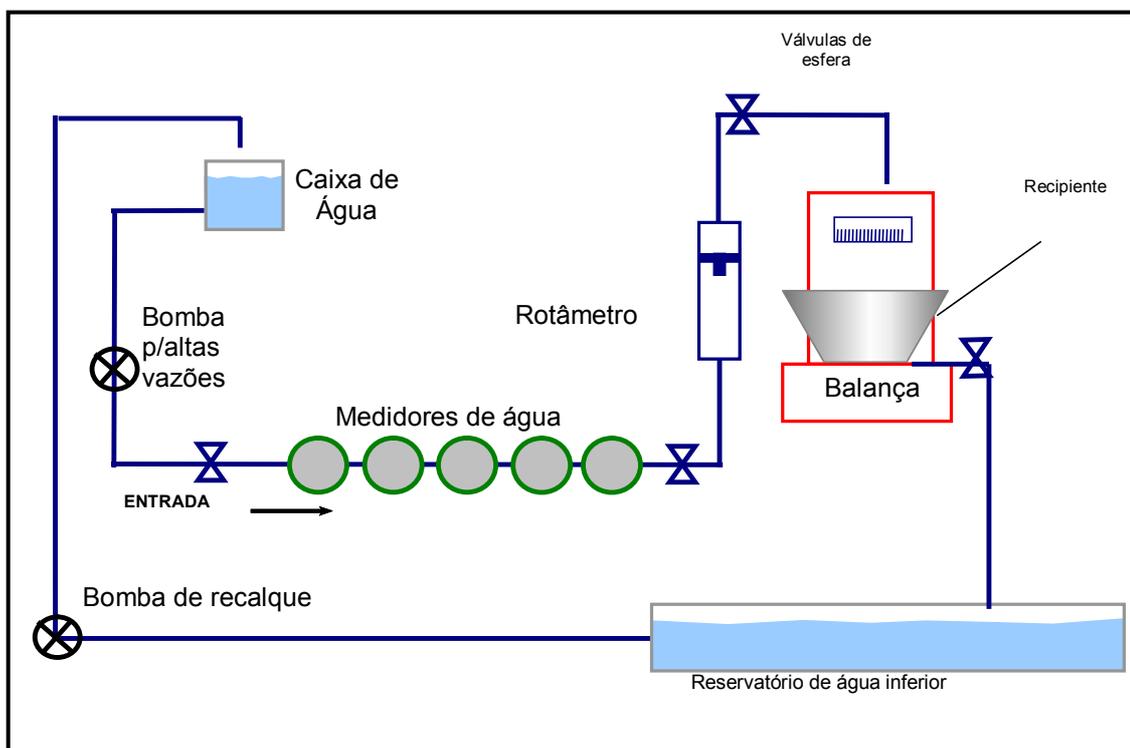


Figura 9 – Desenho esquemático da bancada de calibração gravimétrica.

2.3.3 BANCADA DE CALIBRAÇÃO COM PRINCÍPIO ELETRÔNICO

Outra possibilidade é a calibração utilizando o método de calibração eletrônico, que consiste na comparação do número de voltas de uma turbina, que equivale a um determinado volume, e o volume de referência determinado pelo deslocamento de um êmbolo por um motor de passo.

Com este método tem-se, para cada modelo de medidor de água, uma constante, denominada volume cíclico, e definida como o volume deslocado pelo medidor quando a turbina realiza uma volta em torno de si mesma

Um sensor com princípio infra-vermelho capta a quantidade de voltas que a turbina do medidor de água realiza e um programa computacional executa a multiplicação entre o volume cíclico do medidor de água em calibração e o

respectivo número de voltas. Este resultado é comparado então, com o volume de referência identificado pela bancada eletrônica através de um sensor (encoder) acoplado ao motor de passo. Na figura 10, tem-se uma bancada de calibração eletrônica.

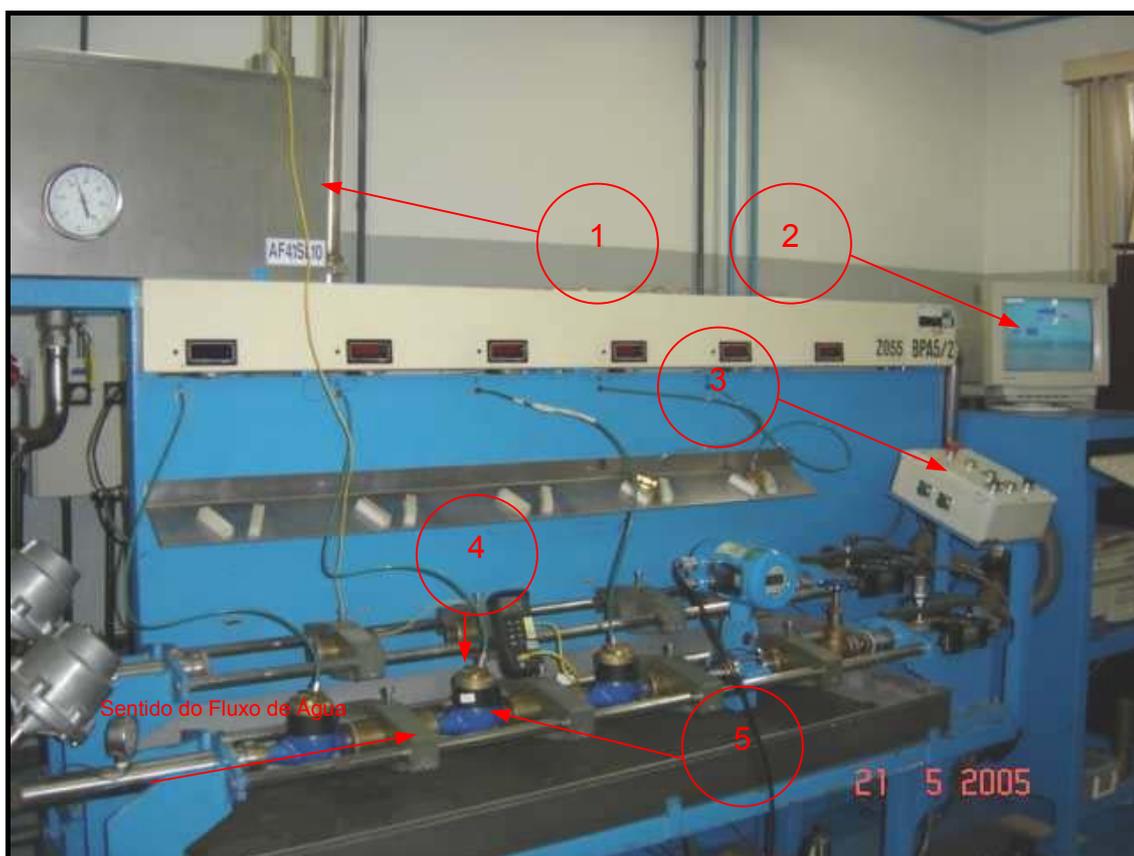


Figura 10 – Bancada de calibração eletrônica: 1) Reservatório de água; 2) Monitor, indica o resultado da medição; 3) Painel operacional para abertura e fechamento da linha e início ou interrupção do teste; 4) Sensor infra-vermelho 5) Medidor de água.

2.4 INCERTEZA DE MEDIÇÃO EM MEDIDORES DE ÁGUA

A palavra *incerteza* significa dúvida, e assim, no sentido mais amplo, incerteza de medição significa dúvida acerca da validade do resultado de uma medição. A incerteza de medição é definida, formalmente, como o parâmetro associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos ao mensurando (VIM, 2003).

2.4.1 DEFINIÇÕES GERAIS

Para o estudo das definições e modelos matemáticos para o cálculo de incerteza de medição, adotou-se o Guia para Expressão da Incerteza de Medição – ISO GUM (INMETRO, 2003).

A quantificação da incerteza leva inicialmente, à definição da chamada incerteza expandida, que define um intervalo em torno do resultado de uma medição com o qual se espera abranger uma grande fração dos valores que possam ser razoavelmente atribuídos ao mensurando.

A incerteza expandida é definida através da expressão (6), onde, k é um fator de abrangência e u_c é a incerteza combinada de y , com y sendo uma estimativa da grandeza medida $Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots)$ e X_1, X_2, X_3, \dots sendo os fatores que influenciam na medição.

$$U = \pm k \cdot u_c(y) \quad (6)$$

O *fator de abrangência* k é definido como um fator numérico, utilizado como multiplicador da incerteza padrão combinada de modo a se obter uma incerteza expandida, para um determinado nível de significância α . Este fator está tipicamente compreendido entre 2 a 3.

A *incerteza padrão combinada*, denominada doravante como incerteza combinada, é definida como a incerteza padrão do resultado de uma medição considerando as incertezas de todas as variáveis de influência, presente durante a medição.

Esta incerteza padrão é estimada como a raiz quadrada positiva da soma das variâncias ou covariâncias das grandezas de influência, ponderando-se o quanto o resultado de medição varia com mudanças nestas grandezas.

Para se ter a estimativa de u_c usa-se a lei de propagação de incertezas, expressa pela equação (7), onde u_c é a incerteza combinada de y e $u(x_i)$ é o desvio padrão que representa a incerteza de medição de cada fator de influência $X_1, X_2, X_3, \dots, X_N$ estimadas por $x_1, x_2, x_3, \dots, x_N$.

$$u_c^2(y) = \sum_{I=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 \cdot u^2(x_i) \quad (7)$$

As incertezas individuais são estimadas segundo uma avaliação do tipo A ou do tipo B. A avaliação do Tipo A, avalia a incerteza pela análise estatística de uma séries de observações utilizando como modelo uma distribuição Normal ou dadas as condições, uma distribuição t-Student. A avaliação do Tipo B, consiste em avaliar a incerteza por outros meios que não a análise estatística de séries de observações.

Na avaliação do Tipo A, o *desvio padrão experimental da média* é utilizado como estimativa da incerteza da grandeza de influência e calculado através das expressões 8 e 9, onde, s é do desvio padrão amostral, n é o número de leituras, x_i é a leitura obtida em uma medição e \bar{x} é a média aritmética das leituras obtidas em uma medição.

$$s_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (8) \quad \text{sendo,} \quad s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (9)$$

Segundo a ISO GUM (INMETRO, 2003), a distribuição normal é assumida para incerteza tipo A, quando é feita uma estimativa baseada em observações repetidas de um processo de variação randômica ou quando é dada uma incerteza sob a forma de um desvio padrão (s) ou um desvio padrão relativo, sem se especificar a distribuição, ou ainda quando é uma incerteza dada sob forma de um intervalo de confiança para um determinado nível de confiança α , por exemplo de 95%, sem se especificar a distribuição.

A incerteza Tipo B é avaliada por julgamento científico, baseando-se em todas as informações disponíveis sobre a possível variabilidade do componente de entrada x_i . Esse conjunto de informações pode incluir:

- Dados de medições prévias;
- Experiência ou conhecimento geral do comportamento e propriedades de materiais e instrumentos relevantes;

- Especificações do fabricante;
- Dados fornecidos em certificados de calibração do padrão de referência;
- Incertezas atribuídas a dados de referência extraídos de manuais;
- O procedimento operacional;
- Os efeitos de condições ambientais;

As componentes de incerteza Tipo B, de um modo geral, são avaliadas assumindo-se uma distribuição retangular e triangular (ISO 5168, 2005; INMETRO, 2003).

A distribuição retangular deve ser usada quando um certificado ou outra especificação dá limites sem definir um nível de confiança. Quando é feita uma estimativa sob a forma de uma faixa máxima ($\pm a$) sem se ter conhecimento do formato da distribuição.

Para uma distribuição retangular, a estimativa da incerteza de um dado fator de influência x_i , é calculado através da expressão (10), onde, a é a metade da amplitude para a variação desse fator de influência.

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (10)$$

Algumas componentes de incerteza de medição são simplesmente dadas como limites máximos dentro dos quais se assume que estão todos os valores da grandeza. Segundo a norma ISO 5168 (2005), quando existe razão para acreditar que os valores próximos dos limites são menos prováveis do que os valores próximos do centro dos limites, assumir a distribuição retangular contribui para uma avaliação muito pessimista. Neste caso recomenda-se a utilização da distribuição triangular com desvio padrão definido na expressão (11), onde, a é a metade da amplitude para a variação desse fator de influência.

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{6}} \quad (11)$$

As distribuições retangular e triangular podem ser visualizadas esquematicamente na figura 11.

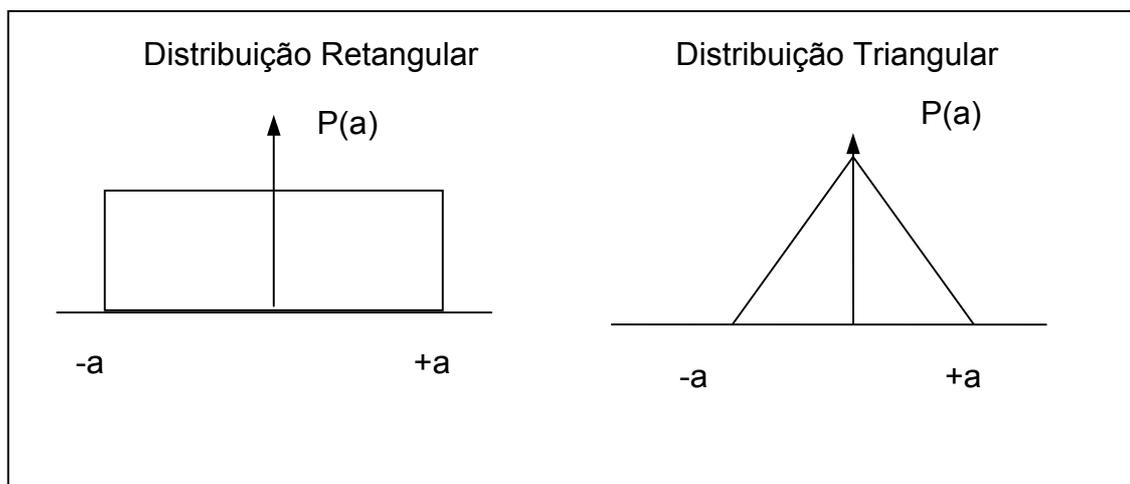


Figura 11 – Representação esquemática de alguns tipos de distribuição de probabilidade, conforme norma ISO 5168(2005).

Segundo o ISO GUM (INMETRO, 2003), o método mais adequado para relacionar o fator k e seu respectivo nível de confiança é o cálculo do *grau de liberdade efetivo* (V_{eff}).

As componentes de incerteza do tipo B possuem graus de liberdade com valores que tendem ao infinito (∞), portanto sua influência é nula.

O grau de liberdade efetivo é definido pela equação (12) de Welch-Satterthwaite, onde, $u_i(y)$ são as componentes i da incerteza que possuem graus de liberdade, e $\nu_i = n-1$ são os respectivos graus de liberdade.

$$V_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{\nu_i}} \quad (12)$$

Uma vez calculado V_{eff} , retira-se o valor de k da tabela de distribuição – t para um determinado nível de confiança.

Na maioria dos exemplos de cálculo de incerteza de medição encontrados na bibliografia estudada utiliza-se um nível de confiança de 95% ou 95,45%, independente do tipo de instrumento calibrado.

Segundo Castrup (1992), de forma geral em todos os guias ou documentos estabelece-se a mesma sistemática de cálculo da incerteza de medição, e se observam os seguintes passos:

1° Identificação das componentes de incerteza, que poderiam afetar o resultado da medição.

2° Estimação estatística das variâncias para cada componente.

3° Combinação das variâncias registradas, estimando-se uma incerteza total de medição ou incerteza padrão combinada u_c .

4° Definição dos limites de confiança, ou incerteza expandida, com base na estimativa de u_c , para um determinado nível de confiança.

2.4.2 COMPONENTES DE INCERTEZA DE MEDIÇÃO EM MEDIDORES DE ÁGUA

Existem diversas componentes de incerteza de medição que influenciam na calibração de um medidor de água. Porém, não há uma norma que especifique o procedimento de cálculo de incerteza de medição para medidores de água, tampouco que forneça exemplos que possam ser usados como orientação.

Apesar disso, para definir as componentes da incerteza de medição de medidores de água, é possível basear-se nesses guias gerais, utilizar a norma ISO 5168 (2005), que define a metodologia de cálculo de incerteza de medição para medidores de vazão e ainda artigos que apresentem estudos semelhantes em instrumentos de medição de vazão e volume.

Existe uma lacuna em relação às componentes de incerteza de medição relacionados ao volume nas normas ou guias específicos para o cálculo de incerteza de medição, especificamente em medidores de água com princípio de funcionamento por velocidade, objeto desta dissertação.

Castro (2004) cita componentes de incerteza de medição que podem ser atribuídas a um medidor de água, porém não realiza uma demonstração prática do cálculo de incerteza de medição.

Outro fato importante a ser destacado, é a inexistência de um exemplo de aplicação do cálculo de incerteza de medição de medidores de água, na norma ISO 5168 (2005), mesmo sendo esta uma norma específica, que trata sobre o tema incerteza de medição na área de vazão.

Na pesquisa bibliográfica realizada, não foram encontrados trabalhos de pesquisa específicos que tratem a calibração de medidores de água, por esta razão redirecionou-se a busca para pesquisas sobre grandezas e instrumentos correlatos, visando o estudo de práticas ou propostas que pudessem ser comparadas, e eventualmente adequadas, com a calibração de medidores de água e sua incerteza de medição.

Segundo Kegel (2001), as componentes de incerteza de medição relacionadas à calibração de um medidor de volume de gás (padrão primário) são: os efeitos aleatórios observados durante o processo, os efeitos sistemáticos associados com o padrão primário, os efeitos sistemáticos associados com a medição de pressão e temperatura e ainda, os efeitos sistemáticos associados com o cálculo da função crítica de vazão e a medição do diâmetro de entrada.

Ao estabelecer um paralelo com o medidor de água, apesar de existir diferença significativa em termos de propriedades do fluido que passa pelo medidor (gás x água), observa-se alguns pontos em comum.

Inicialmente, os efeitos aleatórios do processo de calibração também são estimados pela repetitividade em medidores de água, assim como são considerados as incertezas dos erros sistemáticos associados ao padrão de referência e a influência da temperatura.

Por ser a água um fluido incompressível, quando comparado com o fluido gás, a componente variação de pressão, mencionada anteriormente, não é adotada como componente de incerteza de medição para medidores de água residenciais. Segundo Damasceno (2006), em seu trabalho sobre a influência da temperatura, pressão e viscosidade na medição de óleo em medidores do tipo turbina, a componente de incerteza de medição pressão começa a ter influência a partir do momento da existência de uma pressão, que provoque deformação nos componentes relacionados com a concepção construtiva metrológica do medidor de volume de óleo. Este conceito pode ser estendido para a análise da incerteza de um medidor de água.

Para cada medidor de água, posicionado em série para calibração, existe uma diferente pressão atuando internamente, pois eles oferecem uma resistência ao escoamento do fluido, denominada como perda de carga.

A perda de carga individual dos medidores de água sob estudo é de 0,8 bar na vazão de 3000 L/h ($Q_{m\acute{a}x}$). Isto significa que para atingir uma vazão de 3000 L/h por exemplo, é necessária uma pressão de entrada de no mínimo 4,0 bar, resultado da multiplicação de 5 medidores por 0,8 bar de perda de carga de cada medidor de água.

A figura 12 ilustra a pressão de entrada necessária para atingir a vazão de 3000 L/h e ainda a pressão dos demais medidores de água em função da perda de carga citada anteriormente.

A pressão tem maior influência em vazões compreendidas na faixa máxima do campo superior de medição (por exemplo, 3000 L/h), uma vez que mantém uma relação com a vazão através da expressão (13), onde, $\Delta P_{(Q_{m\acute{a}x})}$ é a perda de carga na vazão máxima, $Q_{m\acute{a}x}$, é a vazão máxima; Q_{teste} é a vazão de teste e ΔP é a perda de carga medida com um manômetro diferencial.

$$\Delta P_{(Q_{m\acute{a}x})} = \frac{(Q_{m\acute{a}x})^2}{(Q_{teste})^2} \cdot \Delta P_{(medida)} \quad (13)$$

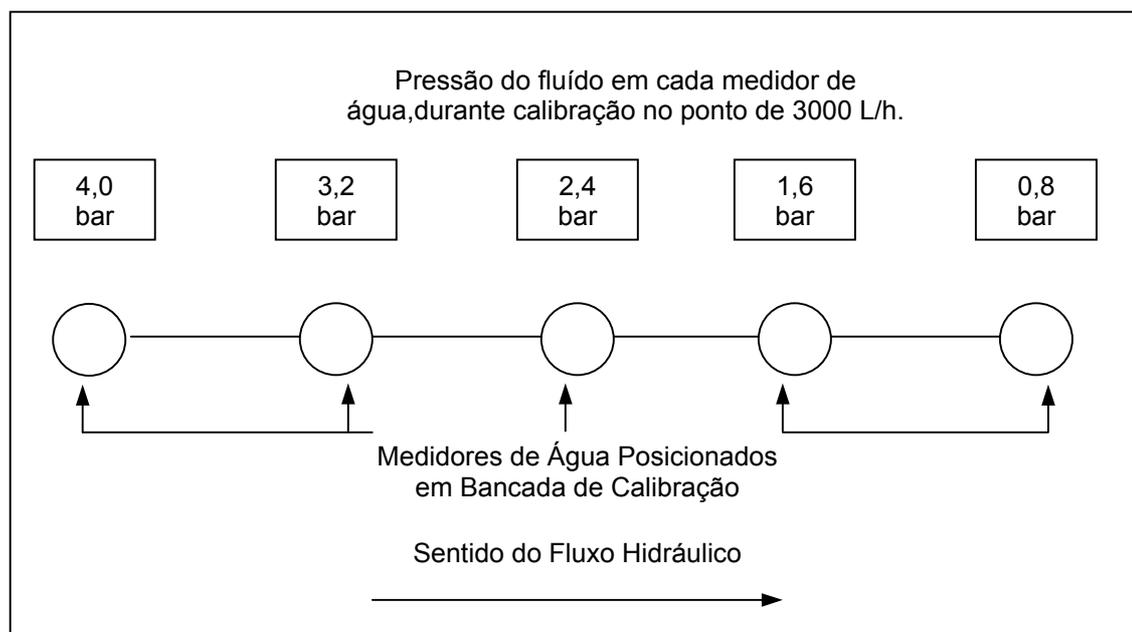


Figura 12 – Pressão do fluido em cada medidor de água, durante calibração no ponto de 3000 L/h, devido a perda de carga.

A equação (13) é aplicada e os resultados de perda de carga para cada vazão, é demonstrada na tabela 12.

A vazão no campo inferior de medição, por exemplo 15 L/h possui uma perda de carga de 0,00002 bar, um valor extremamente baixo para realizar qualquer tipo de deformação nos componentes, confirmando a linha de raciocínio de que a pressão tem maior influência em altas vazões.

Tabela 12 – Vazão e perda de carga em um medidor de água do tipo estudado.

Vazão (L/h)	Perda de Carga (bar)
3000,0	0,80
1500,0	0,20
750,0	0,05
22,5	0,00005
15,0	0,00002

Rathnasingham (2003) destaca em seu artigo sobre o controle ativo da turbulência em medidores de vazão, a importância do controle da turbulência durante a medição de vazão e Liang (2005) cita em seu estudo experimental sobre turbulência em dutos fechados, que a maior turbulência ocorre no comprimento de 0 a 2,5 vezes o diâmetro interno da turbulência.

Ao estabelecer uma relação com a instalação dos medidores de água na bancada de calibração, tem-se que entre um medidor de água e outro, instala-se um prolongador (ou mancal) que possui dupla função: a primeira é suportar o medidor e possibilitar sua instalação em série e a segunda é retificar o fluxo, ou seja, minimizar a turbulência.

Os prolongadores utilizados na bancada de calibração possuem diâmetro interno de 19mm e comprimento de 111mm, ou seja, o comprimento de retificação do fluxo é 5,8 vezes maior que o diâmetro interno, evitando a região de maior turbulência em um duto fechado, comentada anteriormente.

Apesar da utilização destes prolongadores, o efeito da turbulência na calibração ainda existe, mas seu estudo e quantificação como componente de incerteza de medição não é objeto desta dissertação, devido à necessidade de

investimentos no desenvolvimento de ferramentas para isolar esta componente experimentalmente.

Outra componente mencionada por Kegel (2001) em seu estudo sobre análise de dois diferentes métodos de calibração e cálculo de incerteza de medição aplicado em medidores de gás e que não está diretamente relacionado ao medidor de água multijato, é o diâmetro de entrada. Para o medidor de água, este conceito se transfere para a área de entrada da câmara de medição que dá acesso à turbina, sendo que esta componente pode ser mensurada pela avaliação da repetitividade do medidor e não necessariamente, pelo dimensionamento da mesma.

Uma componente de incerteza de medição aplicada por Aibe (2003) em seu estudo comparativo de calibração em um vaso padrão de volume, utilizando como fluido a água e posteriormente óleo, foi a reprodutibilidade originada pela troca de operadores. Esta componente de incerteza de medição não foi aplicada nesta investigação devido a concepção construtiva da bancada de calibração selecionada, uma vez que as operações que poderiam de alguma forma influenciar nos resultados de medição, são automatizadas.

Aibe (2003) cita ainda, a componente de incerteza de medição massa da água evaporada, existente durante realização da calibração em uma medida de capacidade de volume (vaso padrão). Novamente, realizando uma analogia para medidores de água, esta componente de incerteza de medição é aplicável em sistemas de calibração onde a água tenha contato com o ambiente, como por exemplo o sistema de calibração com princípio gravimétrico e o volumétrico. Já no sistema de calibração com princípio eletrônico não é aplicável, pois todo o processo de calibração ocorre em um sistema fechado, sem contato direto com o ambiente.

Segundo Castro (2004) as componentes de incerteza para uma bancada de calibração volumétrica são: repetitividade, resolução devido a leitura inicial de indicação do medidor de água, resolução devido a leitura final de indicação do medidor de água, resolução e incerteza herdada do padrão de referência. Aplicando também o conceito de identificar componentes de incerteza de medição, citado por Castrup (2004), através de observações dos aspectos

físicos que possam influenciar no resultado de medição, construiu-se a tabela 13, onde são apresentadas as componentes de incerteza para os três diferentes sistemas de calibração: volumétrico, gravimétrico e eletrônico.

Nesta tabela é possível verificar que variáveis de influência como: a flutuação da vazão, o “drift”, a inércia da turbina, a vibração, a turbulência causada por diâmetro interno dos mancais, a turbulência causada pela distância entre os mancais, a massa de água evaporada durante a calibração e a variação de pressão segundo a quantidade de medidores, não são hoje estimadas quantitativamente em medidores de água residenciais, conforme constatado no levantamento bibliográfico.

A componente de incerteza de medição *flutuação da vazão* está destacada na cor cinza, para enfatizar que o objetivo desta dissertação é identificar em quais vazões possui influência e estimá-la.

Tabela 13: Componentes da incerteza de medição de medidores de água, classificadas por tipo de bancada de calibração.

Componente de Incerteza de Medição / Bancada	Volumétrica	Gravimétrica	Eletrônica
Repetitividade	■	■	■
Incerteza herdada	■	■	■
Resolução do Padrão	■	■	■
Resolução Medidor de água, Leitura Inicial	■	■	---
Resolução Medidor de água, Leitura Final	■	■	---
Temperatura da Água	■	■	■
Expansão Térmica dos Materiais	■	■	■
Volume Cíclico	---	---	■
Flutuação da Vazão	?	?	?
Drift	?	?	?
Inércia da Turbina	?	?	?
Vibração	?	?	?
Turbulência (Diâmetro Interno dos Mancais)	?	?	?
Turbulência (Distância entre os Mancais)	?	?	?
Massa de Água Evaporada	?	?	---
Variação de pressão x quantidade de medidores na bancada	?	?	?

Legenda: (■) Componente considerada atualmente, (?) Componente não considerada atualmente e (---) Componente não aplicável.

Esta componente foi escolhida em detrimento às outras, devido a uma lacuna entre o que é solicitado pela Portaria INMETRO n° 246 (2000) e a inexistência

de controle da tolerância da flutuação da vazão nas bancadas de calibração volumétrica, gravimétrica ou eletrônica, durante o processo de calibração.

Um medidor de água $Q_{m\acute{a}x}$ 3m³/h classe C calibrado em uma bancada eletrônica tem sua incerteza estimada hoje, considerando como componentes de incerteza a repetitividade, a incerteza herdada do padrão de referência, a resolução do padrão de referência, a temperatura da água, a incerteza herdada do termômetro digital, a expansão térmica dos materiais e o volume cíclico (ver tabela 13 e figura 13).

A primeira componente de incerteza de medição, a repetitividade, classificada é como Tipo A, com base em uma distribuição normal sendo calculada pelo desvio padrão experimental da média (equação 8).

A segunda componente de incerteza de medição está associada à incerteza herdada do padrão de referência de volume, classificada como Tipo B, obtida através da consulta da incerteza de medição expandida, do nível de confiança e do correspondente fator de abrangência, no certificado de calibração do padrão de referência, neste caso a bancada de calibração eletrônica.

A terceira componente de incerteza de medição está associada à resolução do padrão de referência, classificada como Tipo B, com distribuição retangular. Seu valor numérico está associado à resolução de 0,1%, indicada pelo monitor da bancada eletrônica.

A quarta componente de incerteza de medição está associada ao volume cíclico, também classificada como Tipo B, com distribuição retangular e seu valor numérico está associado a uma constante que é uma característica intrínseca de cada medidor de água. A mesma é introduzida no programa da bancada eletrônica, porém a limitação máxima de três casas decimais na unidade de medida cm³ impede a utilização da constante projetada com mais de três casas decimais na unidade de medida cm³. Por esta razão, o valor da quarta casa decimal torna-se uma componente de incerteza de medição.

A quinta e a sexta componente da incerteza de medição estão associadas à temperatura da água durante a calibração dos medidores de água, ao termômetro digital (indicador de temperatura + termoresistência Pt 100) que

mede esta temperatura e à conseqüente dilatação no padrão de referência da bancada eletrônica.

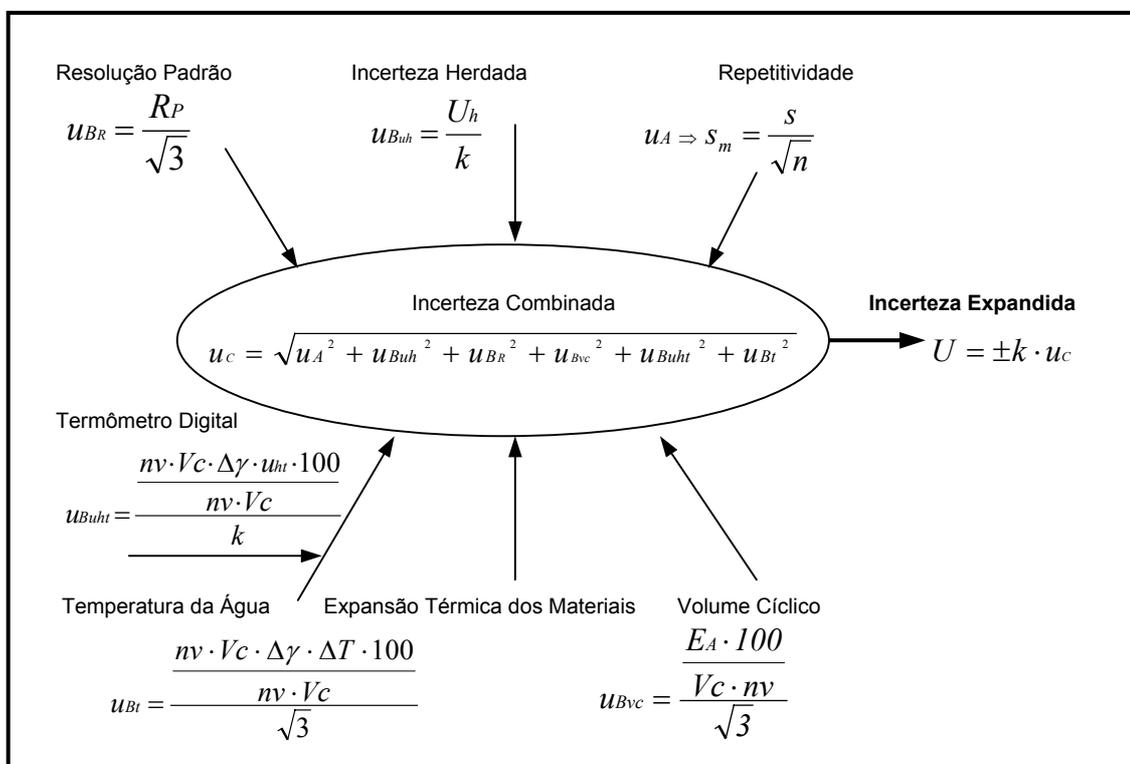


Figura 13 – Diagrama de causa e efeito, com as componentes de incerteza de medição e equações aplicadas no cálculo de incerteza de medição expandida de um medidor de água $Q_{m\acute{a}x}$ 3m³/h e classe C.

Este padrão de referência é um reservatório de água com diâmetro interno conhecido, onde um êmbolo se desloca com velocidade controlada por um motor de passo.

O material de construção deste reservatório é aço inoxidável, uma informação importante para posterior estimativa da dilatação volumétrica causada pela diferença de temperatura entre o padrão de referência no momento em que foi calibrado e a temperatura do fluido água no momento da realização da calibração.

Finalmente, para o cálculo de incerteza combinada, todas as componentes de incerteza são convertidas para a unidade relativa (%).

CAPÍTULO 3 – PROPOSTA PARA DETERMINAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA FLUTUAÇÃO DA VAZÃO.

Para conseguir atingir o objetivo de determinar a influência da flutuação da vazão em um medidor de água com vazão máxima de $3\text{m}^3/\text{h}$ e classe C, foi necessário seguir etapas elucidando questões, decidindo sobre qual caminho percorrer diante das alternativas e validando a proposta com base científica. Após o estudo da bibliografia e as normas, tornou-se necessário planejar testes experimentais que permitissem a obtenção dos erros relativos do volume e dos erros da vazão com suas respectivas incertezas, considerando a flutuação da vazão.

O planejamento experimental incluiu decisões importantes relacionadas:

- Ao tipo de bancada a ser utilizada,
- À quantidade de medidores e a como selecionar esses medidores,
- À quantidade de pontos de calibração (vazões) normalizados e não normalizados,
- À tolerância de flutuação da vazão,
- À tolerância de calibração de um medidor de água, com base em normas nacionais ou internacionais,
- A qual medidor de vazão seria adequado para medir a vazão forçada no experimento,
- Ao sequenciamento dos testes e tratamento estatístico dos dados.

Os testes foram planejados para levantar a curva de erros dos medidores de água utilizando tanto pontos normalizados pela Portaria n° 246 (2000), quanto não normalizados, ao longo da faixa de medição.

Em cada ponto escolhido foi forçada a flutuação da vazão positivamente e negativamente, dentro de limites pré-estabelecidos, gerando-se com isto mais dois pontos (extremos) para cada ponto de calibração (ver figura 14).

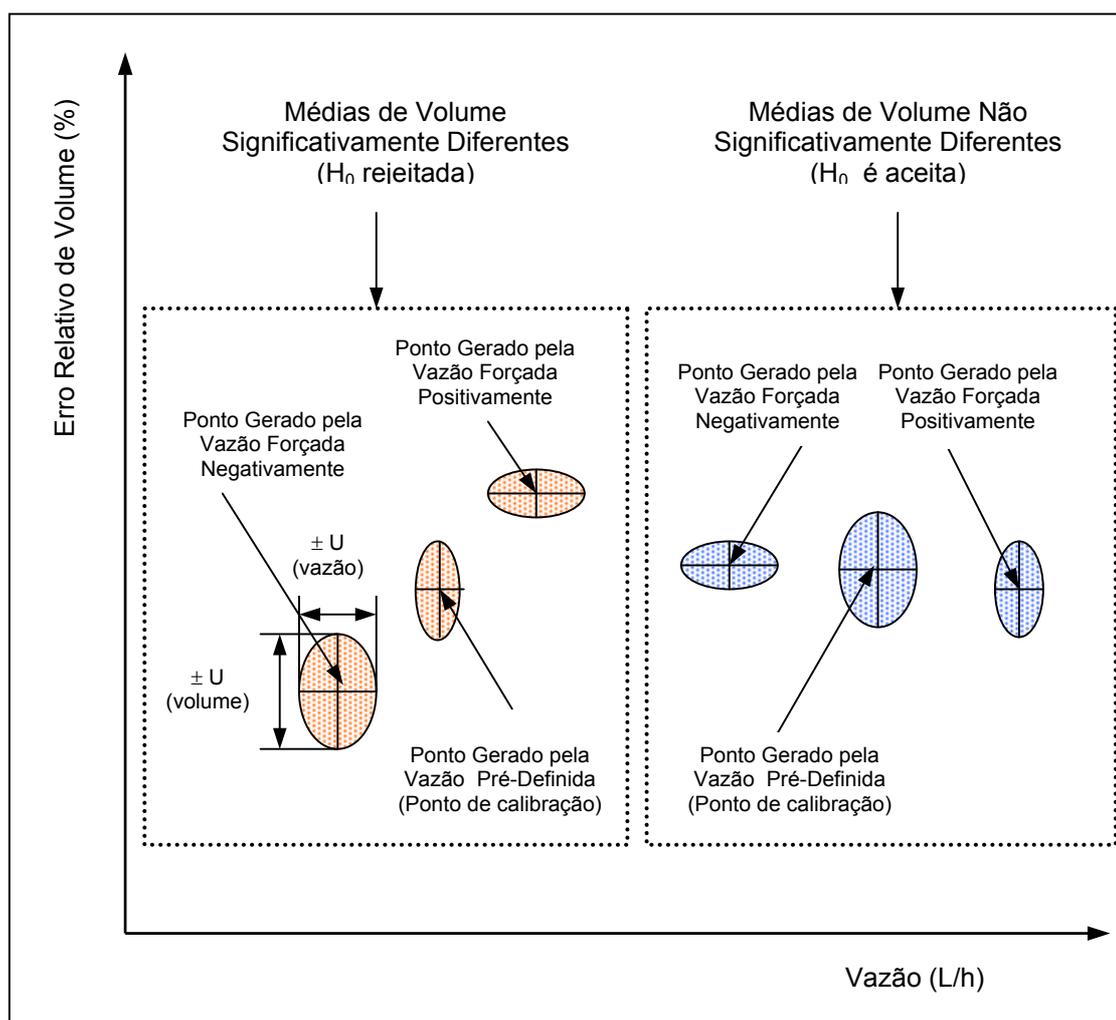


Figura 14 – Representação esquemática dos critérios para a consideração da flutuação da vazão como componente da incerteza de medição.

Com ajuda de uma Análise de Variância (Teste F), estabeleceram-se critérios para identificar em quais vazões a parcela de incerteza devida à flutuação da vazão deveria, ou não, ser considerada na incerteza final de calibração.

A análise de variância tem como hipótese nula H_0 a igualdade das médias μ_i (com $i = 1, \dots, N$) de N populações normais com a mesma variância σ^2 , ou seja $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 \dots = \sigma_n^2$.

As médias obtidas para o erro relativo de volume, em cada ponto de calibração (vazões) e seus respectivos pontos extremos da flutuação da vazão foram comparados entre si.

Quando a hipótese H_0 é aceita no teste F, ou seja, quando as médias não são significativamente diferentes, desde um ponto de vista estatístico, assume-se

que a flutuação da vazão não têm influência significativa como componente da incerteza de medição do medidor.

Quando H_0 é rejeitada, ou seja, quando as médias dos erros relativos de volume são significativamente diferentes, assume-se que a influência da flutuação da vazão é significativa e deve ser considerada para estimar a incerteza de medição do medidor de água. Tal parcela é calculada conforme equações (14) e (15), onde u_c é a maior incerteza combinada dentre os três pontos de calibração que compõem um agrupamento (ver figura 14), u_{amp} é a incerteza estimada a partir da maior amplitude (A) encontrada entre os erros relativo de volume do agrupamento, assumindo-se uma distribuição retangular.

$$u_{BFV} = \sqrt{u_c^2 + u_{amp}^2} \quad (14)$$

$$\text{sendo, } u_{amp} = \frac{A}{\sqrt{3}} \quad (15)$$

Finalmente foi realizada uma análise comparativa entre a incerteza de medição obtida com as componentes de incerteza tradicionais (ver tabela 13) e a incerteza de medição estimada considerando as componentes tradicionais e a incerteza da flutuação da vazão. Esta comparação ocorre somente naqueles pontos de calibração onde sua influência foi indicada pelo teste F.

CAPÍTULO 4 – PLANEJAMENTO E REALIZAÇÃO DOS TESTES

EXPERIMENTAIS

Os testes experimentais descritos a seguir foram realizados no ano de 2005 no departamento de Pesquisa da indústria Actaris, um fabricante de medidores de água residenciais e industriais, que está localizado na Avenida Joaquim Boer nº 792, na cidade de Americana, Estado de São Paulo.

Este departamento possui um laboratório equipado com os três tipos de sistemas de calibração, equipamentos auxiliares para o desenvolvimento das atividades, condições ambientais adequadas em termos de temperatura e geração de vazão, com acesso restrito a pessoas qualificadas para as atividades que nele se realizam.

4.1 SELEÇÃO DO TIPO DE BANCADA DE CALIBRAÇÃO

A bancada de calibração selecionada é a de medição com princípio eletrônico. Esta escolha ocorreu em função do tempo necessário para realização dos testes experimentais ser no mínimo dez vezes inferior, quando realizado o mesmo teste, em bancadas com princípio volumétrico ou gravimétrico. Além disso, levou-se em consideração que neste caso a quantidade de componentes de incerteza de medição é menor, quando comparado com outros princípios e ainda, o fato da coleta de dados não ter influência do ser humano.

4.2 DEFINIÇÃO DA QUANTIDADE DE MEDIDORES E SUAS CARACTERÍSTICAS

A bancada eletrônica possui capacidade para realizar calibração em cinco medidores de água simultaneamente, porém duas destas posições foram utilizadas para colocação do medidor de vazão e da válvula de agulha, respectivamente. Desta forma, a quantidade de medidores para os testes experimentais, foi limitada a três unidades.

Estes três medidores foram retirados da área produtiva, onde foram ajustados e verificados utilizando a Portaria INMETRO nº246 (2000) como critério de

aceitação a tolerância de $\pm 2\%$ para $Q_{\text{máx}}$ até Q_t (inclusive) e $\pm 5\%$ para Q_{min} . Além deste critério, observou-se também, a curva característica dos medidores, sendo selecionados somente aqueles que tivessem um coeficiente de ocupação em relação às tolerâncias de erro relativo (%) em volume, menor ou igual a 70%. Isto significa que houve a preocupação de selecionar um grupo de medidores que refletisse uma condição normal de produção.

4.3 DEFINIÇÃO DA QUANTIDADE DE PONTOS DE CALIBRAÇÃO

Com base nas informações levantadas na revisão bibliográfica, resumidas especificamente na tabela 10, definiram-se os pontos de calibração a serem utilizados, tendo como objetivo o cumprimento mínimo dos requisitos exigidos em território nacional, através da Portaria INMETRO n° 246 (2000).

Os pontos de calibração mínimos exigidos no caso de uma aprovação de modelo são: 3000 L/h, 1500 L/h, 750 L/h, 22,5 L/h e 15 L/h.

O processo de aprovação de um novo modelo de medidor de água pelo INMETRO, é o mais rígido critério conhecido em território nacional, portanto optou-se por utilizá-lo como referência para o desenvolvimento dos testes experimentais no que se refere à definição dos pontos de calibração.

Além dos pontos mencionados anteriormente, acrescentam-se os pontos de calibração 375 L/h, 200 L/h e 100 L/h entre a vazão de 750 L/h e 22,5 L/h por ser o maior intervalo entre os pontos definidos anteriormente. Indiretamente cumpre-se também o requisito da norma SANS 1529-1 (2003) que indica o acréscimo de mais dois pontos de calibração em vazões compreendidas entre Q_s e Q_{min} a ser definida pelo laboratório.

Os pontos de calibração para aprovação de modelo mencionados na norma OIML R49-1 (2003), são semelhantes aos pontos de calibração discutidos anteriormente.

Por uma questão de custo e necessidade de redução do tempo de execução do experimento, não foram considerados mais pontos de calibração.

Sendo assim, ficou definido que os pontos de calibração, para execução do experimento são: 3000 L/h, 1500 L/h, 750 L/h, 375 L/h, 200 L/h, 100 L/h, 22,5 L/h e 15,0 L/h.

4.4 DEFINIÇÃO DA TOLERÂNCIA DE CALIBRAÇÃO PARA ERRO DE VOLUME EM UM MEDIDOR DE ÁGUA

A tolerância do campo inferior e superior de medição no medidor de água a ser utilizada foi definida com base nas informações levantadas na revisão bibliográfica, apresentadas na tabela 5.

Como pode ser observado nesta tabela existem, basicamente, duas variações de tolerância: a primeira $\pm 2\%$ $Q_{\text{máx}}$ ou Q_4 até Q_t ou Q_2 (inclusive) e $\pm 5\%$ Q_t ou Q_2 (exclusive) até Q_{min} ou Q_1 e a segunda $\pm 1,5\%$ Vazão Normal de Teste e $\pm 3\%$ para Vazão Mínima.

A aplicação da menor tolerância por regra geral é a mais indicada, por ser a forma mais crítica para futura análise de resultados. Porém a tolerância recomendada pela norma ANSI / AWWA C708-1(2005) de $\pm 1,5\%$ Vazão Normal de Teste e $\pm 3\%$ para Vazão Mínima não pode ser dissociada da definição do ponto de calibração, porque enquanto para norma ANSI / AWWA C708-1(2005) a vazão mínima é definida em 60 L/h, o medidor de água em estudo, possui característica construtiva com vazão mínima definida em 15 L/h. Esta diferença, de 60 L/h para 15 L/h é significativa, por esta razão, optou-se por não considerar adequada a tolerância de $\pm 3\%$ na vazão mínima por uma discrepância entre o medidor de água objeto do experimento e a definição da norma acima citada.

Definiu-se então que a tolerância para o campo superior e inferior de medição é de $\pm 2\%$ $Q_{\text{máx}}$ ou Q_4 até Q_t ou Q_2 (inclusive) e $\pm 5\%$ Q_t ou Q_2 (exclusive) até Q_{min} ou Q_1 , respectivamente.

4.5 DEFINIÇÃO DA TOLERÂNCIA DA FLUTUAÇÃO DA VAZÃO

Outro aspecto importante na preparação dos experimentos foi a definição da tolerância da flutuação da vazão e da exatidão do indicador da vazão a ser utilizado no experimento, lembrando (ver figura 14) que essa tolerância define os pontos extremos em torno de cada ponto de calibração.

Na tabela 11, pode-se observar basicamente uma única diferença entre os diversos tipos de tolerância para flutuação da vazão.

A diferença entre as duas possibilidades é justamente a inclusão ou não da vazão Q_t ou Q_2 na tolerância de $\pm 2,5\%$ ou $\pm 5\%$, respectivamente.

Visando a criticidade no experimento, definiu-se pela menor tolerância de flutuação para Q_t ou Q_2 , igual a $\pm 2,5\%$. Esta decisão permite observar a influência da flutuação da vazão sob a menor tolerância aplicável para cada ponto de calibração definido no experimento.

Definiu-se então, que a tolerância de flutuação de vazão para cada ponto de calibração compreendido no campo superior de medição, entre as vazões de $Q_{\text{máx}}$ ou Q_4 até Q_t ou Q_2 (exclusive) é de $\pm 5\%$ e para o campo inferior de medição, compreendido entre as vazões Q_{min} ou Q_1 até Q_t ou Q_2 (inclusive) é igual a $\pm 2,5\%$.

Com a tolerância de flutuação de vazão definida, tornou-se possível a definição dos pontos extremos em torno de cada ponto de calibração.

Na tabela 14 e 15, apresenta-se todos os pontos de calibração aplicados nos testes experimentais.

Tabela 14 – Pontos de calibração, pontos extremos na máxima e na mínima da tolerância de flutuação da vazão, no campo superior de medição.

Campo Superior de Medição Ponto de Calibração (L/h) na mínima tolerância de flutuação - 5%	Campo Superior de Medição Ponto de Calibração Nominal (L/h)	Campo Superior de Medição Ponto de Calibração (L/h) na máxima tolerância de flutuação + 5%
2850	3000	3150
1425	1500	1575
712,5	750	787,5
356,2	375	393,8
190	200	210
95	100	105

Tabela 15 – Pontos de calibração, pontos extremos na máxima e na mínima da tolerância de flutuação da vazão, no campo inferior de medição.

Campo Superior de Medição Ponto de Calibração (L/h) na mínima tolerância de flutuação - 2,5%	Campo Inferior de Medição Ponto de Calibração Nominal (L/h)	Campo Inferior de Medição Ponto de Calibração (L/h) na máxima tolerância de flutuação + 2,5%
21,94	22,50	23,06
14,62	15,00	15,37

4.6 SELEÇÃO DE MEDIDOR DE VAZÃO

A regra geral utilizada pela metrologia na área industrial e comentada por Morinaka (2003), sugere a seleção de equipamentos com erro de medição de 1/5 a 1/10 da tolerância do processo.

No presente trabalho a tolerância do processo equivale à tolerância da flutuação da vazão do medidor de água. Portanto, o medidor utilizado para indicar a vazão durante o experimento deve ter seu erro compreendido entre $\pm 0,5\%$ (2,5% menor tolerância de flutuação da vazão dividido por 5) do ponto de calibração selecionado no campo inferior de medição.

No teste experimental aplicado por Johnson (1999) em medidores de água com diâmetro nominal de 250mm até 800mm, selecionou-se um medidor de volume com incerteza de medição de $\pm 0,4\%$ com nível de confiança de 95% para medir uma tolerância de processo (normalizada) de $\pm 2,0\%$ do ponto, ou seja o critério de seleção de instrumentos de medição foi mantido.

Desta forma, dois medidores de vazão eletromagnético calibrados em laboratório pertencente à Rede Brasileira de Calibração (RBC) foram selecionados para atender a especificação mencionada anteriormente. O primeiro com faixa de indicação de 0 a 4000 L/h e resolução de 1 L/h e o segundo com faixa de indicação de 0 a 150 L/h, com resolução de 0,1 L/h.

Ao cumprir tal critério de seleção, focando o campo inferior de aceitação de $\pm 2,5\%$, o medidor utilizado para indicar vazão está automaticamente aprovado para ser utilizado na tolerância de flutuação de vazão de $\pm 5\%$, no campo superior de medição.

Estes medidores eletromagnéticos estão sendo utilizados exclusivamente para o experimento, pois durante a produção dos medidores de água a própria bancada eletrônica possui um indicador de vazão.

Na figura 15, ilustra-se os pontos de calibração e seus respectivos pontos extremos, a tolerância selecionada do erro relativo do volume e o campo superior e inferior de medição. O campo superior de medição é identificado pela cor verde, enquanto o campo inferior de medição é identificado com a cor azul.

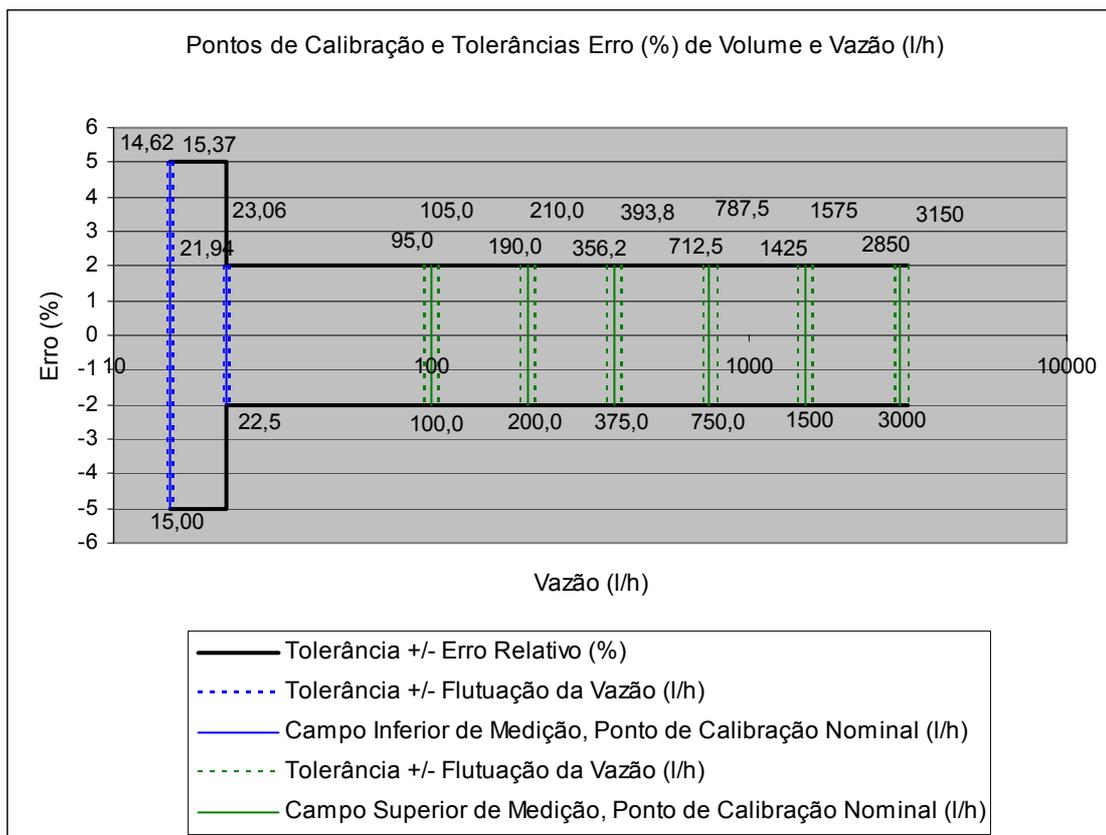


Figura 15 – Pontos de calibração e pontos extremos provocados pela flutuação forçada no limite superior e inferior da tolerância.

4.7 POSICIONAMENTO DOS MEDIDORES DE ÁGUA E EQUIPAMENTOS AUXILIARES

A disposição correta entre os medidores de água, medidor de vazão eletromagnético e válvula de controle da vazão na bancada de calibração eletrônica é importante para evitar que a restrição de área venha a causar turbulência e conseqüentemente influenciar no resultado de medição ou ainda, gerar problemas operacionais por excesso de perda de carga (≥ 5 bar), causando neste caso, o desligamento automático da bancada.

Poeschel (2002), ilustra em seu estudo sobre um projeto de desvio de fluxo para calibração de vazão da água, que a válvula de controle da vazão deve ser posicionada após os medidores que são os objetos da análise ou teste. Por esta razão, o posicionamento segue a definição da figura 16, onde os três medidores de água $Q_{\text{máx}} 3\text{m}^3/\text{h}$, classe C estão em série, seguido do medidor eletromagnético e a válvula tipo agulha, para permitir o ajuste da vazão.

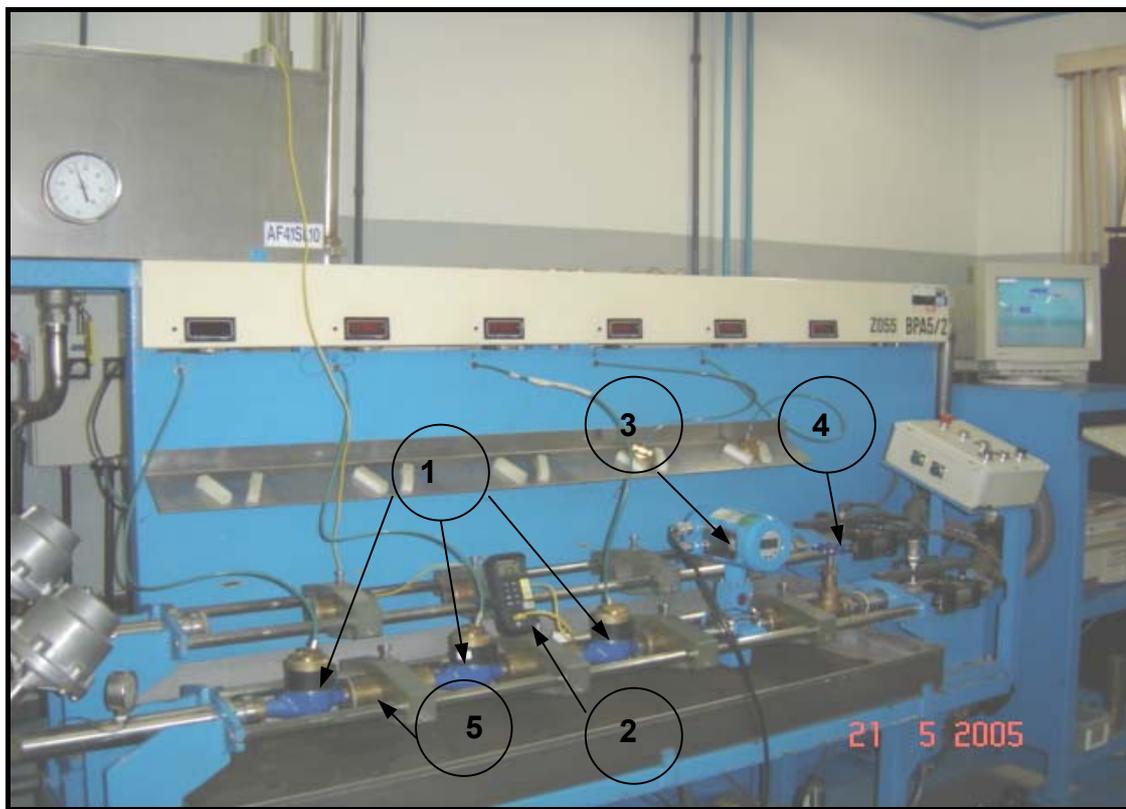


Figura 16 – Bancada de calibração eletrônica e equipamentos posicionados: 1) Medidores de Água; 2) Termômetro Digital; 3) Medidor de Vazão Eletromagnético 4) Válvula Tipo Agulha e 5) Mancal com comprimento maior que 5*D.

A bancada de calibração eletrônica está localizada em um ambiente onde a temperatura não é controlada. O controle de temperatura é realizado no fluido água, focando somente a especificação citada na Portaria INMETRO n°246 (2000), onde define-se que durante o processo de calibração, a temperatura da água não pode variar mais do que 5°C.

Sendo assim, o termômetro digital composto de um indicador de temperatura com resolução de 0,1°C e uma termoresistência PT100, é considerado um equipamento auxiliar para medição da temperatura, durante a realização da calibração.

O indicador do termômetro digital foi posicionado próximo aos medidores de água, com o sensor do mesmo inserido dentro da caixa de água da bancada. A cada leitura de vazão e volume, a temperatura da água foi coletada, para futuro tratamento no cálculo de incerteza de medição.

Durante o transcorrer da preparação do experimento, observou-se sobre a necessidade de troca da válvula que seria utilizada para o ajuste da vazão.

Inicialmente estava previsto a utilização de uma válvula de esfera, pois havia uma preocupação com que a perda de carga do sistema ultrapassasse o limite de segurança programado (5 bar). No entanto, quando os testes foram iniciados, a válvula de esfera não permitia ajuste adequado da vazão nos pontos requeridos.

A alternativa para se fazer o ajuste fino da vazão, foi a utilização de uma válvula tipo agulha, porém com diâmetro nominal maior (1”), para compensar o aumento de perda de carga gerado pela concepção da válvula. A solução obtida é ilustrada na figura 17.



Figura 17 – Válvula tipo agulha utilizada para ajuste fino da vazão.

4.8 PROGRAMAÇÃO NA BANCADA DE CALIBRAÇÃO ELETRÔNICA

A bancada eletrônica foi programada a partir da inserção de dados tais como, vazão de ensaio (ponto de calibração) e respectivos pontos extremos, número de voltas da turbina, volume cíclico, tempo de estabilização da vazão e quantidade de leituras desejadas. Esta bancada é semi-automática e o prosseguimento do teste para 2ª leitura por exemplo, é feita pelo acionamento de um botão.

Na tabela 16, apresenta-se a seqüência de teste, o número de voltas da turbina, o volume cíclico, o tempo de estabilização antes da tomada de leitura e a quantidade de leituras realizadas.

A programação foi ordenada de modo que a medição no ponto de calibração fosse realizada primeiro e em seguida, nos pontos extremos.

Tabela 16 – Informações utilizadas na programação da bancada eletrônica.

Medidor Q _{máx} 3m ³ /h, classe C e volume cíclico igual a 29,539cm ³			
Ponto de Calibração (L/h)	Nº de Voltas	Tempo de Estabilização (s)	Nº de Leituras
3000,00	100	5	3
3150,00	100	5	3
2850,00	100	5	3
1500,00	100	5	3
1575,00	100	5	3
1425,00	100	5	3
750,00	50	5	3
787,50	50	5	3
712,50	50	5	3
375,00	50	5	3
393,80	50	5	3
356,20	50	5	3
200,00	50	5	3
210,00	50	5	3
190,00	50	5	3
100,00	20	5	3
105,00	20	5	3
95,00	20	5	3
22,50	20	5	3
23,06	20	5	3
21,94	20	5	3
15,00	10	5	3
15,37	10	5	3
14,62	10	5	3

O número de voltas foi definido tomando-se como referência, o processo de fabricação atual e também, atentando-se para que o ciclo de calibração, composto pelo deslocamento do pistão, a coleta do número de voltas da turbina do medidor de água e o processamento dos dados, não fosse interrompido devido ao fim de curso do pistão da bancada eletrônica.

A retirada de ar do sistema foi realizada em duas situações, a primeira ocorreu na montagem inicial dos medidores com vazão de 3000 L/h, antes da realização dos testes nas vazões compreendidas entre 3150 L/h e 190 L/h. A

segunda, ocorreu devido à necessidade de troca do medidor eletromagnético, para possibilitar a medição de vazão na faixa de 100 L/h a 14,62 L/h. A retirada de ar do sistema, neste segundo caso, ocorreu com uma vazão de 1000 L/h e com o medidor eletromagnético desligado para evitar qualquer tipo de sobrecarga.

Uma vez definidas e montadas as condições experimentais de teste, realizaram-se as medições dos erros relativos de volume e da vazão, forçando-se a mesma, com ajuda da válvula tipo agulha no sentido positivo e no negativo (ver figura 14). Cada medição foi repetida três vezes e a temperatura foi coletada uma vez para cada ponto de calibração e seus respectivos pontos extremos. Todos os valores coletados (erro relativo do volume, vazão e temperatura) foram registrados e inseridos em tabelas Excel para posterior análise (ver anexos 3, 4 e 5).

CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os valores coletados de erro relativo de volume e vazão, foram utilizados para calcular a incerteza de medição e construir os gráficos de maneira semelhante ao apresentado na figura 14 do capítulo 3. Nestes gráficos os pontos (X;Y) correspondem a vazão na unidade de L/h e erro relativo de volume na unidade %, com suas respectivas incertezas expandidas para um nível de confiança de 95,45%.

As incertezas expandidas para os erros relativo de volume foram plotadas nestes gráficos e estimadas num primeiro momento, com base em incertezas combinadas que consideram somente aquelas componentes de incerteza usadas tradicionalmente, ou seja, sem considerar a influência da flutuação da vazão.

Desta maneira obteve-se para cada ponto de calibração e respectivos pontos extremos, um gráfico.

Estes gráficos foram analisados estatisticamente, aplicando-se análise de variância (Teste F) para testar a igualdade entre as médias do erro relativo de volume para cada ponto de calibração e seus respectivos pontos extremos (agrupamento).

Ao identificar um agrupamento onde as médias dos erros relativo de volume são significativamente diferentes (H_0 rejeitado), quantificou-se a componente de incerteza de medição flutuação da vazão.

Este valor atribuído à componente flutuação da vazão foi acrescida ao cálculo de incerteza de medição, gerando um segundo valor de incerteza de medição relacionado ao agrupamento, onde a hipótese H_0 havia sido rejeitada.

5.1 REALIZAÇÃO DO CÁLCULO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO PARA VOLUME E VAZÃO

Com os dados coletados de erro relativo de volume e temperatura, foi possível realizar o cálculo de incerteza de medição expandida do volume (eixo y do gráfico), utilizando as componentes de incerteza definidas na tabela 13, e resumidas a seguir:

- Repetitividade
- Incerteza Herdada da Bancada de Calibração Eletrônica
- Resolução Padrão
- Temperatura da Água
- Expansão Térmica dos Materiais
- Volume Cíclico

Na tabela 17, dividida em duas partes, visualiza-se um total de 17 colunas, cada uma com um significado em particular, explicado a seguir.

Tabela 17 – Cálculo de incerteza de medição expandida do volume.

MEDIDOR DE ÁGUA Q _{máx} 3m ³ /h x 3/4" x 190mm, Classe C(H)							V _c	0,029539
1	2	3	4	5	6	7	8	9
				Tipo A		Tipo B ₁	Tipo B ₂	Tipo B ₃
				Desvio padrão		Incerteza Herdada	Resolução Leitura	Volume Cíclico
Vazão	Volts da Turbina	Média Erro Corrigido \bar{x} (%)	Erro Médio BPA $U_{(BPA)}$	$u_{(A)}$	Medio $U_{(A)}$	$U_{(B1)}$	$U_{(B2)}$	$U_{(B3)}$
Q (l/h)								

Continuação da Tabela 17 – Cálculo de incerteza de medição expandida do volume.

10	11	12	13	14	15	16	17
Tipo B ₄	Tipo B ₅						
Termômetro Digital	Temperatura	Incerteza Combinada	Graus de Liberdade Efetivo	Fator de Abrangência	Incerteza Expandida	Apresentação Final	
$U_{(B4)}$	$U_{(B5)}$	U_c	V_{eff}	k_p	U	U (%)	k

Na coluna 1, tem-se as vazões nominais do teste e respectivas flutuações de vazão no campo superior e inferior do limite de tolerância.

Na coluna 2, tem-se o número de volts da turbina. A quantidade de volts define o volume de referência em que o pistão da bancada eletrônica irá deslocar.

Na coluna 3, tem-se a média do erro relativo corrigido E_{MC} do volume escoado. Para cada ponto de calibração e respectivos pontos extremos, aplicou-se a expressão (16), onde E é o Erro relativo (%) do medidor de água e E_{BPA} é o Erro relativo médio (%) de volume obtido no certificado de calibração da bancada eletrônica.

$$E_{MC} = E - E_{BPA} \quad (16)$$

Na coluna 4, tem-se o erro relativo médio relacionado à calibração de volume da bancada eletrônica (modelo BPA), através da consulta do certificado de calibração do mesmo.

O certificado de calibração CT 477/2004, pertencente à referida bancada de calibração eletrônica, define o erro relativo da mesma como sendo:

- -0,144 % na vazão de 30 L/h
- -0,170% na vazão de 75 L/h
- -0,188% na vazão de 150 L/h

A média aritmética dos erros relativo citados acima, foi caracterizado como erro sistemático da bancada de calibração, portanto se fez necessária a aplicação da correção deste erro, no resultado de calibração do medidor de água.

Na coluna 5, tem-se o desvio padrão experimental da média (VIM, 2003) para cada medidor de água e cada vazão estimada segundo a expressão número 8.

Na coluna 6 tem-se a contribuição da componente de incerteza de medição tipo A, com distribuição normal, dada como repetitividade, estimada através da combinação dos desvios padrão de cada ponto de calibração e de cada medidor de água, segundo a expressão (17), onde, s_j é o desvio padrão do j -ésimo conjunto de dados, ν_j é o grau de liberdade associados a s_j e m é o número de conjunto de dados combinados.

$$s_{po} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m \nu_j s_j^2}{\sum_{j=1}^m \nu_j}} \quad (17)$$

A norma ISO 5168 (2005) recomenda a utilização do desvio padrão combinado para produzir uma estimativa melhor, da variabilidade da técnica de medição, além de propiciar aumento dos graus de liberdade.

Na coluna 7, tem-se registrado a contribuição da componente de incerteza tipo B, incerteza herdada, através de consulta ao certificado de calibração da bancada eletrônica.

O certificado define a incerteza de medição expandida e o fator de abrangência k igual a 2,0 e nível de confiança de aproximadamente 95%. A equação (18), define esta componente de incerteza, onde, u_h é a incerteza relacionada ao volume, mencionada no certificado de calibração (%) e k é o fator de abrangência, mencionado no certificado de calibração.

$$u_{Buh} = \frac{u_h}{k} \quad (18)$$

Na coluna 8, tem-se a incerteza associada à resolução do padrão. Esta é uma incerteza tipo B e foi estimada com base numa distribuição retangular através da expressão (19), onde, R_p é a Resolução (%) definida no monitor do padrão de referência. A resolução da bancada de calibração eletrônica é de 0,1%.

$$u_{BR} = \frac{R_p}{\sqrt{3}} \quad (19)$$

Na coluna 9, tem-se a incerteza associada ao volume cíclico. Esta é uma incerteza tipo B e foi estimada com base numa distribuição retangular, através de expressão (20), onde, V_c é o volume cíclico e nv é o número de voltas.

$$u_{Bvc} = \frac{0,0000005 \cdot 100}{\sqrt{3} \cdot V_c \cdot nv} \quad (20)$$

O volume cíclico deste medidor é de 0,0295394 litros, o que significa que a cada volta na turbina, teoricamente o volume de 0,0295394 litros passa pela câmara de medição. A componente de incerteza passa a existir no momento em que é realizado a inserção do volume cíclico no programa da bancada eletrônica. O valor a ser inserido deve estar na unidade de cm^3 e com limitação de três casas decimais, portanto o dado inserido no programa é de 29,539 cm^3 .

Constata-se portanto, que a quarta casa decimal fica suprimida e por esta razão é uma componente de incerteza de medição. O valor 0,0000005 litros é convertido para unidade (%), aplicando-se a regra de três:

$$\begin{array}{ccc} Vc \cdot nv \text{ (litros)} & \begin{array}{c} \nearrow \\ \searrow \end{array} & 100 \text{ (\%)} \\ 0,0000005 \text{ (litros)} & & x \text{ (\%)} \end{array}$$

Na coluna 10, estima-se a influência da componente de incerteza de medição do termômetro digital utilizado, aplicando-se a equação (21), onde, nv é o número de voltas, Vc é o volume cíclico, $\Delta\gamma$ é a diferença entre coeficiente de expansão térmica volumétrica do aço e da água, u_{ht} é a incerteza herdada do termômetro digital e k é o fator de abrangência.

A incerteza herdada do termômetro digital é de $\pm 0,35^\circ\text{C}$ e o fator de abrangência (k) é igual a 2,0 para temperatura de 20°C .

$$u_{Buht} = \frac{nv \cdot Vc \cdot \Delta\gamma \cdot u_{ht} \cdot 100}{\frac{nv \cdot Vc}{k}} \quad (21)$$

Na coluna 11, é estimada quantitativamente, a contribuição da componente de incerteza tipo B com distribuição retangular, temperatura e expansão térmica do volume de referência, segundo a expressão (22), onde, nv é o número de voltas, Vc é o volume cíclico, $\Delta\gamma$ é a diferença entre coeficiente de expansão térmica volumétrica do aço e da água e ΔT é a diferença entre temperatura de referência mencionada no certificado de calibração e a temperatura da água durante calibração.

$$u_{Bt} = \frac{nv \cdot Vc \cdot \Delta\gamma \cdot \Delta T \cdot 100}{\frac{nv \cdot Vc}{\sqrt{3}}} \quad (22)$$

O coeficiente de expansão térmica adotado para o aço foi de $4,5 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ e para água $1,8 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

O anexo 5, contém os pontos de calibração e a respectiva temperatura da água. O valor de 23 °C indicado como temperatura de referência, é a temperatura da água quando a bancada eletrônica foi calibrada.

O termômetro digital apresenta erro de +0,47°C em seu certificado de calibração, portanto o valor da temperatura coletado foi corrigido.

Na coluna 12, estima-se quantitativamente a incerteza combinada u_c , aplicando a lei de propagação de incertezas ISO GUM (INMETRO, 2003), através da expressão (23):

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_{Buh}^2 + u_{Br}^2 + u_{Bvc}^2 + u_{Buht}^2 + u_{Bt}^2} \quad (23)$$

Na coluna 13, calcula-se os graus de liberdade efetivos aplicando-se a equação (12) de Welch-Satterthwaite.

Na coluna 14, consulta-se uma tabela t de student (anexo 1), para um nível de confiança de 95,45% utilizando o valor de V_{eff} calculado no passo anterior.

Na coluna 15, tem-se o valor da incerteza de medição expandida, para cada parte.

Nas colunas 16 e 17, tem-se um resumo dos resultados da incerteza de medição expandida e o fator de abrangência k utilizado para cada situação.

A tabela 18 apresenta a planilha de cálculo de incerteza de medição da bancada de calibração eletrônica com foco no volume, quando submetida ao processo forçado de flutuação de vazão.

A figura 18, ilustra o resultado da calibração, considerando o erro relativo de volume e respectiva incerteza de medição (eixo y).

Observa-se na faixa inferior de medição, um aumento significativo na incerteza de medição do erro relativo de volume, principalmente no agrupamento composto pelos pontos de calibração 15,37 L/h, 15,00 L/h e 14,62 L/h.

Tabela 18 – Cálculo da incerteza de medição do medidor de água em relação ao volume.

MEDIDOR DE ÁGUA Qmáx 3m³/h x 3/4" x 190mm, Classe C(H)						Vc	0,029539									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Vazão Q (l/h)	Volts da Turbina	Média Erro Corrigido \bar{x} (%)	Erro Médio BPA U_{BPA}	Desvio padrão		Incerteza Herdada U_{B1}	Resolução Leitura U_{B2}	Volume Ciclico U_{B3}	Termômetro Digital U_{B4}	Temperatura U_{B5}	Incerteza Combinada U_c	Graus de Liberdade Efetivo V_{eff}	Fator de Abrangência k_p	Incerteza Expandida U	Apresentação Final	
				U_{B6}	Medio U_{B7}										U (%)	k
3000	100	-0,32	-0,167	0,0167	0,024	0,040	0,029	0,000000009	0,002	0,011	0,056	189	2,025	0,113	0,11	2,025
				0,0167												
				0,0333												
3150	100	-0,28	-0,167	0,0333	0,061	0,040	0,029	0,000000009	0,002	0,011	0,079	17	2,160	0,171	0,17	2,160
				0,1000												
				0,0000												
2850	100	-0,35	-0,167	0,2000	0,178	0,040	0,029	0,000000009	0,002	0,011	0,186	7	2,520	0,468	0,47	2,520
				0,1667												
				0,1667												
1500	100	-0,79	-0,167	0,0333	0,043	0,040	0,029	0,000000009	0,002	0,014	0,067	35	2,070	0,139	0,14	2,070
				0,0333												
				0,0577												
1575	100	-0,79	-0,167	0,0333	0,033	0,040	0,029	0,000000009	0,002	0,014	0,061	68	2,050	0,126	0,13	2,050
				0,0333												
				0,0333												
1425	100	-0,79	-0,167	0,0577	0,038	0,040	0,029	0,000000009	0,002	0,014	0,064	46	2,060	0,132	0,13	2,060
				0,0000												
				0,0333												
750	50	-0,49	-0,167	0,0667	0,058	0,040	0,029	0,000000017	0,002	0,014	0,077	19	2,140	0,165	0,17	2,140
				0,0667												
				0,0333												
787,5	50	-0,48	-0,167	0,0577	0,079	0,040	0,029	0,000000017	0,002	0,013	0,094	11	2,250	0,212	0,21	2,250
				0,0882												
				0,0882												
712,5	50	-0,48	-0,167	0,0577	0,051	0,040	0,029	0,000000017	0,002	0,013	0,072	24	2,130	0,154	0,15	2,130
				0,0577												
				0,0333												
375	50	-0,31	-0,167	0,0577	0,038	0,040	0,029	0,000000017	0,002	0,014	0,064	46	2,060	0,132	0,13	2,060
				0,0000												
				0,0333												
393,8	50	-0,37	-0,167	0,0333	0,043	0,040	0,029	0,000000017	0,002	0,013	0,067	34	2,090	0,140	0,14	2,090
				0,0577												
				0,0333												
356,2	50	-0,24	-0,167	0,0333	0,043	0,040	0,029	0,000000017	0,002	0,013	0,067	34	2,090	0,140	0,14	2,090
				0,0577												
				0,0333												

Continuação Tabela 18 – Cálculo da incerteza de medição do medidor de água em relação ao volume.

200	50	0,37	-0,167	0,0333	0,027	0,040	0,029	0,000000017	0,002	0,013	0,058	122	2,025	0,117	0,12	2,025
				0,0333												
				0,0000												
210	50	0,29	-0,167	0,0333	0,038	0,040	0,029	0,000000017	0,002	0,012	0,064	45	2,060	0,131	0,13	2,060
				0,0577												
				0,0000												
190	50	-0,08	-0,167	0,1333	0,147	0,040	0,029	0,000000017	0,002	0,012	0,155	7	2,520	0,391	0,39	2,520
				0,1528												
				0,1528												
100	20	1,13	-0,167	0,0577	0,079	0,040	0,029	0,000000043	0,002	0,011	0,094	11	2,250	0,212	0,21	2,250
				0,0882												
				0,0882												
105	20	0,86	-0,167	0,1856	0,187	0,040	0,029	0,000000043	0,002	0,011	0,193	6	2,520	0,487	0,49	2,520
				0,1732												
				0,2000												
95	20	1,10	-0,167	0,0882	0,104	0,040	0,029	0,000000043	0,002	0,011	0,115	9	2,320	0,268	0,27	2,320
				0,1202												
				0,1000												
22,50	20	1,98	-0,167	0,0577	0,096	0,040	0,029	0,000000043	0,002	0,011	0,109	9	2,320	0,252	0,25	2,320
				0,1000												
				0,1202												
23,06	20	1,90	-0,167	0,1453	0,119	0,040	0,029	0,000000043	0,002	0,011	0,129	8	2,370	0,306	0,31	2,370
				0,0882												
				0,1155												
21,94	20	1,90	-0,167	0,1528	0,128	0,040	0,029	0,000000043	0,002	0,011	0,137	8	2,370	0,325	0,33	2,370
				0,1333												
				0,0882												
15,00	10	0,27	-0,167	0,2963	0,329	0,040	0,029	0,000000085	0,002	0,011	0,333	6	2,520	0,840	0,84	2,520
				0,4041												
				0,2728												
15,37	10	0,89	-0,167	0,2603	0,275	0,040	0,029	0,000000085	0,002	0,011	0,280	6	2,520	0,704	0,70	2,520
				0,1856												
				0,3528												
14,62	10	-0,77	-0,167	0,1000	0,196	0,040	0,029	0,000000085	0,002	0,011	0,203	6	2,520	0,511	0,51	2,520
				0,2906												
				0,1453												

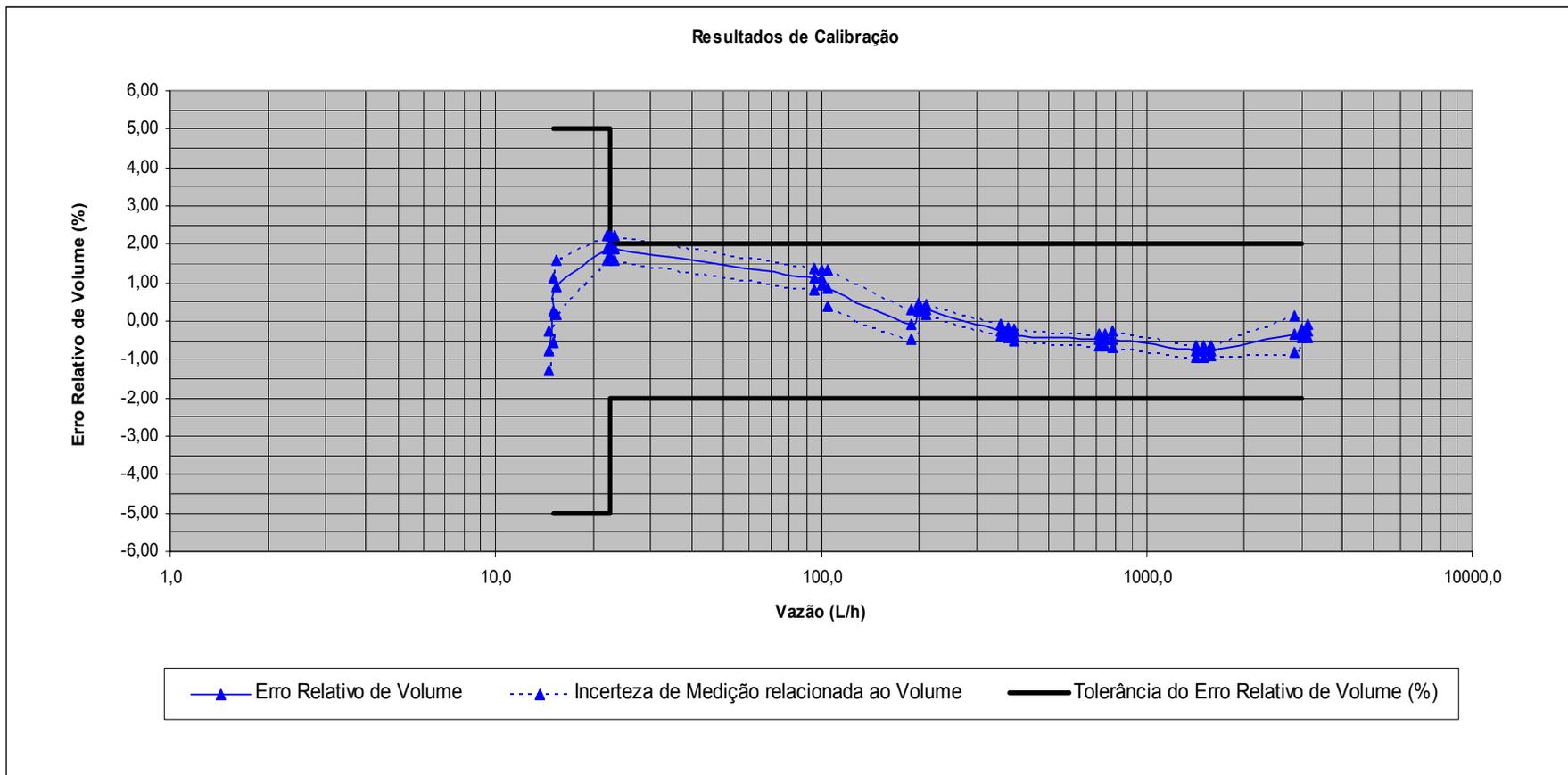


Figura 18 – Representação do resultado da calibração, no medidor de água objeto de estudo.

A partir dos dados de medição coletados para vazão e temperatura, realizou-se o cálculo de incerteza da medição expandida da vazão, utilizando as seguintes componentes de incerteza:

- Repetitividade
- Incerteza Herdada do Medidor de Vazão Eletromagnético.
- Resolução Padrão
- Temperatura da Água
- Expansão Térmica dos Materiais

O cabeçalho da planilha Excell utilizada para o cálculo é apresentada a seguir, na tabela 19.

Tabela 19 - Cálculo da incerteza de medição expandida da vazão.

MEDIDOR DE ÁGUA Q _{máx} 3m ³ /h x 3/4" x 190mm, Classe C(H)							
1	2	3	4	5	6	7	8
				Tipo A	Tipo B ₁	Tipo B ₂	Tipo B ₃
Vazão	Volts da Turbina	Erro Médio Corrigido \bar{x} (l/h)	Vazão Média Corrigida E_{BPA} (l/h)	Desvio Padrão $\sigma(x)$	Incerteza Herdada $U_{(B1)}$	Resolução Leitura $U_{(B2)}$	Termômetro Digital $U_{(B3)}$
Q (l/h)							

Continuação Tabela 19 - Cálculo da incerteza de medição expandida da vazão.

Vc	0,029539					
9	10	11	12	13	14	15
Tipo B ₄						
Temperatura	Incerteza Combinada	Graus de Liberdade Efetivo	Fator de Abrangência	Incerteza Expandida	Apresentação Final	
U(Bt)	U _c	V _{eff}	kp	U	U (l/h)	k

Neste caso, tem-se na coluna 3, o erro médio da vazão corrigida da bancada de calibração eletrônica, para cada ponto de calibração, calculado a partir da expressão (24), onde Q_C é a Vazão Indicada Corrigida (l/h), composta pela vazão de teste programada mais a correção da vazão extraída do certificado de calibração da bancada eletrônica, e Q_R é a Vazão de Referência (l/h), resultados de indicação do medidor de vazão eletromagnético.

$$E_{vc} = Q_C - Q_R \quad (24)$$

Na coluna 4, define-se a vazão média corrigida, relacionada à calibração dos medidores de vazão eletromagnéticos, através da consulta do certificado de calibração dos mesmos.

Para o medidor eletromagnético com faixa de indicação de 0 a 4000 L/h o erro relativo de vazão apresentado no certificado de calibração n° 050201015R é:

- -0,08 % na vazão de 4000 L/h
- -0,10% na vazão de 3000 L/h
- -0,11% na vazão de 2000 L/h
- -0,11% na vazão de 1000 L/h

Para o medidor eletromagnético com faixa de indicação de 0 a 150 L/h, o erro relativo de vazão apresentado no certificado de calibração n° 05021014R é:

- +0,09 % na vazão de 150 L/h
- +0,10% na vazão de 112,5 L/h
- +0,09% na vazão de 75 L/h
- +0,10% na vazão de 37,5 L/h

Em ambos os casos calculou-se a média aritmética, a partir dos valores citados acima, com objetivo de identificar o erro sistemático e corrigir o resultado de medição da vazão.

Na coluna 5, define-se o desvio padrão experimental da média (VIM, 2003) para cada medidor de água e cada ponto de calibração, aplicando a expressão número 8.

Na coluna 6, tem-se a contribuição da componente de incerteza tipo B, incerteza herdada, através de consulta ao certificado de calibração dos medidores de vazão.

O certificado define a incerteza de medição expandida e o fator de abrangência k , com nível de confiança de aproximadamente 95%. A equação (18), define esta componente de incerteza.

Na coluna 7, é definida quantitativamente a contribuição da componente de incerteza tipo B com distribuição retangular, resolução do padrão de referência com valor de 1 L/h para vazões compreendidas de 200 L/h a 3000 L/h, com valor de 0,1 L/h para vazão de 15 L/h a 100 L/h. Através da equação (19) esta componente é estimada.

Na coluna 8, a influência do termômetro digital é estimada como componente de incerteza tipo B.

As informações que constam no certificado de calibração do medidor de vazão eletromagnético, informam que a influência da temperatura é igual a 0,1% da vazão, para cada 10°C de diferença em relação à temperatura de calibração de referência do mesmo, e também, no certificado de calibração do termômetro digital, de que a incerteza herdada é de $\pm 0,35^\circ\text{C}$, com fator de abrangência (k) igual a 2,0 para a temperatura de 20°C , tem-se a equação (25), onde u_{ht} é a incerteza herdada do termômetro digital, Q_c é a vazão corrigida e k é o fator de abrangência.

$$u_{Buht} = \frac{0,01 \cdot u_{ht} \cdot Q_c}{\frac{100}{k}} \quad (25)$$

Na coluna 9, estima-se a contribuição da temperatura como componente de incerteza tipo B com distribuição retangular, através da equação (26), onde ΔT é a diferença entre temperatura de referência e temperatura da água durante calibração e Q_C é a vazão corrigida.

$$U_{Bt} = \frac{0,01 \cdot \Delta T \cdot Q_c}{\frac{100}{\sqrt{3}}} \quad (26)$$

A temperatura utilizada para o cálculo foi a mesma coletada na determinação do erro relativo de volume (ver anexo 5). No entanto a temperatura de referência para vazões compreendidas entre 190 L/h a 3150 L/h é de 23°C e a temperatura de referência para vazões nominais compreendidas entre 14,62 L/h a 105 L/h é de 24°C .

As temperaturas de referência foram obtidas do certificado de calibração dos medidores de vazão eletromagnético e estão relacionadas com a temperatura da água durante o processo de calibração.

Na coluna 10, é definida quantitativamente a incerteza combinada u_c , através da equação (27) :

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_{Buh}^2 + u_{BR}^2 + u_{Buht}^2 + u_{Bt}^2} \quad (27)$$

Na coluna 11, calculam-se os graus de liberdade efetivos aplicando a equação (12) , de Welch-Satterthwaite.

Na coluna 12, tem-se o valor da tabela t de student, para um nível de confiança de 95,45% .

Na coluna 13, tem-se o valor da incerteza de medição expandida para cada ponto de calibração.

Também neste caso, nas colunas 14 e 15, tem-se um resumo dos resultados da incerteza de medição expandida e o fator de abrangência k .

Na tabela 20, pode-se observar a planilha de cálculo de incerteza de medição da bancada de calibração eletrônica com foco na vazão, quando submetida ao processo forçado de flutuação de vazão.

Tabela 20 - Cálculo da incerteza de medição da bancada de calibração eletrônica, com foco na vazão.

MEDIDOR DE ÁGUA Qmáx 3m³/h x 3/4" x 190mm, Classe C(H)									Vc	0,029539				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Vazão Q (l/h)	Volts da Turbina	Erro Médio Corrigido \bar{x} (l/h)	Vazão Média Corrigida E_{EPA} (l/h)	Desvio Padrão $\sigma_{(Q)}$	Incerteza Herdada $U_{(E)}$	Resolução Leitura $U_{(E)}$	Termômetro Digital $U_{(E)}$	Temperatura $U_{(E)}$	Incerteza Combinada U_c	Graus de Liberdade Efetivo ν_{eff}	Fator de Abrangência k_p	Incerteza Expandida U	Apresentação Final	
													U (l/h)	k
3000	100	0,00	2997,00	1,7321	7,493	0,289	0,052	0,092	7,696	779	2,025	15,585	15,58	2,025
3150	100	-6,48	3146,85	1,2019	7,867	0,289	0,055	0,096	7,964	3856	2,025	16,128	16,13	2,025
2850	100	-8,85	2847,15	1,5275	7,118	0,289	0,050	0,087	7,286	1035	2,025	14,7549	14,75	2,025
1500	100	0,17	1498,50	0,8819	3,746	0,289	0,026	0,080	3,860	734	2,025	7,817	7,82	2,025
1575	100	0,42	1573,43	0,0000	3,934	0,289	0,028	0,084	3,945	#DIV/0!	2,000	7,890	7,89	2,000
1425	100	-0,76	1423,58	0,3333	3,559	0,289	0,025	0,076	3,587	26820	2,025	7,2638	7,26	2,025
750	50	-0,42	749,25	0,3333	1,873	0,289	0,013	0,036	1,925	2223	2,025	3,898	3,90	2,025
787,5	50	-0,62	786,71	0,6667	1,967	0,289	0,014	0,033	2,097	195	2,025	4,246	4,25	2,025
712,5	50	-0,88	711,79	0,3333	1,779	0,289	0,012	0,030	1,834	1831	2,025	3,7130	3,71	2,025
375	50	0,96	374,63	0,3333	0,937	0,289	0,007	0,018	1,035	186	2,025	2,097	2,10	2,025
393,8	50	0,74	393,41	0,3333	0,984	0,289	0,007	0,017	1,078	218	2,025	2,183	2,18	2,025
356,2	50	-1,49	355,84	0,3333	0,890	0,289	0,006	0,015	0,993	157	2,025	2,0109	2,01	2,025

Continuação Tabela 20 - Cálculo da incerteza de medição da bancada de calibração eletrônica, com foco na vazão.

200	50	-0,20	199,80	0,0000	0,500	0,289	0,003	0,008	0,577	#DIV/0!	2,000	1,154	1,15	2,000
210	50	-0,54	209,79	0,3333	0,524	0,289	0,004	0,008	0,685	35	2,070	1,419	1,42	2,070
190	50	-0,86	189,81	0,3333	0,475	0,289	0,003	0,007	0,648	28	2,110	1,3669	1,37	2,110
100	20	-0,14	100,10	0,0667	0,250	0,029	0,002	0,009	0,261	467	2,025	0,528	0,53	2,025
105	20	-0,13	105,10	0,0333	0,263	0,029	0,002	0,009	0,267	8182	2,025	0,540	0,54	2,025
95	20	-0,24	95,09	0,0333	0,238	0,029	0,002	0,008	0,242	5549	2,025	0,4899	0,49	2,025
22,50	20	0,09	22,52	0,0667	0,056	0,029	0,000	0,002	0,092	7	2,520	0,232	0,23	2,520
23,06	20	0,02	23,08	0,0333	0,058	0,029	0,000	0,002	0,073	45	2,060	0,150	0,15	2,060
21,94	20	0,03	21,96	0,0333	0,055	0,029	0,000	0,002	0,070	39	2,070	0,1458	0,15	2,070
15,00	10	0,11	15,01	0,0577	0,038	0,029	0,000	0,001	0,075	5	2,650	0,198	0,20	2,650
15,37	10	0,02	15,38	0,0333	0,038	0,029	0,000	0,001	0,059	19	2,140	0,125	0,13	2,140
14,62	10	0,03	14,63	0,0577	0,037	0,029	0,000	0,001	0,074	5	2,650	0,1966	0,20	2,650

5.2 REALIZAÇÃO DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA (TESTE F)

Segundo Stevenson (1986), a análise de variância é uma técnica que pode ser usada para determinar se as médias de duas ou mais populações são significativamente não diferentes (Hipótese H_0).

Quando duas ou mais estimativas são significativamente não diferentes, a hipótese H_0 não é rejeitada, portanto é aceita, enquanto se uma das estimativas é muito maior que a outra, isto tende a rejeitar a hipótese H_0 , ou seja, as populações têm médias significativamente diferentes

Para cada ponto de calibração e respectivos pontos extremos com flutuação forçada, denominados como agrupamento, analisou-se a igualdade das médias aplicando análise de variância, especificamente o Teste F.

Este teste estatístico é aplicado simultaneamente nas três médias do erro relativo de volume, obtidas com nível de confiança de aproximadamente 95%, e quando a hipótese H_0 é aceita, adota-se que as médias são iguais ou quando a hipótese H_0 é rejeitada, adota-se que as médias são diferentes.

Especificamente aplicou-se a razão F nos resultados de erro relativo de volume, pois ao contrário de outros testes de médias, que se baseiam na diferença entre dois valores, a mesma utiliza a razão das duas estimativas, dividindo a estimativa da variância entre as amostras pela estimativa da variância dentro das amostras, conforme equações (28), (29) e (30), onde, S_b^2 é a estimativa da variância entre as amostras, S_w^2 é a estimativa da variância dentro das amostras, s^2 é a variância do erro relativo relacionado ao volume, k é o número de amostras, n é o número de observações, \bar{x}_j é a média aritmética da amostra e \bar{x} é a média das médias amostrais.

$$F = \frac{S_b^2}{S_w^2} \quad (28), \quad \text{sendo} \quad S_w^2 = \frac{\sum s^2}{k} \quad (29) \quad \text{e} \quad S_b^2 = \frac{n \sum (\bar{x}_j - \bar{x})^2}{k - 1} \quad (30)$$

O valor resultante da análise estatística deve ser comparado com um valor crítico tabelado, que indica o valor máximo da estatística no caso de H_0 ser verdadeira, para um determinado nível de significância.

A forma de cada distribuição amostral teórica F, depende do número de graus de liberdade associado. Tanto o numerador como o denominador têm graus de liberdade diferentes.

O grau de liberdade, tanto do numerador como do denominador da razão F, se baseiam nos cálculos necessários para deduzir cada estimativa da variância populacional. A estimativa da variância entre as amostras (numerador) envolve a divisão da soma dos quadrados das diferenças pelo número de médias (amostrais) menos um, demonstrado na equação (31), onde, k é o número de amostras.

$$g.l.n = k - 1 \quad (31)$$

Analogamente, a estimativa da variância dentro das amostras (denominador) é dada pela equação (32), onde, k é o número de amostras e n é o número de observações realizadas.

$$g.l.d = k(n - 1) \quad (32)$$

Para $F_{\text{calculado}} \leq F_{\text{crítico}}$, então a hipótese H_0 é aceita, ou seja, as médias devem ser consideradas significativamente não diferentes.

No entanto se $F_{\text{calculado}} > F_{\text{crítico}}$, então a hipótese H_0 é rejeitada, ou seja, as médias devem ser consideradas significativamente diferentes.

O erro relativo relacionado ao volume e a incerteza de medição relacionada ao volume e a vazão, para cada ponto de calibração, foram então representadas graficamente para análise de variância, especificamente o Teste F.

Quando as médias não são significativamente diferentes (iguais), a influência da flutuação da vazão não é estimada, uma vez que existe uma sobreposição de erro relativo e incerteza de medição entre cada ponto de calibração medido.

Por outro lado, quando as médias são significativamente diferentes, a influência da vazão é estimada, aplicando-se o conceito de soma quadrática da maior incerteza combinada (sem a componente de flutuação da vazão) obtida entre os três pontos de calibração e a amplitude do erro relativo relacionado ao volume das três médias analisadas (equações 14 e 15).

Esta componente é tratada novamente no cálculo de incerteza de medição, assumindo-se uma distribuição retangular para cada ponto de calibração nominal onde haja esta influência, ou seja, as médias sejam identificadas como diferentes pelo Teste F.

A tabela 21 demonstra os resultados obtidos após realização do Teste F.

Os pontos de calibração 15 L/h, 15,37 L/h e 14,62 L/h, é o único agrupamento analisado que possui as médias de erro relativo de volume significativamente **diferentes**, portanto a hipótese H_0 é rejeitada. Sendo assim, é possível estimar a componente flutuação da vazão nesta faixa.

Tabela 21 – Resultado do Teste F, para cada ponto de calibração e respectivos pontos extremos.

Vazão (l/h)	\bar{x} (%)	\bar{x} (%)	S^2	$S_b^2 = \frac{n \sum (\bar{x}_j - \bar{x})^2}{k-1}$	$S_w^2 = \frac{\sum S^2}{k}$	$F = \frac{S_b^2}{S_w^2}$	$gl_n = k-1$ $gl_d = k(n-1)$	$F_{crítico} = 3,40$ Médias iguais ou diferentes ?
3000,00	-0,489	-0,485	0,080	0,01380	0,09167	0,15	2	$F_{cal} \leq F_{crit}$ Não Rejeita H_0 Iguais
3150,00	-0,444		0,123				24	
2850,00	-0,522		0,072				24	
1500,00	-0,956	-0,956	0,085	0,00000	0,11111	0,00	2	$F_{cal} \leq F_{crit}$ Não Rejeita H_0 Iguais
1575,00	-0,956		0,133				24	
1425,00	-0,956		0,115				24	
750,00	-0,656	-0,648	0,033	0,00043	0,02700	0,02	2	$F_{cal} \leq F_{crit}$ Não Rejeita H_0 Iguais
787,50	-0,644		0,025				24	
712,50	-0,644		0,023				24	
375,00	-0,478	-0,474	0,104	0,03360	0,09367	0,36	2	$F_{cal} \leq F_{crit}$ Não Rejeita H_0 Iguais
393,80	-0,533		0,068				24	
356,20	-0,411		0,109				24	
200,00	0,200	0,026	0,188	0,50578	0,20333	2,49	2	$F_{cal} \leq F_{crit}$ Não Rejeita H_0 Iguais
210,00	0,122		0,177				24	
190,00	-0,244		0,245				24	
100,00	0,967	0,863	0,037	0,20707	0,08287	2,50	2	$F_{cal} \leq F_{crit}$ Não Rejeita H_0 Iguais
105,00	0,689		0,146				24	
95,00	0,933		0,065				24	
22,50	1,811	1,759	0,096	0,01815	0,11204	0,16	2	$F_{cal} \leq F_{crit}$ Não Rejeita H_0 Iguais
23,06	1,733		0,113				24	
21,94	1,733		0,128				24	
15,00	0,100	-0,037	0,350	6,29370	0,25481	24,7	2	$F_{cal} \geq F_{crit}$ Rejeita H_0 Diferentes
15,37	0,722		0,242				24	
14,62	-0,933		0,173				24	

Os demais agrupamentos analisados possuem médias que não são significativamente diferentes, portanto aceita-se a hipótese H_0 . Desta forma, não estima-se a componente de incerteza flutuação da vazão, devido a sobreposição de resultados de erro e incerteza de medição entre os pontos de calibração.

As figuras 19 a 25 demonstram que ao forçar a flutuação da vazão durante a calibração do medidor de água, o erro relativo mais ou menos incerteza de medição ($E \pm U$) permanece em sobreposição aos demais pontos de calibração. Isto significa que para as condições extremas de variação de vazão 3150 L/h a 2850 L/h, por exemplo, a variação do erro relativo observada é abrangida pela faixa de incerteza de medição.

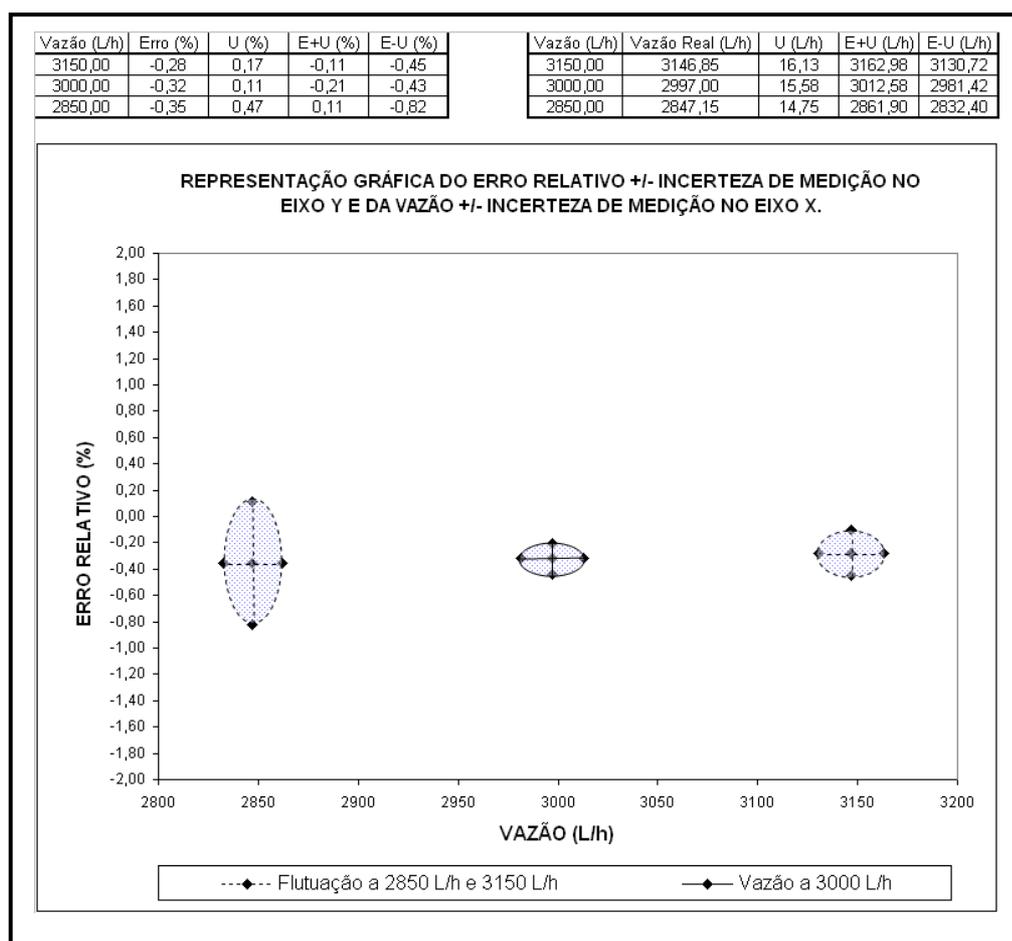


Figura 19 – Resultados de calibração de medidores de água submetidos a flutuação forçada nas vazões de 3150 L/h, 3000 L/h e 2850 L/h. Não rejeita H_0 , médias iguais.

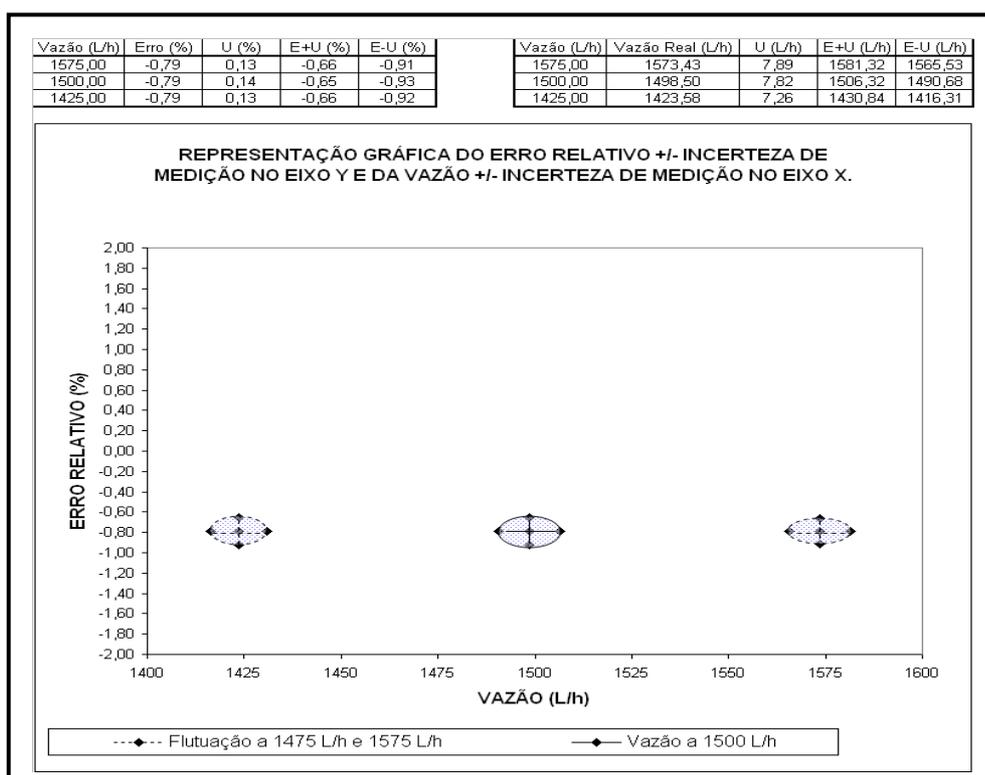


Figura 20 – Resultados de calibração de medidores de água submetidos a flutuação forçada nas vazões de 1575 L/h, 1500 L/h e 1475 L/h - Não rejeita H_0 , médias iguais.

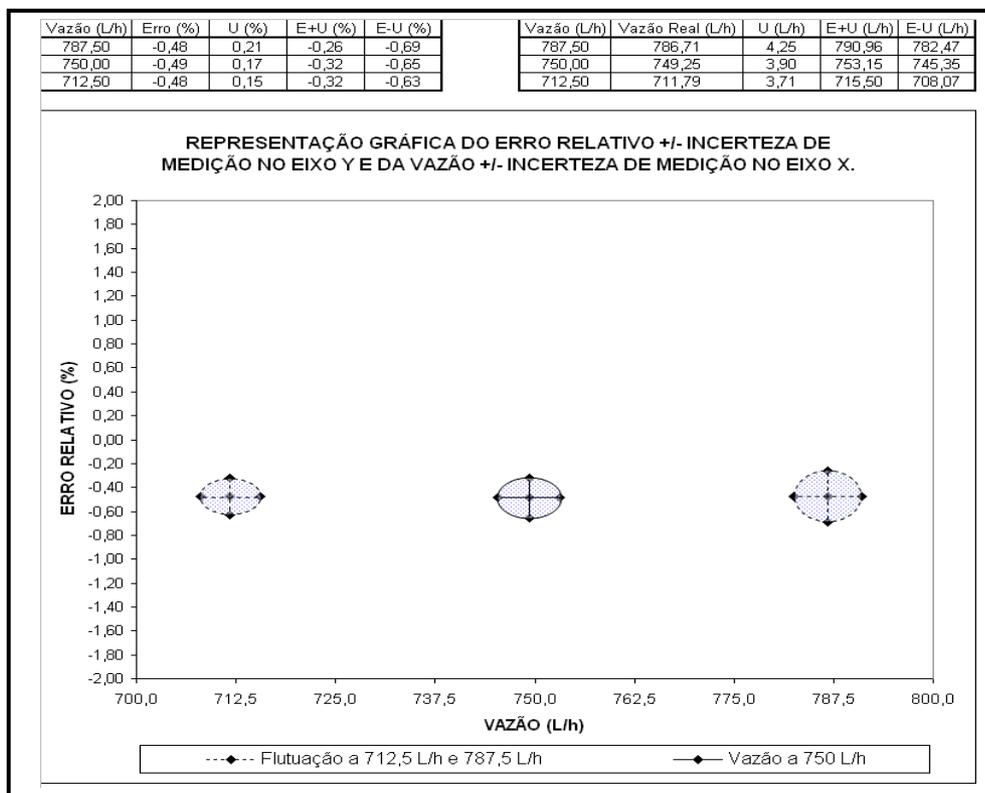


Figura 21 – Resultados de calibração de medidores de água submetidos a flutuação forçada nas vazões de 787,5 L/h, 750 L/h e 712,5 L/h - Não rejeita H_0 , médias iguais.

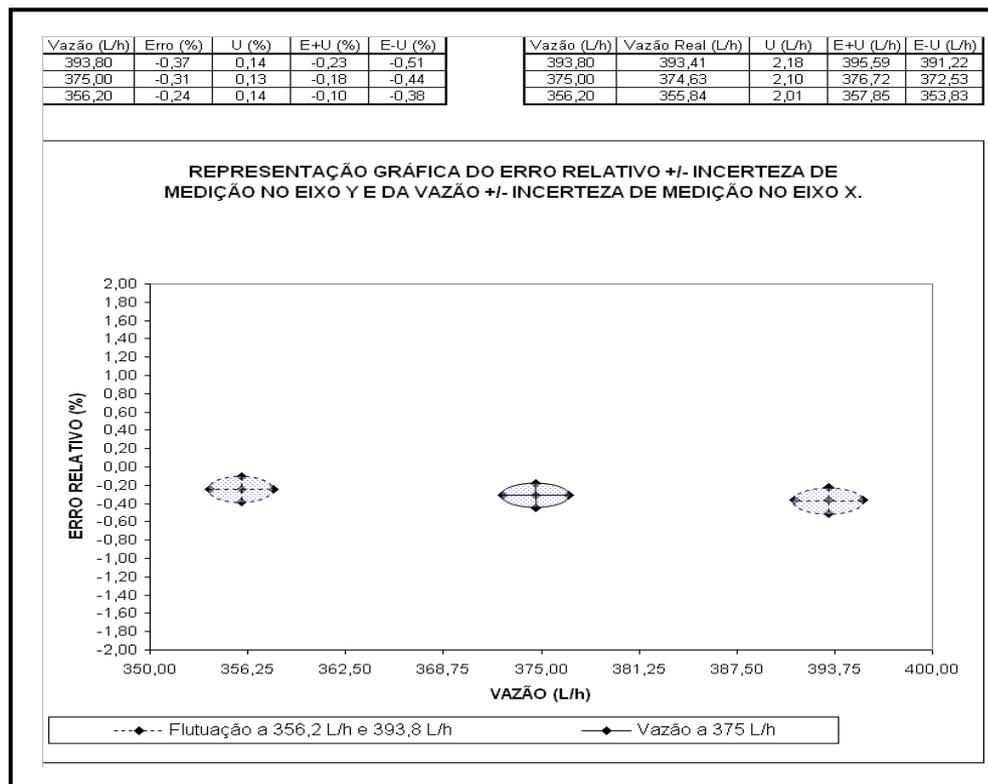


Figura 22 – Resultados de calibração de medidores de água submetidos a flutuação forçada nas vazões de 393,8 L/h, 375 L/h e 356,2 L/h - Não rejeita H_0 , médias iguais.

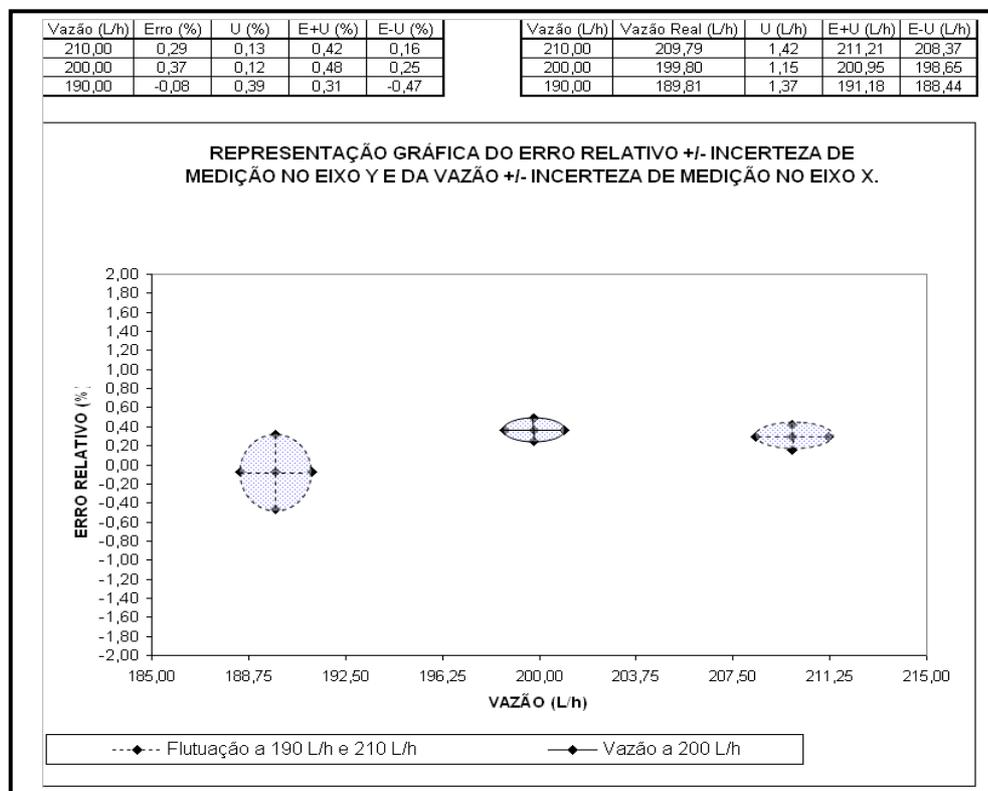


Figura 23 – Resultados de calibração de medidores de água submetidos a flutuação forçada nas vazões de 210 L/h, 200 L/h e 190 L/h - Não rejeita H_0 , médias iguais.

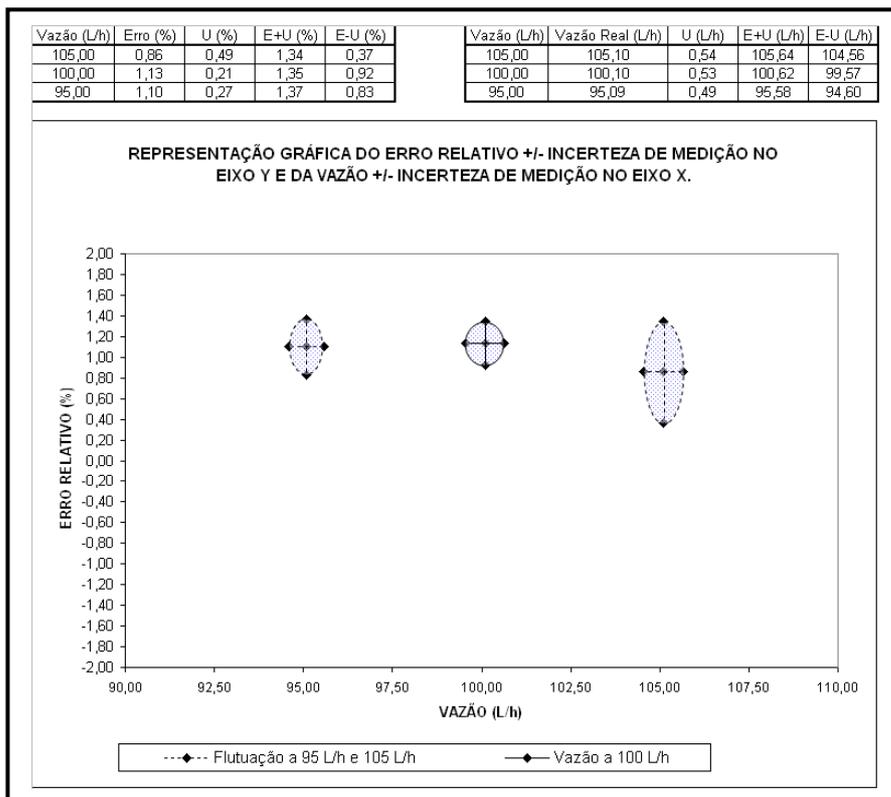


Figura 24 – Resultados de calibração de medidores de água submetidos a flutuação forçada nas vazões de 105 L/h, 100 L/h e 95 L/h - Não rejeita H_0 , médias iguais.

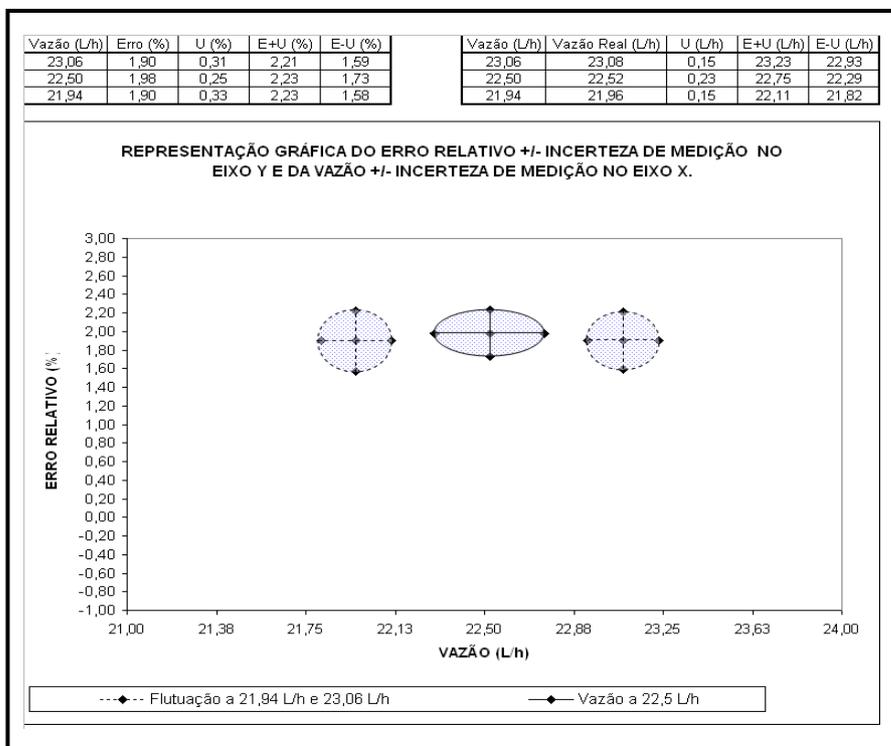


Figura 25 – Resultados de calibração de medidores de água submetidos a flutuação forçada nas vazões de 23,06 L/h, 22,5 L/h e 21,94 L/h - Não rejeita H_0 , médias iguais.

5.3 CÁLCULO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO, ACRESCENTANDO A COMPONENTE DE INCERTEZA DE MEDIÇÃO FLUTUAÇÃO DA VAZÃO

Para estimar a influência da componente de incerteza flutuação da vazão, aplicou-se o conceito de soma quadrática da maior incerteza combinada entre os três pontos de calibração (15,37 L/h, 15,00 L/h e 14,62 L/h) e a amplitude entre as médias do erro relativo do volume entre os pontos de calibração 15,37 L/h e 14,62 L/h (maior amplitude), assumindo-se uma distribuição retangular.

As equações (14) e (15) determinadas no capítulo 3, definem a forma de estimar a componente flutuação da vazão.

Os novos valores de incerteza de medição e fator de abrangência com a componente de incerteza flutuação da vazão inserido no cálculo, podem ser visualizadas na tabela 22.

Para as demais vazões (3150 L/h até 21,94 L/h) a componente de incerteza flutuação da vazão não foi inserida e a indicação de não aplicável (n.a.), foi colocada na planilha.

Tabela 22 – Cálculo da incerteza de medição no medidor de água, acrescentando a componente flutuação da vazão apenas no ponto de calibração de 15 L/h, 15,37 L/h e 14,62 L/h.

MEDIDOR DE ÁGUA Omáx 3m³/h x 3/4"x190mm, Classe C.										Vc								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
Vazão Q (l/h)	Volts da Turbina	Média Erro Corrigido x (%)	Erro Médio BPA U _{BPA}	Tipo A		Tipo B ₁	Tipo B ₂	Tipo B ₃	Tipo B ₄	Tipo B ₅	Tipo B ₆	Incerteza Combinada U _c	Graus de Liberdade ν _{eff}	Fator de Abrangência kp	Incerteza Expandida U	Apresentação Final		
				Desvio padrão s _Q	Medio U _A	Incerteza Herdada U _{B1}	Resolução Leitura U _{B2}	Volume Ciclico U _{B3}	Termômetro Digital U _{B4}	Tempe ratura U _{B5}	Flutuação Vazão U _{B6}					U (%)	k	
3000	100	-0,32	-0,167	0,0167	0,024	0,040	0,029	0,00000001	0,002	0,015	n. a.	0,057	201	2,025	0,115	0,11	2,025	
				0,0167														
				0,0333														
3150	100	-0,28	-0,167	0,0333	0,061	0,040	0,029	0,00000001	0,002	0,015	n. a.	0,080	17	2,160	0,172	0,17	2,160	
				0,1000														
				0,0000														
2850	100	-0,35	-0,167	0,2000	0,178	0,040	0,029	0,00000001	0,002	0,015	n. a.	0,186	7	2,520	0,468	0,47	2,520	
				0,1667														
				0,1667														
1500	100	-0,79	-0,167	0,0333	0,043	0,040	0,029	0,00000001	0,002	0,018	n. a.	0,068	37	2,070	0,141	0,14	2,070	
				0,0333														
				0,0577														
1575	100	-0,79	-0,167	0,0333	0,033	0,040	0,029	0,00000001	0,002	0,018	n. a.	0,062	72	2,050	0,128	0,13	2,050	
				0,0333														
				0,0333														
1425	100	-0,79	-0,167	0,0577	0,038	0,040	0,029	0,00000001	0,002	0,018	n. a.	0,065	49	2,060	0,134	0,13	2,060	
				0,0000														
				0,0333														
750	50	-0,49	-0,167	0,0667	0,058	0,040	0,029	0,00000002	0,002	0,017	n. a.	0,078	19	2,140	0,167	0,17	2,140	
				0,0667														
				0,0333														
787,5	50	-0,48	-0,167	0,0577	0,079	0,040	0,029	0,00000002	0,002	0,017	n. a.	0,095	12	2,230	0,212	0,21	2,230	
				0,0882														
				0,0882														
712,5	50	-0,48	-0,167	0,0577	0,051	0,040	0,029	0,00000002	0,002	0,017	n. a.	0,073	25	2,110	0,154	0,15	2,110	
				0,0577														
				0,0333														
375	50	-0,31	-0,167	0,0577	0,038	0,040	0,029	0,00000002	0,002	0,017	n. a.	0,065	48	2,060	0,134	0,13	2,060	
				0,0000														
				0,0333														
393,8	50	-0,37	-0,167	0,0333	0,043	0,040	0,029	0,00000002	0,002	0,017	n. a.	0,068	36	2,070	0,140	0,14	2,070	
				0,0577														
				0,0333														
356,2	50	-0,24	-0,167	0,0333	0,043	0,040	0,029	0,00000002	0,002	0,017	n. a.	0,068	36	2,070	0,140	0,14	2,070	
				0,0577														
				0,0333														

Continuação Tabela 22 – Cálculo da incerteza de medição no medidor de água, acrescentando a componente flutuação da vazão apenas no ponto de calibração de 15 L/h, 15,37 L/h e 14,62 L/h.

200	50	0,37	-0,167	0,0333	0,027	0,040	0,029	0,00000002	0,002	0,017	n. a.	0,059	130	2,025	0,119	0,12	2,025
				0,0333													
				0,0000													
210	50	0,29	-0,167	0,0333	0,038	0,040	0,029	0,00000002	0,002	0,016	n. a.	0,065	47	2,060	0,133	0,13	2,060
				0,0577													
				0,0000													
190	50	-0,08	-0,167	0,1333	0,147	0,040	0,029	0,00000002	0,002	0,016	n. a.	0,155	7	2,520	0,3918	0,39	2,520
				0,1528													
				0,1528													
100	20	1,13	-0,167	0,0577	0,079	0,040	0,029	0,00000004	0,002	0,015	n. a.	0,095	12	2,230	0,211	0,21	2,230
				0,0882													
				0,0882													
105	20	0,86	-0,167	0,1856	0,187	0,040	0,029	0,00000004	0,002	0,015	n. a.	0,194	6	2,520	0,488	0,49	2,520
				0,1732													
				0,2000													
95	20	1,10	-0,167	0,0882	0,104	0,040	0,029	0,00000004	0,002	0,015	n. a.	0,116	9	2,320	0,269	0,27	2,320
				0,1202													
				0,1000													
22,50	20	1,98	-0,167	0,0577	0,096	0,040	0,029	0,00000004	0,002	0,014	n. a.	0,109	9	2,320	0,253	0,25	2,320
				0,1000													
				0,1202													
23,06	20	1,90	-0,167	0,1453	0,119	0,040	0,029	0,00000004	0,002	0,015	n. a.	0,129	8	2,370	0,307	0,31	2,370
				0,0882													
				0,1155													
21,94	20	1,90	-0,167	0,1528	0,128	0,040	0,029	0,00000004	0,002	0,014	n. a.	0,138	8	2,370	0,326	0,33	2,370
				0,1333													
				0,0882													
15,00	10	0,27	-0,167	0,2963	0,329	0,040	0,029	0,00000009	0,002	0,014	0,516	0,615	72	2,050	1,260	1,26	2,050
				0,4041													
				0,2728													
15,37	10	0,89	-0,167	0,2603	0,275	0,040	0,029	0,00000009	0,002	0,015	0,516	0,587	125	2,025	1,189	1,19	2,025
				0,1856													
				0,3528													
14,62	10	-0,77	-0,167	0,1000	0,196	0,040	0,029	0,00000009	0,002	0,014	0,516	0,555	383	2,025	1,124	1,12	2,025
				0,2906													
				0,1453													

Um comparativo entre resultados de incerteza de medição antes (tabela 18) e após (tabela 22) inserção da componente flutuação da vazão, estão na tabela 23.

Tabela 23 – Comparativo entre cálculo de incerteza de medição antes e após inserção da componente flutuação da vazão.

Vazão (L/h)	Incerteza Medição (%) Antes da Inserção	Incerteza Medição (%) Após Inserção	Aumento (%)
15,00	0,84	1,26	50
15,37	0,70	1,19	70
14,62	0,51	1,12	120

A influência da componente flutuação da vazão é percebida somente em baixas vazões, especificamente na região de 15 L/h. O aumento relativo de 105,9% na vazão de 14,62 L/h evidencia a significância desta componente sobre o resultado de medição.

Durante a preparação para a coleta de dados, observou-se também uma evidência prática da existência da flutuação da vazão, pois mesmo após a vazão ter sido ajustada no ponto de calibração de 1500 L/h, o medidor de vazão eletromagnético oscilava em sua indicação quase de maneira instantânea o valor de 1501 L/h. A figura 27, ilustra esta situação.



Figura 27 – Medidor de vazão eletromagnético, indicando vazão instantânea.

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÃO

O objetivo desta dissertação foi estudar a componente de incerteza de medição flutuação da vazão e verificar sua influência na medição de volume de água com medidor de água residencial de alto desempenho metrológico.

Para atingir este objetivo, foram realizados experimentos industriais com técnicas de planejamento laboratorial combinado com a observação sistemática.

O levantamento e estudo qualitativo das componentes de incerteza de medição aplicadas tradicionalmente na calibração de medidores de água com diferentes sistemas de calibração, permitiu identificar a carência de estudos que considerem outras potenciais componentes de incerteza que podem influenciar no resultado da medição em medidores de água.

A expectativa inicial antes da realização dos testes experimentais era de que a flutuação forçada da vazão nos extremos da tolerância normalizada, influenciaria de uma maneira geral em todos os pontos de calibração, ou seja, cada agrupamento composto pela média do erro relativo de volume do ponto de calibração e respectivos pontos extremos da vazão forçada, seriam significativamente diferentes.

A análise dos resultados com a metodologia adotada constatou porém, que a flutuação da vazão possui influência significativa em apenas um agrupamento, composto pelos pontos de calibração, 15,37 L/h, 15,00 L/h e 14,62 L/h.

O valor determinado na experimentação para a influência desta componente é de 0,52% (maior valor). Ao ser inserido este valor no cálculo de incerteza de medição, detectou-se um incremento da incerteza de medição de aproximadamente 120% levando a uma incerteza de medição expandida de $\pm 1,26\%$ na vazão de 15 L/h.

Algumas outras conclusões gerais, podem ser explicitadas a partir do trabalho realizado:

- Existe normalização quanto à tolerância permitida da flutuação da vazão no processo de calibração, porém não há um monitoramento desta flutuação durante a realização da calibração.
- Por não haver monitoramento, a influência da componente de incerteza de medição flutuação da vazão, no ponto de calibração de 15 L/h (Q_{\min}), precisa ser inserida ao cálculo de incerteza de medição.
- Por não haver monitoramento, pode ocorrer que a flutuação da vazão ultrapasse os limites permitidos e por conseqüência a influência no ponto de calibração 15 L/h (Q_{\min}) seja maior, ou ainda, em outros pontos de calibração no campo inferior ou superior de medição, passem a ter médias do erro relativo de volume significativamente diferentes e por conseqüência a componente flutuação da vazão tenha que ser inserida no cálculo de incerteza de medição, para permitir a declaração do resultado da medição com maior aproximação da realidade.
- A conseqüência da flutuação da vazão, na determinação do erro relativo de volume na região de 15 L/h, aponta para uma necessidade de melhoria nos sistemas de medição de vazão aplicados atualmente em bancadas de calibração eletrônica, volumétrica e gravimétrica, uma vez que a tendência do mercado mundial é exigir medidores de água velocimétricos, com vazão mínima cada vez menores, por exemplo com 10 L/h e 12 L/h.

Ao conhecer as variáveis de influência é possível elaborar planos para minimizar seus efeitos ou até mesmo torná-los não significativos e a contribuição científica desta dissertação está associada no conhecimento adquirido e também nas propostas geradas por tal realização.

Dentre as propostas de melhoria para minimizar o efeito da flutuação de vazão durante calibração em medidores residenciais com vazão mínima ≤ 15 L/h destacam-se:

- Medir a influência da flutuação de vazão em outros sistemas de calibração, onde o tempo de escoamento é maior, por exemplo: processo de calibração por princípio volumétrico, que atingiria um tempo

de quarenta minutos de escoamento (vazão 15 L/h com escoamento de 10 litros de água).

- Medir a influência da flutuação da vazão em outros modelos de medidores de água.
- Avaliar outras componentes de incerteza de medição, tais como: drift, inércia da turbina, vibração, turbulência (gerada pelo diâmetro ou distância dos mancais), massa de água evaporada e variação da pressão x quantidade de medidores na bancada.
- Utilizar sistema inteligente de controle de vazão e flutuação de vazão utilizando válvulas proporcionais, sistema eletrônico de coleta de dados e medidores de vazão eletromagnéticos, por exemplo.
- Realizar análise crítica dos parâmetros estabelecidos por norma, no sentido de esclarecer a forma de controle da flutuação da vazão e definir de forma concisa sobre a questão da tolerância para ajuste de vazão, considerando que parte desta tolerância, será consumida pela tolerância da flutuação da vazão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adams, T. – A2LA Guide for the Estimation of Measurement Uncertainty, 2002.

Aibe V.Y., Rodrigues C.R.C., Santo Filho D.M.E., Santos J.J. & Barbosa A.P., Calibração de um Vaso com um Líquido Diferente da Água, Metrologia 2003 – Metrologia para a Vida Sociedade Brasileira de Metrologia (SBM), Recife-Pernambuco, Brasil, 2003.

American National Standards Institute / American Water Works Association
ANSI/AWWA standard C708 Cold Water Meters – Multijet Type, 1996.

American National Standards Institute / American Water Works Association
ANSI/AWWA standard C708 Cold Water Meters – Multijet Type, 2005.

Arencibia R.V & Giacomo B., Equacionamento das Componentes do Erro Volumétrico em Máquinas de Medir a Três Coordenadas, Tese da Universidade São Paulo, 1999.

Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR NM 212, Medidores Velocimétricos de Água Fria até 15m³/h, 1999.

Bake S., Meyer D.G.W., Rist U., Turbulence Mechanism in Klebanoff Transition: a Quantitative Comparison of Experimental and Direct Numerical Simulation, Vol 459, pp. 217-243, United Kingdom, 2002.

Bayer M.M., Maia G.C.G., Balthar A.R., Oliveira V.M., Souza J.R. & Macedo W.V.C., Influência da Incerteza Associada à Determinação da Composição do Gás Natural no Cálculo do Fator de Compressibilidade Segundo a AGA-8, Metrologia , Recife - Pernambuco – Brasil, setembro de 2003.

Billant P., Chomaz J.M., Huerre P., Experimental Study of Vortex Breakdown in Swirling jets, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol 376, pp. 183-219, United Kingdom, July 1998.

Calcatelli A., Raiteri G. & Rumiano G., The IMGC-CNR Flowmeter for Automatic Measurements of Low-Range Gas Flows, *Elsevier, Measurement* 34 pp. 121-132, Italy, 2003.

Camarano D.M. & Azevedo A.M., Variação – A Rejeição de Dados Numéricos, *Revista Instrumentação e Metrologia*, nº 5, pág. 4 a 9, Editora BANAS, Brasil 04/2001.

Castro D. J., *Todo sobre Medidores de Água*, Editora Hozlo S.R.L., 1ª edição, 2004.

Castrup H. – Practical Methods for Analysis of Uncertainty Propagation, Proc. 38th Annual Instrumentation Symposium, Las Vegas, NV, USA, April 1992.

Castrup H. – Estimating Bias Uncertainty, Proceedings of the NCSLI Workshop & Symposium, Washington D.C., USA, July 2001.

Castrup H. – An Investigation into Estimating Type B Degrees of Freedom, ISG Technical Document, USA, August 2000.

Castrup H. – Estimating Category B Degrees of Freedom, Proc. Measurements, Science Conf., Anaheim, CA, USA, January 2000.

Castrup H. – Estimating and Combining Uncertainties, presented at the 8th Annual ITEA Instrumentation Workshop, Lancaster, CA, USA, May 2004.

Castrup H. - A Comprehensive Comparison of Uncertainty Analysis Tools, presented at the Measurement Science Conference, Anaheim, CA, January 2004.

Castrup H. – Estimating Parameter Bias Uncertainty, presented at the Measurement Science Conference, Anaheim, CA, March 2006.

Cicca C.M., Iuso C., Spazzini P.G., Onorato M., Particle Image Velocimetry Investigation of a Turbulent Boundary Layer Manipulated by Spanwire Wall Oscillations, Journal of Fluid Mechanics, Vol 467, pp. 41-56, United Kingdom, April 2002.

Damasceno M.A., Penha J. K. M., Silva N.F., Felipe R. N. B., Felipe R.C.T.S. & Medeiros G.G, An International Journal Brazilian Archives of Biology and Technology, Vol. 49, pp 65-71, January 2006.

Elmore E., Moreno B.G. e Mesones F.E.G, Manual de Referência – Medidores de Água Domiciliar, Editora Celpis, 1972, Peru.

Gallas M.R., Incerteza de Medição, IF-UFRGS, <http://www.if.ufrgs.br>, 2004.

Guia EURACHEM / CITAC – Determinando a Incerteza de Medição Analítica, 2ª edição, INMETRO 2002.

Hobbs J.M., Variable Area and Pressure Difference Flowmeters, IOP Publishing Ltd. , J. Phys. E: Sci.Instrum. 20, United Kingdom, 1987.

Husain R. & An-Nahdi K.A., Uncertainty Calculations in a Measurements Standards Laboratory, article of Center for Applied Physical Sciences – Research Institute, King Fahd University of Petroleum and Minerals, Proc. Natl.Sci.Counc. ROC(A) Vol. 24 n° 3, pp. 210 – 215, Saudi Arabia 2000.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística; IBGE Mapeia os serviços de saneamento básico do país, 2000. Disponível em: <http://www.ibge.com.br> Acesso em 20 ago. 2004.

Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO), Guia para Expressão da Incerteza de Medição, 3ª edição, 2003.

Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO), Portaria n° 246 de 17 de outubro de 2000.

Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO), Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia – VIM, 3ª edição, 2003.

International Organization for Standardization, ISO 5168 Measurement of fluid flow - Evaluation of uncertainties, 2005.

International Organization for Standardization ISO 4064-1 Measurement of water flow in closed conduits – Meters for cold potable – Part 1 Specifications, 1993.

International Organization for Standardization ISO 4064 –2 Measurement of water flow in closed conduits – Meters for cold potable – Part 2 Installations Requirements, 2001.

International Organization for Standardization ISO 4064 –3 Measurement of water flow in closed conduits – Meters for cold potable – Part 3 Method and Equipment, 1999.

International Organization for Standardization ISO 4064 –3 Measurement of water flow in fully charged closed conduits – Meters for cold potable water and hot water – Part 3 Test Methods and Equipment, 2005.

Ioss B., Lhuillier C. & Jeanneau H., Numerical Simulation of Transit-Time Ultrasonic Flowmeters : Uncertainties Due to Flow Profile and Fluid Turbulence, Elsevier, Ultrasonics, 40 pp 1009-1015, France, 2002.

Johnson E.H., In situ calibration of large water meters, Journal of Water SA, Vol 25, n° 2, [http:// www.wrc.org.za](http://www.wrc.org.za), April 1999.

Kegel, T.M., Updating the Uncertainty Analysis for a Flow Calibration Laboratory, Measurement Science Conference, Anaheim, California, January 17-19, 2001.

Kegel, T.M., Uncertainty Analysis for the CEESI Ventura High Flow Test Facility, 4th International Symposium on Fluid Flow Measurement, Denver, Colorado, June 27-30, 1999.

Kegel, T.M., Uncertainty Analysis of a Volume Primary Standard, 5th International Symposium on Fluid Flow Measurement, Arlington – VA Apr 7-10, 2002.

Lemon D.D. & Lampa J., Estimating uncertainties in turbine discharge measurements with the Acoustic Scintillation Flow Meter in low-head short-intake plants, www.agflow.com, 2002.

Liang H. & Maxworthy T., An Experimental Investigation of Swirling Jets, Journal of Fluid Mechanics, Vol 525, pp. 115-159, United Kingdom, 2005.

Link, W. Metrologia Mecânica – Expressão da incerteza de medição. Rio de Janeiro, Programa RH Metrologia, 1997.

Maldonado J.M, Arias R., Oelze H.H., Bean V.E., Houser J.F., Lachance C. and Jaques C. – Journal Metrologia - International Comparison of Volume

Measurement Standards at 50l at the CENAM (México), PTB (Germany), Measurement Canada and NIST (USA), Vol 39, 91-95, 2002.

Marconi M.A. & Lakatos E.M., Técnicas de Pesquisa, Editora Atlas, 5ª edição, 2002.

Martins N. M. Z. & Vieira A. F. C., Variabilidade em um Sistema de Medidas e Análise de Variância, Revista Instrumentação e Metrologia, nº 7 pág. 22 até 29, Editora BANAS, Brasil 08/2001.

Morinaka H., Uncertainty in Type Approval and Verification, article of National Metrology Institute of Japan / AIST, Tsukuba, Japan, 2003.

Organisation Internationale de Métrologie Légale, OIML R49 – 1 Water Meters intended for the metering of cold potable water – Part 1 : Metrological and Technical Requirements, 2003.

Pinheiro, J.A., Medição de Petróleo e Gás Natural – Regulamento da ANP / INMETRO, Petrobrás, 2004.

Poeschel W., Engel R., Dopheide D., Baade H.J., Kecke H.J., Praetor R., Weist N., Kurras E. – A Unique Fluid Diverter Design for Water Flow Calibration Facilities, Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) Braunschweig, Germany, 2002.

Price A.B., Smith F.T. Phd and Suby A.A. – Uncertainty Analysis – Estimating the error of measured variables and determining how the error propagate, HPAC Heating/Piping/Air Conditioning Engineering, 2000.

Rathnasingham R. & Breuer K. S., Active Control of Turbulence Boundary Layers, Journal of Fluid Mechanic Vol 495, pp. 209-223, United Kingdom, June 2003.

Rieger L., Thomann M., Gujer W., Siegrist H. – Quantifying the Uncertainty of On-Line Sensors at WWTPs During Field Operation, article of Water Research, 39 Elsevier, Dubendorf, Switzerland, September 2005.

Slack N., Chambers S., Harland C., Harrison A. & Jonhston R., Administração da Produção, Editora Atlas, 1ª edição, 1997.

Souza, H., Manual Técnico - Hidráulica, Escola Protec, Edição 1986.

South African National Standard SANS 1529-1 Water Meters for cold potable water – Part 1: Characteristics of mechanical water meters of nominal bore not exceeding 100mm, 2003.

Stevenson W. J., Estatística Aplicada à Administração, Editora Harbra, 1986.

Svendsen A., Veeramony J., Bakunin J., Kirbu J.T., The Flow in Weak Turbulent Hydraulic Jumps, Journal of Fluid Mechanics, Vol 418, pp. 25-57, United Kingdom, 2000.

Troskolanski A.T., Théorie et pratique des mesures hydrauliques, Editora Dunod Paris, Polônia, 1962.

United Kingdom Accreditation Service, UKAS, M3003 The Expression of Uncertainty Confidence of Measurement, 1997.

Vorobieff P. & Ecke R.E., Turbulent Rotating Convection: an Experimental Study, Journal of Fluid Mechanics, Vol 458, pp. 191-218, United Kingdom, 2002.

Vuolo J.H., Fundamentos da Teoria de Erros, Editora Edagard Blucher Ltda, 2ª edição, 1996.

Willink R., A procedure for the evaluation of Measurement Uncertainty Based on Moments, Institute of Physics Publishing, Metrologia 42 pp. 329-343, New Zealand, August 2005.

Wright J.D., Johnson A.N. & Moldover M.R., Design and Uncertainty Analysis for a PVTt Gas Flow Standard, Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, National Institute of Standards and Technology, Volume 108, number 1, January-February 2003.

Zaki D. Hussain PHD – Theoretical Uncertainty of orifice flow measurement, USA, www.emersonprocess.com, 2002.

ANEXO 1 – DISTRIBUIÇÃO – t DE STUDENT

Valor de $t_p(v)$ da distribuição $-t$, para v graus de liberdade, que define um intervalo $-t_p(v)$ a $+t_p(v)$ que abrange a fração p da distribuição.

Graus de Liberdade	Fração p em porcentagem					
	68,27	90	95	95,45	99	99,73
1	1,84	6,31	12,71	13,97	63,66	235,8
2	1,32	2,92	4,30	4,53	9,92	19,21
3	1,20	2,35	3,18	3,31	5,84	9,22
4	1,14	2,13	2,78	2,87	4,60	6,62
5	1,11	2,02	2,57	2,65	4,03	5,51
6	1,09	1,94	2,45	2,52	3,71	4,90
7	1,08	1,89	2,36	2,43	3,50	4,53
8	1,07	1,86	2,31	2,37	3,36	4,28
9	1,06	1,83	2,26	2,32	3,25	4,09
10	1,05	1,81	2,23	2,28	3,17	3,96
11	1,05	1,80	2,20	2,25	3,11	3,85
12	1,04	1,78	2,18	2,23	3,05	3,76
13	1,04	1,77	2,16	2,21	3,01	3,69
14	1,04	1,76	2,14	2,20	2,98	3,64
15	1,03	1,75	2,13	2,18	2,95	3,59
16	1,03	1,75	2,12	2,17	2,92	3,54
17	1,03	1,74	2,11	2,16	2,90	3,51
18	1,03	1,73	2,10	2,15	2,88	3,48
19	1,03	1,73	2,09	2,14	2,86	3,45
20	1,03	1,72	2,09	2,13	2,85	3,42
25	1,02	1,71	2,06	2,11	2,79	3,33
30	1,02	1,70	2,04	2,09	2,75	3,27
35	1,01	1,70	2,03	2,07	2,72	3,23
40	1,01	1,68	2,02	2,06	2,70	3,20
45	1,01	1,68	2,01	2,06	2,69	3,18
50	1,01	1,68	2,01	2,05	2,68	3,16
100	1,005	1,660	1,984	2,025	2,626	3,077
∞	1,000	1,645	1,960	2,000	2,576	3,000

ANEXO 2 – DISTRIBUIÇÃO F

Tabela adaptada de Stevenson (1986), valor de F, à direita do qual ficam 0,05 da área sob a curva.

Graus de Liberdade Denominador	Graus de Liberdade do Numerador					
	1	2	3	4	5	6
1	161	200	216	225	230	234
2	18,51	19	19,16	19,25	19,30	19,33
3	10,13	9,55	9,28	9,12	9,01	8,94
4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16
5	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95
6	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28
7	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87
8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58
9	5,12	4,26	3,86	3,63	3,48	3,37
10	4,96	4,10	3,71	3,48	3,33	3,22
11	4,84	3,98	3,59	3,36	3,20	3,09
12	4,75	3,88	3,49	3,26	3,11	3,00
13	4,67	3,80	3,41	3,18	3,02	2,92
14	4,60	3,74	3,34	3,11	2,96	2,85
15	4,54	3,68	3,29	3,06	2,90	2,79
16	4,49	3,63	3,24	3,01	2,85	2,74
17	4,45	3,59	3,20	2,96	2,81	2,70
18	4,41	3,55	3,16	2,93	2,77	2,66
19	4,38	3,52	3,13	2,90	2,74	2,63
20	4,35	3,49	3,10	2,87	2,71	2,60
24	4,26	3,40	3,01	2,78	2,62	2,51
25	4,24	3,38	2,99	2,76	2,60	2,49
30	4,17	3,32	2,92	2,69	2,53	2,42
40	4,08	3,23	2,84	2,61	2,45	2,34
50	4,03	3,18	2,79	2,56	2,40	2,29
60	4,00	3,15	2,76	2,52	2,37	2,25
80	3,96	3,11	2,72	2,48	2,33	2,21
100	3,94	3,09	2,70	2,46	2,30	2,19
150	3,91	3,06	2,67	2,43	2,27	2,16
200	3,89	3,04	2,65	2,41	2,26	2,14
400	3,86	3,02	2,62	2,39	2,23	2,12
1000	3,85	3,00	2,61	2,38	2,22	2,10
∞	3,84	2,99	2,60	2,37	2,21	2,09

ANEXO 3 – RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO, ERRO RELATIVO DE VOLUME, COM FLUTUAÇÃO DA VAZÃO FORÇADA.

Pontos L/h	Erro Relativo de Volume (%)									Média (n=9)
	Medidor nº 1			Medidor nº 2			Medidor nº 3			
	L ₁	L ₂	L ₃	L ₁	L ₂	L ₃	L ₁	L ₂	L ₃	
3000,00	-0,70	-0,70	-0,75	-0,10	-0,10	-0,15	-0,60	-0,60	-0,70	-0,489
3150,00	-0,80	-0,70	-0,70	0,20	-0,10	-0,10	-0,60	-0,60	-0,60	-0,444
2850,00	-0,70	-0,10	-0,70	-0,70	-0,20	-0,70	-0,70	-0,20	-0,70	-0,522
1500,00	-0,70	-0,80	-0,70	-1,30	-1,30	-1,40	-0,90	-0,70	-0,80	-0,956
1575,00	-0,70	-0,70	-0,60	-1,50	-1,40	-1,40	-0,80	-0,70	-0,80	-0,956
1425,00	-0,70	-0,80	-0,60	-1,40	-1,40	-1,40	-0,80	-0,80	-0,70	-0,956
750,00	-0,90	-0,90	-0,70	-0,60	-0,40	-0,40	-0,70	-0,70	-0,60	-0,656
787,50	-0,70	-0,80	-0,90	-0,50	-0,50	-0,50	-0,80	-0,60	-0,50	-0,644
712,50	-0,80	-0,70	-0,90	-0,60	-0,50	-0,40	-0,60	-0,60	-0,70	-0,644
375,00	-1,00	-0,80	-0,90	-0,30	-0,30	-0,30	-0,20	-0,30	-0,20	-0,478
393,80	-0,90	-0,90	-0,80	-0,40	-0,50	-0,30	-0,40	-0,30	-0,30	-0,533
356,20	-0,80	-0,90	-0,80	-0,30	-0,20	-0,30	0,00	-0,20	-0,20	-0,411
200,00	-0,30	-0,40	-0,40	0,50	0,60	0,60	0,40	0,40	0,40	0,200
210,00	-0,40	-0,50	-0,40	0,30	0,40	0,50	0,40	0,40	0,40	0,122
190,00	-1,10	-0,70	-0,70	-0,20	0,20	0,30	-0,30	0,20	0,10	-0,244
100,00	0,80	1,00	0,90	1,00	1,20	1,30	0,70	1,00	0,80	0,967
105,00	0,30	0,80	0,90	0,70	1,00	1,30	0,00	0,60	0,60	0,689
95,00	0,80	1,10	0,90	1,00	1,10	1,40	0,50	0,80	0,80	0,933
22,50	1,50	1,70	1,90	1,60	1,70	2,20	1,40	2,00	2,30	1,811
23,06	1,50	1,70	1,20	1,50	1,80	1,60	2,10	2,30	1,90	1,733
21,94	1,30	1,40	1,80	1,70	1,30	1,70	2,10	2,00	2,30	1,733
15,00	-0,70	0,30	0,00	-0,90	0,40	0,20	0,00	0,90	0,70	0,100
15,37	-0,10	0,40	0,80	0,70	0,80	1,30	0,20	1,00	1,40	0,722
14,62	-1,50	-1,20	-1,20	-1,40	-0,80	-0,40	-0,90	-0,40	-0,60	-0,933

ANEXO 4 – RESULTADOS DA MEDIÇÃO DA VAZÃO

Vazão (L/h)	Leitura 1	Leitura 2	Leitura 3	Média (L/h)
3000,00	2997	2994	3000	2997,00
3150,00	3151	3154	3155	3153,33
2850,00	2855	2854	2859	2856,00
1500,00	1498	1500	1497	1498,33
1575,00	1573	1573	1573	1573,00
1425,00	1424	1424	1425	1424,33
750,00	750	750	749	749,67
787,50	786	788	788	787,33
712,50	713	712	713	712,67
375,00	374	373	374	373,67
393,80	393	393	392	392,67
356,20	357	358	357	357,33
200,00	200	200	200	200,00
210,00	210	211	210	210,33
190,00	191	191	190	190,67
100,00	100,1	100,3	100,3	100,23
105,00	105,2	105,2	105,3	105,23
95,00	95,3	95,4	95,3	95,33
22,50	22,3	22,5	22,5	22,43
23,06	23,0	23,1	23,1	23,07
21,94	21,9	21,9	22,0	21,93
15,00	14,9	15,0	14,8	14,90
15,37	15,4	15,4	15,3	15,37
14,62	14,5	14,6	14,7	14,60

ANEXO 5 – RESULTADOS DA MEDIÇÃO DA TEMPERATURA

Vazão (l/h)	Temperatura Água (°C)	Temperatura Água Corrigida (°C)
3150,00	25,0	24,53
3000,00	25,0	24,53
2850,00	25,0	24,53
1575,00	25,4	24,93
1500,00	25,4	24,93
1425,00	25,4	24,93
787,50	25,2	24,73
750,00	25,3	24,83
712,50	25,2	24,73
393,80	25,2	24,73
375,00	25,3	24,83
356,20	25,2	24,73
210,00	25,1	24,63
200,00	25,2	24,73
190,00	25,1	24,63
105,00	25,0	24,53
100,00	25,0	24,53
95,00	25,0	24,53
23,06	25,0	24,53
22,50	24,9	24,43
21,94	24,9	24,43
15,37	25,0	24,53
15,00	24,9	24,43
14,62	24,9	24,43

Temperatura de Referência da Bancada de Calibração Eletrônica (°C)	23
Temperatura de Referência do Medidor de Vazão Eletromagnético - Baixa Vazão (°C)	23
Temperatura de Referência do Medidor de Vazão Eletromagnético - Alta Vazão (°C)	24