INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia associada à Universidade de São Paulo

**AVALIAÇÃO METROLÓGICA DA INCERTEZA NA MEDIÇÃO
DE VAZÃO MÁSSICA DE GASES COM TECNOLOGIAS
VOLUMÉTRICA E PRESSÃO DIFERENCIAL**

FLAVIO BARBOSA MELO

**Dissertação apresentada como parte
dos requisitos para obtenção do Grau
de Mestre em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear- Aplicações.**

Orientador: Dr. Goro Hiromoto

SÃO PAULO
2007

DEDICATÓRIA

À minha esposa Myoko e aos meus filhos Daniel e Felipe. Aos meus alunos da FACENS (Faculdade de engenharia de Sorocaba) e UNIP- Sorocaba.

AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Goro Hiromoto, pela confiança, paciência e diretrizes na orientação e condução desse trabalho.

Ao Dr. Cláudio Garcia, pelo apoio e suporte.

Aos colegas Engenheiros Augusto Passos, Denis Borg, Junio Branco, José Carlos Rodrigues e Marcos Straioto pelo incentivo e suporte.

Ao engenheiro Advair Albertini pela inestimável ajuda na elaboração dos gráficos e planilhas.

A minha esposa Myoko pelo incentivo e compreensão nos incontáveis momentos em que estava imerso na elaboração desse trabalho, provavelmente apenas de corpo presente.

À mãe-natureza que tem sido bastante generosa comigo.

RESUMO

A avaliação metrológica da incerteza da medição, apesar de estar normalizada internacionalmente (ISO-GUM, 1995) desde a metade dos anos 90, só agora está se popularizando nas indústrias, nas escolas técnicas e de engenharia. Em algumas áreas, como na metrologia dimensional, está avançada e em outras, como na medição de variáveis de processos industriais tais como vazão, pressão e temperatura, ainda está numa fase intermediária.

Um dos principais entraves para essa popularização é a falta de padronização da nomenclatura nas especificações técnicas dos instrumentos de medição, onde se declara a incerteza, por exemplo, de 1% de “acurácia” sem definir se é percentual da leitura, da faixa calibrada ou da faixa máxima. Ou ainda, sem definir se a probabilidade de abrangência é 68, 95 ou 99,7%.

Esse trabalho entra nesse cenário com a pretensão de clarificar e simplificar esses conceitos, começando pelo histórico da evolução do pensamento que transformou a incerteza numa variável quantitativa com sua avaliação efetuada de uma maneira padronizada e internacionalmente aceita. Em seguida é feita uma descrição conceitual sucinta do método ISO-GUM e também é desvendado o intrincado jogo de palavras e fórmulas das declarações de incertezas dos fabricantes de instrumentos de medição.

Com o domínio desses conceitos, partimos para efetuar dois exemplos numéricos de avaliação metrológica de incertezas na medição de vazão, usando um conjunto de fórmulas semelhantes às publicadas por renomados fabricantes de instrumentos de medição.

No primeiro exemplo usando a medição de vazão por pressão diferencial com placa de orifício e no segundo usando um medidor volumétrico, nos quais são identificadas e quantificadas todas as potenciais fontes de incerteza. A visualização e a análise é feita através de gráficos e planilhas em Excel.

ABSTRACT

In despite of the metrological evaluation of the measurement uncertainty have been internationally standardized (ISO-GUM, 1995) since the mid of the nineties, only now it's getting popular in the industries, technical and engineering schools. In some fields like dimensional metrology it is advanced, while in others like in the process measurement industries like flow, temperature and pressure is still in an intermediate phase.

One of the main barriers to this popularization is the lack of standardized nomenclature used in the technical data sheets of the measuring instruments, where is claimed, for example, 1% accuracy without defining whether is of the reading, span or upper range limit or even without defining the coverage probability.

This paper enters into this scenario with the pretension of clarify and simplify this concept, starting with the historic and evolution of the thinking which transformed the uncertainty in a quantitative variable with it's evaluation done in a standardized and internationally accepted way. Following is done a summarized description of the ISO-GUM method and also is unveiled the entangled play of words and formulas stated by instrument manufacturers.

With the grasp of these concepts we begin start carrying out two worked examples of the metrological evaluation of flow metering uncertainty by renowned instrument makers.

In the first example making use of an orifice meter and in the second one a volumetric flow meter, where the main components and sources of uncertainties are identified and quantified. The analysis and visualization is done through Excel curves and spread-sheets.

TABELA DE CONTEÚDO

1 INTRODUÇÃO	1-1
1.1 Incertezas e valores-limite.....	1-2
2 OBJETIVOS	2-1
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E HISTÓRICO.....	3-1
4 METODO ISO-GUM DE AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DA MEDIÇÃO.....	4-1
4.1 O guia ISO-GUM e seus suplementos	4-1
4.2 Método ISO-GUM de cálculo de incerteza da medição	4-2
4.3 Classificação quanto ao “tipo” das componentes de incerteza	4-3
4.3.1 Incertezas “ tipo A”	4-3
4.3.2 Incertezas “ tipo B”	4-3
5 INCERTEZAS DA MEDIÇÃO DE VAZÃO POR PRESSÃO DIFERENCIAL	5-1
5.1 Descrição do método de medição	5-1
5.2 Equação ISO da vazão de fluidos por pressão diferencial	5-2
5.3 Incertezas da vazão por pressão diferencial	5-2
5.4 Equação ISO das incertezas da vazão por pressão diferencial	5-3
5.4.1 Incerteza do coeficiente de descarga “iC”	5-6
5.4.2 Incerteza do fator de expansão dos gases “iε”	5-6
5.4.3 Incerteza do fator da velocidade de aproximação “iE”	5-6
5.4.4 Incertezas da medição de pressão diferencial “idP”	5-7
5.4.4.1 Incerteza de referência da pressão diferencial “idPR”	5-7
5.4.4.2 Incerteza da pressão diferencial com a temperatura “idPT”	5-8
5.4.4.3 Incerteza da pressão diferencial com a pressão estática “idPPE”	5-8
5.4.4.4 Incerteza da pressão diferencial com a deriva “idPD”	5-9
5.4.4.5 Gráfico das incertezas na medição da pressão diferencial	5-9
5.4.4.6 Instantâneo 1 do gráfico das incertezas da pressão diferencial	5-9
5.4.4.7 Instantâneo 2 do gráfico das incertezas da pressão diferencial	5-10
5.4.4.8 Instantâneo 3 do gráfico das incertezas da pressão diferencial	5-11
5.4.5 Incertezas da medição de pressão estática “iPE”	5-11
5.4.5.1 Incerteza de referência da pressão estática “iPER.	5-11
5.4.5.2 Incerteza da pressão estática com a temperatura “iPET”	5-12
5.4.5.3 Incerteza da pressão estática com a deriva “iPED”	5-12
5.4.5.4 Instantâneo do gráfico das incertezas da pressão estática.....	5-12
5.4.6 Incertezas da medição da temperatura “iT”.....	5-13
5.4.6.1 Incerteza de referência do transmissor de temperatura “iTTR”	5-13
5.4.6.2 Incerteza do transmissor de temperatura devido À temperatura	5-13
5.4.6.3 Incerteza do transmissor de temperatura com a deriva “ITTD”	5-14
5.4.6.4 Incerteza da intercambiabilidade do sensor de temperatura “iTsl”	5-14

5.4.6.5 Incerteza do sensor de temperatura com a deriva "ITSD".....	5-15
5.4.6.6 Instantâneo do gráfico das incertezas da temperatura.	5-15
5.4.7 Incerteza do fator de compressibilidade "iZ"	5-15
5.4.8 Planilhas de incertezas	5-16
5.4.8.1 Instantâneo 1 da planilha de incertezas.	5-17
5.4.8.2 Instantâneo 2 da planilha de incertezas.	5-17
5.4.8.3 Instantâneo 3 da planilha de incertezas.	5-17
5.4.9 Instantâneos das contribuintes de incerteza.	5-21
5.4.9.1 Instantâneo 1 das contribuintes de incerteza.	5-21
5.4.9.2 Instantâneo 2 das contribuintes de incerteza.	5-21
5.4.9.3 Instantâneo 3 das contribuintes de incerteza.	5-22
6 INCERTEZA DA VAZÃO COM MEDIDORES VOLUMÉTRICOS	6-1
6.1 Descrição do método de medição	6-1
6.2 Equação da incerteza da vazão por medidores volumétricos	6-2
6.2.1 Incerteza do medidor volumétrico de vazão "iqm"	6-3
6.2.2 Incerteza da massa específica "ip"	6-3
6.3 Gráficos das incertezas da pressão estática e temperatura	6-5
6.3.1 Instantâneo do gráfico das incertezas da pressão estática.	6-5
6.3.2 Instantâneo do gráfico das incertezas da temperatura.	6-5
6.4 Planilha de incertezas	6-6
6.4.1 Instantâneo 1 da planilha de incertezas.	6-7
6.4.2 Instantâneo 2 da planilha de incertezas.	6-7
6.4.3 Gráfico de barras das contribuintes de incerteza	6-10
7 CONCLUSÕES	7-1
7.1 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	7-1
A.1 Introdução	A1
A.2 Subscritos, símbolos e acrônimos	A2
A.2.1 Subscritos	A2
A.2.2 Símbolos	A3
A.2.3 Acrônimos	A3
A.3 Especificações em pressão, vazão e temperatura.	A5
A.3.1 Especificação da incerteza em "% LSFM".	A5
A.3.2 Especificação da incerteza em "% AFN"	A5
A.4 TERMINOLOGIA	A7
B.1 Classificação dos medidores de vazão	B1
B.2 Definições de vazão	B2
B.2.1 Vazão Volumétrica	B2
B.2.2 Vazão Volumétrica Normal	B2
B.2.3 Vazão Mássica	B3
B.3 Medidores volumétricos de vazão	B3
B.3.1 Medidores volumétricos de vazão por deslocamento positivo	B3

B.3.2 Medidor volumétrico de vazão tipo Turbina	B4
B.3.3 Medição volumétrico de vazão tipo Vortex	B4
B.3.4 Medição volumétrico de vazão tipo Ultra-sônico.....	B5
B.3.4.1 Medição volumétrico de vazão tipo Ultra-sônico por efeito Doppler	B6
B.3.4.2 Medição volumétrico de vazão Ultra-sônico por tempo de transito.....	B6
B.4.1 Equação de Bernoulli na medição de vazão por pressão diferencial.....	B6
B.4.2 Correções da equação teórica de Vazão por pressão diferencial.....	B8
B.4.2.1 Coeficiente de descarga	B8
B.4.2.2 Fator de velocidade de aproximação “E”	B8
B.4.2.3 Fator de expansão dos gases “ ϵ ”	B8
B.4.2.4 Equação corrigida da vazão de fluidos por pressão diferencial	B9
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	R1

1 INTRODUÇÃO

Desde os primórdios o ser humano já efetuava medições de objetos e quantificava o valor de mercadorias para compra e venda.

No início, as dimensões eram definidas usando o próprio corpo como referência, resultando unidades de medida inconsistentes, as quais traziam consideráveis dificuldades para comparação com medidas efetuadas por diferentes instrumentos.

Em 1790, o governo francês criou uma comissão da qual se originou o sistema métrico. Mais de um século se passou e apesar de mundialmente adotado, ainda se faz uso de unidades não-métricas como PSI (Pound per Square Inch) usados na medição de pressão em pneus de veículos automotores.

O crescimento e o desenvolvimento comercial-industrial geraram pressões mundiais por medições cada vez mais acuradas, o que resultou numa formidável evolução tecnológica a ponto de transformar a medição numa ciência metrológica.

Padrões de competitividade mundiais impulsionaram a qualidade, fazendo dela o diferencial entre as empresas, exigindo melhoria contínua dos processos produtivos e de controle. Essa melhoria, porém, só é realmente efetiva se as medições forem efetuadas numa cadeia contínua e com declaração da incerteza em cada nível.

A norma ISO14253-1, por exemplo, estabelece regras para determinar a conformidade ou não-conformidade com uma dada tolerância ou limites máximos admissíveis de erros levando-se em conta a incerteza de medição.

Medição é o processo experimental de obtenção da magnitude de uma grandeza cujo resultado deve explicitar a incerteza associada.

No mundo globalizado, a avaliação da incerteza da medição está se tornando cada vez mais importante. À medida que as “commodities” se valorizam, o custo da incerteza associada aumenta. A calibração, particularmente de medidores de vazão, para a determinação de desempenho está se tornando um fator decisivo na avaliação do custo - benefício e no ciclo de vida do instrumento a ser adquirido.

1.1 Incertezas e valores-limite

Toda medição está sujeita a erros cujas amplitudes não são completamente conhecidas e, portanto, possui uma incerteza associada ao seu resultado. Esses erros são causados por pequenas diferenças na construção de instrumentos aparentemente idênticos, por variações ambientais, por desvios ao longo do tempo ou ainda pelos métodos de medição.

O modo mais simples de obter o intervalo que define a incerteza ou faixa dos erros é somando os valores limites dos erros individuais. É improvável, porém, que todos os erros contribuam com seus valores máximos ao mesmo tempo, sendo, portanto uma maneira pessimista de estimativa.

A primeira vista pode parecer que a soma aritmética simples implica numa abrangência de 100% das medidas, porém, sempre existe a possibilidade de que algumas das observações fiquem fora desse intervalo.

Por isso a incerteza da medição é especificada em termos da faixa de erros prováveis em vez de limites absolutos, por levar em conta a impossibilidade de se obter todas as medidas com 100% de abrangência.

A norma ISO-GUM (ISO-GUM, 1995) é atualmente mundialmente reconhecida como a base para o tratamento de incertezas e consiste em tratar todas as suas componentes do mesmo modo, independente da natureza dos efeitos, sejam eles aleatórios ou sistemáticos no momento da medição.

A norma ISO-5168 (ISO-5168, 2005) para medição de vazão, é compatível com a ISO-GUM e preconiza que avaliações de incerteza devem estar sempre baseadas em processos bem definidos de medição, os quais incluem a definição de um modelo matemático, bem como a identificação e a estimativa de todas as fontes elementares dos efeitos sobre o desempenho da medição.

Muitas análises são feitas para assegurar que valores-limite não sejam ultrapassados. Decisões sem informação acerca da incerteza da medição podem ser fáceis de tomar, porém, tais decisões podem ser incorretas e com conseqüências, por exemplo, econômicas quando se rejeita um produto em vez de aceitá-lo, jurídicas quando se pronuncia um veredicto de culpado em vez de inocente, clínicas quando se prescreve um tratamento desnecessário.

A figura 1.1.1 mostra graficamente a diferença entre o resultado de uma medição com e sem incerteza.

Quando os resultados forem acompanhados de estimativas de incertezas, eles devem ser apresentados sob a forma de intervalos, dentro dos quais o valor verdadeiro se situa com um dado nível de confiança, geralmente de 95%.

A importância de se estabelecer a incerteza de medições foi discutida em reunião articulada pelo CIPM (Comitê Internacional de Pesos e Medidas) com as organizações internacionais:

- ISO - Organização Internacional de Normalização;
- IEC - Comissão Eletrotécnica Internacional;
- BIPM - Bureau Internacional de Pesos e Medidas;
- OIML - Organização Internacional de Metrologia Legal;
- IUPAC - União Internacional de Química Pura e Aplicada;
- IUPAP - União Internacional de Física Pura e Aplicada.

Esse grupo de trabalho multi-organizacional produziu a partir da recomendação INC-1 (BIPM, 1980) o ISO-GUM, que é um guia com a finalidade de estabelecer um consenso internacional sobre a expressão da incerteza da medição, fornecendo regras técnicas que proporcionassem uma harmonização no tratamento da incerteza em calibração, acreditação e serviços de metrologia.

O termo “incerteza” está intimamente relacionado à “dúvida”. A incerteza de medição nada mais é do que uma dúvida com relação ao valor ou à faixa de erros obtido durante o procedimento de medição.

Normalmente, o resultado de uma medição ou do cálculo de uma grandeza representa somente uma aproximação ou uma estimativa do valor do mensurando, portanto, para ser completo ele deverá estar acompanhado de uma declaração de incerteza associada.

Com o objetivo de identificar e analisar as possíveis fontes de incerteza na medição das grandezas avaliadas, o procedimento adotado em cada etapa deve ser detalhado e estruturado, de forma a garantir o máximo enquadramento, evitando desse modo a duplicidade de fontes de incerteza. Esse objetivo pode ser alcançado e melhor visualizado por meio da utilização de *diagramas de causa e efeito*, também conhecidos como diagramas de Ishikawa (ISO-VIM, Draft, 2005).

O método de avaliação é considerado “Tipo A” quando existe a disponibilidade de dados experimentais para avaliação estatística dos mesmos.

O método de avaliação é considerado “Tipo B” quando o mesmo é realizado por meio de julgamento científico, baseado em todas as informações possíveis sobre o comportamento da grandeza medida. É necessário quantificar cada fonte potencial de incerteza através de medição ou de dados experimentais obtidos previamente ou ainda, através de sua dedução a partir de análises teóricas.

A avaliação da incerteza realizada de acordo com os princípios estabelecidos pelo ISO-GUM é baseada na identificação e na quantificação dos efeitos dos parâmetros de influência sobre a incerteza global. Além disso, requer a compreensão do procedimento de medição e das incertezas associadas a cada um dos fatores que afetam o resultado.

Antes de combinar todas as contribuições para a obtenção da incerteza global do mensurando, elas devem ser expressas na forma de incertezas padrão, ou seja, como um desvio padrão. A incerteza padrão proveniente de efeitos aleatórios é, normalmente, estimada a partir de uma série de experimentos, sendo sua estimativa quantificada em termos do desvio padrão dos valores medidos.

2 OBJETIVOS

Esse trabalho tem como objetivo aplicar a metodologia ISO-GUM para descrever o processo de estimativa da incerteza na medição de vazão de gases por duas das tecnologias mais populares, que são através de medidores de vazão por pressão diferencial com placas de orifício e medidores de vazão volumétricos (como turbinas e ultra-sônicos).

Os principais contribuintes da incerteza são as medições de pressão e temperatura, as equações de estado, a computação de vazão e o próprio medidor de vazão. Esses componentes são descritos, quantificados e um exemplo numérico de cada uma dessas tecnologias é apresentado, baseado num típico conjunto de especificações que representam a média do atual estado-da-arte de alguns dos mais conceituados fabricantes mundiais.

Para gerar os gráficos e as tabelas de detalhamento da incerteza foi usada a planilha eletrônica Microsoft Excel, que permite simular qualquer valor da faixa de leitura dos instrumentos, bem como as variáveis que afetam a incerteza total do sistema de medição.

A planilha de simulação permite também otimizar o resultado final por meio da visualização da proporção percentual na composição da incerteza total. Permite, ainda, modificar um dado parâmetro para atingir um valor desejado de desempenho.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E HISTÓRICO

Esta seção é baseada principalmente no artigo técnico “The History and Statistical Development of the New ASME-SAE-AIAA-ISO Measurement Uncertainty Methodology” (ABERNETHY e RINGHISER, 1985).

Em **1911**, a NBS (National Bureau of Standards – atualmente NIST), organização responsável pelos padrões nos Estados Unidos da América, publicou um artigo de autoria de M. D. Hearsey que tratava da “teoria dos erros”.

Em **1953**, a revista “Mechanical Engineering-USA”, publicou um artigo de autoria de S. J. Klein e F. A. McClintock, que versava sobre o método RSS (Root Sum Square) de combinação dos contribuintes da incerteza. Nos anos 50 e 60, o método RSS foi amplamente usado como uma referência por uma parte dos metrologistas e organizações, outra parte, porém, preferiam continuar usando o método da soma aritmética dos erros.

Na **década de 60**, a veracidade (trueness) ou exatidão (accuracy) dos resultados de medições e testes foram constantes motivos de controvérsias, confusões e discussões acaloradas entre cientistas e engenheiros.

Nessa época, a falta ou a precariedade de comunicação resultava em desenvolvimentos independentes e potencialmente inconsistentes, tendo como consequência o uso de diferentes métodos para o cálculo de incerteza, o que tornava praticamente impossível a comparação entre resultados de medições e testes entre instrumentos e laboratórios.

Em **1968**, após uma fracassada tentativa em 1963, o grupo ICRPG (Interagency Chemical Rocket Propulsion Group) publicou o “ICRPG Handbook” de autoria de R. B. Abernethy e outros, que abordava o cálculo da incerteza na medição de propelentes líquidos para motores de foguetes.

Em **1973**, o AEDC (Arnold Engineering Development Center) da Força Aérea dos Estados Unidos da América publicou o “AEDC Handbook”, de autoria de R. B. Abernethy e outros, o qual era uma revisão e expansão do “ICRPG Handbook” voltado para o cálculo da incerteza do desempenho de turbinas a gás, o qual forneceu um importante impulso na direção da harmonização do cálculo da incerteza da medição.

O “método AEDC” foi extensivamente usado e serviu de base para as normas publicadas nos anos 70 e 80 [ISO5168-1973, ASME MFC 2M-1983 e ASME PTC 19.1-1985]. Esse método classificava os componentes da incerteza pela natureza aleatória e sistemática dos erros.

No **fim dos anos 70** uma pesquisa mostrou que, apesar dos muitos métodos usados, todos eles classificavam as componentes da incerteza baseado na natureza aleatória (precision, repeatability) e sistemática (bias) dos erros cuja combinação determinaria um intervalo que deveria conter o valor verdadeiro da variável medida em um dado nível de confiança.

A principal diferença entre os métodos era, porem, quanto ao modo de combinação desses efeitos sistemáticos com os aleatórios. O modo da soma linear desses efeitos era defendido por uma parte da comunidade metrológica como Abernethy, Ku, Jersey e Golden, enquanto que o da soma quadrática (raiz da soma dos quadrados) era defendido por metrologistas e instituições como Kline & McClintock, ISO 5168 e ANSI/ASME.

Outro ponto conflitante era quanto ao nível de confiança (probabilidade de abrangência) a ser adotado. As opções mais populares eram 95 e 99.7%.

Simulações de Monte-Carlo foram usadas para avaliar as características estatísticas e eventualmente chegar a uma decisão por consenso, quanto à escolha do modo de combinação, linear ou quadrático.

Os resultados das simulações de Monte-Carlo (ABERNETHY, 1973) realizadas em 1967 por Abernethy and Ringhiser, foram confirmados em experimento independente, por John Ascough (England) em 1978 e por George Kelley (General Electric) em 1980, os quais indicavam que:

$$\sqrt{\sum (t_{95, v} S)^2} \quad (3.1)$$

Onde

t_{95,v} : “t” de Student com abrangência de 95% e “V” graus de liberdade

S : desvio padrão

resultava num nível de confiança superior a 95%, conforme mostrado na figura 3.1.

e que:

$$t_{95, v_{ws}} \sqrt{\sum s^2} \quad (3.2)$$

Onde

$t_{95, v_{ws}}$: “t” de Student com o número de graus de liberdade combinado obtido pela fórmula de Welch-Satterthwaite “ v_{ws} ”, conforme a equação 3.3 abaixo:

$$v_{ws} = \frac{(\sum s_i^2)^2}{\sum \frac{s_i^4}{v_i}} \quad (3.3)$$

resultava num nível de confiança de 95%, como mostrado na figura 3.2.

Apesar dos resultados da simulação de Monte Carlo, as divergências quanto à combinação linear ou quadrática somente cessaram quando se propôs (NBS 300, 1980) que tanto a combinação linear quanto a quadrática seria aceita desde que a propagação das componentes aleatórias e sistemáticas fosse feita separadamente.

No **fim dos anos 70**, uma corrente de pensamento, em contraposição ao método AEDC, defendia que a classificação dos componentes da incerteza deveria ser feita em função da disponibilidade de dados experimentais e não pela sua natureza aleatória ou sistemática. Também era defendida uma padronização da probabilidade de abrangência dos componentes da incerteza para 68% antes de combiná-las.

Em 1980, um grupo de trabalho (Working Group on the Statement of Uncertainties) reunido pelo BIPM (Bureau Internacional de Pesos e Medidas) produziu a recomendação INC-01: “Expressão de Incertezas Experimentais”, a qual se tornou o embrião para um procedimento do tratamento da incerteza harmonizado e internacionalmente aceito.

Em 1981, o CIPM (Comitê Internacional de Pesos e Medidas) aprovou a recomendação INC-1 e a ratificou em 1986.

Em 1993, a ISO (International Organization for Standardization) publicou o “GUM- Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement”, em conjunto com as organizações IEC (Eletrotécnica), BIPM (Pesos e Medidas), OIML (Metrologia Legal), IUPAC (Química) e IUPAP (Física).

O grupo “ISO-TAG 4/WG 3” desenvolveu esse guia a partir da recomendação INC-1 com o objetivo de prover uma base para comparação de resultados de medição nas áreas de normalização, calibração e acreditação.

Atualmente o método ISO-GUM forma uma base para outras normas nacionais e internacionais.

4 METODO ISO-GUM DE AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DA MEDIÇÃO.

4.1 O guia ISO-GUM e seus suplementos

Conforme já mencionado, a metodologia ISO-GUM é derivada da recomendação “INC-01, 1981” e é um guia genérico para qualquer tipo de avaliação de incerteza, desde a área científica até a industrial.

Outros guias genéricos [NIST NT 1294 (1994), UKAS M 3003 (1997)] em conformidade com o ISO-GUM foram editados com objetivos de condensação e/ou simplificação do texto.

Também em conformidade com o ISO-GUM, foram e continuam sendo editados vários guias dirigidos para áreas específicas com o objetivo de atender requisitos particulares como em vazão (ISO-5168, 2005) e acreditação de laboratórios (EA-4/02, 1999) entre outras.

Segundo o JCGM (Joint Committee for Guides in Metrology), comitê do BIPM responsável pela manutenção do ISO-GUM, não está previsto num futuro próximo planos para uma nova edição desse guia. Esse comitê, no entanto, está elaborando uma série de suplementos para endereçar possíveis limitações, bem como, adicionar conteúdos relacionados à incerteza ainda não cobertos por esse guia. Os suplementos são:

Suplemento 1: “Numerical methods for the propagation of distributions”. Correntemente sob a forma de “Draft”, para revisões e comentários. Trata-se da aplicação de simulações estatísticas conhecidas genericamente como “Métodos Monte-Carlo”, sendo voltado a modelos complexos e/ou distribuições assimétricas de probabilidades e consiste em propagar as distribuições (e não as dispersões) através do modelo.

Suplemento 2: “Models having more than one output quantity”. Voltados para modelos cuja saída é expressa como um vetor ou matriz.

Suplemento 3: “Conformance Testing”. Endereça questões específicas de conformidade, rejeição e aceitação, as quais são assuntos relevantes para as indústrias de manufatura, segurança e saúde.

Suplemento 4: “Modelling”. Fornece elementos adicionais quanto a particularidade dos modelos, implícito/explicito, físico/empírico/híbrido ou se a saída é escalar ou vetorial.

Suplemento 5: “Least Square Adjustments”. Aplicado À linearização das funções de transferência dos modelos, através de dados obtidos em calibrações, bem como À generalização das questões endereçadas pelo suplemento 2.

4.2 Método ISO-GUM de cálculo de incerteza da medição

Esse método (ISO-GUM, 1995) pode ser resumido basicamente pelos seguintes passos:

- Identificação das fontes ou componentes das incertezas de entradas que vão influenciar a incerteza de saída.
- Elaboração da função de transferência do modelo físico, a qual estabelece a relação matemática entre as grandezas de entrada “X” e a grandeza de saída “Y”.
- Classificação e quantificação das componentes relevantes dos contribuintes de incertezas.
- Padronização para uma probabilidade de abrangência de 68%, a qual implica num fator de abrangência de:

“ 1σ ”, para grandes amostras

e

“ $t_{v,68} \cdot S$ ” para pequenas amostras,

Onde

“ s ” : Desvio padrão da média

“ $t_{v,68}$ ”: “t” de Student com “v” graus de liberdade e 68% de abrangência.

- Obtenção da incerteza combinada padrão (componentes padronizadas em 68% de abrangência) pela raiz da soma dos quadrados.
- Obtenção da incerteza expandida para 95% de abrangência, através da multiplicação da incerteza combinada padrão do passo anterior pelo seguinte fator de abrangência:

“ $t_{vws,95}$ ” : “t” de Student com “vws” graus de liberdade, obtido pela

fórmula de Welch-Satterthwaite “ws” para 95% de abrangência.

4.3 Classificação quanto ao “tipo” das componentes de incerteza

Os componentes da incerteza da medição são classificados quanto à aplicação ou não de métodos estatísticos para processar os dados disponíveis na obtenção da incerteza.

4.3.1 Incertezas “ tipo A”

São aquelas avaliadas por métodos estatísticos. Trata-se de uma avaliação do espalhamento ou da dispersão da média das medidas, normalmente através de uma estatística como desvio padrão da média.

Detalhes a respeito das incertezas do tipo A podem ser obtidas nas seguintes referências:

- (ISO-GUM, 1995, seção 4.2)
- (NIST NT 1294, 1994 Seção 3)
- (UKAS M 3003, 1997 Seção 3)
- (ISO-5186, 2005 Seção 6)

4.3.2 Incertezas “ tipo B”

São aquelas avaliadas por métodos não-estatísticos, as quais são normalmente “herdadas” ou “importadas” de medições anteriores, relatórios de calibração ou especificações dos fabricantes de instrumentos de medição.

Na quantificação das incertezas do tipo B é necessário determinar ou estimar a distribuição de frequência, baseado nas informações publicadas a esse respeito. Isso é feito devido à necessidade de padronizar as componentes da incerteza em 68% de abrangência para combiná-las entre si e também com as do tipo A.

A tabela 4.3.2 fornece uma visão de opções mais comuns de incertezas e seus “desvios padrão equivalentes” de algumas distribuições de frequência usadas para avaliação do tipo B.

TABELA 4.3.2 DESVIOS PADRÃO EQUIVALENTES (INCERTEZAS TIPO B)		
Incertezas	Distribuição de frequências	Desvio padrão equivalente
Limites de erro “ $\pm u$ ”, na ausência de dados	Retangular com amplitude “1” e largura “ $2u$ ”	$u/\sqrt{3}$
Limites de erro “ $\pm u$ ”	Triangular com amplitude “1” e com largura “ $2u$ ”	$u/\sqrt{6}$
Incerteza “ u ”+ Fator de Abrangência “ k ”	Normal	u/k
Incerteza “ u ”+ Probabilidade de abrangência “ PA ”	Normal com desvio padrão “ σ ”	u/σ_{PA}
Incerteza “ u ”+ Probabilidade de abrangência “ PA ”+ Graus de Liberdade “ v ”	t de Student	$u/t_{v,PA}$

Detalhes a respeito das incertezas do “tipo B” podem ser obtidos nas seguintes referências:

- (ISO-GUM, 1995, seção 4.3)
- (NIST NT 1294, 1994, Seção 4)
- (UKAS M 3003, 1997 Seção 4)
- (ISO-5186, 2005 Seção 7)

5 INCERTEZAS DA MEDIÇÃO DE VAZÃO POR PRESSÃO DIFERENCIAL

5.1 Descrição do método de medição

O método de medição de vazão consiste na instalação de um elemento primário (uma placa de orifício, neste exemplo) em uma tubulação, na qual o fluido está escoando. A instalação desse elemento provoca uma queda de pressão Á jusante. A vazão é determinada pela medida da pressão diferencial, pelas propriedades do fluido, e pelo elemento primário.

A equação da vazão mássica “ q_m ” por pressão diferencial (descrita no Anexo B.4) é:

$$q_m = KCE\varepsilon\sqrt{dP\rho} \quad (5.1)$$

Onde

K= Constante de proporcionalidade

C= Coeficiente de descarga

E = Fator de velocidade de aproximação

ε = Fator de expansão dos gases

dP = Pressão diferencial

ρ = massa específica

A figura 5.1 mostra o sistema de medição de vazão a partir da pressão diferencial “ dP ”, com as respectivas entradas de pressão estática “ P_E ”, temperatura “ T ” e equações de estado “**EOS**”, as quais serão usadas para calcular a massa específica “ ρ ” e a própria vazão mássica “ q_m “. A temperatura, para efeito do cálculo de incerteza, é dividida entre sensor “ T_s ” e transmissor “ T_T ”.

5.2 Equação ISO da vazão de fluidos por pressão diferencial

A equação 5.2.1 (ISO-5167-1, 2003) da vazão mássica “ q_m ” por pressão diferencial é dada por:

$$q_m = \frac{C}{\sqrt{1 - \beta^4}} \varepsilon \frac{\pi}{4} d_o^2 \sqrt{2 \Delta P \rho} \quad (5.2.1)$$

$$C = 0,5961 + 0,0261 \beta^2 - 0,216 \beta^8 + 0,000521 \left(\frac{10^6 \beta}{Re_{dl}} \right)^{0,7} + \dots \quad (5.2.2)$$

$$\varepsilon = 1 - \left(0,351 + 0,256 \beta^4 + 0,93 \beta^8 \right) \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{k}} \right] \quad (5.2.3)$$

Onde

C = Coeficiente de descarga

β = **do/dl**: Razão dos diâmetros orifício-linha,

do = Diâmetro da placa de orifício,

dl = Diâmetro da linha,

ρ = Massa específica do fluido,

ΔP = Pressão diferencial através da placa de orifício,

p_1, p_2 = Pressões Á montante e Á jusante da placa de orifício,

k = Coeficiente de expansão isentrópico,

$Re_{dl} = v dl \rho / \mu$: Número de Reynolds do fluido com velocidade “**v**” numa tubulação com diâmetro “**dl**”.

μ = Viscosidade absoluta.

5.3 Incertezas da vazão por pressão diferencial

A equação 5.2.1 da medição de vazão por pressão diferencial depende de vários fatores, cujos componentes estão divididos basicamente em dois grupos: o primeiro está relacionado com a geometria do medidor e o segundo com as propriedades e as condições de operação do fluido sob medição.

As componentes das incertezas relativas ao primeiro grupo são constantes dentro de certos limites, enquanto que as do segundo grupo são variáveis para cada ponto da medição.

Segundo a norma ISO (ISO-5168, 2005), para propósitos práticos em metrologia industrial, as incertezas de “C”, “d”, “ε”, “dP” são consideradas independentes entre si. Na edição de 1978 dessa mesma norma é demonstrado que a diferença na desconsideração das correlações é menor que 0,1 %.

5.4 Equação ISO das incertezas da vazão por pressão diferencial

Considerando desprezível a contribuição dos termos de covariância, a equação prática ISO (ISO-5168, 2005) da estimativa da incerteza é:

$$\frac{\delta q_m}{q_m} = \sqrt{\left(\frac{\partial q_m}{\partial C} \frac{\delta C}{C}\right)^2 + \left(\frac{\partial q_m}{\partial \varepsilon} \frac{\delta \varepsilon}{\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{\partial q_m}{\partial E} \frac{\delta E}{E}\right)^2 + \left(\frac{\partial q_m}{\partial dP} \frac{\delta dP}{dP}\right)^2 + \left(\frac{\partial q_m}{\partial \rho} \frac{\delta \rho}{\rho}\right)^2} \quad (5.4.a)$$

Onde

$\frac{\partial q_m}{\partial x}$: Coeficientes de sensibilidade dos componentes.

$\frac{\delta x}{x}$: Incertezas relativas dos componentes

Na obtenção da vazão mássica de gases através de medidores por pressão diferencial, a massa específica pode ser medida diretamente via densímetros ou calculada por equações de estados, temperatura e pressão.

No primeiro caso, o medidor de massa específica normalmente usado é o de “tubo vibrante”, no qual a frequência de ressonância do sistema vibrante varia inversamente proporcional à raiz quadrada da massa específica. A avaliação das incertezas deve ser efetuada pelos seus parâmetros de influência, tais como temperatura e pressão e correções residuais.

No segundo caso, o qual se segue neste exemplo, a massa específica é obtida através da equação geral dos gases, na qual a massa específica é diretamente proporcional a pressão e inversamente proporcional à temperatura e ao fator de compressibilidade. Portanto, a incerteza da massa específica será calculada através das incertezas da pressão estática “iP_E”, da temperatura “iT” e do fator de compressibilidade “iZ”.

Os coeficientes de sensibilidade da equação ISO estão apresentados na tabela 5.4.1 e consistem de equações ou fatores numéricos obtidos a partir de modelo matemático. Eles refletem o modo com que as variações das entradas se propagam para a saída do modelo e são calculados através das derivadas parciais em relação aos seus componentes individuais.

TABELA 5.4.1: COEFICIENTES DE SENSIBILIDADE E INCERTEZAS.

Componente	Coeficiente de sensibilidade “$\frac{\partial q_m}{\partial x}$”	Incerteza “i”
Coeficiente de descarga	$(\partial q_m / \partial c) = 1$	$\delta C / C = i_C$
Fator de expansão dos gases	$(\partial q_m / \partial \epsilon) = 1$	$\delta \epsilon / \epsilon = i_\epsilon$
Fator da velocidade de aproximação	$(\partial q_m / \partial E) \rightarrow$ Obtido através de “dl” e “do”	$(\delta E / E) \rightarrow$ Obtido através de “idl” e “ido”
Diâmetro da linha	$(\partial q_m / \partial d_l) = [\beta^2 / (1 - \beta^4)]$	$\delta d_l / d_l = i_{dl}$
Diâmetro do orifício	$(\partial q_m / \partial d_o) = [2 / (1 - \beta^4)]$	$\delta d_o / d_o = i_{do}$
Pressão diferencial	$(\partial q_m / \partial dP) = 1/2$	$\delta dP / dP = i_{dP}$
Massa específica	$(\partial q_m / \partial \rho) \rightarrow$ Obtido através de “PE”, “T” e “Z”	$(\delta \rho / \rho) \rightarrow$ Obtido através de “iPE”, “iT” e “iZ”
Pressão estática	$(\partial q_m / \partial P_E) = 1/2$	$\delta P_E / P_E = i_{PE}$
Temperatura	$(\partial q_m / \partial T) = 1/2$	$\delta T / T = i_T$
Fator de compressibilidade	$(\partial q_m / \partial Z) = 1/2$	$\delta Z / Z = i_Z$

Introduzindo os coeficientes de sensibilidade da tabela 5.4.1 na equação 5.4.a e alterando a notação temos:

$$i_{qm} = \sqrt{i_C^2 + i_\epsilon^2 + \left(\frac{2\beta^4 i_{dl}}{1 - \beta^4} \right)^2 + \left(\frac{2i_{do}}{1 - \beta^4} \right)^2 + \left(\frac{i_{dP}}{2} \right)^2 + \left(\frac{i_{PE}}{2} \right)^2 + \left(\frac{i_T}{2} \right)^2 + \left(\frac{i_Z}{2} \right)^2} \quad (5.4.b)$$

Cujos componentes, valores e abrangências estão na tabela 5.4.2.

TABELA 5.4.2 COMPONENTES DA INCERTEZAS DA EQUAÇÃO 5.4.b.			
Incerteza (Item.)*	Componente (Item.)*	Equação ou Valor (% It)**	Abrangência
Relativas À geometria da placa de orifício (5.4.1 a 5.4.3)	Coeficiente de Descarga (5.4.1)	$i_C = 0,5$	2σ
	Fator de expansão (5.4.2)	$i_E = 3 \Delta P/P_E$	
	Diâmetro do Orifício (5.4.3.1)	$i_{do} = 0,03$	
	Diâmetro da Linha (5.4.3.2)	$i_{dl} = 1.0$	
Da medição de pressão diferencial “ idP ” (5.4.4)	De referência (5.4.4.1)	$i_{dPR} = 0,03 (AFN / It)$	3σ
	Dependência térmica (5.4.4.2)	$i_{dPT} = 0,04 (AFN / It) (\delta T/28)$	
	Pressão estática (5.4.4.3)	$i_{dPPE} = 0,06 (AFN / It) (\delta PE/7000)$	
	Deriva (5.4.4.4)	$i_{dPD} = [0,4 (LSFM/It) (\delta Cal/5) (\delta T/28) (\delta PE/7000)]$	
Da medição de pressão estática “ iPE ” (5.4.5)	De referência (5.4.5.1)	$i_{PER} = 0,2 (AFN / It)$	
	Dependência térmica (5.4.5.2)	$i_{PET} = 0,6 (AFN / It) (\delta T/28)$	
	Deriva (5.4.5.3)	$i_{PED} = [1 (LSFM/It) (\delta Cal/5) (\delta T/28)]$	
Do transmissor de temperatura “ iTT ” (5.4.6)	De referência (5.4.6.1)	$i_{TTR} = [50 / (It + 273)]$	
	Dependência térmica (5.4.6.2)	$i_{TTT} = [10 / (It + 273)] (\delta T/10)$	
	Deriva (5.4.6.3)	$i_{TTD} = \{ [30/(It+273)] (\delta Cal/2) (\delta T/10) \}$	
Do sensor de temperatura “ iTs ” (5.4.6)	Intercambiabilidade (5.4.6.4)	$i_{Tsl} = [(0,30+0,005It) / (It+273)] \times 100$	
	Deriva (5.4.6.5)	$i_{TsD} = [50/(It+273)] (\delta Cal/2)$	
Do fator de compressibilidade (5.4.7)		$i_C = 0,1$	2σ

* As referências numéricas entre parênteses são os itens onde as componentes e suas equações são discutidas em detalhes.

**(% It) = (percentagem da leitura).

5.4.1 Incerteza do coeficiente de descarga “iC”

Para uma placa de orifício (ISO5167-2, 2003), dentro dos limites de uso, com os parâmetros “**Ra/do**” (rugosidade relativa) e “**β**”, “**do**”, “**Re_{do}**” livres de erro e ainda restritos Á:

- $0,2 \leq \beta < 0,6$
- Diâmetro do orifício $do \geq 12,5 \text{ mm}$
- Diâmetro da linha : $50 \text{ mm} \leq dl \leq 1000 \text{ mm}$
- Número de Reynolds $Re_{do} \geq 10000$

A incerteza relativa de “C” em percentagem da leitura “% It” se torna:

$$iC = \delta C/C = 0,5 \% \text{ It} \quad (5.4.1)$$

5.4.2 Incerteza do fator de expansão dos gases “iε”

Considerando “**β**”, “**dP/PE**” e “**k**” livres de erro, a incerteza de “**ε**” é dada por “**3,5 ΔP/k.PE**” (ISO5167-2, 2003), e é predominantemente dependente da razão “pressão diferencial-pressão estática” do fluido de medição.

Como o expoente isentrópico “**k**” varia entre 1,2 e 1,4, a incerteza de “**ε**” pode ser simplificada para:

$$i\epsilon = \delta \epsilon/\epsilon = 3 \Delta P/PE \% \text{ It} \quad (5.4.2)$$

5.4.3 Incerteza do fator da velocidade de aproximação “iE”

Como o fator de velocidade de aproximação é função da razão “**β=do/dl**”, o mesmo pode ser avaliado via diâmetros da linha “**dl**” e do orifício “**do**”, os quais são funções de incerteza do instrumento na medição desses diâmetros e para altas temperaturas, como vapor d’água, da incerteza do coeficiente de expansão térmica dos materiais.

O diâmetro do orifício, por ser usinado e perfeitamente redondo, tem sua incerteza quase exclusivamente dependente da incerteza do micrômetro usado na sua medição.

Portanto a incerteza típica de “**ido**” é:

$$ido = (\delta do/do) = 0,03 \% \text{ It} \quad (5.4.3.1)$$

O diâmetro da linha, por possuir uma certa “ovalização”, depende da representatividade da medição em vários eixos, além da incerteza do micrômetro usado na sua medição. Tubulações especiais, uniformes internamente, são muitas vezes necessárias para garantir o menor valor de “**idl**”.

Nessas condições, a incerteza típica de “**idl**” é:

$$\mathbf{idl = (\delta dl/dl) = 1,0 \ \% \ It} \quad (5.4.3.2)$$

5.4.4 Incertezas da medição de pressão diferencial “**idP**”

O conjunto de especificações da pressão diferencial é, usualmente, composto pela incerteza de referência e pelas incertezas devido À temperatura, À pressão estática e À deriva.

5.4.4.1 Incerteza de referência da pressão diferencial “**idPR**”

Esse termo, usualmente, inclui as incertezas combinadas de linearidade, repetitividade e histerese com uma dada, porém nem sempre informada, probabilidade de abrangência. A palavra “referência” significa que os parâmetros como temperatura, pressão e umidade, são considerados sem variações e nas suas condições base ou de referência. Geralmente, não são informadas suas contribuições proporcionais e tampouco o método de combinação (linear ou quadrática), impossibilitando desmembrá-las e harmonizá-las para 68% de abrangência conforme recomenda a ISO-GUM (ISO-GUM,1995).

Essa incerteza é declarada em Amplitude da Faixa Nominal “% AFN”, e é independente do Limite Superior da Faixa Máxima “LSFM” para razões “LSFM/AFN”, o qual é, presentemente, menor que 10.

As equações típicas da incerteza “**idPR**” em % AFN e % It, são:

$$\mathbf{idPR = 0,01 + 0,005(LSFM/AFN) \ \% \ AFN, \ para \ LSFM/AFN \geq 10.}$$

$$\mathbf{idPR = 0,03 \ \% \ AFN, \ para \ LSFM/AFN < 10}$$

Selecionado LSFM/AFN=4 e convertendo para % It, temos:

$$\mathbf{idPR = 0,03(AFN / It) \ \% \ It} \quad (5.4.4.1)$$

A faixa típica de pressão diferencial numa placa de orifício é de 0 a 30kPa, portanto o transmissor deve ser selecionado com um LSFM mais próximo possível acima de 30kPa, para obtermos a menor incerteza.

5.4.4.2 Incerteza da pressão diferencial com a temperatura “idPT”

Esse termo, usualmente especificado para uma determinada variação de temperatura ambiente, é dependente da razão “LSFM/AFN” e declarado em % AFN.

As equações típicas de “idPT” em % AFN e % It, para 28 °C de variação são:

$$\text{idPT} = [0,02 + 0,005(\text{LSFM/AFN}) \delta T/28] \% \text{AFN}$$

Com LSFM/AFN = 4 e convertendo para % It, temos:

$$\text{idPT} = [0,04 (\text{AFN/It}) \delta T/28] \% \text{It} \quad (5.4.4.2)$$

Na maioria dos instrumentos de medição a dependência térmica é uma componente significativa da incerteza total e, portanto, a possibilidade de manter o instrumento de medida condicionado dentro de um invólucro com uma faixa mais estreita possível de temperatura, minimiza essa componente. Na prática, com instrumentos de campo, isso raramente é viável.

5.4.4.3 Incerteza da pressão diferencial com a pressão estática “idPPE”

Esse termo usualmente é especificado para uma pressão estática “PE” de 7000 kPa , porém poucas aplicações possuem valores dessa magnitude.

As equações típicas de “idPPE” em % AFN e % It, para 7000 kPa de variação são:

$$\text{idPPE} = [0,02 + 0,01 (\text{LSFM/AFN}) \delta P_E/7000] \% \text{AFN}$$

Com LSFM/AFN= 4 e convertendo para % It, temos:

$$\text{idPPE} = [0,06 (\text{AFN/It}) \delta P_E/7000] \% \text{It} \quad (5.4.4.3)$$

5.4.4.4 Incerteza da pressão diferencial com a deriva “idPD”

Esse termo determina o intervalo de calibração “ δCal ” do medidor e inclui as dependências da temperatura e da pressão estática para um período de uso de cinco anos.

Observar que as incertezas de referência e devido Às variações de temperatura e pressão estática são declaradas em função da amplitude da faixa nominal “% AFN”, enquanto que a incerteza devido Á deriva é especificada em função do limite superior da faixa máxima % LSFM.

Supondo que haja um “envelhecimento” linear, as equações típicas de “idPD”, em % AFM e % lt, para variações de 28 °C, 7000 kPa e intervalos de calibração de 5 anos, são:

$$\text{idPD} = [0,1(\delta Cal/5)(\delta T/28)(\delta PE/7000)] \% \text{LSFM}$$

Com $LSFM/AFN = 4$ e convertendo para % lt, temos:

$$\text{idPD} = [0,4 (AFN/lt)(\delta Cal/5)(\delta T/28)(\delta PE/7000)] \% \text{lt} \quad (5.4.4.4)$$

5.4.4.5 Gráfico das incertezas na medição da pressão diferencial

Os gráficos das componentes das incertezas são ferramentas implementadas em Excel, usadas para visualizar o comportamento dessas componentes ao longo da faixa de uso dos instrumentos de medição.

Como não é possível colocar no papel os gráficos reais em Excel, selecionamos três instantâneos que sejam representativos na identificação das componentes da incerteza com maiores contribuições.

5.4.4.6 Instantâneo 1 do gráfico das incertezas da pressão diferencial.

A figura 5.4.4.6 mostra as componentes das incertezas da pressão diferencial, na faixa de 10,3 a 30,3 kPa, com os seguintes parâmetros:

- Pressão diferencial: 0 a 30 kPa (mostrado de 10,3 a 30,3 kPa)
- Variação da temperatura ambiente “ $\delta T = 25\text{ °C}$ ”
- Variação da pressão estática “ $\delta PE = 3000\text{ kPa}$ ”
- Intervalo de calibração “ $\delta Cal = 1\text{ ano}$ ”

Nota-se que a influência da pressão diferencial é pequena ao longo da parte superior da faixa, mas se torna significativa na parte inferior conforme mostrado nas [figuras 5.4.4.7 e 5.4.4.8](#).

5.4.4.7 Instantâneo 2 do gráfico das incertezas da pressão diferencial

A figura 5.4.4.7 mostra as componentes das incertezas da pressão diferencial, na faixa de 0,3 a 10,3 kPa, com os mesmos parâmetros da figura 5.4.4.6 (faixa “0 a 30 kPa”, “ $\delta T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ”, “ $\delta PE = 3000\text{ kPa}$ ” e “ $\delta Cal = 1\text{ ano}$ ”), na qual a influência da pressão diferencial só se torna dominante para pontos a partir de 1 ou 2%, o que corresponde a uma vazão de 10 e 14%, devido ao fato da vazão ser proporcional à raiz quadrada da pressão diferencial.

5.4.4.8 Instantâneo 3 do gráfico das incertezas da pressão diferencial

A figura 5.4.4.8 , possui a mesma configuração da figura 5.4.4.7 exceto o intervalo de calibração “ δCal ” que passou de 1 para 2 anos e por isso a influência da deriva “ idP ” passa a ser um fator significativo.

5.4.5 Incertezas da medição de pressão estática “ iPE ”

Com exceção da componente devido À variação de pressão estática “ $idPPE$ ” (item 5.4.4.3), a qual é exclusiva da pressão diferencial, as incertezas de referência “ $idPR$ ” (item 5.4.4.1), devido À variação de temperatura “ $idPT$ ” (item 5.4.4.2) e À deriva “ $idPD$ ” (item 5.4.4.4), assumem a mesma forma das usadas na medição de pressão estática.

5.4.5.1 Incerteza de referência da pressão estática “ $iPER$ ”.

Os detalhes dessa componente estão descritos no item “5.4.4.1”.

As equações típicas da incerteza de “ $iPER$ ” em $\% AFN$ e $\% It$, são:

$$iPER = [0,1 + 0,0125(LSFM / AFN)] \% AFN$$

Com $LSFM/AFN = 8$, e convertendo de $\% AFN$ para $\% It$, temos:

$$iPER = 0,2 (AFN / It) \% It \quad (5.4.5.1)$$

5.4.5.2 Incerteza da pressão estática com a temperatura “iPET”

Os detalhes dessa componente estão descritos no item “5.4.4.2”.

As equações típicas de “iPET” em $\% \text{ AFN}$ e $\% \text{ Lt}$ para 28 °C de variação, são:

$$iPET = [0,2 + 0,05(LSFM/AFN) \delta T/28] \% \text{ AFN}$$

Com $LSFM/AFN = 8$, e convertendo de $\% \text{ AFN}$ para $\% \text{ Lt}$, temos:

$$iPET = 0,6 (AFN / Lt) (\delta T/28) \% \text{ Lt} \quad (5.4.5.2)$$

5.4.5.3 Incerteza da pressão estática com a deriva “iPED”

Com exceção da influência da variação da pressão estática “ δPE ”, os detalhes dessa componente da incerteza estão descritos no item “5.4.4.4”.

As equações típicas de “iPED”, em $\% \text{ AFM}$ e $\% \text{ Lt}$ para variações de 28 °C, 7000 kPa e intervalos de calibração de 5 anos.

$$iPED = [0,125(\delta Cal/5).(\delta T/28)] \% \text{ LSFM}$$

Com $LSFM/AFN = 8$ e convertendo para $\% \text{ Lt}$, temos:

$$iPED = [1(AFN/Lt).(\delta Cal/5).(\delta T/28)] \% \text{ Lt} \quad (5.4.5.3)$$

5.4.5.4 Instantâneo do gráfico das incertezas da pressão estática.

A figura 5.4.5.4, mostra as componentes das incertezas da pressão estática na faixa de 300 a 500 kPa, variação da temperatura ambiente “ $\delta T = 25 \text{ °C}$ ” e Intervalo de calibração “ $\delta Cal = 1 \text{ ano}$ ”, na qual a influência da pressão estática é razoavelmente significativa.

5.4.6 Incertezas da medição da temperatura “iT”

Nas incertezas das medições de pressão diferencial e estática, o sensor e a eletrônica são indissociáveis, formando um conjunto único.

A temperatura, no entanto, é composta pelo transmissor e o sensor separadamente e, portanto, suas componentes da incerteza também serão separadas e detalhadas.

Diferentemente da medição das pressões diferencial e estática, a incerteza da medição de temperatura é, normalmente, declarada em “°C” e, portanto, é necessário convertê-la para “% It”, já que todas as outras incertezas são especificadas desse modo.

Além disso, as leituras da temperatura “It” em graus Celsius devem ser convertidas para Kelvin (It (°C) + 273).

Com exceção da influência da variação da pressão estática “δPE”, os detalhes dessa componente da incerteza estão descritos no item “5.4.4.4”.

5.4.6.1 Incerteza de referência do transmissor de temperatura “iT_{TR}”

Os detalhes dessa componente da incerteza estão descritos no item “5.4.4.1”, exceto pelo fato da incerteza ser declarada em “°C”.

As equações típicas da incerteza “iT_{TR}” em % AFN e % It são:

$$iT_{TR} = 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Convertendo para “% It”, em relação á temperatura absoluta temos:

$$iT_{TR} = [50 / (It + 273)] \% It \quad (5.4.6.1)$$

5.4.6.2 Incerteza do transmissor de temperatura devido Á temperatura “iT_{TT}”

Os detalhes dessa componente estão descritas no item “5.4.4.2”.

As equações típicas da incerteza “iT_{TT}” em “°C” e % It , para cada 10 °C de variação, são:

$$iT_{TT} = 0,1 (\delta T/10) \text{ } ^\circ\text{C}$$

Convertendo para “% It”, em relação á temperatura absoluta temos:

$$iT_{TT} = [10/ (It + 273)] (\delta T/10) \% It \quad (5.4.6.2)$$

5.4.6.3 Incerteza do transmissor de temperatura com a deriva “iT_{TD}”

Os detalhes dessa componente estão descritos no item “5.4.4.4”.

As equações típicas da incerteza “iT_{TD}”, em % AFM e % It, para 10 °C de variação e intervalos de calibração de 2 anos são:

$$iT_{TD} = 0,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Convertendo para “% It”, em relação à temperatura absoluta temos:

$$iT_{TD} = [30 / (It + 273)] (\delta Cal / 2) (\delta T / 10) \% It \quad (5.4.6.3)$$

5.4.6.4 Incerteza da intercambiabilidade do sensor de temperatura “iT_{SI}”

O sensor de temperatura normalmente usado é a termo-resistência (RTD), pela sua característica de manter uma saída estável e consistente ao longo do tempo, mesmo na presença de choques físicos e térmicos.

Essa incerteza ocorre devido À diferença na medição de temperatura, quando um sensor é substituído por outro do mesmo tipo, sem calibração prévia.

A norma IEC-60751 estabelece duas classes de incertezas para termo-resistência de platina conhecida como Pt-100, a qual possui resistências nominais de 100 ohms @ 0 (zero) °C e 138,5 ohms @ 100 °C.

- Classe A: (0,15 + 0,002 It) °C
- Classe B: (0,30 + 0,005 It) °C

A incerteza da temperatura em aplicações de vazão de gases é calculada pela relação entre a variação da temperatura lida e a temperatura absoluta (°C + 273). A escolha, portanto, do sensor classe A ou B não tem influência significativa sobre a incerteza total.

Optando por um sensor classe B, as equações típicas da incerteza “iT_{SI}”, em “°C” e “% It” são:

$$iT_{SI} = (0,30 + 0,005 It) \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Convertendo para “% It”, em relação à temperatura absoluta temos:

$$iT_{SI} = \{[(0,30 + 0,005 It) / (It + 273)] 100\} \% It \quad (5.4.6.4)$$

5.4.6.5 Incerteza do sensor de temperatura com a deriva “ITsD”

Com exceção da influência da variação da pressão estática “ δPE ”, os detalhes dessa componente da incerteza estão descritos no item “5.4.4.4”.

As equações típicas da incerteza “ $iTsD$ ”, em “ $^{\circ}C$ ” e “ $\% It$ ” para intervalos de calibração de 2 anos, são:

$$iT_sD = 0,5(\delta Cal/2) ^{\circ}C$$

Convertendo para “ $\% It$ ”, em relação à temperatura absoluta temos:

$$iT_sD = [50 / (It + 273)](\delta Cal/2) \% It \quad (5.4.6.5)$$

5.4.6.6 Instantâneo do gráfico das incertezas da temperatura.

A figura 5.4.6.6, mostra as componentes das incertezas da temperatura na faixa de 10 a 40 $^{\circ}C$ com variação da temperatura ambiente “ $\delta T=25 ^{\circ}C$ ” e intervalo de calibração “ $\delta Cal = 1 \text{ ano}$ ”.

A influência da temperatura é pequena pelo fato da temperatura usada na compensação da massa específica ser em escala absoluta (Kelvin).

5.4.7 Incerteza do fator de compressibilidade “iZ”

O fator de compressibilidade “Z” corrige o desvio do gás real em relação ao gás ideal e sua incerteza depende da equação de estado.

A incerteza típica de “iZ” é:

$$iZ = (\delta Z/Z) = 0,1 \% It \quad (5.4.7)$$

5.4.8 Planilhas de incertezas

As planilhas de incertezas da vazão mássica por pressão diferencial foram elaboradas em planilhas Excel com 13 colunas e 19 linhas.

Nas colunas se detalham os seguintes elementos:

COLUNA 1: Fontes de incertezas geométricas (placa e linha) e das medições

COLUNA 2: Siglas das componentes dessas fontes.

COLUNA 3: Nomes dos componentes das fontes de incerteza.

COLUNA 4: Pontos configuráveis de leitura da pressão diferencial “**It_dP**”, pressão estática “**It_Pe**” e temperatura “**It_T**”.

COLUNA 5 e 6: Fórmulas e valores da incerteza de entrada.

COLUNA 7: Distribuições de probabilidade.

COLUNA 8: Divisores, que são os fatores de abrangência de entrada para converter para 68 % de probabilidade de abrangência as distribuições normais diferentes de 68 % ou ainda transformar outras distribuições, como retangular e triangular, em normal-equivalentes com 68% de abrangência.

COLUNA 9 e 10: Fórmulas e valores dos coeficientes de sensibilidade.

COLUNA 11: Incertezas de saída @ 68 % e seus percentuais de contribuição.

COLUNA 12: Percentual da contribuição individual das componentes da incerteza de saída em relação À incerteza total.

COLUNA 13: Repetição, para facilidade de leitura, das siglas das componentes das fontes de incerteza.

Nas linhas são detalhadas 6 fontes de incerteza e seus componentes

LINHAS 1 a 4: Placa de orifício com 4 componentes de incerteza.

LINHAS 5 a 8: Pressão diferencial com 4 componentes de incerteza.

LINHAS 9 a 11: Pressão estática com 3 componentes de incerteza.

LINHAS 12 a 14: Transmissor de temperatura com 3 componentes de incerteza.

LINHAS 15 e 16: Sensor de temperatura com 2 componentes de incerteza.

LINHA 17: Fator de compressibilidade dos gases.

LINHA 18: Incerteza combinada padrão @ 68 % de abrangência.

LINHA 19: Incerteza expandida @ 95 % de abrangência.

5.4.8.1 Instantâneo 1 da planilha de incertezas.

A tabela 5.4.8.1 mostra o instantâneo 1, com configurações típicas dos parâmetros de influência (“ $\delta T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ”, “ $\delta PE= 3000\text{ kPa}$ ” e “ $\delta Cal=1\text{ ano}$ ”), e leituras de pressão diferencial, pressão estática e temperatura em pontos extremos que ocasionam as maiores incertezas:

- Pressão diferencial = 0,3 kPa (1 % da faixa de 0 a 30 kPa).
- Pressão estática = 500 kPaA (100 % da faixa de 300 a 500 kPaA)
- Temperatura = 40 $^{\circ}\text{C}$ (100 % da faixa de 15 a 40 $^{\circ}\text{C}$).

Da tabela 5.4.8.1 podemos concluir que as componentes da pressão diferencial no extremo inferior útil da faixa, são responsáveis pela maior parte das contribuições.

5.4.8.2 Instantâneo 2 da planilha de incertezas.

A tabela 5.4.8.2 mostra o instantâneo 2, o qual possui mesma configuração da do instantâneo 1, porém com a leitura pressão diferencial “idP” alterada de 0,3 kPa (1% da faixa de 0 a 30kPa) para 0,6 kPa (2%). Acima de 2%, a pressão diferencial começa a diminuir sua contribuição em relação aos outros componentes.

Observar que 1 e 2% da pressão diferencial implicam em 10 % $[100(\sqrt{100}/100)]$ e 14% $[100(\sqrt{2}/100)]$ da vazão respectivamente.

Da tabela 5.4.8.2 podemos concluir que, com a tecnologia atual, a medição de pressão diferencial é a componente que limita a leitura mínima útil em aproximadamente 1 % da faixa nominal, mantendo uma incerteza da ordem de 2 % da leitura.

5.4.8.3 Instantâneo 3 da planilha de incertezas.

A tabela 5.4.8.3 mostra o instantâneo 3, a qual possui a mesma configuração da do instantâneo 2, porém com o intervalo de calibração “ δCal ” estendido de 1 para 2 anos, na qual podemos notar que a componente da pressão diferencial devido à deriva “idPD” é significativamente aumentada.

TABELA 5.4.8.1 INSTANTÂNEO 1 DA PLANILHA DE INCERTEZAS
*i*tDP=0,3 kPa, $\delta T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\delta P_E = 3000\text{ kPa}$ e $\delta Cal = 1\text{ ano}$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	Fonte	Sigla	Componente	Leitura	Incerteza de entrada		Distribuição	Divisor	Coeficiente de sensibilidade		Incerteza de saída @68%	% de contribuição	Sigla
					Fórmula	Valor			Fórmula	Valor			
1	Geométrica	C	Coeficiente de descarga	-	0,50 % lt	0,500	Normal	2	1	1	0,2500	9,67%	C
2		ε	Fator de expansão	-	(3 dP)/(ltPE)	0,002	Normal	2	1	1	0,0011	0,04%	ε
3		dl	Diâmetro da linha	0,10	1,000	1,000	Normal	2	2β^4 / (1-β^4)	0,13	0,0667	2,58%	dl
4		do	Diâmetro do orifício	0,05	0,03 % lt	0,030	Normal	2	2 / (1-β^4)	2,13	0,0320	1,24%	do
5	Pressão diferencial (kPa)	idPR	Condições de referência	0,3	[0,03(AFN/lt)] % lt	3,000	Normal	3	1/2	1/2	0,5000	19,34%	idPR
6		idPT	Temperatura ambiente		[0,04(AFN/lt)(dT/28)] % lt	3,571	Normal	3	1/2	1/2	0,5952	23,02%	idPT
7		idPPE	Pressão estática		[0,06 (AFN/lt)(dPE/7000)] % lt	2,571	Normal	3	1/2	1/2	0,4286	16,57%	idPPE
8		idPD	Deriva		[0,4(AFN/lt)(dCal/5)(dT/28)(dPE/7000)] % lt	3,061	Normal	3	1/2	1/2	0,5102	19,73%	idPD
9	Pressão estática (kPaA)	iPER	Condições de referência	400	[0,2(AFN/lt)] % lt	0,100	Normal	3	1/2	1/2	0,0167	0,64%	iPER
10		iPET	Temperatura ambiente		[0,6(AFN/lt)(dT/28)] % lt	0,268	Normal	3	1/2	1/2	0,0446	1,73%	iPET
11		iPED	Deriva		[1 (AFN/lt)(dCal/5)(dT/28)] % lt	0,089	Normal	3	1/2	1/2	0,0149	0,58%	iPED
12	Transmissor de Temperatura (°C)	iTTR	Condições de referência	25	[50/(lt + 273)] % lt	0,168	Normal	3	1/2	1/2	0,0280	1,08%	iTTR
13		iTTt	Temperatura ambiente		[(10/(lt+273))(dT/10)] % lt	0,084	Normal	3	1/2	1/2	0,0140	0,54%	iTTt
14		iTTD	Deriva		[30/(lt+273)](dCal/2)(dT/10)] % lt	0,126	Normal	3	1/2	1/2	0,0210	0,81%	iTTD
15	Sensor de Temperatura (°C)	iTsl	Intercambiabilidade		[(0,3+0,005 lt)/(lt+273)]100 % lt	0,143	Normal	3	1/2	1/2	0,0238	0,92%	iTsl
16		iTsD	Incerteza devido a deriva		[(50/(lt+273))(dCal/2)] % lt	0,084		3	1/2	1/2	0,0140	0,54%	iTsD
17	Fator de compressibilidade	iZ	Equação de estado	-	0,10 %lt	0,100	Normal	2	1/2	1/2	0,0250	0,97%	iZ
18	Incerteza Padrão			√Σ(incertezas de saída @68%)²							1,06	100,00%	
19	Incerteza Expandida			√Σ(incertezas de saída @68%)² x t _{wss,95}							2,12		

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	Fonte	Sigla	Componente	Leitura	Incerteza de entrada		Distribuição	Divisor	Coeficiente de sensibilidade		Incerteza de saída @68%	% de contribuição	Sigla
					Fórmula	Valor			Fórmula	Valor			
1	Geométrica	C	Coeficiente de descarga	-	0,50 % lt	0,500	Normal	2	1	1	0,2500	15,93%	C
2		ε	Fator de expansão	-	(3 dP)/(ltPE)	0,005	Normal	2	1	1	0,0023	0,14%	ε
3		dl	Diâmetro da linha	0,10	1,000	1,000	Normal	2	2β^4 / (1-β^4)	0,13	0,0667	4,25%	dl
4		do	Diâmetro do orifício	0,05	0,03 % lt	0,030	Normal	2	2 / (1-β^4)	2,13	0,0320	2,04%	do
5	Pressão diferencial (kPa)	idPR	Condições de referência	0,6	[0,03(AFN/lt)] % lt	1,500	Normal	3	1/2	1/2	0,2500	15,93%	idPR
6		idPT	Temperatura ambiente		[0,04(AFN/lt)(dT/28)] % lt	1,786	Normal	3	1/2	1/2	0,2976	18,96%	idPT
7		idPPE	Pressão estática		[0,06 (AFN/lt)(dPE/7000)] % lt	1,286	Normal	3	1/2	1/2	0,2143	13,65%	idPPE
8		idPD	Deriva		[0,4(AFN/lt)(dCal/5)(dT/28)(dPE/7000)] % lt	1,531	Normal	3	1/2	1/2	0,2551	16,25%	idPD
9	Pressão estática (kPaA)	iPER	Condições de referência	400	[0,2(AFN/lt)] % lt	0,100	Normal	3	1/2	1/2	0,0167	1,06%	iPER
10		iPET	Temperatura ambiente		[0,6(AFN/lt)(dT/28)] % lt	0,268	Normal	3	1/2	1/2	0,0446	2,84%	iPET
11		iPED	Deriva		[1 (AFN/lt)(dCal/5)(dT/28)] % lt	0,089	Normal	3	1/2	1/2	0,0149	0,95%	iPED
12	Transmissor de Temperatura (°C)	iTTR	Condições de referência	25	[50/(lt + 273)] % lt	0,168	Normal	3	1/2	1/2	0,0280	1,78%	iTTR
13		iTtT	Temperatura ambiente		[(10/(lt+273))(dT/10)] % lt	0,084	Normal	3	1/2	1/2	0,0140	0,89%	iTtT
14		iTTD	Deriva		[30/(lt+273)](dCal/2)(dT/10)] % lt	0,126	Normal	3	1/2	1/2	0,0210	1,34%	iTTD
15	Sensor de Temperatura (°C)	iTSI	Intercambiabilidade		[(0,3+0,005 lt)/(lt+273)]100 % lt	0,143	Normal	3	1/2	1/2	0,0238	1,51%	iTSI
16		iTSd	Incerteza devido a deriva		[(50/(lt+273))(dCal/2)] % lt	0,084		3	1/2	1/2	0,0140	0,89%	iTSd
17	Fator de compressibilidade	iZ	Equação de estado	-	0,10 %lt	0,100	Normal	2	1/2	1/2	0,0250	1,59%	iZ
18	Incerteza Padrão			$\sqrt{\sum (\text{incertezas de saída @68\%})^2}$							0,58	100,00%	
19	Incerteza Expandida			$\sqrt{\sum (\text{incertezas de saída @68\%})^2} \times t_{wts,95}$							1,16		

TABELA 5.4.8.2 INSTANTÂNEO 2 DA PLANILHA DE INCERTEZAS
(tdP=0,6 kPa, δT = 25 °C, δPE = 3000 kPa e δCal= 1 ano)

TABELA 5.4.8.3 INSTANTÂNEO 3 DA PLANILHA DE INCERTEZAS
 (idP=0,6 kPa, $\delta T = 25^\circ\text{C}$, $\delta P_E = 3000\text{ kPa}$ e $\delta \text{Cal} = 2\text{ anos}$)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	Fonte	Sigla	Componente	Leitura	Incerteza de entrada		Distribuição	Divisor	Coeficiente de sensibilidade		Incerteza de saída @68%	% de contribuição	Sigla
					Fórmula	Valor			Fórmula	Valor			
1	Geométrica	C	Coeficiente de descarga	-	0,50 % lt	0,500	Normal	2	1	1	0,2500	13,34%	C
2		ϵ	Fator de expansão	-	$(3 \text{ dP}) / (\text{ltPE})$	0,005	Normal	2	1	1	0,0023	0,12%	ϵ
3		dl	Diâmetro da linha	0,10	1,000	1,000	Normal	2	$2\beta^4 / (1-\beta^4)$	0,13	0,0667	3,56%	dl
4		do	Diâmetro do orifício	0,05	0,03 % lt	0,030	Normal	2	$2 / (1-\beta^4)$	2,13	0,0320	1,71%	do
5	Pressão diferencial (kPa)	idPR	Condições de referência	0,6	$[0,03(\text{AFN}/\text{lt})] \% \text{ lt}$	1,500	Normal	3	1/2	1/2	0,2500	13,34%	idPR
6		idPT	Temperatura ambiente		$[0,04(\text{AFN}/\text{lt})(\text{dT}/28)] \% \text{ lt}$	1,786	Normal	3	1/2	1/2	0,2976	15,88%	idPT
7		idPPE	Pressão estática		$[0,06 (\text{AFN}/\text{lt})(\text{dPE}/7000)] \% \text{ lt}$	1,286	Normal	3	1/2	1/2	0,2143	11,43%	idPPE
8		idPD	Deriva		$[0,4(\text{AFN}/\text{lt})(\text{dCal}/5)(\text{dT}/28)(\text{dPE}/7000)] \% \text{ lt}$	3,061	Normal	3	1/2	1/2	0,5102	27,21%	idPD
9	Pressão estática (kPaA)	iPER	Condições de referência	400	$[0,2(\text{AFN}/\text{lt})] \% \text{ lt}$	0,100	Normal	3	1/2	1/2	0,0167	0,89%	iPER
10		iPET	Temperatura ambiente		$[0,6(\text{AFN}/\text{lt})(\text{dT}/28)] \% \text{ lt}$	0,268	Normal	3	1/2	1/2	0,0446	2,38%	iPET
11		iPED	Deriva		$[1(\text{AFN}/\text{lt})(\text{dCal}/5)(\text{dT}/28)] \% \text{ lt}$	0,179	Normal	3	1/2	1/2	0,0298	1,59%	iPED
12	Transmissor de Temperatura ($^\circ\text{C}$)	iTTR	Condições de referência	25	$[50/(\text{lt} + 273)] \% \text{ lt}$	0,168	Normal	3	1/2	1/2	0,0280	1,49%	iTTR
13		iTtT	Temperatura ambiente		$[(10/(\text{lt}+273))(\text{dT}/10)] \% \text{ lt}$	0,084	Normal	3	1/2	1/2	0,0140	0,75%	iTtT
14		iTTD	Deriva		$[30/(\text{lt}+273)](\text{dCal}/2)(\text{dT}/10) \% \text{ lt}$	0,252	Normal	3	1/2	1/2	0,0419	2,24%	iTTD
15	Sensor de Temperatura ($^\circ\text{C}$)	iTsl	Intercambiabilidade	25	$[(0,3+0,005 \text{ lt})/(\text{lt}+273)]100 \% \text{ lt}$	0,143	Normal	3	1/2	1/2	0,0238	1,27%	iTsl
16		iTsD	Incerteza devido a deriva		$[(50/(\text{lt}+273))(\text{dCal}/2)] \% \text{ lt}$	0,168		3	1/2	1/2	0,0280	1,49%	iTsD
17	Fator de compressibilidade	iZ	Equação de estado	-	0,10 %lt	0,100	Normal	2	1/2	1/2	0,0250	1,33%	iZ
18	Incerteza Padrão				$\sqrt{\sum (\text{incertezas de saída @68\%})^2}$						0,73	100,00%	
19	Incerteza Expandida				$\sqrt{\sum (\text{incertezas de saída @68\%})^2} \times t_{wss,95}$						1,46		

5.4.9 Instantâneos das contribuintes de incerteza.

Esses instantâneos permitem visualizar, na forma de gráfico de barras, os valores das contribuições individuais contidos na 10ª coluna dos instantâneos da planilha de incertezas.

5.4.9.1 Instantâneo 1 das contribuintes de incerteza.

A [figura 5.4.9.1](#) mostra o Instantâneo 1 das contribuintes de incerteza onde podemos visualizar a predominância dos componentes da pressão diferencial no ponto de 0,3 kPa para $\delta_{cal}=1$ ano.

5.4.9.2 Instantâneo 2 das contribuintes de incerteza.

A [figura 5.4.9.2](#) mostra o Instantâneo 2 das contribuintes de incerteza, onde podemos visualizar um decréscimo da predominância dos componentes da pressão diferencial quando a mesma se desloca de 0,3 para 0,6 kPa.

5.4.9.3 Instantâneo 3 das contribuintes de incerteza.

A figura 5.4.9.3 mostra o Instantâneo 3 das contribuintes de incerteza, onde podemos notar um acréscimo da influência da deriva na pressão diferencial, quando o intervalo de calibração é estendido de 1 para 2 anos.

6 INCERTEZA DA MEDIÇÃO DE VAZÃO COM MEDIDORES VOLUMÉTRICOS

6.1 Descrição do método de medição

O método de medição de vazão consiste na instalação de um medidor volumétrico de vazão (turbina, vortex, ultra-sônico e deslocamento positivo são exemplos típicos dessa tecnologia) em uma tubulação, na qual o fluido está escoando. Esses medidores têm como saída a vazão volumétrica a qual é, dentro de certos limites, independente das propriedades do fluido como densidade e viscosidade.

A figura 6.1 mostra o sistema de medição de vazão a partir da vazão volumétrica “ q_v ”, com as entradas de temperatura “ T ”, da pressão estática “ P_E ” e das equações de estado “ EOS ”. A medição de temperatura “ T ” é separada, para efeito de discriminação da incerteza, em transmissor “ T_T ” e sensor “ T_s ”.

Essas entradas serão usadas para calcular a massa específica “ ρ ” e outras propriedades físicas do fluido, bem como a obtenção da própria vazão mássica “ q_m ”.

A equação da vazão mássica “ q_m ”, Á partir da vazão volumétrica “ q_v ” é dada por:

$$q_m = \rho q_v \quad (6.1)$$

Onde

ρ = massa específica do fluido

6.2 Equação da incerteza da vazão por medidores volumétricos

Na derivação dessa equação da avaliação da incerteza da medição vazão mássica “ q_m ”, a contribuição dos termos de covariância é considerada desprezível.

$$\frac{\delta q_m}{q_m} = \sqrt{\left(\frac{\partial q_m}{\partial q_v} \frac{\delta q_v}{q_v} \right)^2 + \left(\frac{\partial q_m}{\partial \rho} \frac{\delta \rho}{\rho} \right)^2} \quad (6.2.1)$$

Onde

q_v : Vazão volumétrica

ρ : Massa específica

$\frac{\partial q_m}{\partial x}$: Coeficientes de sensibilidade dos componentes.

$\frac{\delta x}{x}$: Incertezas relativas dos componentes

Os coeficientes de sensibilidade estão apresentados na tabela 6.2 e são fatores numéricos obtidos a partir do modelo matemático, os quais refletem o modo com que as variações das entradas se propagam para a saída do modelo. Eles são calculados através das derivadas parciais da equação 6.2.1 em relação aos seus componentes individuais.

A incerteza da massa específica é calculada através das incertezas da pressão estática “ i_{PE} ”, da temperatura “ i_T ” e do fator de compressibilidade “ i_Z ”.

TABELA 6.2: COEFICIENTES DE SENSIBILIDADE “ $\frac{\partial q_m}{\partial x}$ ” E INCERTEZAS “ i ”.		
Vazão Volumétrica	$(\partial q_m / \partial q) = 1$	$\delta dP/dP = i_{dP}$
Massa específica	$(\partial q_m / \partial \rho) \rightarrow$ Via PE, T e Z	$(\delta \rho / \rho) \rightarrow$ Via i_{PE}, i_T e i_Z
Pressão estática	$(\partial q_m / \partial PE) = 1$	$\delta PE / PE = i_{PE}$
Temperatura	$(\partial q_m / \partial T) = 1$	$\delta T / T = i_T$
Fator de compressibilidade	$(\partial q_m / \partial Z) = 1$	$\delta Z / Z = i_Z$

Introduzindo os coeficientes de sensibilidade da tabela 6.2 na equação 6.2.1 e alterando a notação temos:

$$iq_m = \sqrt{iq_v^2 + \left(\frac{iP_E}{2}\right)^2 + \left(\frac{iT}{2}\right)^2 + \left(\frac{iZ}{2}\right)^2} \quad (6.2.2)$$

6.2.1 Incerteza do medidor volumétrico de vazão “iqm”

Presentemente, os medidores mais comuns na medição de gases para transações comerciais são os tipos turbina e ultra-sônico. As incertezas desses medidores, para uso em gás natural são especificadas pela AGA (AGA 7, 1991 e AGA 9, 1998) em 1,0% para turbina e 0,7 % para ultra-sônicos não calibrados.

Baseado em dados publicados (KEGEL, 2004), faremos uso de uma especificação não-calibrada e de uma calibrada para medidores ultrasônicos, conforme detalhada no item A.3.4 “Especificação da incerteza em “% lt” e “LSFM/lt”.

$$iq_m = \delta q_m / q_v = 0,8 \% \text{ lt} \quad \text{para } (3 \leq \text{velocidades} \leq 30) \text{ m/s} \quad (6.2.1.1)$$

e

$$iq_m = \delta q_m / q_v = 0,4 \% \text{ lt} \quad \text{para } (3 \leq \text{velocidades} \leq 30) \text{ m/s} \quad (6.2.1.2)$$

Neste exemplo, se usa um fator de redução da incerteza por calibração o qual decresce á metade da incerteza não calibrada. Esse fator será um parâmetro configurável na planilha de incerteza.

6.2.2 Incerteza da massa específica “ip”.

Na obtenção da vazão mássica de gases através de medidores volumétricos, a massa específica pode ser medida diretamente via densímetros ou calculada por equações de estados, temperatura e pressão.

No primeiro caso, o medidor de massa específica, normalmente usado, é o de “câmara vibrante” no qual a frequência de ressonância do sistema vibrante varia inversamente proporcional Á raiz quadrada da massa específica. A avaliação das incertezas deve ser efetuada pelos seus parâmetros de influência tais como temperatura e pressão e correções residuais.

No segundo caso, o qual seguiremos neste exemplo, a massa específica é obtida através da equação geral dos gases, na qual a massa específica é diretamente proporcional à pressão e inversamente proporcional à temperatura e ao fator de compressibilidade.

Portanto, a incerteza da massa específica será calculada através das incertezas da pressão estática “ i_{PE} ”, da temperatura “ i_T ” e do fator de compressibilidade “ i_Z ”.

Algumas das equações das incertezas, neste exemplo, são as mesmas do exemplo para medidores por pressão diferencial e serão reapresentadas juntamente com a equação do medidor volumétrico na tabela 6.2.2.

<u>TABELA 6.2.2 COMPONENTES DA INCERTEZA DA EQUAÇÃO 6.2.2.</u>			
Incerteza	Componente (Item.)*	Equação ou valor (% It)**	Abrangência
Do Medidor ultra-sônico não-calibrado	De Referência (6.2.1)	$i_{qm} = 0,8 \text{ (} 3 \leq \text{Vel.} \leq 30 \text{) m/s}$	2σ
Do medidor ultra-sônico calibrado		$i_{qm} = 0,4 \text{ (} 3 \leq \text{Vel.} \leq 30 \text{) m/s}$	
Da medição de pressão estática “ i_{PE} ”	De referência (5.4.5.1)	$i_{PER} = 0,2 \text{ (AFN / It)}$	3σ
	Dependência térmica (5.4.5.2)	$i_{PET} = 0,6 \text{ (AFN / It)}$	
	Deriva (5.4.5.3)	$i_{PED} = [1(\text{AFN}/\text{It})(\delta \text{Cal}/5)(\delta T/28)]$	
Do transmissor de temperatura “ i_T ”	De referência (5.4.6.1)	$i_{TTR} = [50 / (\text{It} + 273)]$	
	Dependência térmica (5.4.6.2)	$i_{TTT} = [10 / (\text{It} + 273)] (\delta T/10)$	
	Deriva (5.4.6.3)	$i_{TTD} = [30/(\text{It}+273)](\delta T/10)(\delta \text{Cal}/2)$	
Do sensor de temperatura “ i_{Ts} ”	Intercambiabilidade (5.4.6.4)	$i_{Tsl} = [(0,30+0,005\text{It})/ (\text{It}+273)] \times 100$	
	Deriva (5.4.6.5)	$i_{TsD} = [50/(\text{It}+273)](\delta \text{Cal}/2)$	
Do fator de compressibilidade (5.4.7)		$i_C = 0,1$	2σ

* As referências numéricas entre parênteses são os itens onde as componentes e suas equações são discutidas em detalhes.

**(% It)= (percentagem da leitura).

6.3 Gráficos das incertezas da pressão estática e temperatura

São gráficos das componentes das incertezas implementadas em Excel que serão usados como ferramentas para visualizar o comportamento das componentes ao longo da faixa de uso dos instrumentos de medição.

Como não é possível colocar no papel os gráficos reais em Excel, selecionamos um instantâneo que seja representativo na identificação da contribuição dos componentes-chave.

6.3.1 Instantâneo do gráfico das incertezas da pressão estática.

A figura 6.3.1 é uma réplica da figura 5.4.5.4, já discutida no item 5.4.5.

6.3.2 Instantâneo do gráfico das incertezas da temperatura.

A figura 6.3.2 é uma réplica da figura 5.4.6.6, já discutida no item 5.4.6.

6.4 Planilha de incertezas

As planilhas de incertezas da vazão mássica por medidor volumétrico foram elaboradas em planilhas Excel com 13 colunas e 13 linhas.

Nas colunas se detalham os seguintes elementos:

COLUNA 1 : Fontes de incertezas do medidor volumétrico e das medições

COLUNA 2 : Siglas das componentes dessas fontes.

COLUNA 3 : Nomes dos componentes das fontes de incerteza.

COLUNA 4 : Pontos configuráveis de leitura da pressão estática “ItPe” e temperatura “ItT”.

COLUNA 5 e 6 : Fórmulas e valores da incerteza de entrada.

COLUNA 7 : Distribuições de probabilidade.

COLUNA 8 : Divisores, que são os fatores de abrangência de entrada para converter para 68 % de probabilidade de abrangência as distribuições normais diferentes de 68 % ou ainda transformar outras distribuições, como retangular e triangular em normal-equivalentes com 68% de abrangência.

COLUNA 9 e 10 : Fórmulas e valores dos coeficientes de sensibilidade.

COLUNA 11 : Incertezas de saída @ 68% e seus percentuais de contribuição.

COLUNA 12 : Percentual da contribuição individual das componentes da incerteza de saída em relação a incerteza total.

COLUNA 13 : Repetição, para facilidade de leitura, das siglas das componentes das fontes de incerteza.

Nas linhas são detalhadas 6 fontes de incerteza e seus componentes

LINHAS 1 e 2 : Medição volumétrica calibrada e não calibrada.

LINHAS 3 a 5 : Pressão estática com 3 componentes de incerteza.

LINHAS 6 a 8 : Transmissor de temperatura com 3 componentes de incerteza.

LINHAS 9 e 10 : Sensor de temperatura com 2 componentes de incerteza.

LINHA 11 : Fator de compressibilidade dos gases.

LINHA 12 : Incerteza combinada padrão @ 68% de abrangência.

LINHA 13 : Incerteza expandida @ 95% de abrangência.

6.4.1 Instantâneo 1 da planilha de incertezas.

Medidores de vazão, principalmente para aplicações fiscais, são disponíveis com ou sem a passagem de fluídos pelo medidor para a definição da constante de calibração hidráulica específica da unidade sob teste.

Medidores de vazão são denominados de não-calibrados quando suas incertezas podem ser validadas por inspeções dimensionais, do diâmetro interno por exemplo. O fator de calibração publicado é resultado de calibrações periódicas e históricas ao longo da fabricação do medidor, de maneira semelhante aos coeficientes de descarga em placas de orifício.

Medidores de vazão são denominados calibrados quando suas incertezas são obtidas através da passagem de fluido em cada medidor fabricado. O fator de calibração publicado possui uma dispersão estatística menor que aqueles não-calibrados e, portanto, sua incerteza de referência (de laboratório) possui uma redução de tipicamente 50% em relação ao não calibrado.

A tabela 6.4.1 mostra o instantâneo 1 da planilha de incertezas, com configurações típicas dos parâmetros de influência (“ $\delta T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ” e “ $\delta Cal = 1\text{ ano}$ ”) e :

Vazão volumétrica = não-calibrada (velocidades de 3 a 30 m/s)

Temperatura = 40 °C (100 % da faixa de 10 a 40 °C).

Onde podemos observar a predominância do medidor volumétrico na contribuição da incerteza.

6.4.2 Instantâneo 2 da planilha de incertezas.

A tabela 6.4.2 mostra o instantâneo 2 da planilha de incertezas, a qual tem a mesma configuração da tabela 6.4.1, porém com o medidor volumétrico alterado de calibrado para não calibrado, na qual pode-se observar um decréscimo da predominância do medidor volumétrico na contribuição da incerteza.

TABELA 6.4.1 INSTANTÂNEO 1 DA PLANILHA DE INCERTEZAS
Medidor volumétrico: Não-calibrado
 $\delta T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, δCal (Pe e T) = 1 ano

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	Fonte	Sigla	Componente	Leitura	Incerteza de entrada		Distribuição	Divisor	Coeficiente de sensibilidade		Incerteza de saída @68%	% de contribuição	Sigla
					Fórmula	Valor			Fórmula	Valor			
1	Medição volumétrica não calibrada	qv	Condições de referência	3 m/s	0,8 % lt	0,800	Retangular	1,73	1	1	0,46188	55,76%	qv
2													
3	Pressão estática (kPaA)	iPER	Condições de referência	300	$[0,2(AFN/lt)]\text{ \% lt}$	0,133	Normal	3	1/2	1/2	0,0222	2,68%	iPER
4		iPET	Temperatura ambiente		$[0,6(AFN/lt)(dT/28)]\text{ \% lt}$	0,357	Normal	3	1/2	1/2	0,0595	7,19%	iPET
5		iPED	Deriva		$[1(AFM/lt)(dCal/5)(dT/28)]\text{ \% lt}$	0,952	Normal	3	1/2	1/2	0,1587	19,16%	iPED
6	Transmissor de Temperatura (°C)	iTTR	Condições de referência	20	$[50/(lt + 273)]\text{ \% lt}$	0,171	Normal	3	1/2	1/2	0,0284	3,43%	iTTR
7		iTTT	Temperatura ambiente		$[(10/(lt+1073))(dT/10)]\text{ \% lt}$	0,085	Normal	3	1/2	1/2	0,0142	1,72%	iTTT
8		iTTD	Deriva		$[30/(lt+273)](dCal/2)(dT/10)\text{ \% lt}$	0,128	Normal	3	1/2	1/2	0,0213	2,58%	iTTD
9	Sensor de Temperatura (°C)	iTsl	Intercambiabilidade		$[(0,3+0,005\text{ lt})/(lt+273)]100\text{ \% lt}$	0,137	Normal	3	1/2	1/2	0,0228	2,75%	iTsl
10		iTsD	Incerteza devido a deriva		$[(50/(lt+273))(dCal/2)]\text{ \% lt}$	0,085	Normal	3	1/2	1/2	0,0142	1,72%	iTsD
11	Fator de compressibilidade	iZ	Equação de estado		0,10 %lt	0,100	Normal	2	1/2	1/2	0,0250	3,02%	iZ
12	Incerteza Padrão			$\sqrt{\sum(\text{incertezas de saída @68\%})^2}$							0,50	100,00%	
13	Incerteza Expandida			$\sqrt{\sum(\text{incertezas de saída @68\%})^2} \times t_{W95,95}$							0,99		

TABELA 6.4.2 INSTANTÂNEO 2 DA PLANILHA DE INCERTEZAS

Medidor volumétrico: Calibrado

 $\delta T = 25^{\circ}C$, δCal (Pe e T) = 1 ano

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	Fonte	Sigla	Componente	Leitura	Incerteza de entrada		Distribuição	Divisor	Coeficiente de sensibilidade		Incerteza de saída @68%	% de contribuição	Sigla
					Fórmula	Valor			Fórmula	Valor			
1	Medição volumétrica calibrada	qv	Condições de referência	3 m/s	0,4 % lt	0,400	Retangular	1,73	1	1	0,23094	38,66%	qv
2													
3	Pressão estática (kPaA)	iPER	Condições de referência	300	$[0,2(AFN/lt)] \% lt$	0,133	Normal	3	1/2	1/2	0,0222	3,72%	iPER
4		iPET	Temperatura ambiente		$[0,6(AFN/lt)(dT/28)] \% lt$	0,357	Normal	3	1/2	1/2	0,0595	9,96%	iPET
5		iPED	Deriva		$[1(AFM/lt)(dCal/5)(dT/28)] \% lt$	0,952	Normal	3	1/2	1/2	0,1587	26,57%	iPED
6	Transmissor de Temperatura (°C)	iTTR	Condições de referência	20	$[50/(lt + 273)] \% lt$	0,171	Normal	3	1/2	1/2	0,0284	4,76%	iTTR
7		iTTT	Temperatura ambiente		$[(10/(lt+1073))(dT/10)] \% lt$	0,085	Normal	3	1/2	1/2	0,0142	2,38%	iTTT
8		iTTD	Deriva		$[30/(lt+273)](dCal/2)(dT/10) \% lt$	0,128	Normal	3	1/2	1/2	0,0213	3,57%	iTTD
9	Sensor de Temperatura (°C)	iTsl	Intercambiabilidade		$[(0,3+0,005 lt)/(lt+273)]100 \% lt$	0,137	Normal	3	1/2	1/2	0,0228	3,81%	iTsl
10		iTsD	Incerteza devido a deriva		$[(50/(lt+273))(dCal/2) \% lt$	0,085	Normal	3	1/2	1/2	0,0142	2,38%	iTsD
11	Fator de compressibilidade	iZ	Equação de estado		0,10 %lt	0,100	Normal	2	1/2	1/2	0,0250	4,18%	iZ
12	Incerteza Padrão			$\sqrt{\sum(\text{incertezas de saída @68\%})^2}$							0,29	100,00%	
13	Incerteza Expandida			$\sqrt{\sum(\text{incertezas de saída @68\%})^2} \times t_{W95,95}$							0,58		

6.4.3 Gráfico de barras das contribuintes de incerteza

A figura 6.4.3.1 mostra, na forma de gráfico de barras os valores da 10ª coluna do instantâneo 1 da planilha de incertezas, na qual a contribuição do medidor de vazão volumétrica é predominante.

A figura 6.4.3.2 mostra na forma de gráfico de barras valores da 10ª coluna do instantâneo 1 da planilha de incertezas, na qual a contribuição do medidor de vazão volumétrica diminui sua predominância.

7 CONCLUSÕES

A medida que este trabalho de avaliação metrológica da incerteza na medição foi se desenvolvendo, algumas idéias e conceitos começaram a ficar mais claras, alguns aspectos que Á principio me pareciam significantes, surpreendentemente se revelaram insignificantes e vice-versa.

Somente após dezenas, talvez centenas de vezes que tive que digitar, ler e reler a palavra “incerteza” é que a mesma passou a fazer sentido como o termo a ser usado e não “acurácia”, “precisão” ou outro. Creio, por isso, que é necessário insistir na sua divulgação e no seu uso para que todos os envolvidos nesse campo tenham esse conceito naturalmente aceito.

Da leitura de especificações de vários fabricantes de instrumentos, conclui-se que mesmo pessoas familiarizadas com essas nomenclaturas e fórmulas de declaração de incertezas, podem ter dificuldades em interpretar o emaranhado de informações e que algumas delas, como a deriva ao longo do tempo e probabilidade de abrangência, raramente são declaradas.

Em geral foi possível concluir que:

- Os gráficos e as planilhas de incertezas são essenciais para entender qual o ponto de leitura mínima em que se pode obter o nível de incerteza almejado e intervir no sentido de minimizar a incerteza total.
- A influência da temperatura é desprezível na incerteza da massa específica, porém é significativa na dependência térmica dos instrumentos de medição.
- O intervalo de calibração, determinado pela deriva, desempenha um papel fundamental na incerteza total da medição.

7.1 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Ampliar a abrangência das planilhas incluindo itens configuráveis nas fórmulas de incertezas, como por exemplo, a inclusão da razão entre os limites superiores da faixa máxima e faixa calibrada, a qual é significativa na dependência da deriva. Criar campos nos quais os componentes da incerteza sejam preenchidos em função dos instrumentos selecionados, o que também ajudaria para que algum dado não seja esquecido.

ANEXO A: TERMINOLOGIA EM VAZÃO, TEMPERATURA E PRESSÃO

A.1 Introdução.

As especificações de desempenho de instrumentos de medição de variáveis de processos industriais, tais como vazão, pressão e temperatura possuem formatos e vocábulos específicos tanto em relação à variável medida quanto ao princípio de medição.

O vocabulário em uso corrente nas especificações técnicas dos fabricantes de instrumentos é composto de palavras inconsistentes tais como precisão, repetitividade, linearidade, que são usadas respectivamente no sentido de “faixa de erros” ou “incerteza” e, portanto, deveriam ser respectivamente imprecisão, não-repetitividade e não-linearidade. Apesar de banidas pelo ISO-VIM-1995 (Vocabulário Internacional de Metrologia), esses vocábulos, talvez por resistência cultural, continuam sendo extensivamente usados. Uma possível iniciativa na direção de uma solução seria grafar entre parênteses as palavras recomendadas e com o passar do tempo suprimir os termos banidos. Os países com sistema inglês de medida já usam essa abordagem, grafando a dimensão métrica equivalente entre parênteses como, por exemplo, 0,1” (2,54mm).

Nas décadas de 1990 e 2000, consideráveis esforços foram e continuam sendo feitos para padronizar a terminologia usada em incerteza metrológica. No curso desses esforços, conceitos foram esclarecidos e refinados, termos ambíguos ou vagos foram eliminados ou redefinidos. Como resultado, ficou mais fácil sabermos o significado “exato” de cada termo quando nos deparamos em leituras de trabalhos, guias e normas metrológicas. É necessário que todos os esforços sejam feitos, especialmente na escrita formal, para que se usem os termos adequadamente definidos com o intuito de deixar claro a idéia que o texto quer transmitir e conseqüentemente o entendimento do leitor.

Em 1993, a ISO publicou a primeira edição em inglês do “VIM: Vocabulário Internacional de Metrologia”, no qual são formalmente definidos os principais termos usados em metrologia. Correntemente (2006) a segunda edição em inglês está sendo elaborada.

A.2 Subscritos, símbolos e acrônimos

Esta seção apresenta uma lista de símbolos e define alguns termos e conceitos usados neste trabalho os quais carregam características e significados metrológicos bem específicos que, sem a devida atenção, tornarão a leitura difícil. Cumpre observar que este anexo é apenas um apanhado de uma vasta e freqüentemente incompreendida área e, com o objetivo de facilitar a leitura e posterior consulta a textos em língua inglesa, os termos não facilmente reconhecíveis a partir do seu equivalente em inglês, estão grafados no formato “português (inglês)”.

Esta subseção tem por objetivo servir como fonte de consulta relativa a nomenclatura usada neste trabalho, já que não é viável descrever cada símbolo, subscrito e acrônimo ao longo do texto, À medida que eles aparecem.

A.2.1 Subscritos

Na tabela A.2.1 os quadrados “X” representam símbolos genérico.

<u>TABELA A.2.1</u> LISTA DE SUBSCRITOS	
X₁	Entrada
x₂	Saída
X_C	Calibração.
X_D	Deriva
X_E	Estática
X_L	Linha
X_m	Mássico
X_O	Orifício
X_R	Referência
X_S	Sensor
X_T	Transmissor, Transição
X_V	Volumétrico

A.2.2 Símbolos

Na tabela A.2.2 são indicadas preferencialmente unidades do sistema internacional (SI), seus múltiplos e submúltiplos.

<u>TABELA A.2.2</u> LISTA DE SÍMBOLOS		
Símbolo	Significado	Unidade
δ	Variação/ intervalo	-
ε	Fator de expansão dos gases	-
C	Coeficiente de descarga	-
d	Diâmetro	mm, m
D	Deriva	-
ΔP ou dP	Pressão diferencial	kPa
E	Fator de velocidade de aproximação	-
K	Coeficiente isentrópico	-
It	Leitura	-
n	Nº de desvios padrão	σ
P	Pressão absoluta	kPaA
q	Vazão	Kg/h, m ³ /h
R	Referência	-
T	Temperatura	°C
X	Símbolo genérico	-

A.2.3 Acrônimos

A tabela A.2.3 não é uma lista exaustiva, porém, são mostradas as combinações mais comumente encontradas ao longo desse trabalho.

TABELA A.2.3 LISTA DE ACRÔNIMOS

AFN	Amplitude da Faixa Nominal (Span)
AFNdP	Amplitude da Faixa Nominal da Pressão Diferencial
AFNP_E	Amplitude da Faixa Nominal da Pressão Estática
AFNT	Amplitude da Faixa Nominal da Temperatura
δCal	Intervalo de Calibração
δP_E	Variação da Pressão Estática
δT	Variação da Temperatura
d_I	Diâmetro da Linha
d_o	Diâmetro do Orifício
IdPD	Incerteza da Pressão Diferencial devido Á Deriva
idPP_E	Incerteza da Pressão Diferencial devido Á Pressão Estática
IdPR	Incerteza de Referência da medição de Pressão Diferencial
IdPT	Incerteza da Pressão Diferencial devido Á Temperatura
IP_ED	Incerteza na medição da Pressão Estática devido Á Deriva
IP_ER	Incerteza de Referência na medição da Pressão Estática
IP_ET	Incerteza da Pressão Estática devido Á Temperatura
IT_sD	Incerteza do Sensor de Temperatura devido Á Deriva
iT_sI	Incerteza do Sensor de Temperatura devido Á Intercambiabilidade
iT_tD	Incerteza do Transmissor de Temperatura devido Á Deriva
iT_tR	Incerteza de Referência do Transmissor de Temperatura
iT_tT	Incerteza do Transmissor de Temperatura devido Á Temperatura
LIFM	Limite Inferior da Faixa Máxima (LRL)
LIFN	Limite Inferior da Faixa Nominal (LRV)
LIFNdP	Limite Inferior da Faixa Nominal da Pressão Diferencial
LIFNP_E	Limite Inferior da Faixa Nominal da Pressão Estática
LIFNT	Limite Inferior da Faixa Nominal da Temperatura
LSFM	Limite Superior da Faixa Máxima (URL)
LSFM/AFN	(Limite Superior da Faixa MÁx. / Amplitude da Faixa Nom.)→(URL/Span)
LSFN	Limite Superior da Faixa Nominal (URV)
LSFNdP	Limite Superior da Faixa Nominal da Pressão Diferencial
LSFN_E	Limite Superior da Faixa Nominal da Pressão Estática
LSFNT	Limite Superior da Faixa Nominal da Temperatura
It_dP	Leitura da Pressão Diferencial
It_PE	Leitura da Pressão Estática
It_T	Leitura da Temperatura
q_v	Vazão volumétrica
q_m	Vazão Mássica

A.3 Especificações em pressão, vazão e temperatura.

A.3.1 Especificação da incerteza em “% LSFM”.

A incerteza devido à deriva “iXD” de medidores de pressão é, tipicamente, especificada como uma percentagem fixa do limite superior da faixa máxima (LSFM) e é independente da amplitude da faixa nominal (AFN). A incerteza é mínima no limite superior “LSFM” e máxima no limite inferior “LIFM” da faixa máxima, conforme a [figura A.3.1](#).

A.3.2 Especificação da incerteza em “% AFN”

As incertezas de referência “iXR” e dependência térmica “iXT” dos medidores de pressão e temperatura, tipicamente, são especificadas como uma percentagem fixa da amplitude da faixa nominal (AFN) e são independentes, dentro de certos limites, do limite superior da faixa máxima (LSFM). A incerteza é mínima no limite superior “LSFN” e máxima no limite inferior “LIFN” da faixa nominal, conforme mostrada na [figura A.3.2](#).

A.3.3 Especificação da incerteza em “% It” + “ % LSFM”

Os medidores de vazão, em geral, especificam sua incerteza de referência como uma combinação da leitura “It” e do limite superior da faixa máxima “LSFM”, com o objetivo de diminuir a taxa de variação do acréscimo da incerteza com o decréscimo da leitura, conforme é mostrado na [figura A.3.3](#).

A.3.4 Especificação da incerteza em “% It” e “% It_T”

Modernos medidores de vazão especificam sua incerteza de referência em duas faixas, separadas por uma leitura de transição “It_T”. Acima dessa transição a incerteza é dada em % It e abaixo, em % It_T. Presentemente, esse valor de transição é em torno de 1/10 da vazão máxima e é dependente de algum parâmetro, como instabilidade de zero em medidores Coriolis ou velocidade em medidores magnéticos, conforme mostrado na [figura A.3.4](#).

A.4 TERMINOLOGIA

Amplitude da Faixa Máxima (Maximum Span) “AFM”

Diferença algébrica entre os extremos superior e inferior da faixa máxima de medição. Esse valor é específico para cada tamanho de sensor.

Amplitude da Faixa Nominal (Span) “AFN”:

Diferença algébrica entre os extremos superior e inferior da faixa de medição. Particularmente para faixas cujo extremo inferior é zero, como é caso da vazão e pressão diferencial, a faixa é numericamente igual ao extremo superior da faixa.

Erro:

Diferença entre o valor medido e o valor verdadeiro. Como o erro depende do valor verdadeiro, o mesmo também não é exatamente conhecido, mas é possível estimar a sua “incerteza”, ou seja, o intervalo dos prováveis valores dos erros com alguma probabilidade de abrangência (normalmente 95%).

Exatidão (Accuracy):

Nas folhas técnicas de dados, normalmente, significa “inexatidão” mas deve ser interpretado como incerteza. Quando um fabricante especifica “exatidão de 1%”, significa na verdade uma exatidão de 99%, com alguma probabilidade de abrangência (normalmente 95%). Quando a distribuição de frequência não é especificada, supõe-se, na falta de informação, uma distribuição retangular.

Faixa (Range):

Conjunto dos pontos que cobrem, com alguma folga a variável medida. Um medidor de pressão diferencial, por exemplo, com uma faixa de 200 a 3000 mH₂O.

Fórmula de Welch-Satterthwaite:

Fórmula usada para determinar o grau de liberdade efetivo “ v_{ef} ” de varias incertezas a partir da incerteza padrão combinada “ u_C ”, e das incertezas individuais “ u_i ” com seus respectivos graus de liberdade “ v_i ”. Usado na determinação do fator de abrangência “ k ” (“ t ” de Student).

$$v_{ef} = \frac{u_C^4}{\sum \frac{u_i^4}{v_i}}$$

Histerese

Desvio máximo entre as medidas na ascendente e descendente. Especificados em sensores que deslocam mecanicamente para efetuar a medida.

Incerteza da Medição (Faixa de Erros Prováveis):

Parâmetro que determina a faixa dos valores dos erros com alguma probabilidade de abrangência (normalmente 95%).

Linearidade

Desvio máximo das medidas em relação a melhor reta.

Medição (measurement):

Processo experimental de obtenção da magnitude de uma grandeza. Composto de uma ou mais medidas ou observações. Observar que, geralmente, em inglês usa-se a palavra “measurement” tanto com o significado de medida como de medição, dependendo do contexto.

Medida ou Leitura “It” (Reading, Rate):

Ponto da faixa no qual a medida ou observação é efetuada, podendo ser qualquer ponto ao longo da faixa.

Mensurando:

Variável ou grandeza medida

Método de medição (ISO-VIM , Draft, 2004):

Seqüência genérica de operações, em geral, sem detalhes suficientes para executar a medição.

Nível de Confiança

Nomenclatura, usualmente em textos de estatística, para termo metrológico de probabilidade de abrangência

Planilhas de Incerteza (Uncertainty Budget):

Planilhas nas quais são listados e calculados os elementos essenciais da avaliação de incerteza, como:

Componentes de entrada:

- Fontes.
- Valores e coeficientes de sensibilidade
- Probabilidade: Distribuição e abrangência

Saída do modelo matemático.

- Incertezas padrão combinada das entradas
- Incerteza expandida e fator de abrangência.

Precisão = Repetitividade

Probabilidade de Abrangência (Coverage probability, Confidence Level):

É a probabilidade percentual dentro da qual se situarão as medidas ou os erros de medição. Uma vazão de $100\text{m}^3/\text{h} \pm 1\%$ com probabilidade de abrangência de 95%, significa que: 95 de 100 observações estarão entre 99 e 101, ou ainda que 95 de 100 observações estarão com erros dentro de 1%.

Procedimento de medição (ISO-VIM, 2004):

Seqüência detalhada de operações, segundo um método, que permite a execução de uma medição sem informações adicionais.

Processo de Medição:

Conjunto dos procedimentos, operadores e instrumentos usados para determinar o valor numérico da variável medida.

Repetibilidade (repetitividade) ou precisão:

Dispersão das medidas em torno da média, mantendo inalteradas as condições de medição. O intervalo de tempo entre as medidas deve ser curto em relação à estabilidade do medidor sob teste.

Valor verdadeiro:

Valor determinado por um processo perfeito de medição. Como todo o processo de medição tem algum grau de imperfeição, então o valor verdadeiro nunca é exatamente conhecido. Este valor pode aproximadamente obtido através de um padrão de referência com incerteza varias vezes menor que a incerteza do instrumento sob medição. Na área de vazão, tal medidor, geralmente possui incerteza apenas duas ou três vezes menor.

ANEXO B: MEDIDORES VOLUMÉTRICOS E POR PRESSÃO DIFERENCIAL

B.1 Classificação dos medidores de vazão

A figura B.1.1, mostra uma ampla classificação dos medidores de vazão, ressaltando em tracejado as técnicas-escopo desse trabalho que são por pressão diferencial (placa de orifício) e volumétricos.

A figura B.1.1, divide os medidores de vazão em quatro grandes classes, que cobrem a maioria dos tipos de medidores usados industrialmente, dentre ao quais citamos aqueles cuja incerteza é objeto desse trabalho

Por pressão diferencial

A placa é um exemplo típico dessa classe. Sua incerteza é detalhada no capítulo 5 e seu princípio de funcionamento bem como a equação que relaciona a vazão com a queda de pressão é deduzida neste anexo.

Volumétricos

Turbinas, Ultra-sônicos e Vórtices, são exemplos típicos dessa classe. Suas incertezas são detalhadas no capítulo 6 e seu princípio de funcionamento é descrito neste anexo.

B.2 Definições de vazão

B.2.1 Vazão Volumétrica

A vazão volumétrica, usualmente em m³/h, é definida como a taxa de variação do volume no tempo. É normalmente obtida pelo produto da velocidade “V” do fluido pela Área interna “A” da tubulação.

$$q = vA \quad \text{Vazão no SI} \quad \left[\left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \text{m}^2 \right] = \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad (\text{B.2.1})$$

A vazão volumétrica de gases é usada somente para o cálculo da velocidade a qual será usada para determinar Número de Reynolds, perda de carga e velocidade do fluido.

B.2.2 Vazão Volumétrica Normal

A vazão volumétrica normal “q_N”, usualmente Nm³/h, é definido a taxa de variação do volume normal no tempo e é normalmente obtida pela razão entre a densidade e a densidade normal.

$$q_N = q \left(\frac{\rho}{\rho_N} \right) = \left(\frac{P}{P_N} \right) \cdot \left(\frac{T_N}{T} \right) \cdot \left(\frac{Z_N}{Z} \right) \quad (\text{B.2.2})$$

A vazão normal “q_N” é uma medida da variação da quantidade de matéria dos gases ao longo do tempo. A mesma pode ser obtida a partir da vazão volumétrica “q” e da razão entre a densidade “ρ” e a densidade normal “ρ_N”.

As razões das densidades podem ser obtidas conhecendo-se a pressão, a temperatura e o fator de compressibilidade “P, T e Z” e seus correspondentes normais “P_N, T_N e Z_N”, conforme a equação B.2.2.

Para mistura de gases como gás natural, por exemplo, a densidade e a densidade normal (na condição normal de temperatura e pressão) e consequentemente a vazão e a vazão normal é dependente também da composição dos gases.

B.2.3 Vazão Mássica

A vazão mássica " q_m ", usualmente kg/h, é uma medida da variação quantidade de matéria dos fluidos ou mistura de fluidos ao longo do tempo. Relaciona-se com a vazão volumétrica " q " através da densidade " ρ ".

$$q_m = \rho q$$

(B.2.3)

B.3 Medidores volumétricos de vazão

A seguir é apresentada uma descrição sumaria dos medidores de vazão tipo deslocamento positivo, turbina, vortex e ultra-sônico, ao quais se enquadram no escopo desse trabalho .

B.3.1 Medidores volumétricos de vazão por deslocamento positivo

Medidores nos quais pacotes de fluidos com volumes fixos acionam sucessivamente um mecanismo de medição e contagem. A frequência de rotação do mecanismo pode ser diretamente totalizada ou transformada em vazão volumétrica instantânea. A [figura B.3.1](#) mostra três dos tipos mais comuns desses medidores.

B.3.2 Medidor volumétrico de vazão tipo Turbina

Medidores cuja vazão volumétrica é proporcional a frequência de rotação de um rotor posicionado no percurso do fluido dentro de um tubo

A rotação do rotor é transmitida por meios mecânicos ou elétricos para um contador de pulsos ou uma unidade eletrônica transformada a frequência em sinal digital ou analógico.

A figura B.3.1 mostra a construção típica de uma turbina.

B.3.3 Medição volumétrica de vazão tipo Vortex

Medidores nos quais uma haste anti-aerodinâmica é colocada de forma a obstruir parcialmente o escoamento de um fluido, ocorrendo a formação de vórtices cuja frequência “f” é proporcional a velocidade “v” do fluido e também da forma e largura da haste representada pelo número de Strouhal “St”.

$$f = St \cdot V/d$$

Transdutores (piezelétricos, capacitivos e outros) são usados para transformar os esforços mecânicos exercidos sobre a haste em sinais elétricos de frequência.

A figura B.3.2 mostra que em baixas velocidades as linhas de fluxo contornam a haste, porém À medida que a velocidade aumenta acima de um determinado limite, a linhas se descolam do canto da haste e formam vórtices

alternados e gerando esforços mecânicos correspondentes.

Cada pulso gerado é corresponde a um determinado volume fixo independente dentro de certos limites das propriedades e da fase do fluido medido.

B.3.4 Medição volumétrica de vazão tipo Ultra-sônico

São medidores cuja velocidade do fluido é obtida através da reflexão (Efeito Doppler) ou retardo (tempo de trânsito) de sinais ultra-sônicos emitidos através do fluido.

A figura B.3.3 mostra os emissores e receptores de ondas ultra-sônicas em medidores mono-feixe e duplo-feixe.

Os medidores multi-feixes (até 4 feixes) são usados para aumentar a confiabilidade, compensar efeitos de distorção no perfil de velocidades e diminuir a incerteza da medição.

B.3.4.1 Medição volumétrica de vazão tipo Ultra-sônica por efeito Doppler

Nesses medidores a velocidade do fluido é proporcional à variação de frequência aparente, produzida pela reflexão de ultra-sons nas partículas móveis do fluido em movimento relativo ao emissor e ao receptor.

Os sinais de ultra-som são refletidos pelas partículas do fluido e têm sua frequência alterada proporcionalmente a velocidade do fluido. Limitados a fluidos que contêm partículas capazes de refletir ondas acústicas.

B.3.4.2 Medição volumétrica de vazão Ultra-sônica por tempo de trânsito

Medidores nos quais transdutores transmitem e recebem alternadamente trens de pulsos ultra-sônicos. A velocidade/vazão do fluido é proporcional à diferença entre os tempos de propagação no sentido do fluxo e no contra-fluxo. Limitados a fluidos limpos (sem partículas sólidas) e sem bolhas, pois esses elementos refletem as ondas e interferem na medida.

B.4 Medição de vazão por pressão diferencial

B.4.1 Equação de Bernoulli na medição de vazão por pressão diferencial

A equação da vazão por pressão diferencial é obtida a partir da Equação de Bernoulli, onde num escoamento de fluidos ideais (incompressíveis, invíscidos e sem perdas) a somatória das energias (cinética, potencial e de pressão) é constante ao longo de uma tubulação.

Considerando um fluido escoando numa tubulação com um estrangulamento longo e suave como o da figura B.4.1.1 e aplicando a Equação de Bernoulli temos:

$$\frac{v_D^2}{2g} + \frac{P_D}{\gamma} = \frac{v_d^2}{2g} + \frac{P_d}{\gamma} \quad (\text{B.4.1.1})$$

Isolando as velocidades e chamando a pressão diferencial " $P_D - P_d$ " de ΔP , temos:

$$\frac{v_d^2 - v_D^2}{2g} = \frac{P_D - P_d}{\gamma} = \frac{\Delta P}{\gamma} \quad (\text{B.4.1.2})$$

Donde obtemos a pressão diferencial em função do peso específico e das velocidades na linha e no estrangulamento.

$$\Delta P = \frac{\gamma}{2g} (v_d^2 - v_D^2) \quad (\text{B.4.1.3})$$

Expressando " v_d " em função de " v_D ", através da lei da continuidade ($V_1 A_1 = V_2 A_2$) temos:

$$v_d = v_D \left(\frac{A_D}{A_d} \right) = v_D \left(\frac{D}{d} \right)^2 \quad (\text{B.4.1.4})$$

Donde obtemos a equação teórica da vazão mássica por pressão diferencial.

$$q_m = \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2 \rho \Delta P}{1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4}} \quad (\text{B.4.1.5})$$

B.4.2 Correções da equação teórica de Vazão por pressão diferencial

Varias correções são necessárias para compensar efeitos da viscosidade dos líquidos, expansão dos gases e geometrias não considerados da obtenção da pressão diferencial pela equação de Bernoulli.

B.4.2.1 Coeficiente de descarga

É uma correção empírica do desvio entre a vazão real e a vazão teórica. A mesma depende da razão dos diâmetros “ β ”, número de Reynolds “Re” e da posição das tomadas de pressão.

$$C = \frac{q}{q_T} \quad (B.4.2.1)$$

Onde

q = vazão real

q_T = velocidade teórica.

A equação do coeficiente de descarga foi obtida a partir da regressão de milhares de dados coletados em diversos países no decorrer do século vinte.

B.4.2.2 Fator de velocidade de aproximação “E”

É uma correção do aumento da velocidade no estrangulamento a qual depende da geometria da obstrução e do “ $\beta=d/D$ ” (relação dos diâmetros obstrução-tubulação).

$$E = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^4}} \quad (B.4.2.2)$$

B.4.2.3 Fator de expansão dos gases “ ϵ ”

Correção do efeito da compressibilidade dos gases a qual depende da geometria, do expoente isentrópico e da razão entre a pressão diferencial e a pressão de entrada. Apesar de afetar o coeficiente de descarga esse fator é, usualmente, introduzido separadamente na equação.

B.4.2.4 Equação corrigida da vazão de fluidos por pressão diferencial

Introduzindo os coeficientes de correção “C”, “E” e “ε” na equação A.4.1.6, temos:

A equação da vazão mássica “qm”, por pressão diferencial é:

$$q_m = KCE\varepsilon\sqrt{\Delta P\rho} \quad (\text{B.4.2.4})$$

Onde

K= Constante de proporcionalidade

C= Coeficiente de descarga

E = Fator de velocidade de aproximação.

ε = Fator de expansão dos gases.

ΔP = Pressão diferencial

ρ = massa específica

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 ABERNETHY R., BENEDICT, R., DOWDELL, R., **ASME Measurement Uncertainty**, 1983.
- 2 ABERNETHY R., RINGHISER, B., **The History And Statistical Development Of The New ASME-SAE-AIAA-ISO Measurement Uncertainty Methodology** July, 1985
- 3 ABERNETHY, R.,B., ET AL, **Handbook Of Uncertainty In Gas Turbine Measurements**, Report USAF Arnold Engineering Development Center, Report AEDC-Tr-73-5 Feb 1973.
- 4 AGA 7, **Measurement of Fuel Gas by Turbine Measurement**, American Gas Association Report No 7, Washington, DC, USA, 1991.
- 5 AGA 9, **Measurement of Gas by Multipath Ultrasonic Meter**, American Gas Association Report No 9, Washington, DC, USA, 1998.
- 6 ANSI/ASME PTC 19.1, **Performance Test Codes Supplement on Instruments and Apparatus, Part 1, Measurement Uncertainty**, American Society of Mechanical Engineers, New York, NY, USA, 1985
- 7 ANSI/ASME PTC 19.3, **Performance Test Codes Supplement on Instruments and Apparatus, Part 3, Temperature Measurements**, American Society of Mechanical Engineers, New York, NY, USA, 1974.
- 8 EA-4/02, **Expressão da Incerteza de Medição na Calibração**, Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial, 1999
- 9 GOLDEN, R., **Semi scale Uncertainty Report: Methodology**, Prepare for U.S. Nuclear Regulatory Mission, Nureg/Cr – 2459, Sept 1982
- 10 HERSEY, M., **Development Of The Theory Of Errors With Reference To Economy Of Time British Association For The Advancement Os Service** – 1913 Reprinted By Churchill Eisenhart, NBS Journal Of Research, 1965.
- 11 INC-01, **Expression of the Experimental Uncertainties**, International Bureau of Weights and Measures, 1981.
- 12 INMETRO-VIM, **VocÁbulario Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia**, 3ª edição, Rio de Janeiro, 2003.
- 13 ISO 5167-1, **Measurement of Fluid Flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full – Part 1: General principles and requirements**, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2003.
- 14 ISO 5167-2, **Measurement of Fluid Flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full – Part 2: Orifice plates**, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2003.
- 15 ISO 5168, **Measurement of fluid flow – Procedures for the evaluation of uncertainties**, International Organization for Standardization, 2nd edition, Geneva, Switzerland, 2005.

- 16 ISO 5168: **Measurement of Fluid Flow, Estimation of Uncertainty of Flow rate Measurement**, 1978.
- 17 ISO-GUM, **Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement**, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 1995.
- 18 ISO-VIM, **International Vocabulary of General and Fundamental Terms in Metrology**, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 1993.
- 19 ISO-VIM, Draft, **International Vocabulary of General and Fundamental Terms in Metrology**, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2004.
- 20 KEGEL, T., **Uncertainty Analysis of Turbine and Ultrasonic Meter Volume Measurements - Part 2, Advanced Topics**, Colorado Engineering Experiment Station, Inc., Nunn, Co, USA, 2004.
- 21 KLINE, S., MCCLINTOCK, F., **Describing Uncertainties in Single Sample Experiments**, Mechanical Engineering Volume 75, 1953.
- 22 KU, H., **Precision Measurement and Calibration**, NBS Special Publication 300 Volume 1 1969
- 23 NBS 300, **Postscript To Special Publication 300**, 1980.
- 24 NIST NT 1294, **Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Result**, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, USA, 1994.
- 25 UKAS M3003, **The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement**, United Kingdom Accreditation Services, 1st Edition, England, 1997.