



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

- Mestrado - Doutorado

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE
CALIBRAÇÃO ASSISTIDA POR COMPUTADOR
PARA INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO DE
TEMPERATURA E PRESSÃO EM ESTAÇÕES DE
MEDIÇÃO DE GÁS NATURAL**

por

Gerizaldo Cavalcanti Gomes Maia

*Dissertação apresentada à Universidade Federal da
Paraíba para obtenção do Grau de Mestre*

GERIZALDO CAVALCANTI GOMES MAIA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE CALIBRAÇÃO
ASSISTIDA POR COMPUTADOR PARA INSTRUMENTOS DE
MEDIÇÃO DE TEMPERATURA E PRESSÃO EM ESTAÇÕES DE
MEDIÇÃO DE GÁS NATURAL**

Dissertação apresentada ao curso de
Pós-Graduação em engenharia
mecânica da Universidade Federal da
Paraíba, em cumprimento às exigências
para obtenção do Grau de Mestre

Orientador: Professor Doutor José Felício da Silva

TERMO DE APROVAÇÃO

GERIZALDO CAVALCANTI GOMES MAIA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE CALIBRAÇÃO ASSISTIDA POR COMPUTADOR
PARA INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO DE TEMPERATURA E PRESSÃO EM ESTAÇÕES DE
MEDIÇÃO DE GÁS NATURAL**

Dissertação aprovada como requisito para obtenção do grau de mestre no Programa de Mestrado em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba, pela seguinte banca examinadora:

Orientador: Prof. Dr. José Felício da Silva
Departamento de Engenharia Mecânica – UFPB

Examinador Interno: Prof. Dr. João Bosco de Aquino e Silva
Departamento de Engenharia Mecânica – UFPB

Examinador Externo: Prof. Dr. Glauco Fontgalland
Departamento de Engenharia Elétrica – UFCG

João Pessoa, _____ de _____ de 2003

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família, em especial à minha avó, Francisca Ilza Maia, que me forneceu a base moral e os meios para sempre buscar evoluir intelectualmente

Dedico também a Andréa Diniz, pelo seu insistente apoio, sem o qual esse título jamais teria sido conquistado

Finalmente, porém não menos importante, dedico ao querido Professor Doutor José Felício da Silva, por guiar meus passos nesse trabalho com dedicação e profissionalismo, e por sua influência positiva em minha carreira

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, professor José Felício da Silva, pela competência, dedicação e paciência ao longo dos anos em que orientou minha carreira acadêmica desde o final da graduação até a conclusão do mestrado e por, através de caminhos explicados apenas por uma força superior, influenciar decididamente a minha carreira profissional

A Universidade Federal da Paraíba, pela oportunidade de ingressar nesse programa de pós-graduação.

Ao CTGÁS, pelo apoio do seu corpo técnico e oportunidade fazer uso de suas instalações e laboratórios, fato imprescindível para a conclusão deste trabalho.

Ao CNPq, pelo suporte financeiro que me permitiu dedicação exclusiva para a elaboração dessa dissertação

A todos os demais que de algum modo contribuíram para esse trabalho.

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE CALIBRAÇÃO ASSISTIDA POR COMPUTADOR PARA INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO DE TEMPERATURA E PRESSÃO EM ESTAÇÕES DE MEDIÇÃO DE GÁS NATURAL

RESUMO

O presente trabalho visou o desenvolvimento de um sistema de calibração de instrumentos de medição de pressão e temperatura assistida por computador. A utilização deste sistema objetivou facilitar o trabalho do pessoal envolvido nas operações de calibração em estações de medição de gás natural, pois o preenchimento dos dados de identificação dos instrumentos é automático após seleção, sendo solicitado ao usuário apenas a inserção das indicações obtidas pelo instrumento padrão e pelo instrumento calibrado em toda a faixa de medição. As fontes de incerteza do tipo B, obtidas a partir das características dos instrumentos utilizados durante o processo de calibração bem como do histórico de calibração, são automaticamente determinadas a partir da consulta a um banco de dados. A incerteza do tipo B da calibração, que é o resultado da combinação de todas as fontes de incerteza do tipo B obtidas, é combinada com a incerteza do tipo A obtida através da análise estatística dos resíduos da função linear de melhor ajuste entre as indicações do instrumento a ser calibrado e respectivos valores verdadeiros convencionais. Os resultados finais do processo, sintetizados no relatório de calibração emitido automaticamente, são os coeficientes lineares da função de melhor ajuste e o intervalo de confiança associado a este ajuste, sendo este combinado com a incerteza do tipo B, relacionado a um nível de confiança estabelecido. Além das informações estatísticas, são apresentados parâmetros operacionais, tais como data de calibração, equipamentos utilizados, não conformidades detectadas, dentre outros armazenados no banco de dados para consulta e análise posterior.

**DEVELOPMENT OF COMPUTER AIDED CALIBRATION
SYSTEM FOR PRESSURE AND TEMPERATURE MEASUREMENT
INSTRUMENTS AT NATURAL GAS MEASUREMENT STATIONS**

ABSTRACT

The present work objectives were developing a computer-aided system for pressure and temperature measuring instruments calibration. This system's focus was easing the work of personnel involved in calibration operations in natural gas measuring stations by automatic filling of instruments identification data through automatic selection, being requested to the user only the insertion of measurements obtained by standard instrument and the calibrated instrument throughout the measuring range. The sources of uncertainty type B, obtained from the characteristics of the instruments used during the calibration process and the calibration history are automatically determined from a query to the database. The type B calibration uncertainty, which is the result of combining all the type B uncertainty sources, is combined with the type A uncertainty obtained by statistical analysis of the residuals of the best fit linear function between the measurement instrument to be calibrated and their true conventional values. The final results of the process, which are automatically reported in output calibration report, are the linear coefficients of best fit function and the confidence interval associated with this adjustment, which is combined with the type B uncertainty, related to a confidence level set. Furthermore, other information presented are operating parameters such as calibration date, equipment used, detected nonconformities, among other information stored for further query and analysis.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	INTRODUÇÃO.....	12
CAPÍTULO 2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	14
2.1	MEDIÇÃO	14
2.2	ERROS E INCERTEZA.....	14
2.3	ANÁLISE ESTATÍSTICA DO RESULTADO DA MEDIÇÃO.....	15
2.4	HISTOGRAMAS E DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIAS.....	16
2.5	ESTIMATIVA DO VALOR VERDADEIRO DO MENSURANDO	17
2.6	MEDIDAS DE DISPERSÃO.....	18
2.7	DISTRIBUIÇÃO NORMAL.....	19
2.7.1	INTERVALO DE CONFIANÇA PARA A MÉDIA DE UMA DISTRIBUIÇÃO NORMAL.....	19
2.8	DISTRIBUIÇÃO RETANGULAR.....	20
2.8.1	INTERVALO DE CONFIANÇA PARA A MÉDIA DE UMA DISTRIBUIÇÃO RETANGULAR.	21
2.9	DISTRIBUIÇÃO T DE STUDENT	21
2.9.1	INTERVALO DE CONFIANÇA PARA A MÉDIA DE UMA DISTRIBUIÇÃO T DE STUDENT.....	22
2.10	INCERTEZA DE MEDIÇÃO	23
2.10.1	COMBINAÇÃO DE INCERTEZAS NÃO CORRELACIONADAS	24
2.10.2	GRAUS DE LIBERDADE EFETIVOS.....	25
2.10.3	EXPANSÃO DE INCERTEZAS	26
2.10.4	INFLUÊNCIA DA INCERTEZA NO RESULTADO DE UMA MEDIÇÃO ...	26
2.11	AJUSTE DE CURVAS ATRAVÉS DO MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS	27
2.11.1	INCERTEZA PADRÃO DO AJUSTE LINEAR.....	28

1.1.1	COMBINAÇÃO DAS FONTES DE INCERTEZA NÃO CORRELACIONADAS .	29
	
	CAPÍTULO 3 MÉTODOS DE MEDIÇÃO DAS GRANDEZAS RELACIONADAS À	
	MEDIÇÃO DE GÁS NATURAL	31
3.1	MEDIÇÃO DE TEMPERATURA.....	31
3.1.1	A ESCALA TERMODINÂMICA DE TEMPERATURA	31
3.1.2	ESCALA INTERNACIONAL DE TEMPERATURA DE 1990.....	32
3.1.3	MEDIÇÃO DE TERMORRESISTÊNCIAS DE PLATINA	41
3.2	MEDIÇÃO DE PRESSÃO.....	41
3.3	FATOR DE COMPRESSIBILIDADE.....	42
3.3.1	EQUAÇÕES DO VIRIAL	42
3.3.2	RELATÓRIO AGA-8	43
3.4	MEDIÇÃO DE VAZÃO	44
3.4.1	TIPOS DE ESCOAMENTO INTERNO.....	44
3.4.2	RETIFICAÇÃO E CONDICIONAMENTO DE VAZÃO	46
3.4.3	MEDIDORES DE VAZÃO.....	47
	CAPÍTULO 4 CALIBRAÇÃO DAS GRANDEZAS DE ENTRADA	50
4.1	CALIBRAÇÃO DE TRANSMISSORES DE TEMPERATURA	50
4.1.1	FONTES DE INCERTEZA.....	50
4.1.2	CALIBRAÇÃO DE TRANSMISSOR DE TEMPERATURA E DETERMINAÇÃO	
	DE INCERTEZAS.....	57
4.2	CALIBRAÇÃO DE ELEMENTOS TRANSMISSORES DE PRESSÃO ESTÁTICA	
	E DIFERENCIAL.....	59
	CAPÍTULO 5 RESULTADOS	62
5.1	SISTEMA DE INFORMAÇÃO	62
5.1.1	BANCO DE DADOS	62
5.1.3	PLANILHA DE CALIBRAÇÃO	62
5.1.4	EXEMPLO DE CALIBRAÇÃO PARA UM TRANSMISSOR DE	
	TEMPERATURA.....	66
	CAPÍTULO 6 DISCUSSÃO E CONCLUSÕES	69
	CAPÍTULO 7 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	71
	REFERÊNCIAS	72

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de erros de medição	15
Figura 3 – Histograma (DIETRICH, 1991).....	16
Figura 4 - Distribuição de probabilidades populacional (DIETRICH, 1991)	17
Figura 5 - Distribuição retangular (DIETRICH, 1991).....	20
Figura 6 - Ciclo de Carnot (SONNTAG, et al., 1998)	32
Figura 7 - Incerteza associada à determinação do fator de compressibilidade	44
Figura 8 - Regimes de escoamento.....	45
Figura 9 - Tipos de linearizadores de vazão: (a) Etoile; (b) Tube bundle; (c) Box;.....	46
Figura 10 - Condicionador de vazão Zanker	47
Figura 11 - Medidor tipo turbina (BAKER, 2000).....	48
Figura 12 - Determinação da não uniformidade radial do banho térmico, com distribuição espacial de termoresistências no banho	52
Figura 13 - Determinação da não uniformidade axial do banho térmico com termoresistências posicionadas à diferentes profundidades de banho.....	54
Figura 14 - Esquema para calibração de pressão em campo.....	59
Figura 15 - Tela inicial do programa.....	63
Figura 16 - Formulário para seleção dos equipamentos.....	64
Figura 17 - Planilha de calibração	65
Figura 18 - Seleção dos padrões utilizados na calibração	66
Figura 19 - Indicações do padrão e instrumento	67
Figura 20 - Resultado da calibração em cada nível.....	67
Figura 21 - Equação de ajuste para toda a faixa de medição	68
Figura 22 - Incerteza padrão combinada do ajuste.....	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Pontos fixos da ITS-90 (MANGUN & FURUKAWA, 1990).....	34
Tabela 2 - Constantes utilizadas nas funções de referência (MANGUN & FURUKAWA, 1990).....	36

RELAÇÃO DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

p - Probabilidade

$f(x)$ – Função densidade de probabilidade

$p(a,b)$ – Probabilidade calculada entre os limites de integração (a,b)

$E(X)$ – Estimativa do valor verdadeiro do mensurando, ou esperança matemática

\bar{X} – Média aritmética

$s(x)$ – Desvio padrão amostral

σ – Desvio padrão populacional de uma função densidade de probabilidade conhecida à priori

μ – Esperança matemática de uma função densidade de probabilidade conhecida à priori,

z – Variável aleatória de uma distribuição normal reduzida ($E(z) = 0$ e $\sigma_z = 1$)

Z_c – Limite de integração da distribuição normal reduzida

a, b – Limites de integração da distribuição de probabilidades retangular

N – Número de amostras aleatórias

t – Variável aleatória da distribuição t de student

v – Graus de liberdade da distribuição t de student ($v = N-1$)

t_c – Limite de integração de uma distribuição t de student $t(v)$

$s_{\bar{x}}$ – Desvio padrão amostral da média

$u(x_i)$ – Incerteza padrão da estimativa da grandeza X_i

c_i – Coeficiente de sensibilidade $(\frac{\partial y}{\partial x_i})$

$u_c(y)$ – Incerteza padrão combinada de todas as grandezas X_i

$s_{\bar{y}}$ – Desvio padrão amostral do mensurando

v_{eff} – Graus de liberdade efetivos da distribuição de probabilidades combinada de múltiplas fontes de incerteza

α – Vetor contendo os parâmetros lineares do ajuste mais verossímil pelo método dos mínimos quadrados

$\sigma_y(x)$ – Incerteza do ajuste mais verossímil

ITS-90 – Escala internacional de temperatura de 1990

T_{90} – Temperatura (em Kelvin), definida pela escala internacional de temperatura de 1990

t_{90} – Temperatura (em °C), definida pela escala internacional de temperatura de 1990

SPRT – Termômetro de resistência de platina padrão. Equipamento com maior exatidão e menor incerteza que termômetros de resistência de platina convencionais, calibrados em conjuntos específicos de pontos fixos de medição definidos pela ITS-90, podendo ser utilizado para a determinação da temperatura da ITS-90 entre 13,8033K e 1234,93K

CVGT – Termômetro de gás de hélio. Equipamento utilizado para determinação da temperatura da ITS-90 entre 3,0K e 24,5561K

$R(273,16)$ – Resistência do SPRT medida no ponto triplo da água

$R(T_{90})$ - Resistência do SPRT medida na temperatura T_{90}

$W(T_{90})$ - Razão de resistências para a temperatura T_{90} ($W(T_{90}) = R(T_{90}) / R(273,16)$)

$W_r(T_{90})$ – Valor de referência da razão de resistências para a temperatura T_{90} , utilizado na ITS-90

$\Delta W(T_{90})$ – Diferença entre a razão de resistências obtida com o SPRT e a razão de resistências de referência da ITS-90

$A_0, A_i, B_0, B_i, C_0, C_i, D_0, D_i$ – Constantes utilizadas nas equações para determinação de $W_r(T_{90})$ e sua função inversa, $T_{90}(W_r)$

P - Pressão do gás (Pa);

T - Temperatura (K);

\bar{v}, v - Volume específico em base molar e mássica;

\bar{R}, R - Constante universal dos gases e constante particular.

Z – Fator de compressibilidade do gás real

B, C, D, \dots - Segundo, terceiro, quarto, ... coeficientes do Virial para uma mistura de gases reais

y - Fração molar

i, j, k - Índices que representam as espécies químicas

AGA – American Gas Association. Entidade representativa dos fornecedores de gás natural dos EUA

Re – Número de Reynolds

ρ - Densidade do fluido

\bar{V} - Velocidade média do perfil de velocidades

D - Diâmetro da tubulação

μ - Viscosidade dinâmica do fluido

K - Fator do medidor tipo turbina, definido como a relação entre a vazão volumétrica e a frequência de pulsos gerada pelo medidor

F - Frequência de pulsos do medidor tipo turbina, em hertz

q - Vazão no medidor tipo turbina, em m^3/s

Q – Vazão no medidor tipo placa de orifício, em kg/s

Δp – Variação de pressão entre as faces à montante e à jusante de um medidor de vazão tipo placa de orifício

k – Fator empírico do medidor tipo placa de orifício, que inclui parâmetros próprios do elemento deprimogênito de pressão, da configuração física da instalação e das características do fluido medido

D_r – Desvio máximo radial de temperatura obtido em um banho térmico, à mesma profundidade de imersão

$\bar{t}_{\max}, \bar{t}_{\min}$ - Estimativas máxima e mínima de temperatura t_{90} obtidas em diferentes posições na direção radial (para obtenção do D_r) de um banho térmico

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

Com a crescente participação do gás natural na matriz energética brasileira e aumento no número de agentes envolvidos nas operações de produção, transporte e distribuição de gás natural ao longo de diferentes malhas de gasodutos, tornou-se crucial o investimento em medição, a fim de garantir um aumento na confiabilidade das operações de transferência de custódia.

Devido às características do gás natural, tais como a distribuição na fase gasosa, a composição variável no transcorrer do tempo, bem como a necessidade de uma correção de sua medição volumétrica para condições estabelecidas em contrato entre os agentes envolvidos no processo de transferência de custódia (normalmente 101,325 kPa e 20 °C), há um aumento no grau de incerteza da medição.

A medição volumétrica de gás natural envolve a determinação das estimativas de diversas grandezas, as quais tem suas incertezas associadas que devem ser combinadas de forma tal a se obter como resultado uma única incerteza de medição associada à medição volumétrica.

Para se obter a incerteza de cada grandeza, é necessário realizar a calibração dos instrumentos relacionados a esta, preferencialmente nas mesmas condições de operação. Dentre as grandezas que influenciam na medição podem ser citadas: pressão manométrica, pressão diferencial, temperatura, composição, volume e massa.

É importante considerar que o objetivo da calibração é determinar os parâmetros lineares do ajuste mais verossímil, de modo a relacionar, para cada indicação da grandeza medida pelo instrumento em campo, o respectivo valor verdadeiro convencional, bem como a incerteza oriunda deste ajuste.

Verifica-se que na grande maioria dos trabalhos de calibração em campo, considera-se uma incerteza do ajuste como sendo constante em toda a faixa de medição. Para

o presente trabalho será determinado, para várias grandezas (pressão estática, pressão diferencial, temperatura), uma incerteza padrão combinada, função do valor verdadeiro convencional, mesmo que não seja apresentada uma variância experimental das estimativas em cada nível constante durante toda a faixa de medição.

O presente trabalho está organizado dentro dos seguintes tópicos principais: No Capítulo 1 será apresentada uma introdução sobre os objetivos gerais e metodologia utilizada no trabalho; No Capítulo 2 são tratados os fundamentos matemáticos e estatísticos utilizados; No Capítulo 3 são expostas as grandezas associadas à medição de gás natural, bem como os instrumentos utilizados e sistemas de medição; O Capítulo 4 trata da calibração dos instrumentos utilizados para medição das grandezas utilizadas para determinação da medição volumétrica de gás natural; O Capítulo 5 expõe a arquitetura do sistema computacional utilizado; O Capítulo 6 mostra os resultados obtidos em calibrações de diversos instrumentos; No Capítulo 7 são expostas as conclusões obtidas; No Capítulo 8 são apresentadas as recomendações para trabalhos futuros

CAPÍTULO 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 MEDIÇÃO

A medição de grandezas está em todas as partes, seja associado à ciência, tecnologia, indústria e comércio. Sempre haverá a necessidade de se efetuar medições cujo resultado seja amplamente aceito, bem como uma faixa de valores dentro da qual serão obtidos resultados coerentes após sucessivas medições.

Essa abordagem estatística da medição, com um valor convencional (o “resultado” da medição) associado a uma faixa de valores possíveis para o resultado dessa medição (sempre vinculada a uma determinada probabilidade), quantifica o desconhecimento sobre todos os efeitos não controlados que influenciam no resultado da medição pois, apesar de todo o cuidado ao se executar medições, sempre haverá influências externas que alterarão, mesmo que levemente, o resultado após sucessivas medições (LIRA, 2002).

2.2 ERROS E INCERTEZA

De acordo com o (INMETRO, 2003) o erro de medição é a diferença entre o valor medido de uma grandeza e um valor de referência. Existem dois tipos de erros de medição, classificados como erros aleatórios e erros sistemáticos. Os erros aleatórios são aqueles que variam de forma não previsível após sucessivas medições, e estão associados às influências externas não possíveis de serem corrigidas. Já os erros sistemáticos são aqueles oriundos da média que resultaria de um infinito número de medições do mesmo mensurando, efetuadas sob condições de repetitividade, menos o valor verdadeiro do mensurando.

Existem quatro possíveis combinações entre erros sistemáticos e erros aleatórios, conforme ilustrado na Figura 1, onde o centro do alvo corresponde a um hipotético valor

verdadeiro do mensurando e as marcações no alvo correspondem as sucessivas medições desse mensurando:

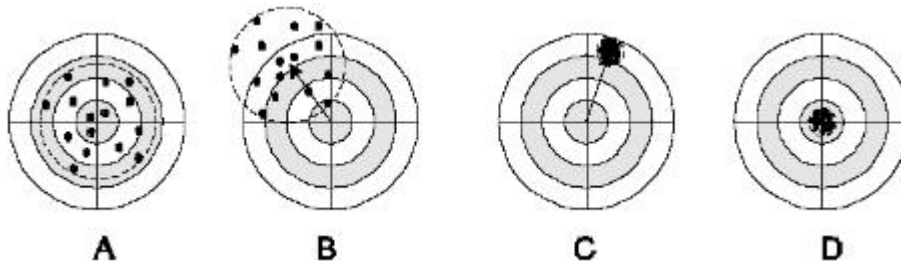


Figura 1 - Tipos de erros de medição

Caso A – Baixo erro sistemático e elevado erro aleatório

Caso B – Alto erro sistemático e alto erro aleatório

Caso C – Baixo erro aleatório e alto erro sistemático

Caso D – Baixos erros sistemáticos e aleatório

Portanto em todos os processos de medição existentes, a indicação apresentada por um instrumento de medição é apenas uma estimativa do valor verdadeiro do mensurando. Para se fazer uma avaliação quantitativa da qualidade de uma medição é necessário realizar uma análise estatística dos resultados obtidos, o que possibilitará aprovar ou rejeitar determinado processo de medição.

2.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA DO RESULTADO DA MEDIÇÃO

A análise estatística dos dados baseia-se na premissa de que, por mais controladas que sejam as condições de utilização e por mais exato que seja um determinado instrumento de medição, sempre existirão flutuações aleatórias não plenamente previstas no resultado de uma medição, gerando assim erros aleatórios.

A partir de amostras do resultado de uma medição, é possível inferir sobre o comportamento de uma população. Torna-se conveniente avaliar inicialmente as indicações

obtidas em medições consecutivas e independentes na forma gráfica através de histogramas para possibilitar a análise da distribuição de frequências.

2.4 HISTOGRAMAS E DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIAS

Quando se deseja resumir uma grande quantidade de dados brutos na forma gráfica, costuma-se distribuir os dados em classes ou categorias e determinar o número de elementos contidos em cada classe, denominado frequência da classe. A frequência da classe pode ser também uma frequência relativa, quando se divide pelo número do total de dados obtidos.

Um histograma de frequência, ou histograma consiste num conjunto de retângulos que possui a base no eixo horizontal, com centro no ponto médio da classe escolhida, largura igual às amplitudes dos intervalos de classe e área proporcional às frequências relativas das classes conforme ilustrado na Figura 2.

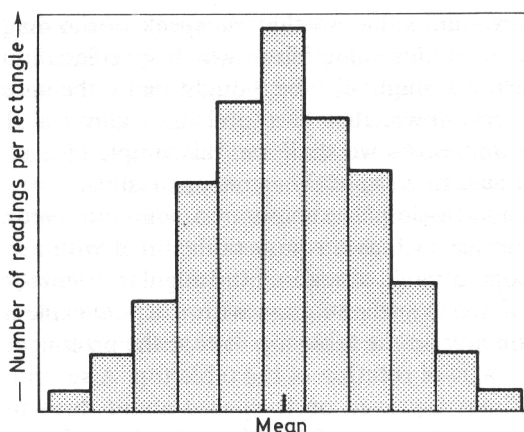


Figura 2 – Histograma (DIETRICH, 1991)

À medida que é aumentada o número de amostras e de classes, percebe-se que o comportamento do histograma vai se assimilando a uma curva, que descreve a distribuição de probabilidades de uma população, conforme ilustrado na Figura 3

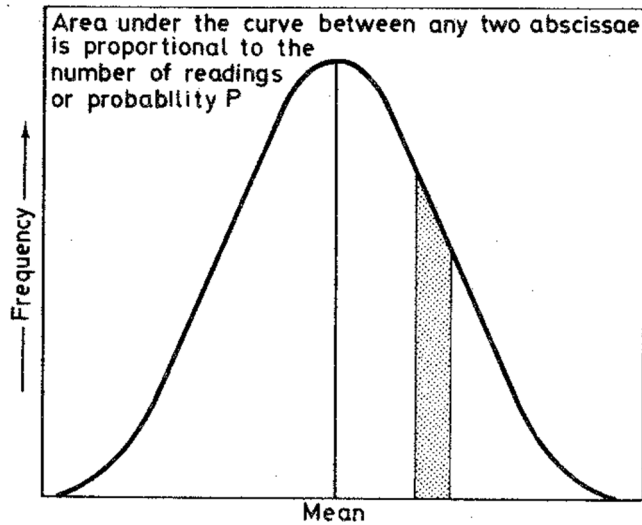


Figura 3 - Distribuição de probabilidades populacional (DIETRICH, 1991)

É possível aproximar uma função $f(x)$ que represente o comportamento da distribuição de probabilidades de uma população, essa função é denominada função de densidade de probabilidade ou função de densidade. Para determinar a probabilidade de um evento ocorrer com valores no intervalo entre dados a e b em uma função de densidade é necessário calcular a integral dada pela equação 1.

$$p(a,b) = \int_a^b f(x) \cdot dx \quad (1)$$

onde:

- p - Probabilidade
- $f(x)$ - Função de densidade.
- a,b - Limites de integração

2.5 ESTIMATIVA DO VALOR VERDADEIRO DO MENSURANDO

A estimativa do valor verdadeiro do mensurando $E(X)$ é dada através da esperança matemática de uma função de densidade obtida através do teste do chi-quadrado. A esperança matemática é definida pela equação 2.

$$E(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot f(x) \cdot dx \quad (2)$$

A melhor estimativa para valor verdadeiro do mensurando quando utilizado um conjunto limitado de dados é a média dos valores obtidos, pois geralmente os valores obtidos experimentalmente concentram-se em torno de um ponto central (ABNT; INMETRO; SBM, 1998). A média aritmética (ou simplesmente média) é expressa matematicamente na forma da equação 3.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N} \quad (3)$$

onde

\bar{X} - Média aritmética

X_i - Indicações individuais

N - Número de indicações

2.6 MEDIDAS DE DISPERSÃO

O grau ao qual os dados numéricos tendem a dispersar-se em torno de um valor médio chama-se variação ou dispersão dos dados. Existem diversas medidas de dispersão tais como a amplitude total, desvio médio, variância e o desvio padrão, dentre outras, sendo que a variância e o desvio padrão são as medidas de dispersão mais utilizadas.

Para uma função de densidade $f(x)$, a variância é definida pela equação 4.

$$Var(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - E(X))^2 \cdot f(x) \cdot dx \quad (4)$$

O desvio padrão é definido como a raiz quadrada positiva da variância, e apresenta como vantagem possuir a mesma unidade do mensurando.

Quando tem-se um conjunto de dados amostrais, seu desvio padrão amostral é representado por s e definido pela equação 5.

$$s = \sqrt{Var(X)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N-1}} \quad (5)$$

A justificativa para se utilizar $N - 1$ no denominador é que se perde um grau de liberdade para cada característica populacional estimada a partir de dados amostrais, como por exemplo, a estimativa do desvio padrão populacional a partir de um conjunto limitado de dados experimentais.

2.7 DISTRIBUIÇÃO NORMAL

A função de densidade normal (ou Curva de Gauss), é um tipo de distribuição de probabilidades que se ajusta muito frequentemente em processos de medição, sendo uma curva idealizada para uma variável aleatória verdadeira (DIETRICH, 1991).

Sua função de densidade $f(x)$ é definida conforme equação 6.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (6)$$

onde:

σ - Desvio padrão populacional da distribuição de probabilidades normal

μ - Esperança da distribuição de probabilidades normal

Quando a variável aleatória X é expressa na forma de unidade reduzida, $z = \frac{X - \mu}{\sigma}$, então a Equação pode ser escrita pela equação 7.

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} \quad (7)$$

A distribuição normal reduzida z tem como características possuir esperança matemática $E(z) = 0$ e variância $Var(z) = 1$.

2.7.1 Intervalo de confiança para a média de uma distribuição normal

Quando dispõe-se da informação *a priori* sobre a distribuição populacional de determinada medição e conclui-se que se trata de uma distribuição normal, pode-se determinar um intervalo de confiança para a média populacional a partir do conhecimento do desvio padrão populacional (BUSSAB & MORETTIN, 2002).

Para determinar o intervalo de confiança da média populacional a partir de N amostras, o parâmetro a ser determinado é a média populacional μ a estatística utilizada será a média amostral \bar{X} e o desvio padrão da estatística é o desvio padrão da média. $\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$ (FIDLER, 2003).

Os níveis de confiança em torno da média são determinados a partir da integração da Equação 7 entre os limites $-Z_c$ e Z_c , desta forma tem-se a equação 8, (BUSSAB & MORETTIN, 2002).

$$P = \int_{-Z_c}^{Z_c} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz \quad (8)$$

Para um dado nível de confiança P é necessário calcular o respectivo valor de Z_c associado. São fornecidas tabelas padronizadas de valores de Z_c para diferentes níveis de confiança com essa finalidade. Desta forma, o intervalo de confiança da média é dado pela equação 9, (SPIEGEL, 1993).

$$\bar{X} - Z_c \cdot \sigma_{\bar{x}} < \mu < \bar{X} + Z_c \cdot \sigma_{\bar{x}} \quad (9)$$

2.8 DISTRIBUIÇÃO RETANGULAR

A distribuição retangular (ou uniforme) caracteriza-se por uma probabilidade constante entre dois limites $a < x < b$ com valor $P = f(x) = \frac{1}{(b-a)}$ (Figura 4). Esta distribuição é utilizada quando pouco pode ser estimado acerca da distribuição amostral de probabilidades de uma variável e de sua incerteza (DIETRICH, 1991).

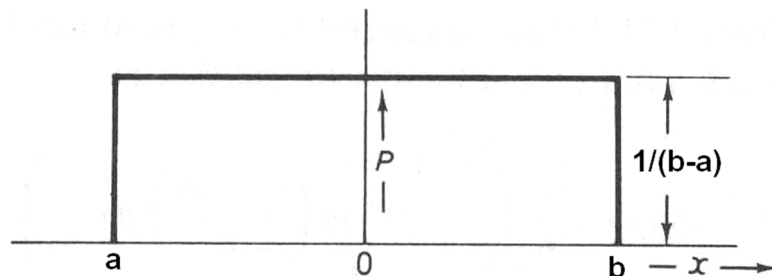


Figura 4 - Distribuição retangular (DIETRICH, 1991)

Ao contrário de uma distribuição normal, quando a distribuição é determinada com base em um número grande de medições repetidas a distribuição retangular é assumida quando se conhecem apenas os limites máximo e mínimo admissíveis para uma variável, supondo-se que a função de densidade no intervalo é constante (DIETRICH, 1991)

A esperança matemática desta distribuição é dada pela equação 10, (BUSSAB & MORETTIN, 2002).

$$E(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot f(x) \cdot dx = \int_a^b x \cdot \frac{1}{b-a} dx = \frac{b+a}{2} \quad (10)$$

A variância da distribuição retangular é dada pela equação 11, (BUSSAB & MORETTIN, 2002).

$$Var(X) = \int (x - E(X))^2 \cdot f(x) \cdot dx = \int \left(x - \left(\frac{b+a}{2} \right) \right)^2 \cdot \left(\frac{1}{b-a} \right) \cdot dx = \frac{(b-a)^2}{12} \quad (11)$$

O desvio padrão populacional da distribuição de probabilidades retangular, definido como a raiz quadrada da variância, dada conforme equação 12.

$$\sigma(X) = \sqrt{Var(X)} = \frac{b-a}{2\sqrt{3}} \quad (12)$$

2.8.1 Intervalo de confiança para a média de uma distribuição retangular.

O intervalo de confiança da média em uma distribuição retangular é dado como o intervalo de um desvio padrão em torno da esperança matemática, tem-se a equação 13.

$$\frac{(b+a)}{2} - \frac{(b-a)}{\sqrt{12}} < \mu < \frac{(b+a)}{2} + \frac{(b-a)}{\sqrt{12}} \quad (13)$$

2.9 DISTRIBUIÇÃO T DE STUDENT

A distribuição t de Student é utilizada quando se dispõe de um conjunto limitado de dados experimentais. As distribuições amostrais experimentais com tamanho $N > 30$ geralmente são consideradas distribuições normais (SPIEGEL, 1993). Para amostras com

tamanho $N < 30$ essa aproximação não é tão boa, e não se pode determinar a partir destas amostras o desvio padrão σ populacional sem um certo grau de incerteza associada (DIETRICH, 1991).

A estatística t, utilizada para a determinação de intervalos de confiança em distribuições t de student, é definida pela equação 14, (SPIEGEL, 1993).

$$t = \frac{\bar{X} - \mu}{s_{\bar{x}}} \quad (14)$$

Para determinar a função de densidade de uma distribuição t é necessário introduzir a função gama, equação 15, (BUSSAB & MORETTIN, 2002).

$$\Gamma(\alpha) = \int e^{-x} x^{\alpha-1} dx, \alpha > 0 \quad (15)$$

A função de densidade da distribuição t é dada pela equação 16, (BUSSAB & MORETTIN, 2002):

$$f(t; v) = \frac{\Gamma\left(\frac{v+1}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{v}{2}\right) \sqrt{\pi \cdot v}} \left(1 + \frac{t^2}{v}\right)^{-\frac{v+1}{2}}, -\infty < t < \infty \quad (16)$$

onde:

- v - Graus de liberdade da amostra
- t - Variável aleatória contínua utilizada

Os graus de liberdade estão relacionados ao tamanho da amostra, uma vez que a distribuição t de student é na verdade uma família de distribuições, dependendo do grau de liberdade adotado, com forma similar à normal e idêntica a esta quando $v = \infty$, (BUSSAB & MORETTIN, 2002). Uma amostra pequena implica em uma maior probabilidade nas “caudas” da função densidade de probabilidade.

Para a determinação de um intervalo de confiança contendo a esperança matemática μ associada a uma distribuição t não é necessário o conhecimento prévio dos parâmetros populacionais, mas é necessário que a distribuição de probabilidades tenha uma característica aproximadamente normal.

2.9.1 Intervalo de confiança para a média de uma distribuição t de Student

De modo similar à distribuição normal tem-se que, a determinação de um intervalo de confiança de um parâmetro, supondo uma distribuição t de student é descrita como (FIDLER, 2003):

$$\text{estatística} - (t_c) \cdot (\text{desvio padrão da estatística}) < \text{parâmetro} < \text{estatística} + (t_c) \cdot (\text{desvio padrão da estatística})$$

onde:

t_c - Valor calculado (tabelado) de t, associado a um grau de liberdade v e um nível de confiança P

Para determinar o intervalo de confiança da média populacional a partir de N amostras, o parâmetro a ser determinado é a média populacional μ , a estatística utilizada será a média amostral \bar{X} e o desvio padrão da estatística é o desvio padrão amostral da média, equação 17.

$$s_{\bar{X}} = \frac{s_X}{\sqrt{N}} \quad (17)$$

Os níveis de confiança em torno da média são determinados a partir da integração da Equação 16 com v graus de liberdade entre os limites $-t_c$ e t_c , desta forma tem-se a equação 18.

$$P = \int \frac{\Gamma\left(\frac{v+1}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{v}{2}\right)\sqrt{\pi \cdot v}} \left(1 + \frac{t^2}{v}\right)^{-\frac{v+1}{2}} \quad (18)$$

Para um dado nível de confiança P é necessário calcular o respectivo valor de t_c associado. São fornecidas tabelas padronizadas de valores de t_c para diferentes níveis de confiança e graus de liberdade com essa finalidade. Desta forma, o intervalo de confiança da média é dado pela equação 19, (SPIEGEL, 1993).

$$\bar{X} - t_c \cdot s_{\bar{X}} < \mu < \bar{X} + t_c \cdot s_{\bar{X}} \quad (19)$$

2.10 INCERTEZA DE MEDIÇÃO

A incerteza de uma medição é definida no Guia para a expressão da Incerteza de Medição (ABNT; INMETRO; SBM, 1998) como sendo um parâmetro, associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos ao mensurando. O parâmetro pode ser um desvio padrão ou a metade de um intervalo correspondente a um nível de confiança declarado.

Em um processo de medição, podem estar envolvidas operações de determinação de indicações de várias grandezas, onde o resultado final da medição Y é determinado através de uma relação funcional f das grandezas de entrada não correlacionadas X_1, X_2, \dots, X_N na forma $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$ sendo que, para cada estimativa deve estar associada uma incerteza (ABNT; INMETRO; SBM, 1998).

A incerteza de cada grandeza de entrada pode ser derivada de cálculos estatísticos a partir de N observações repetidas e independentes, calculada a partir do conhecimento da função de densidade do mensurando ou fornecida a priori através de certificados de calibração e outros meios.

O Guia Para a Expressão da Incerteza de Medição (ABNT; INMETRO; SBM, 1998) indica um método para se efetuar a combinação de incertezas, mas deixa claro que as incertezas a serem combinadas devem estar expressas na forma de um desvio padrão, independentemente de qual seja a função de densidade de determinado mensurando. A expressão na forma de um desvio padrão pode representar níveis de confiança diferentes em cada caso, pois o mesmo está diretamente relacionada com a função de densidade e a incerteza, que define os limites de integração, através da Equação 1.

2.10.1 Combinação de incertezas não correlacionadas

As incertezas das grandezas de entrada X_1, X_2, \dots, X_N devem ser combinadas de forma a se obter a incerteza de Y . Isso é feito a partir da lei de propagação da incerteza, equação 20, (ABNT & INMETRO & SBM, 1998).

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) \quad (20)$$

onde:

- $u_{c,2}(y)$ - Variância combinada
- $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ - Coeficiente de sensibilidade
- $u(x_i)$ - Incerteza padrão da estimativa da grandeza X_i

A Equação 20 não impõe restrições quanto à função de densidade utilizada para determinar cada $u(x_i)$, uma vez que no Teorema do Limite Central (ABNT; INMETRO; SBM, 1998) afirma-se que, a convolução de distribuições de probabilidade (normais ou não) tende a uma distribuição normal à medida que o número de contribuições para a incerteza padrão combinada aumenta. Desta forma, pode-se considerar a incerteza padrão combinada $u_c(y)$ como derivada de uma aproximação da distribuição normal (t de Student) com ν graus de liberdade efetivos.

2.10.2 Graus de liberdade efetivos

De acordo com (ABNT; INMETRO; SBM, 1998) a distribuição normal não irá descrever a distribuição da variável $\frac{(y - Y)}{u_c(y)}$ se $u_{c,2}(y)$ é a soma de dois ou mais componentes de variância estimados $u_i^2(y) = c_i^2 u^2(x_i)$, mesmo se cada x_i é a estimativa de uma grandeza de entrada X_i normalmente distribuída, uma vez que a distribuição normal é uma distribuição de probabilidades idealizada. Todavia, é possível aproximar a convolução de distribuições de probabilidade a uma distribuição t com ν_{eff} graus de liberdade efetivos, obtidos através da fórmula de Welch-Satterthwaite, equações 21 e 22, (ABNT; INMETRO; SBM, 1998).

$$\nu_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{\nu_i}} \quad (21)$$

com

$$\nu_{eff} \leq \sum_{i=1}^N \nu_i \quad (22)$$

2.10.3 Expansão de incertezas

A incerteza padrão combinada obtida a partir da Equação 20 é uma aproximação do desvio padrão experimental da média para a grandeza Y , com graus de liberdade efetivos v_{eff} fornecidos pela Equação 21. Sabe-se que em razão do teorema do limite central a distribuição amostral das médias do mensurando Y pode ser aproximada a uma distribuição t de Student (ABNT; INMETRO; SBM, 1998), sendo então aplicado o mesmo enfoque dado na Seção 2.9.1 para determinação do intervalo de confiança de μ para um dado nível de confiança e graus de liberdade efetivos v_{eff} , equação 23.

$$\bar{Y} - t_c \cdot s_{\bar{Y}} < \mu < \bar{Y} + t_c \cdot s_{\bar{Y}} \quad (23)$$

O valor de t_c para um dado nível de confiança α e graus de liberdade efetivos v_{eff} pode ser obtido através de tabelas estatísticas.

2.10.4 Influência da incerteza no resultado de uma medição

A incerteza calculada é um parâmetro que define um intervalo em torno da estimativa de uma medição dentro da qual é possível assumir, com um determinado nível de confiança α , encontrar o valor verdadeiro do mensurando μ .

A importância em se determinar o valor numérico da incerteza de medição reside em proporcionar maior confiabilidade ao resultado de uma medição, implicando em incremento de segurança (um limite de segurança estabelecido pode ser ultrapassado ao se levar em conta o valor medido (estimativa) e a sua incerteza associada), credibilidade em medições fiscais (limite de erro máximo admissível deve levar em consideração a incerteza associada à medição obtida pela cadeia de medição empregada).

Uma determinação mais completa das fontes de incertezas que podem contribuir para a dispersão dos valores indicados para um mensurando aumenta o valor numérico da incerteza de medição, mas em contrapartida torna-se possível uma análise crítica de quais

fontes de incerteza contribuem com uma parcela maior na incerteza combinada, desta forma pode-se dedicar maiores esforços no sentido de diminuir a influência destas fontes.

2.11 AJUSTE DE CURVAS ATRAVÉS DO MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS

O método dos mínimos quadrados é uma aplicação da teoria da máxima verossimilhança. Segundo o método dos mínimos quadrados (RICHTER, 1995), o melhor ajuste é aquele em que a quantidade expressa pela equação 24,

$$\chi^2(\alpha) = \sum_{i=1}^N \frac{[y_i - y(x_i; \alpha)]^2}{\sigma_i} \quad (24)$$

é minimizada, onde α é um vetor contendo os parâmetros lineares do ajuste mais verossímil, σ_i o desvio padrão dos erros aleatórios em cada nível y_i sendo assumida uma distribuição normal desses erros.

A variância populacional da distribuição amostral dos erros pode ser conhecida a priori ou então determinada a partir da escolha de um estimador adequado. O importante a ser considerado é que, para a utilização do método quando não se possui conhecimento prévio da variância populacional é necessário serem detectados os erros aleatórios de medição em cada nível y_i

Para cada parâmetro linear α_j encontrado existe uma incerteza associada, o que, combinando as incertezas de cada parâmetro é possível determinar a incerteza do ajuste como um todo (RICHTER, 1995). A determinação da incerteza dos parâmetros α_j é uma operação descrita comumente na literatura, sendo útil na calibração de uma grandeza dependente de várias outras grandezas físicas de entrada, pois torna possível determinar a estimativa e a incerteza associada a cada grandeza de entrada x_i Para o caso da calibração por comparação entre um instrumento padrão e um instrumento a ser calibrado, ambos submetidos ao mesmo mensurando, é mais interessante determinar a incerteza do ajuste como um todo $\sigma_y(x)$, ou seja, o intervalo de confiança em torno da equação de ajuste e não apenas as incertezas dos parâmetros α_j (RICHTER, 1995). Essa, incerteza do ajuste linear, será combinada posteriormente com as demais incertezas do tipo A e B para determinar a incerteza da medição como um todo.

Definindo as equações 25 e 26,

$$b_i \equiv \left(\frac{y_i}{\sigma_i} \right) \quad (25)$$

e

$$A_{ij} \equiv \frac{X_j(x_i)}{\sigma_i} \quad (26)$$

onde $X_j(x_i)$ é a função de base X_j aplicada à estimativa da indicação do instrumento de medição padrão x_i . A partir das Equações 25 e 26 é possível reescrever a Equação 24 na forma matricial dada pela equação 27.

$$\chi^2 = (b - A\alpha)^T (b - A\alpha) \quad (27)$$

onde:

26 A - Matriz composta de todos os elementos A_{ij} obtidos a partir da Equação

25 b - Vetor composto de todos os elementos b_i obtidos a partir da Equação

O subscrito T significa operação de transposição de matriz.

Para encontrar o vetor de coeficientes α é necessário encontrar o mínimo da Equação 27. Minimizar a Equação 27 implica em derivá-la em relação a cada parâmetro α_j

$$\frac{\partial}{\partial \alpha_j} (\chi^2) = 0 \quad (28)$$

o que resulta na solução

$$\alpha = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (29)$$

onde α é um vetor contendo os parâmetros lineares do melhor ajuste dos mínimos quadrados, baseado no método da máxima verossimilhança.

2.11.1 Incerteza padrão do ajuste linear

Segundo (RICHTER, 1995), a incerteza do ajuste (em função da indicação do instrumento padrão) é dada pela equação 30.

$$\sigma_y(x) = \sqrt{X(x)^T C X(x)} \quad (30)$$

onde

$$C = (A^T A)^{-1} \quad (31)$$

O número de graus de liberdade de σ_y será dado pela equação 32,

$$v = N - M \quad (32)$$

onde:

M - Número de parâmetros lineares determinados

N - Número de níveis

Combinação das fontes de incerteza não correlacionadas

Para encontrar a incerteza padrão combinada utilizou-se a lei de propagação da incerteza (ABNT; INMETRO; SBM, 1998) sendo esta definida pela equação 33,

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 \cdot u^2(x_i) \quad (33)$$

onde cada $u(x_i)$ corresponde a uma incerteza padrão oriunda das fontes de incerteza que influenciam na medição.

Segundo o teorema do limite central, a convolução de distribuições de probabilidade resulta em uma distribuição de probabilidades aproximadamente normal, com variância igual a u_c^2 e graus de liberdade efetivos v_{eff} dados pela fórmula de Welch-Satterthwaite, equação 34, (ABNT; INMETRO; SBM, 1998).

$$v_{eff} = \frac{u_c^4}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{v_i}} \quad (34)$$

Como o teorema do limite central assegura que a convolução das distribuições de probabilidade resulta em uma distribuição aproximadamente normal, então é possível utilizar a estatística t para determinar o intervalo de confiança, equação 35.

$$f(x; \alpha) \pm t(0,9545, v_{eff}) \cdot u_c(y) \quad (35)$$

Onde o valor 0,9545 é o nível de confiança correspondente a um intervalo de dois desvios padrão em torno do parâmetro a ser determinado, podendo ser utilizado valores diferentes caso se deseje aplicar um nível de confiança diferente. O valor da variável independente (valor verdadeiro convencional) pode ser determinado através de método numérico apropriado resolvendo a equação 35 em relação a x em termos de y.

CAPÍTULO 3 MÉTODOS DE MEDIÇÃO DAS GRANDEZAS RELACIONADAS À MEDIÇÃO DE GÁS NATURAL

3.1 MEDIÇÃO DE TEMPERATURA

3.1.1 A escala termodinâmica de temperatura

William Thomson (Lord Kelvin) verificou que, a partir dos estudos de Sadi Carnot sobre máquinas reversíveis seria possível desenvolver uma escala de temperatura que fosse independente da substância de trabalho, tornando possível criar uma escala absoluta de temperatura. O princípio desta escala absoluta de temperatura consistiu na análise da eficiência de máquinas de Carnot, uma vez que a eficiência é função apenas das temperaturas dos reservatórios térmicos envolvidos no processo (, podendo ser escrito como na equação 36, (SONNTAG, et al., 1998):

$$\eta_c = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - f(T_H, T_L) \quad (36)$$

onde:

Q_L - Calor transferido ao reservatório térmico de menor temperatura em um ciclo de Carnot

Q_H - Calor retirado do reservatório térmico de maior temperatura em um ciclo de Carnot

$f(T_H, T_L)$ - Função das temperaturas do reservatório térmico de maior temperatura T_H e do reservatório térmico de menor temperatura T_L

Existem diversas relações funcionais das temperaturas T_H e T_L que satisfazem essa equação. Lord Kelvin escolheu a seguinte relação funcional dado pela equação 37.

$$\frac{Q_L}{Q_H} = \frac{T_L}{T_H} \quad (37)$$

A partir desta análise, e considerando a diferença entre o ponto de ebulição da água e o ponto de fusão do gelo igual a 100 K, foi determinado que a temperatura de fusão do gelo equivaleria nessa escala à temperatura de 273,15 K e a temperatura do ponto de ebulição da água seria expressa nessa mesma escala como 373,15 K.

A temperatura de 273,15 K para o ponto de fusão do gelo é alcançada apenas quando existe uma mistura de fases de gelo e água puros, submetidos à uma pressão de 101,325 Pa, em equilíbrio com o ar saturado de vapor d'água (SONNTAG, et al., 1998).

A dificuldade de se implementar uma escala termodinâmica de temperatura completa consiste na existência de alguns poucos pontos de equilíbrio onde seja possível determinar com segurança a relação de temperaturas. Além do que, não é muito prático determinar a escala termodinâmica de temperaturas todas as vezes que se torna necessário fazer alguma medição de temperatura. Desta forma, foi criada a escala internacional de temperatura (ITS-90) que define instrumentos e métodos de interpolação para determinação da temperatura termodinâmica (MANGUN & FURUKAWA, 1990).

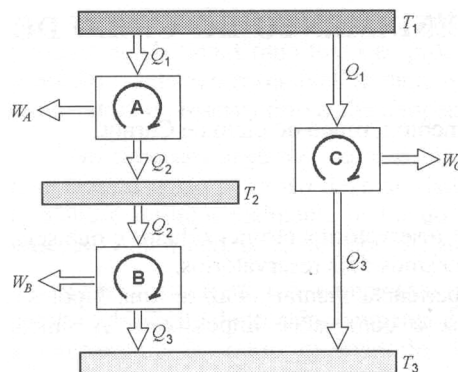


Figura 5 - Ciclo de Carnot (SONNTAG, et al., 1998)

3.1.2 Escala internacional de temperatura de 1990.

A escala internacional de temperatura de 1990 (ITS-90), foi adotada pelo Comitê Internacional de Pesos e Medidas em sua reunião em 1989, conforme o requisito incorporado na Resolução 7 da 18ª Conferência Geral de Pesos e Medições de 1987. Esta escala substitui

a Escala Prática Internacional de Temperatura de 1968 (edição revisada de 1975) e a Escala de Temperatura Provisória de 1976 de 0,5 K a 30 K (MANGUN & FURUKAWA, 1990).

A unidade de temperatura termodinâmica T foi definida como a fração de $1/273,16$ da temperatura termodinâmica do ponto triplo da água, sendo expressa em Kelvin. A temperatura internacional T_{90} é uma aproximação íntima com o valor numérico de T , obtida através dos métodos propostos pela ITS-90. Foi definida também a temperatura internacional t_{90} , expressa em graus Celsius. A relação entre T_{90} e t_{90} é a seguinte (MANGUN & FURUKAWA, 1990):

$$T_{90}/K = t_{90}/^{\circ}C + 273,15 \quad (38)$$

O objetivo da ITS-90 é que, ao longo da sua faixa, para qualquer temperatura dada, o valor numérico de T_{90} seja obtido de forma mais simples, utilizando para tal, comparações diretas de temperaturas termodinâmicas.

3.1.2.1 Definição da escala internacional de temperaturas de 1990.

Entre 0,65 K e 5,0 K é definida em termos das relações de temperatura de pressão de vapor dos isótopos, ^3He e ^4He que são respectivamente hélio com dois prótons e um nêutron (mais raro) e hélio com dois prótons e dois nêutrons.

Entre 3,0 K e o ponto triplo do Néon (24,5561 K) T_{90} é definido por meio de um termômetro de gás de hélio (CVGT) calibrado em três temperaturas experimentalmente realizáveis que possuem valores numéricos atribuídos (pontos fixos de definição) e usando-se procedimentos de interpolação especificados.

Entre o ponto triplo de equilíbrio do hidrogênio (13,8033 K) e o ponto de solidificação da prata (1234,93 K) T_{90} é definida por meio de termômetros de resistência de platina padrão (SPRT) calibrados em conjuntos específicos de pontos fixos de medição e usando-se procedimentos de interpolação especificados. Os SPRT são instrumentos fabricados em condições especiais, utilizando-se platina com elevada pureza e livre de tensões. Os SPRT são normalmente utilizados como padrão de referência para um laboratório, sendo utilizados para calibrar os padrões de trabalho.

Acima do ponto de solidificação da prata (1234,93 K) T_{90} é definida em termos de um ponto fixo de definição e da lei de radiação de Planck. O equipamento utilizado para medição de temperatura nessa faixa é o termômetro de radiação.

A

Tabela 1 mostra os pontos fixos de temperatura para a ITS-90, bem como os elementos empregados, estados de equilíbrio e instrumentação.

Tabela 1 - Pontos fixos da ITS-90 (MANGUN & FURUKAWA, 1990)

Elemento	Estado de equilíbrio	Temperatura		$W_r(T_{90})$	Instrumento Utilizado
		T_{90} (K)	t_{90} (°C)		
He	Pressão de vapor	3 a 5	- 270,15 a - 268,15		CVGT
e-H ₂	Ponto triplo	13,8033	- 259,3467	0,00119007	CVGT / SPRT
e-H ₂	Pressão de vapor	≈ 17	≈ - 256,15		CVGT / SPRT
e-H ₂	Pressão de vapor	≈ 20,3	≈ - 252, 85		CVGT / SPRT
Ne	Ponto triplo	24,5561	- 248,5939	0,00844974	CVGT / SPRT
O ₂	Ponto triplo	54,3584	- 218,7916	0,09171804	SPRT
Ar	Ponto triplo	83,8058	- 189,3442	0,21585975	SPRT
Hg	Ponto triplo	234,3156	- 38,8344	0,84414211	SPRT
H ₂ O	Ponto triplo	273,16	0,01	1,00000000	SPRT
Ga	Ponto de fusão	302,9146	29,7646	1,11813889	SPRT
In	Ponto de solidificação	429,7485	156,5985	1,60980185	SPRT
Sn	Ponto de solidificação	505,078	231,928	1,89279768	SPRT
Zn	Ponto de solidificação	692,677	419,527	2,56891730	SPRT
Al	Ponto de solidificação	933,473	660,323	3,37600860	SPRT
Ag	Ponto de solidificação	1234,93	961,78	4,28642053	SPRT
Au	Ponto de solidificação	1337,33	1064,18		RT
Cu	Ponto de solidificação	1357,77	1084,62		RT

Notas:

Todas as substâncias com exceção do ³He são de composição de isotópica natural, e-H₂ é hidrogênio à concentração de equilíbrio das formas moleculares ortho e para.

O equipamento que abrange toda a faixa de temperaturas onde normalmente são efetuadas as medições de vazão é o Termômetro Padrão de Resistência de Platina (SPRT), a faixa de medição definida pela ITS-90 é de 13,8033 K a 1234,93 K. É importante observar que nenhum SPRT é projetado para operar em toda a faixa definida pela ITS-90, sendo então utilizados e caracterizados equipamentos que operam em sub-faixas de temperatura.

Na ITS-90 as temperaturas são expressas na forma de razão de entre as resistências medidas nos pontos fixos da ITS-90 e no ponto triplo da água, na forma da equação 39.

$$W(T_{90}) = \frac{R(T_{90})}{R(273,16)} \quad (39)$$

onde:

- $W(T_{90})$ - Razão de resistências para a temperatura T_{90}
- $R(T_{90})$ - Resistência do SPRT medida na temperatura T_{90}
- $R(273,16)$ - Resistência do SPRT medida no ponto triplo da água

Um SPRT adequado deve atender os seguintes requisitos:

$$W(302,9146 \text{ K}) \geq 1,11807 \quad (40)$$

ou

$$W(234,3156 \text{ K}) \leq 0,844235 \quad (41)$$

Para um SPRT que é projetado para ser utilizado em temperaturas próximas ao ponto de solidificação da prata é necessário que se atenda o seguinte critério adicional:

$$W(1234,93 \text{ K}) \geq 4,2844 \quad (42)$$

O ajuste de temperatura de um SPRT em relação à escala da ITS-90 é feito através da diferença entre o $W(T_{90})$ e um $W_r(T_{90})$, onde $W_r(T_{90})$ é um valor de referência utilizado na ITS-90 e a partir do qual são definidas as equações de conversão da razão de resistências para temperaturas termodinâmicas, objetivando a utilização nos intervalos de temperatura entre os pontos fixos. Desta forma, tem-se:

$$\Delta W(T_{90}) = W(T_{90}) - W_r(T_{90}) \quad (43)$$

As equações para cálculo de $W_r(T_{90})$ são definidas para duas faixas de temperatura.

Para a faixa de 13,8033 K a 273,16 K tem-se:

$$\ln [W_r(T_{90})] = A_0 + \sum_{i=1}^{12} A_i \left[\frac{\ln(T_{90} / 273,16 \text{ K}) + 1,5}{1,5} \right]^i \quad (44)$$

Uma função inversa, equivalente à Equação 44, com incerteza de 0,0001 K é:

$$T_{90} / 273,16 \text{ K} = B_0 + \sum_{i=1}^{15} B_i \left[\frac{W_r(T_{90})^{1/6} - 0,65}{0,35} \right] \quad (45)$$

Para a faixa de temperatura de 273,15 K a 1234,93 K a equação para o cálculo da função de referência $W_r(T_{90})$ é dada por:

$$W_r(T_{90}) = C_0 + \sum_{i=1}^9 C_i \left[\frac{(T_{90} / K - 754,15)}{481} \right]^i \quad (46)$$

Uma função inversa, equivalente à Equação 46, com incerteza de 0,00013 K é:

$$T_{90} / K - 273,15 = D_0 + \sum_{i=1}^9 D_i \left\{ \frac{[W_r(T_{90}) - 2,64]}{1,64} \right\}^i \quad (47)$$

Os valores das constantes $A_0, A_i, B_0, B_i, C_0, C_i, D_0, D_i$, todos determinados na ITS-90, são fornecidos na tabela 2.

Tabela 2 - Constantes utilizadas nas funções de referência (MANGUN & FURUKAWA, 1990)

A ₀	-2,13534729	B ₀	0,183324722	C ₀	2,78157254	D ₀	439,932854
A ₁	3,18324720	B ₁	0,240975303	C ₁	1,64650916	D ₁	472,418020
A ₂	-1,80143597	B ₂	0,209108771	C ₂	-0,13714390	D ₂	37,684494
A ₃	0,71727204	B ₃	0,190439972	C ₃	-0,00649767	D ₃	7,472018
A ₄	0,50344027	B ₄	0,142648498	C ₄	-0,00234444	D ₄	2,920828
A ₅	-0,61899395	B ₅	0,077993465	C ₅	0,00511868	D ₅	0,005184
A ₆	-0,05332322	B ₆	0,012475611	C ₆	0,00187982	D ₆	-0,963864
A ₇	0,28021362	B ₇	-0,032267127	C ₇	-0,00204472	D ₇	-0,188732
A ₈	0,10715224	B ₈	-0,075291522	C ₈	-0,00046122	D ₈	0,191203
A ₉	-0,29302865	B ₉	-0,056470670	C ₉	0,00045724	D ₉	0,049025
A ₁₀	0,04459872	B ₁₀	0,076201285				
A ₁₁	0,11868632	B ₁₁	0,123893204				
A ₁₂	-0,05248134	B ₁₂	-0,029201193				
		B ₁₃	-0,091173542				
		B ₁₄	0,001317696				
		B ₁₅	0,026025526				

3.1.2.2 Procedimento para ajuste de um SPRT em conformidade com a ITS-90 (MANGUN, 1990)

O ajuste de um SPRT é feito seguindo uma seqüência de procedimentos, sendo necessário a determinação de sua resistência em determinados pontos com o mínimo de incerteza possível, desta forma tem-se como procedimentos:

Determinação da faixa de medição do SPRT;

Obtenção das temperaturas termodinâmicas que estão dentro da faixa de medição do SPRT;

Verificação do atendimento da condição de utilização (Equações 40, 41 e 42)

Definição das sub-faixas de medição;

Determinação das constantes nas equações de desvio;

Cálculo de $T_{90} = f[W(T_{90})]$.

A faixa de medição de um SPRT é fornecida pelo fabricante do equipamento, a partir da qual são definidas as sub-faixas de medição.

Deve-se determinar os valores de resistência no ponto triplo da água ($T_{90} = 273,16$ K) e verificar se pelo menos uma das condições de utilização definidas pelas Equações 40 e 41 é atendida.

A escolha das sub-faixas de medição depende da faixa de medição do SPRT. A partir desta escolha é que são definidas as funções de desvio utilizadas para a determinação das constantes de ajuste.

3.1.2.2.1 Sub-faixa de medição de 13,8033 K a 273,16 K

Nessa faixa de medição, a função de desvio é dada pela relação:

$$\Delta W_I(T_{90}) = a_1[W(T_{90}) - 1] + b_1[W(T_{90}) - 1]^2 + \sum_{i=1}^5 c_i [\ln(W(T_{90}))]^{i+n} \quad (48)$$

Com $n = 2$. Os coeficientes a_1 , b_1 , e os cinco c 's são obtidos pela medição nos oito pontos fixos da ITS-90 com temperaturas abaixo do ponto triplo da água, incluindo este ponto. O valor $\Delta W_I(T_{90})$ é determinado a partir da Equação 43, onde o valor de $W_r(T_{90})$ é determinado para cada ponto fixo, através da Equação 44 ou consultando os valores fornecidos na

Tabela 1. Para cada medição realizada num ponto fixo é determinado um valor de $\Delta W_I(T_{90})$, o que resulta num total de oito condições de contorno, suficientes para determinação de todos os coeficientes.

3.1.2.2.2 Sub-faixa de medição de 24,5561 K a 273,16 K

Nessa faixa de medição, a função de desvio é dada pela relação:

$$\Delta W_2(T_{90}) = a_2 [W(T_{90}) - 1] + b_2 [W(T_{90}) - 1]^2 + \sum_{i=1}^3 c_i [\ln(W(T_{90}))]^{i+n} \quad (49)$$

Com $n = 0$. Os coeficientes a_2 , b_2 , e os três c 's são obtidos pela medição nos pontos triplos de equilíbrio do hidrogênio (13,8033 K), neônio (24,5561 K), oxigênio (55,3584 K), argônio (83,8058 K), mercúrio (234,3156 K) e água (273,16 K). Nota-se que para essa sub-faixa, as temperaturas são medidas até a temperatura do ponto triplo do neônio, mas o instrumento precisa ser calibrado na temperatura do ponto triplo do hidrogênio.

3.1.2.2.3 Sub-faixa de medição de 54,3584 K a 273,16 K

Nessa faixa de medição, a função de desvio é dada pela relação:

$$\Delta W_3(T_{90}) = a_3 [W(T_{90}) - 1] + b_3 [W(T_{90}) - 1]^2 + c_1 [\ln(W(T_{90}))]^{1+n} \quad (50)$$

Com $n = 1$. Os coeficientes a_3 , b_3 , e c_1 são obtidos pela medição nos pontos triplos do oxigênio (55,3584 K), argônio (83,8058 K), mercúrio (234,3156 K) e água (273,16 K).

3.1.2.2.4 Sub-faixa de medição de 83,8058 K a 273,16 K

Nessa faixa de medição, a função de desvio é dada pela relação:

$$\Delta W_4(T_{90}) = a_4 [W(T_{90}) - 1] + b_4 [W(T_{90}) - 1]^2 \cdot \ln(W(T_{90})) \quad (51)$$

Com $n = 1$. Os coeficientes a_4 e b_4 são obtidos pela medição nos pontos triplos do argônio (83,8058 K), mercúrio (234,3156 K) e água (273,16 K).

3.1.2.2.5 Sub-faixa de medição de 273,15 K a 1234,93 K

Nessa faixa de medição, a função de desvio é dada pela relação:

$$\Delta W_6(T_{90}) = a_6 [W(T_{90}) - 1] + b_6 [W(T_{90}) - 1]^2 + c_6 [W(T_{90}) - 1]^3 + d [W(T_{90}) - W(933,473K)]^2 \quad (52)$$

Os coeficientes a_6 , b_6 , e c_6 são obtidos pela medição nos pontos de solidificação do estanho (505,078 K), zinco (692,677 K) e alumínio (933,473 K). O valor $\Delta W_6(T_{90})$ é determinado a partir da Equação 43, onde o valor de $W_r(T_{90})$ é determinado para cada ponto fixo, através da Equação 46 ou consultando os valores fornecidos na

Tabela 1. Para cada medição realizada num ponto fixo é determinado um valor de $\Delta W_6(T_{90})$, o que resulta num total de três condições de contorno, suficientes para determinação de todos os coeficientes, não se considerando a determinação do valor de d . Em seguida determina-se o valor de d a partir dos valores de a_6 , b_6 , e c_6 e do desvio $\Delta W(T_{90})$ do valor de referência $W_r(T_{90})$ no ponto de solidificação da prata (1234,93 K). O coeficiente d é usado apenas em medições de temperatura na faixa do ponto de solidificação do alumínio até o ponto de solidificação da prata. Para medições de temperatura abaixo do ponto de solidificação do alumínio o valor de d é igual a zero.

3.1.2.2.6 Sub-faixa de medição de 273,15 K a 933,473 K

Nessa faixa de medição, a função de desvio é dada pela relação:

$$\Delta W_7(T_{90}) = a_7 [W(T_{90}) - 1] + b_7 [W(T_{90}) - 1]^2 + c_7 [W(T_{90}) - 1]^3 \quad (53)$$

Os coeficientes a_7 , b_7 , e c_7 são obtidos pela medição nos pontos de solidificação do estanho (505,078 K), zinco (692,677 K) e alumínio (933,473 K).

3.1.2.2.7 Sub-faixa de medição de 273,15 K a 692,677 K

Nessa faixa de medição, a função de desvio é dada pela relação:

$$\Delta W_8(T_{90}) = a_8 [W(T_{90}) - 1] + b_8 [W(T_{90}) - 1]^2 \quad (54)$$

Os coeficientes a_8 e b_8 são obtidos pela medição nos pontos de solidificação do estanho (505,078 K) e zinco (692,677 K).

3.1.2.2.8 Sub-faixa de medição de 273,15 K a 505,078 K

Nessa faixa de medição, a função de desvio é dada pela relação:

$$\Delta W_9(T_{90}) = a_9 [W(T_{90}) - 1] + b_9 [W(T_{90}) - 1]^2 \quad (55)$$

Os coeficientes a_9 e b_9 são obtidos pela medição nos pontos de solidificação do índio (429,7485 K) e estanho (505,078 K).

3.1.2.2.9 Sub-faixa de medição de 273,15 K a 429,7485 K

Nessa faixa de medição, a função de desvio é dada pela relação:

$$\Delta W_{10}(T_{90}) = a_{10} [W(T_{90}) - 1] \quad (56)$$

O coeficiente a_{10} é obtido pela medição no ponto de solidificação do índio (429,7485 K).

3.1.2.2.10 Sub-faixa de medição de 273,15 K a 302,9146 K

Nessa faixa de medição, a função de desvio é dada pela relação:

$$\Delta W_{11}(T_{90}) = a_{11} [W(T_{90}) - 1] \quad (57)$$

O coeficiente a_{11} é obtido pela medição no ponto triplo da água (273,16 K) e no ponto de fusão do gálio (302,9146 K).

3.1.2.2.11 Sub-faixa de medição de 234,3156 K a 302,9146 K

Nessa faixa de medição, a função de desvio é dada pela relação:

$$\Delta W_5(T_{90}) = a_5 [W(T_{90}) - 1] + b_5 [W(T_{90}) - 1]^2 \quad (58)$$

Os coeficientes a_5 e b_5 são obtidos pela medição no ponto triplo do mercúrio (234,3156 K) e no ponto de fusão do gálio (302,9146 K). O valor de referência $W_r(T_{90})$ deve ser calculado levando-se em conta a faixa o ponto fixo utilizado, ambas as Equações 38 e 40 devem ser utilizadas para cobrir essa sub-faixa de medição.

3.1.3 Medição de termo resistências de platina

A medição de resistência de um sensor de termo resistência de platina é um procedimento necessário para a avaliação da temperatura termodinâmica. Torna-se necessário implementar circuitos e métodos de ensaio para que se possa minimizar os erros e as incertezas devido a variações aleatórias nas indicações, efeitos de auto-aquecimento, estabilidade e uniformidade do banho térmico, dentre outros.

3.1.3.1 Elemento sensor

A platina, utilizada como elemento sensor termo resistivo é um metal nobre, e como tal é um elemento estável (relativamente indiferente ao ambiente onde é utilizado), facilmente trabalhado em fios finos, tem elevado ponto de fusão e pode ser obtido com elevado grau de pureza. Todas essas características traduzem-se numa relação estável de resistência-temperatura ($R-T$) que caracteriza o sensor em uma larga faixa de temperaturas. Entretanto, de modo a se obter um sensor termo resistivo com essas características desejáveis é necessário evitar contaminação da platina e efetuar uma montagem livre de tensões, pois esses efeitos alteram a relação $R-T$ (BENEDICT, 1984).

Os sensores são normalmente construídos enrolando-se um fino fio de platina na forma de espiral em torno de um núcleo de mica ou cerâmica. Em seguida é feito o recozimento para eliminar tensões residuais provenientes em defeitos na malha cristalina. O tamanho do fio vai estar relacionado com a resistência desejada a 0 °C, podendo ser, por exemplo, de 25,5 Ω ou 100 Ω .

3.2 MEDIÇÃO DE PRESSÃO

O medidor de pressão utilizada na medição de vazão é do tipo capacitivo, isto é, o elemento sensor é um capacitor que varia direta e proporcionalmente à pressão. São determinadas duas pressões distintas, uma estática, que é a pressão do fluido medida na parede da tubulação, onde não há movimento e outra diferencial, ou dinâmica, utilizada para medir a vazão através de um elemento deprimogênito, como a placa de orifício.

3.3 FATOR DE COMPRESSIBILIDADE

O fator de compressibilidade define o afastamento do comportamento do gás real em relação a um gás perfeito. Em um gás ideal são desprezados as interações moleculares, mas sabe-se que num gás real essas interações existem e influenciam no seu comportamento de pressão/volume/temperatura (PVT). A equação de estado que define o comportamento PVT de um gás perfeito é definida por:

$$p \cdot \bar{v} = \bar{R} \cdot T \quad (59)$$

quando em base molar, ou:

$$p \cdot v = R \cdot T \quad (60)$$

em base mássica, onde:

P - Pressão do gás (Pa);

T - Temperatura (K);

\bar{v}, v - Volume específico em base molar e mássica;

\bar{R}, R - Constante universal dos gases e constante particular.

Percebe-se que, para um gás ideal, a relação $\frac{p \cdot v}{R \cdot T}$ permanece constante e igual à unidade, independentemente do estado em que o gás se encontre. Para um gás real essa relação não é constante e torna-se necessário introduzir um termo, chamado fator de compressibilidade Z .

O fator de compressibilidade é uma equação de estado. Existem diversas equações de estado para determinação do fator de compressibilidade de gases, uma das mais adequadas, e com base teórica firme, é a equação do Virial (SMITH, et al., 2000)

3.3.1 Equações do Virial

As equações do Virial determinam o fator de compressibilidade com base numa expansão em série de potências de V , que é o volume molar do gás real (SMITH, et al., 2000)

$$Z = 1 + \frac{B}{V} + \frac{C}{V^2} + \frac{D}{V^3} + \dots \quad (61)$$

Onde:

B, C, D, \dots - Segundo, terceiro, quarto, ... coeficientes do Virial

Os coeficientes do Virial para determinada mistura de gases são obtidos a partir dos conceitos da mecânica estatística, onde o primeiro coeficiente refere-se ao comportamento do gás ideal, o segundo coeficiente refere-se às interações entre duas moléculas, o terceiro coeficiente refere-se à interação entre três moléculas e assim sucessivamente. O uso das equações do Virial é particularmente útil ao se trabalhar em baixas pressões, pois nessas condições as interações entre quatro ou mais moléculas tornam-se menos frequentes e, desta forma, a série de potências da Equação 61 pode ser truncada no terceiro termo sem acarretar com isso em elevado desvio entre o comportamento do gás previsto pela equação de estado e o medido.

Para uma mistura de gases o segundo e o terceiro coeficientes do Virial podem ser expressos como (SMITH, et al., 2000):

$$B = \sum_i \sum_j y_i \cdot y_j \cdot B_{ij} \quad (62)$$

e

$$C = \sum_i \sum_j \sum_k y_i \cdot y_j \cdot y_k \cdot C_{ijk} \quad (63)$$

onde:

y - Fração molar

i, j, k - Índices que representam as espécies químicas

B - Segundo coeficiente do Virial

C - Terceiro coeficiente do Virial

3.3.2 Relatório AGA-8

O relatório da AGA-8 fornece uma estimativa do fator de compressibilidade para gases compostos de hidrocarbonetos, inclusive o gás natural.

É fornecido nesse relatório uma série de equações empíricas, baseadas nos coeficientes de interação moleculares entre os diversos constituintes do gás natural, de modo

a estimar com exatidão o fator de compressibilidade em função da composição do gás natural, além da pressão e temperatura os quais o mesmo está submetido.

Todavia, associada a esta estimativa existe uma incerteza, que é declarada em termos de faixas de pressão e temperatura conforme exposto na Figura 6.

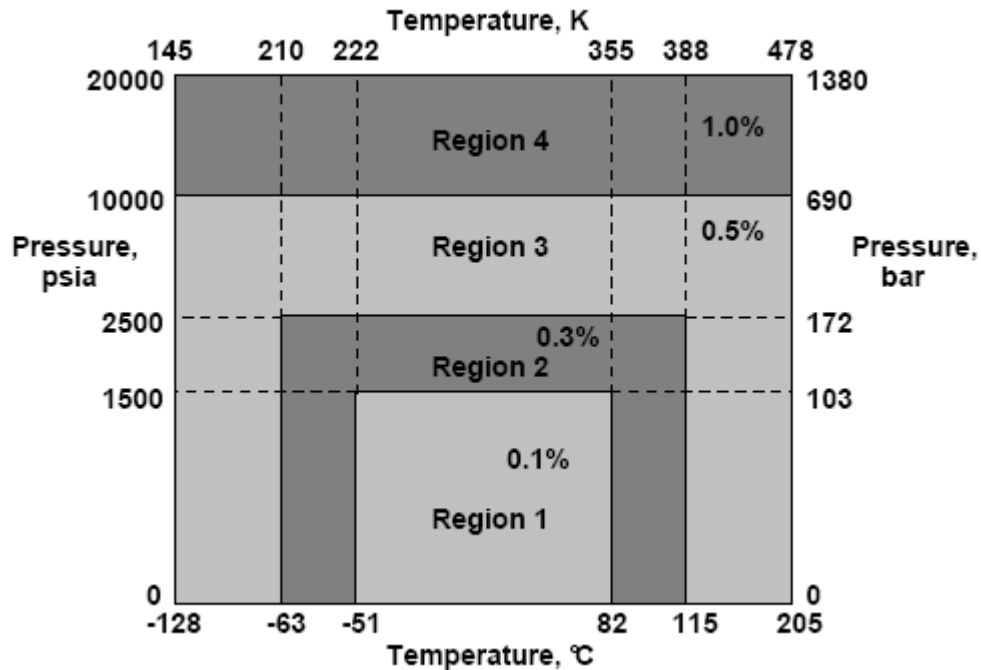


Figura 6 - Incerteza associada à determinação do fator de compressibilidade

3.4 MEDIÇÃO DE VAZÃO

3.4.1 Tipos de escoamento interno

O escoamento interno caracteriza-se por estar envolto por superfície sólida, é denominado também de escoamento em duto. A sua natureza pode ser laminar ou turbulenta.

A natureza do escoamento está relacionada com a razão entre forças de inércia e forças viscosas (FOX & MCDONALD, 2001). Quem primeiro identificou esse fenômeno foi o engenheiro Osborne Reynolds, cujos estudos pioneiros na determinação dos tipos de escoamento renderam-lhe a homenagem de ser utilizado um parâmetro adimensional com seu nome para a classificação do tipo de escoamento.

O número de Reynolds é a razão entre as forças de inércia e as forças viscosas. Quando o número de Reynolds é inferior a aproximadamente 2100, diz-se que o escoamento é laminar, quando essa mesma razão apresenta um valor maior que aproximadamente 4100 diz-se que o escoamento é turbulento, com um número de Reynolds entre 2100 e 4100 diz-se que o regime de escoamento é uma transição entre o regime laminar e o turbulento. O número de Reynolds é expresso através da seguinte equação:

$$Re = \frac{\rho \cdot \bar{V} \cdot D}{\mu} \quad (64)$$

onde:

ρ - Densidade do fluido

\bar{V} - Velocidade média do perfil de velocidades

D - Diâmetro da tubulação

μ - Viscosidade dinâmica do fluido

O regime laminar de escoamento processa-se de forma ordenada, com o fluido deslocando-se em camadas que não interagem umas com as outras, enquanto o regime turbulento processa-se de forma desordenada, dificultando, ou até mesmo impossibilitando uma descrição analítica do movimento do fluido.

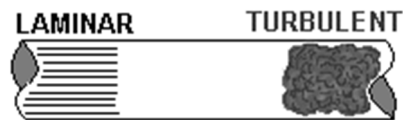


Figura 7 - Regimes de escoamento

O interesse em se estudar o regime turbulento consiste em se tentar descrever o comportamento do perfil de velocidades em um escoamento interno. O perfil de velocidades e as propriedades de um fluido real escoando em um duto genérico variam tanto longitudinal como transversalmente ao longo do duto. As variações nas seções transversais não apresentam necessariamente um comportamento simétrico, o que torna o escoamento de fluidos reais em dutos essencialmente tridimensional.

Devido à complexidade da análise de um campo de escoamento tridimensional é comum uma abordagem simplificada, considerando uma modelagem unidimensional.

(MICKAN, 1998) realizaram estudos do escoamento em dutos utilizando diferentes configurações e constataram que, utilizando ar como fluido de trabalho, foi possível garantir que em uma tubulação reta com comprimento de no mínimo 28 vezes o diâmetro interno da tubulação, o perfil turbulento de velocidades apresenta-se completamente desenvolvido. A partir desta constatação torna-se razoável utilizar nos cálculos uma velocidade média do escoamento \bar{V} , uniforme em cada seção transversal da tubulação.

3.4.2 Retificação e condicionamento de vazão

O regime de escoamento de fluidos é essencialmente tridimensional. Numa tubulação reta com comprimento de no mínimo 28 vezes o diâmetro interno é possível se obter um perfil turbulento de velocidades completamente desenvolvido (MICKAN, 1998), mas essa configuração de tubulação nem sempre é possível de ser obtida. De modo a obter um perfil turbulento de velocidades uniforme em cada seção, são introduzidas na tubulação os retificadores e condicionadores de vazão. Esses elementos agem reduzindo as componentes tangenciais e radiais de velocidade, garantindo assim um fluxo unidimensional na direção axial. (MICKAN, 1998) investigaram a performance de diversos retificadores (Figura 7) e condicionadores de vazão e concluíram que, dentre os equipamentos analisados, o condicionador do tipo Zanker (Figura 8) foi o que apresentou melhor performance geral, pois além de reduzir ou remover as componentes de velocidade radial e tangencial, esse condicionador de vazão modifica a componente axial de velocidades, de modo a produzir um fluxo simétrico em cada seção.

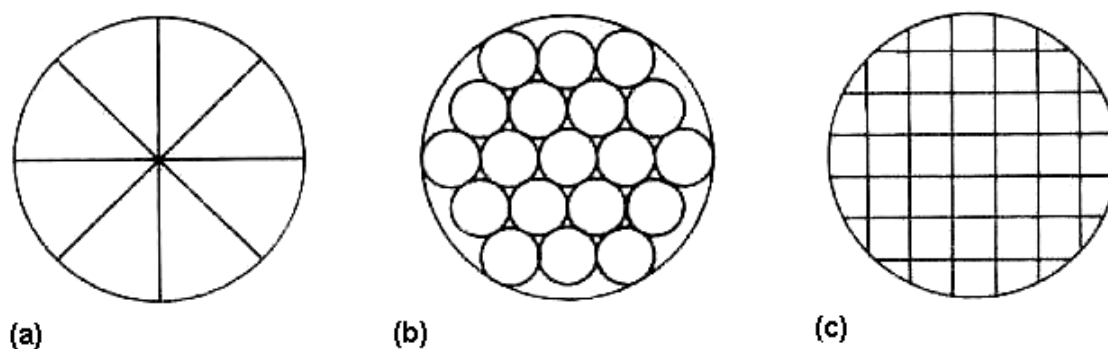


Figura 8 - Tipos de linearizadores de vazão: (a) Etoile; (b) Tube bundle; (c) Box;

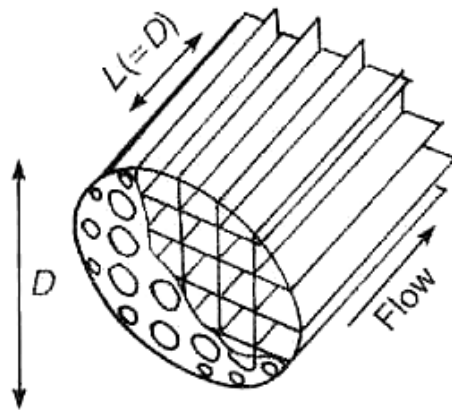


Figura 9 - Condicionador de vazão Zanker

3.4.3 Medidores de vazão

Existem atualmente diversos tipos de medidores de vazão disponíveis no mercado tais como placas de orifício, venturis, medidores de deslocamento positivo, coriolis, ultrasônicos, turbina, etc. Será dado um enfoque maior aos medidores de vazão do tipo turbina e do tipo placa de orifício em função da larga base instalada no Brasil e sua aplicabilidade para operações de transferência de custódia em grandes volumes.

3.4.3.1 Tipo turbina

O medidor tipo turbina tem como elementos principais um rotor montado em um eixo e mancal (Figura 10). O fluido cuja vazão deve ser medida passa pelas lâminas do rotor, fazendo com que o mesmo gire com velocidade proporcional à velocidade do fluido. O rotor de uma turbina é projetado de modo a gerar o mínimo de distúrbio no fluido que passa pelas suas lâminas, de modo a cortar o fluido na forma de uma hélice perfeita, fazendo com que cada revolução da hélice represente um comprimento axial de um parafuso e por essa razão, um volume calculável. Na prática, existem forças de atrito (mecânicas ou magnéticas) que retardam a rotação do eixo, de modo a fazer com que a rotação do eixo represente um volume calculado menor que o real (OLIVIER, 2001). Esse fenômeno gera não linearidades, uma vez que o atrito não é constante em toda a faixa de medição. Para medir a velocidade do

rotor um dispositivo é necessário, podendo ser usado um conjunto de engrenagens ou um sensor eletrônico que detecta a passagem de cada lâmina gerando um pulso.

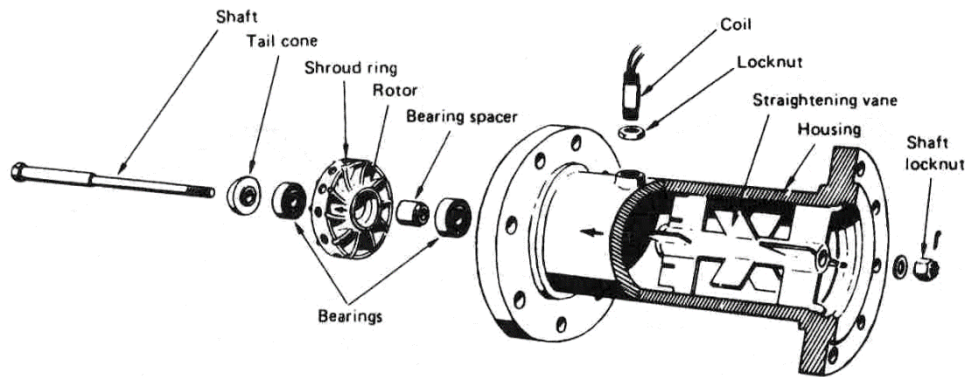


Figura 10 - Medidor tipo turbina (BAKER, 2000)

O pulso gerado por rotação na turbina indica, no caso ideal, uma quantidade definida e constante de volume, o que não ocorre em toda a faixa de medição devido aos efeitos do atrito. O fator K de uma turbina é definido como a relação entre a vazão volumétrica e a frequência de pulsos na forma:

$$K = \frac{f}{q} \quad (65)$$

onde:

- K - Fator do medidor
- f - Frequência de pulsos, em hertz
- q - Vazão no medidor, em m^3/s

3.4.3.2 Placa de orifício

A placa de orifício é um elemento deprimogênito, isto é, um elemento que mede vazão pela geração de perda de carga no escoamento.

Os elementos primários geradores de depressão são instrumentos que utilizam bases teóricas cuja aplicação é imediata. Sua interação com o fluido tem fundamentos físicos diretos, sem mecanismos intermediários. Sua função é criar uma diferença de pressão Δp que seja relacionada a vazão Q , descrita por uma equação do tipo:

$$Q = k\sqrt{\Delta p} \quad (66)$$

Incluindo-se no valor de k os parâmetros próprios do elemento deprimogênito, da configuração física de instalação e das características do fluido medido” (DELMÉE, 1995)

CAPÍTULO 4 CALIBRAÇÃO DAS GRANDEZAS DE ENTRADA

4.1 CALIBRAÇÃO DE TRANSMISSORES DE TEMPERATURA

O transmissor de temperatura é um instrumento que funciona como uma cadeia de medição de temperatura, pois nesse instrumento é composto de sensor de termo resistência de platina, transdutor, microprocessador para conversão dos valores de resistência em temperatura e opcionalmente alguns modelos vêm equipados com display. É possível calibrar as constantes características do sensor, mas o procedimento mais comum consiste em apenas calibrar o transmissor de temperatura comparando a saída fornecida pelo display do equipamento em Celsius ou Kelvin com aquela fornecida pela cadeia de medição que inclui uma termo resistência de platina padrão (SPRT).

O princípio de calibração de um transmissor de temperatura é a calibração por comparação a um instrumento rastreável à ITS-90 (um SPRT). Ambos os instrumentos, devem ser submetidos a um banho à temperatura controlada, sendo realizadas N medições consecutivas e independentes para cada temperatura t_{90} , variando a temperatura t_{90} em função da faixa de medição do transmissor de temperatura e do número de pontos desejados para ajuste da curva de calibração pelo método dos mínimos quadrados descrito na da seção 2.11.

4.1.1 Fontes de incerteza

As fontes de incerteza que influenciam na dispersão dos resultados de uma calibração de um transmissor de temperatura podem ser listadas em seis grupos:

Incerteza devido à não-uniformidade, profundidade de imersão e instabilidade do banho térmico (Tipo B);

Incerteza importada do certificado de calibração da termo resistência de platina padrão utilizada (Tipo B);

Incerteza devido à resolução na indicação do instrumento padrão e do instrumento em teste (Tipo B);

Dispersão devido à medição de t_{90} (Tipo A);

Dispersão devido à medição de t (Tipo A);

Incerteza devido ao ajuste utilizado (Tipo A).

4.1.1.1 Incertezas devido ao banho térmico

O banho térmico deve fornecer uma temperatura uniforme e estável ao longo do tempo, mas sabe-se que existe um gradiente de temperatura nas direções radial e axial no interior do recipiente onde é feito o ensaio, além do que existem instabilidades devidas ao controle de temperatura do banho (MOREIRA, 2001).

4.1.1.1.1 Incerteza devido à não-uniformidade do banho na direção radial

A incerteza devido à não-uniformidade da temperatura ao longo da direção radial pode ser determinada a partir do máximo desvio entre as estimativas de temperaturas obtidas em diferentes pontos ao longo da direção radial do banho térmico (Figura 11), considerando-se uma função de densidade retangular, utilizando-se termo resistências de platina rastreáveis a ITS-90.

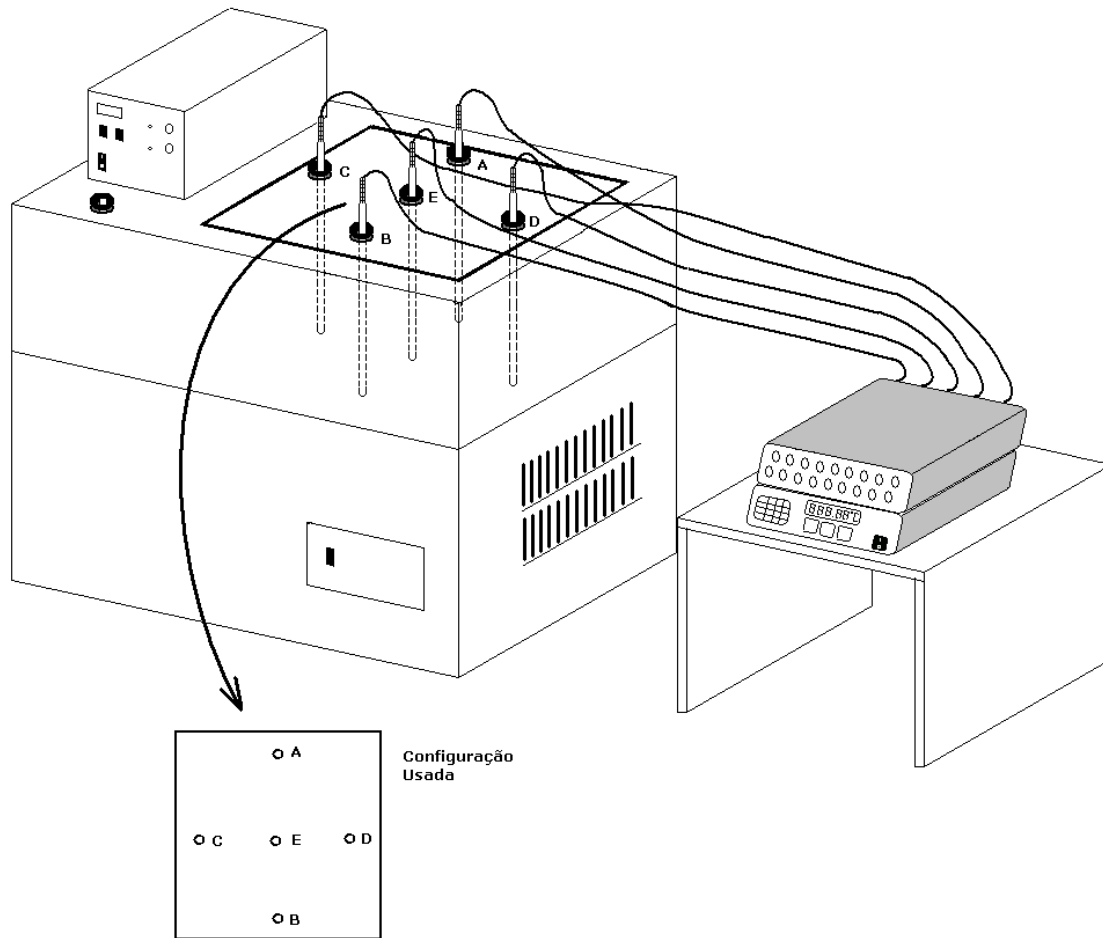


Figura 11 - Determinação da não uniformidade radial do banho térmico, com distribuição espacial de termo resistências no banho

Para cada termo resistência de platina tem-se:

$\bar{t}_{90_j} \rightarrow j = 1..N$ - Estimativa da temperatura t_{90} no sensor j ;

$s_{t_j} = \frac{s_t}{\sqrt{n}} \rightarrow j = 1..N$ - Desvio padrão amostral da média das temperaturas j

$= 1,2,..N$;

$\frac{U(t_j)}{k}$ - Incerteza padrão combinada do sensores $j = 1,2,..N$

fornecida pelo certificado de calibração.

res - Resolução do equipamento indicador

O desvio máximo radial é definido como a diferença entre a maior estimativa de temperatura menos a menor estimativa de temperatura, obtidas a partir de termo resistências de platina localizadas em uma mesma profundidade de imersão e em diferentes posições na direção radial. O valor de sua estimativa é dado por:

$$D_r = \bar{t}_{\max} - \bar{t}_{\min} \quad (67)$$

onde \bar{t}_{\max} é o valor máximo da estimativa dentre as termo resistências e \bar{t}_{\min} é o valor mínimo.

Devido ao não conhecimento da distribuição de frequências associada às médias dos desvios máximos, assume-se uma função de densidade retangular. Desta forma tem-se:

$$u_1(D_r) = \frac{\bar{t}_{\max} - \bar{t}_{\min}}{\sqrt{12}} \quad (68)$$

Deve-se todavia propagar as incertezas devido às medições de \bar{t}_{\max} e \bar{t}_{\min} na incerteza de D_r , desta forma tem-se os seguintes coeficientes de sensibilidade:

$$c_2 = \frac{\partial D_r}{\partial \bar{t}_{\max}} = \frac{\partial}{\partial \bar{t}_{\max}} (\bar{t}_{\max} - \bar{t}_{\min}) = 1 \quad (69)$$

e

$$c_3 = \frac{\partial D_r}{\partial \bar{t}_{\min}} = \frac{\partial}{\partial \bar{t}_{\min}} (\bar{t}_{\max} - \bar{t}_{\min}) = -1 \quad (70)$$

As influência das incertezas devido às medições de \bar{t}_{\max} e \bar{t}_{\min} é obtida multiplicando pelos respectivos coeficientes de sensibilidade pelas incertezas padrão determinadas a partir da dispersão dos resultados de medição

$$u_2(D_r) = c_2 \cdot u(\bar{t}_{\max}) = 1 \cdot u(\bar{t}_{\max}) \quad (71)$$

$$u_3(D_r) = c_3 \cdot u(\bar{t}_{\min}) = -1 \cdot u(\bar{t}_{\min}) \quad (72)$$

- incerteza padrão combinada:

$$u_c(D_r) = \sqrt{u_1(D_r)^2 + u_2(D_r)^2 + u_3(D_r)^2} \quad (73)$$

- graus de liberdade efetivos:

$$v_{eff}(D_r) = \frac{u_c(D_r)^4}{\frac{u_1(D_r)^4}{v_1} + \frac{u_2(D_r)^4}{v_2} + \frac{u_3(D_r)^4}{v_3}} \quad (74)$$

4.1.1.1.2 Incerteza devido à não-uniformidade do banho na direção axial

A incerteza devido à não-uniformidade da temperatura ao longo da direção axial pode ser determinada a partir do máximo desvio entre as estimativas de temperaturas obtidas em diferentes profundidades de imersão do banho térmico (Figura 12), respeitando-se a condição de que a profundidade de imersão mínima deve ser ao menos quinze vezes o diâmetro das termo resistências de platina rastreáveis pela ITS-90.

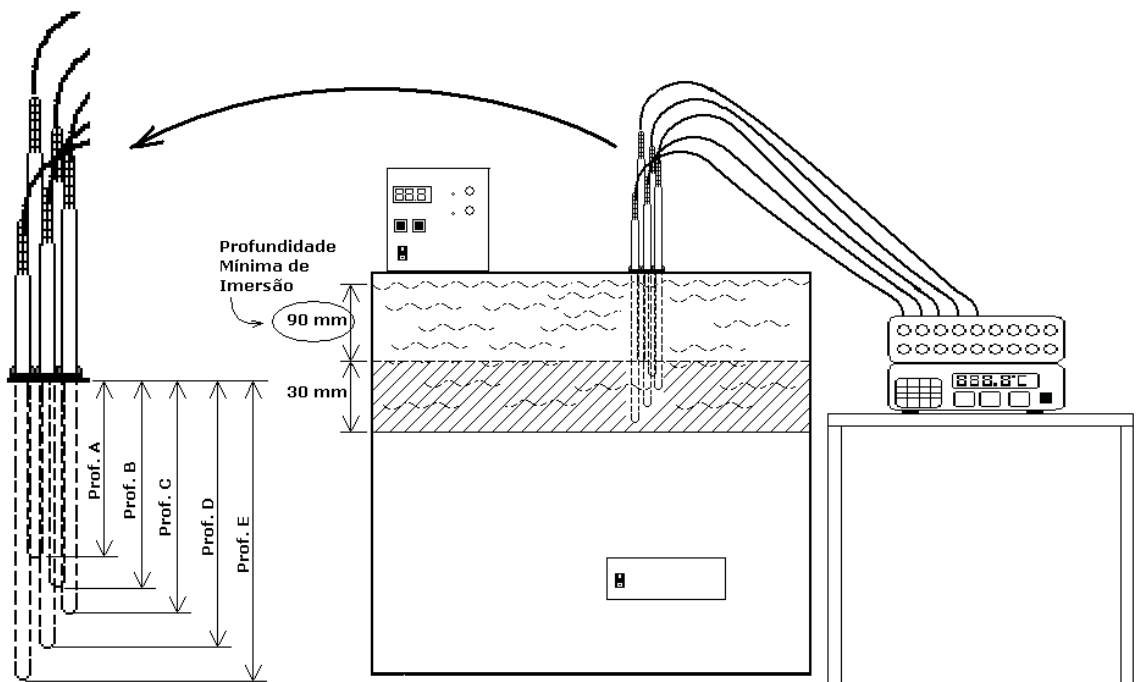


Figura 12 - Determinação da não uniformidade axial do banho térmico com termo resistências posicionadas à diferentes profundidades de banho

Para cada termo resistência de platina tem-se:

$\bar{t}_{90_j} \rightarrow j = 1..N$ - Estimativa da temperatura t_{90} no sensor j ;

$s_{t_j} = \frac{s_t}{\sqrt{n}} \rightarrow j = 1..N$ - Desvio padrão amostral da média das temperaturas j

$= 1, 2, \dots, N$;

$$\frac{U(t_j)}{k} \quad - \text{ Incerteza padrão combinada dos sensores } j = 1, 2, \dots, N \text{ fornecida pelo}$$

certificado de calibração.

res - Resolução do equipamento indicador

O desvio máximo axial é definido como a diferença entre a maior estimativa de temperatura menos a menor estimativa de temperatura, obtidas a partir de termorresistências de platina localizadas em diferentes profundidades de imersão. O valor de sua estimativa é dado por:

$$D_a = \bar{t}_{\max} - \bar{t}_{\min} \quad (75)$$

onde \bar{t}_{\max} é o valor máximo da estimativa dentre as termorresistências e \bar{t}_{\min} é o valor mínimo.

Devido ao não conhecimento da distribuição de frequências associada às médias dos desvios máximos, assume-se uma distribuição de probabilidades retangular. Desta forma tem-se:

$$u_1(D_a) = \frac{\bar{t}_{\max} - \bar{t}_{\min}}{\sqrt{12}} \quad (76)$$

Deve-se todavia propagar as incertezas devido às medições de \bar{t}_{\max} e \bar{t}_{\min} na incerteza de D_a , desta forma tem-se os seguintes coeficientes de sensibilidade:

$$c_2 = \frac{\partial D_a}{\partial \bar{t}_{\max}} = \frac{\partial}{\partial \bar{t}_{\max}} (\bar{t}_{\max} - \bar{t}_{\min}) = 1 \quad (77)$$

e

$$c_3 = \frac{\partial D_a}{\partial \bar{t}_{\min}} = \frac{\partial}{\partial \bar{t}_{\min}} (\bar{t}_{\max} - \bar{t}_{\min}) = -1 \quad (78)$$

A influência das incertezas devido às medições de \bar{t}_{\max} e \bar{t}_{\min} é obtida multiplicando pelos respectivos coeficientes de sensibilidade pelas incertezas padrão determinadas a partir da dispersão dos resultados de medição

$$u_2(D_a) = c_2 \cdot u(\bar{t}_{\max}) = 1 \cdot u(\bar{t}_{\max}) \quad (79)$$

$$u_3(D_a) = c_3 \cdot u(\bar{t}_{\min}) = -1 \cdot u(\bar{t}_{\min}) \quad (80)$$

- incerteza padrão combinada:

$$u_c(D_a) = \sqrt{u_1(D_a)^2 + u_2(D_a)^2 + u_3(D_a)^2} \quad (81)$$

- graus de liberdade efetivos:

$$v_{eff}(D_a) = \frac{u_c(D_a)^4}{\frac{u_1(D_a)^4}{v_1} + \frac{u_2(D_a)^4}{v_2} + \frac{u_3(D_a)^4}{v_3}} \quad (82)$$

4.1.1.1.3 Incerteza devido à não-estabilidade do banho

A incerteza devido à não-estabilidade da temperatura ao longo do tempo pode ser determinada utilizando-se uma termo resistência de platina rastreável pela ITS-90 a partir do máximo desvio entre as temperaturas medidas em instantes sucessivos de tempo. Tem-se então:

$$t_i \quad - \text{Indicações de temperatura } t_{90}, \quad t_i = f(R_i, \bar{R}_{0j});$$

$$s_{\bar{R}_{0j}} = \frac{s_{R0}}{\sqrt{n}} \quad - \text{Desvio padrão amostral da média da termo resistência em } t_{90} = 0^\circ\text{C};$$

$$\frac{U(t)}{k} \quad - \text{Incerteza padrão combinada da temperatura indicada do}$$

sensor, fornecida pelo certificado de calibração.

$$\frac{U(R)}{k} \quad - \text{Incerteza padrão do instrumento de medição, fornecida pelo}$$

certificado de calibração.

res - Resolução em ohms do equipamento

O desvio máximo da não-estabilidade é definido como a diferença entre a maior indicação de temperatura menos a menor indicação de temperatura em um dado intervalo de tempo suficiente para que seja completado um ciclo térmico, ou seja, o tempo necessário para que a temperatura em um dado ponto do banho térmico oscile entre seu valor máximo e o valor mínimo, retornando ao valor inicial. A estimativa do desvio máxima é dada por:

$$D_e = t_{\max} - t_{\min} \quad (83)$$

onde t_{\max} é o valor máximo de temperatura obtido em um intervalo de tempo suficiente para completar um ciclo térmico e t_{\min} é o valor mínimo.

Devido ao não conhecimento da distribuição de frequências associada às médias dos desvios, assume-se uma distribuição de probabilidades retangular. Desta forma tem-se:

$$u_1(D_e) = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{\sqrt{12}} \quad (84)$$

Deve-se todavia propagar as incertezas devido às medições de t_{\max} e t_{\min} na incerteza de D_e , desta forma tem-se os seguintes coeficientes de sensibilidade:

$$c_2 = \frac{\partial D_e}{\partial t_{\max}} = \frac{\partial}{\partial t_{\max}} (t_{\max} - t_{\min}) = 1 \quad (85)$$

e

$$c_3 = \frac{\partial D_e}{\partial t_{\min}} = \frac{\partial}{\partial t_{\min}} (t_{\max} - t_{\min}) = -1 \quad (86)$$

A influência das incertezas devido às medições de \bar{t}_{\max} e \bar{t}_{\min} é obtida multiplicando pelos respectivos coeficientes de sensibilidade pelas incertezas padrão determinadas a partir da dispersão dos resultados de medição

Deve-se considerar também a incerteza padrão fornecida pelo certificado de calibração da termo resistência:

$$u_3(\bar{t}_{\max}) = \frac{U(t)}{k} \quad (87)$$

- incerteza padrão combinada:

$$u_c(\bar{t}_{\max}) = \sqrt{u_1(\bar{t}_{\max})^2 + u_2(\bar{t}_{\max})^2 + u_3(\bar{t}_{\max})^2} \quad (88)$$

- graus de liberdade efetivos:

$$v_{eff}(\bar{t}_{\max}) = \frac{u_c^4}{\frac{u_1(\bar{t}_{\max})^4}{v_1} + \frac{u_2(\bar{t}_{\max})^4}{v_2} + \frac{u_3(\bar{t}_{\max})^4}{v_3}} \quad (89)$$

4.1.2 Calibração de transmissor de temperatura e determinação de incertezas

O transmissor de temperatura é um dispositivo que incorpora o elemento sensor termo resistivo, conversão de valores de resistência em temperatura através de equações de interpolação, exibição de valores de temperatura através de display e possibilidade de incorporação em um sistema supervisorio para coleta automática de dados. O objetivo da calibração deste equipamento consiste em se determinar uma relação funcional entre a temperatura indicada pelo equipamento (t) e a temperatura termodinâmica (t_{90}) em qualquer temperatura fornecida pelo equipamento, além de determinação de sua incerteza.

O ajuste de t a t_{90} consiste em determinar uma função que relacione a variável t a t_{90} e determinar a incerteza padrão combinada com base na combinação das incertezas devidas à variação aleatória nos valores de temperatura e da variância dos resíduos do ajuste.

O melhor ajuste, é obtido a partir da escolha de um $\varphi(t_i)$ que fornece a menor variância dos resíduos. As opções mais utilizadas são aquelas referentes a funções polinomiais de grau n .

A partir de um conjunto de pares de pontos (\bar{t}_{90}, \bar{t}) , é feito o ajuste de uma função $\varphi(\bar{t}_i) = \bar{t}_{90}$ que propicie a menor variância dos resíduos. Tem-se então, para cada par de estimativas (\bar{t}_{90}, \bar{t}) :

\bar{t}_{90} - Estimativa da temperatura no SPRT;

$\sigma_{\bar{t}_{90}}$ - Desvio padrão amostral das indicações do SPRT;

\bar{t} - Estimativa da temperatura do elemento em teste;

$\sigma_{\bar{t}}$ - Desvio padrão amostral das indicações do transmissor de temperatura em teste;

A incerteza padrão combinada de \bar{t} é derivada das contribuições da incerteza devido ao padrão utilizado, das variações aleatórias na indicação do mensurando e nos efeitos de histerese.

A determinação da incerteza de \bar{t} consiste em se efetuar medições sucessivas e independentes em temperaturas t_{90} num sentido ascendente e depois descendente, incluindo desta forma os efeitos da histerese em \bar{t} . Um vez definidas em cada nível as estimativas de \bar{t} e \bar{t}_{90} e quantificada a dispersão na ordem de um desvio padrão amostral s , então é

necessário que, para aplicação do método fornecido pela Seção 2.11, seja determinada o desvio padrão populacional da variável dependente (t) e considerando a variável dependente isenta de erros. A estimação do desvio padrão populacional é feita a partir do uso da distribuição chi-quadrado, com N-1 graus de liberdade (número de amostras em cada nível). A partir das estimativas de \bar{t} e \bar{t}_{90} são determinados os coeficientes de $\varphi(t_i)$ e também os coeficientes lineares do intervalo de confiança.

4.2 CALIBRAÇÃO DE ELEMENTOS TRANSMISSORES DE PRESSÃO ESTÁTICA E DIFERENCIAL

O transmissor de pressão é um dispositivo que incorpora o elemento sensor capacitivo, exibição de valores de pressão através de display e possibilidade de incorporação em um sistema supervisor para coleta automática de dados. O objetivo da calibração deste equipamento consiste em se determinar uma relação funcional entre a pressão indicada pelo equipamento (p) e a pressão indicada por um instrumento padrão (p_{pad}) em qualquer pressão fornecida pelo equipamento, além de determinação de sua incerteza. O esquema de calibração em campo pode ser mostrado na Figura 13.

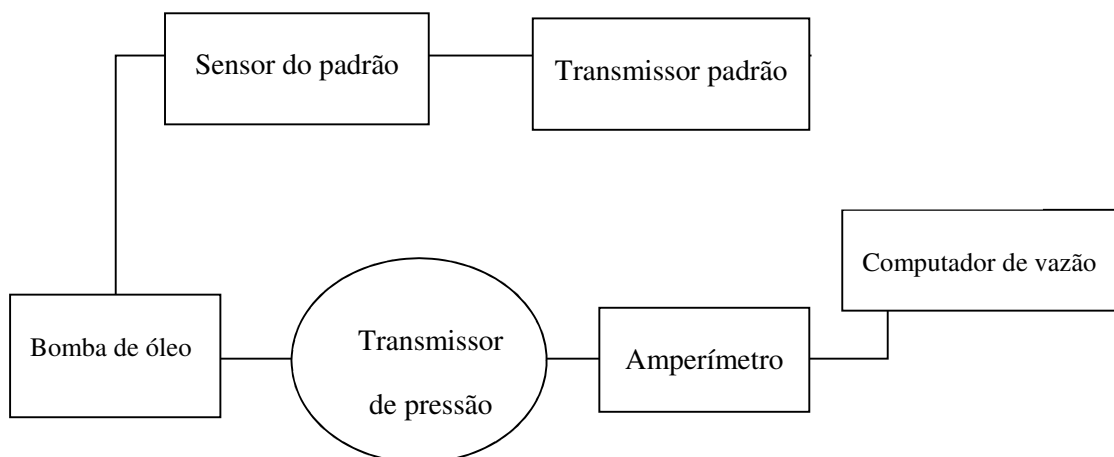


Figura 13 - Esquema para calibração de pressão em campo.

Nesse esquema, um mesmo mensurando (pressão de óleo aplicada por uma bomba) é medido simultaneamente por um instrumento padrão e por um computador de vazão. É necessário considerar a propagação da incerteza em todos os instrumentos envolvidos, seja

o transmissor de pressão (PT), que possui um elemento sensor capacitivo e converte essa indicação em escala de 4 a 20mA, o amperímetro, que possui uma incerteza associada à medição da corrente elétrica e o computador de vazão, que possui incerteza referente a exibição numa quantidade limitada de casas decimais (distribuição retangular).

O ajuste de p a p_{pad} consiste em determinar uma função que relacione a variável p a p_{pad} e determinar a incerteza padrão combinada com base na combinação das incertezas devidas à variação aleatória nos valores de pressão e da variância dos resíduos do ajuste.

O melhor ajuste, é obtido a partir da escolha de um $\varphi(t_i)$ que fornece a menor variância dos resíduos. As opções mais utilizadas são aquelas referentes a funções polinomiais de grau n .

A partir de um conjunto de pares de pontos (\bar{p}_{pad}, \bar{p}) , é feito o ajuste de uma função $\varphi(\bar{p}_i) = \bar{p}_{pad}$ que propicie a menor variância dos resíduos. Tem-se então, para cada par de estimativas (\bar{p}_{pad}, \bar{p}) :

\bar{p}_{pad} - Estimativa da pressão indicada pelo medidor padrão;

$\sigma_{p_{pad}}$ - Desvio padrão amostral das indicações do SPRT;

\bar{p} - Estimativa da pressão indicada pelo transmissor de pressão em teste;

σ_p - Desvio padrão amostral das indicações do transmissor de pressão em teste;

A incerteza padrão combinada de \bar{p} é derivada das contribuições da incerteza devido ao padrão utilizado, das variações aleatórias na indicação do mensurando e nos efeitos de histerese.

A determinação da incerteza de \bar{p} consiste em se efetuar medições sucessivas e independentes em diferentes pressões (definidas como 0%, 25%, 50%, 75%, 100% da amplitude da faixa nominal) num sentido ascendente e depois descendente, incluindo desta forma os efeitos da histerese em \bar{p} . Um vez definidas em cada nível as estimativas de p e p_{pad} e quantificada a dispersão na ordem de um desvio padrão amostral s , então é necessário que, para aplicação do método fornecido pela Seção 2.11, seja determinada o desvio padrão populacional da variável dependente (p) e considerando a variável dependente isenta de erros. A estimação do desvio padrão populacional é feita a partir do uso da distribuição chi-

quadrado, com N-1 graus de liberdade (número de amostras em cada nível). A partir das estimativas de \bar{t} e \bar{t}_{90} são determinados os coeficientes de $\varphi(t_i)$ e também os coeficientes lineares do intervalo de confiança.

CAPÍTULO 5 RESULTADOS

5.1 SISTEMA DE INFORMAÇÃO

A função do sistema de informação desenvolvido é automatizar o processo de calibração de instrumentos em campo, permitindo o arquivamento dos resultados em um banco de dados. É importante considerar que é possível acompanhar a tendência de um determinado equipamento ao longo do tempo, comparando curvas de ajuste determinadas em sucessivas calibrações.

5.1.1 Banco de dados

Foi utilizado um banco de dados relacional de modo a armazenar os dados relativos às informações de cada empresa onde pode ser realizada a calibração em campo, suas malhas de gasoduto, estações de gás, equipamentos instalados e seus históricos de calibração, de modo a ser verificada a tendência de evolução dos erros sistemáticos ao longo do tempo. (observe que isto pode ir para a materiais e métodos)

5.1.2 Planilha de calibração

A entrada e processamento dos dados de calibração obtidos em campo são executados em uma planilha de calibração, cuja finalidade é agir como interface entre o operador e o banco de dados. O número de planilhas a ser criado depende da quantidade de instrumentos selecionados para calibração em formulários e a maior parte dos dados operacionais, tais como identificação do equipamento e do local onde é feita a calibração, são preenchidos automaticamente, restando ao operador selecionar os padrões de calibração

a serem utilizados, sendo exibidos para seleção apenas aqueles relacionados à grandeza a ser calibrada, cujo certificado de calibração não esteja vencido. A tela inicial do programa (Figura 14) consiste em um formulário onde é selecionada a transportadora/distribuidora solicitante do serviço de calibração. Quando se escolhe uma transportadora, a caixa de combinação da malha de gasodutos é preenchida com as malhas onde a transportadora/distribuidora opera e para cada uma destas selecionadas são exibidas as estações de gás correspondentes.

Calibração de instrumentos em campo

Selecionar operador(es)	Selecionar fiscal(is)	Transportadora / Distribuidora
Marcilio Bayer Vivianne Menezes	Alysson Regis Gerizaldo Maia Jailson Costa	MOD_TRANSP
		Malha SE
		Estação de gás MODELO_ESTACAO
		Data / Hora 11/07/03 - 14:34

Nome: _____ Função: _____

Adicionar

Encerrar Programa

Selecionar instrum. Gerar planilha(s)

FIGURA 14 - TELA INICIAL DO PROGRAMA

Em seguida, é necessário escolher ao menos um fiscal e um executor da calibração, e apenas após a seleção destes, será habilitada a opção de selecionar os instrumentos a serem calibrados para a estação de gás escolhida. Quando o botão correspondente à opção de selecionar os instrumentos estiver ativado, ao pressioná-lo é aberto um formulário, onde é feita a seleção dos mesmos (Figura 15).

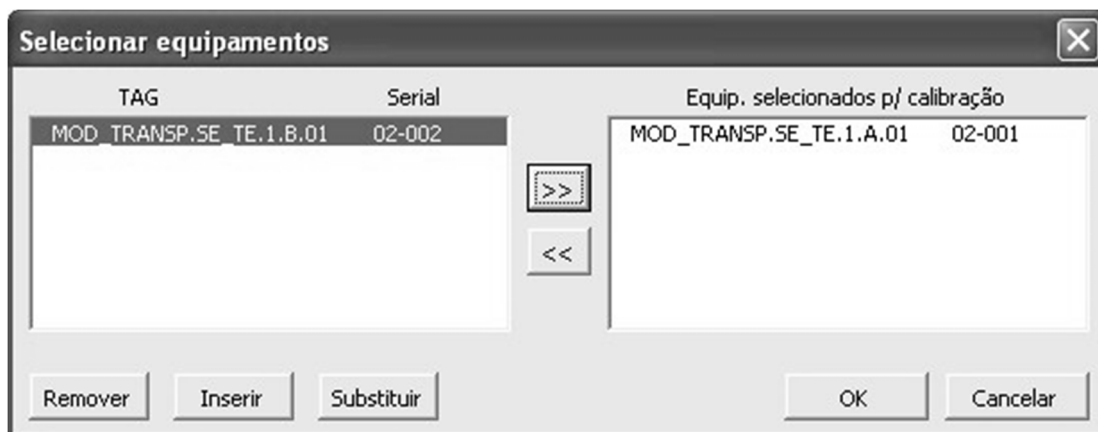


FIGURA 15 - FORMULÁRIO PARA SELEÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

Na lista da esquerda estão dispostos os equipamentos existentes na estação de gás, sendo possível remover, adicionar ou substituir algum equipamento existente; sua forma de identificação (TAG) é baseada em (INSTRUMENT SOCIETY OF AMERICA – ISA, 1992), sendo definido um modelo para preenchimento do TAG, qual seja:

transport.malha_função.codestação.tramo.cronológico

onde

transport – Transportadora/Distribuidora;

malha – Malha de gasodutos onde está localizada a estação;

função – Código de função do equipamento segundo (INSTRUMENT SOCIETY OF AMERICA – ISA, 1992);

codestação – Código da estação fornecido pela transportadora;

tramo – Tramo de medição onde está instalado o equipamento a ser calibrado;

cronológico – Número que indica uma ordem cronológica para equipamentos de mesma função instalado em um mesmo tramo de medição.

Após a seleção dos equipamentos retorna-se à tela inicial (Figura 14), onde o botão de gerar planilhas estará ativado; quando pressionado, será criado o número de planilhas correspondente ao de equipamentos. Em cada planilha de calibração são preenchidos os dados de identificação do equipamento e condições operacionais (Figura 16).

Transp. / Malha	MOD_TRANSP / SE		Estação:		Mudar para planilha			Fechar Planilha			
Data - Hora:			Temperatura amb.		Ant.		Prox.				
Informações sobre a calibração da grandeza - Temperatura											
Instrumento	Fabricante	Modelo	Serial	TAG	Faixa de medição - Celsius		Resolução - Celsius	Última calibração			
transmissor de temperatur	SMAR	TT302	02-001	MOD_TRANSP.SE_TE.1.A.0	10 30		0,01				
Preenchimento dos dados de calibração											
As found - Ajuste de curva do tipo:					Linear						
As found do equipamento - Transmissor de temperatura - Tipo de calibração:					Malha						
1ª Aquisição		2ª Aquisição		3ª Aquisição		4ª Aquisição		Estimativa		Variância experimental (s ²)	Erro Fiducial
Padrão - °C	Instrumento	Padrão - °C	Instrumento	Padrão - °C	Instrumento	Padrão - °C	Instrumento	Padrão	Instrumento	Padrão	Instrumento
10		10		10		10					
15		15		15		15					
20		20		20		20					
25		25		25		25					
30		30		30		30					
Processar						Selecionar padrões					
As left - Ajuste de curva do tipo: Linear											
As left do equipamento - Transmissor de temperatura - Tipo de calibração: Malha - psi											
1ª Aquisição		2ª Aquisição		3ª Aquisição		4ª Aquisição		Estimativa		Variância experimental (s ²)	Erro Fiducial
Padrão - °C	Instrumento	Padrão - °C	Instrumento	Padrão - °C	Instrumento	Padrão - °C	Instrumento	Padrão	Instrumento	Padrão	Instrumento

FIGURA 16 - PLANILHA DE CALIBRAÇÃO

Na planilha de calibração são inseridos automaticamente os nomes da transportadora/distribuidora, estação de gás, grandeza e respectivos instrumentos a serem calibrados, fabricante, modelo, número de série, TAG, faixa de medição, resolução e data da última calibração. Com base na faixa de medição do equipamento, são definidas as indicações a serem fornecidas pelo instrumento padrão, que devem ser obtidas em 0%, 25%, 50%, 75% e 100% da faixa de medição do equipamento a ser calibrado.

É importante considerar que apenas os campos pertinentes ao preenchimento manual (indicações do padrão e do instrumento a ser calibrado) podem ser editados, sendo permitida a execução dos cálculos apenas quando os campos são preenchidos com valores numéricos.

Após o preenchimento dos dados da calibração efetuada no estado atual do equipamento sem ajuste (as found), é necessário selecionar os padrões utilizados para calibração. Esse procedimento é realizado ao se pressionar o botão selecionar padrões, localizado na planilha; após isto, é exibido um formulário onde são exibidos todos os padrões relacionados com a grandeza a ser calibrada em questão (Figura 17), cuja calibração não esteja vencida.



FIGURA 17 - SELEÇÃO DOS PADRÕES UTILIZADOS NA CALIBRAÇÃO

É possível selecionar apenas um padrão de cada tipo para formar a cadeia de medição (ex.: elemento sensor + elemento indicador), onde deverão ser combinadas as fontes de incertezas oriundas de cada elemento desta cadeia.

São facultados ao operador a seleção do tipo de calibração (malha de medição ou instrumento individual) e o tipo de ajuste polinomial (linear, quadrático, cúbico), onde serão calculados os respectivos coeficientes lineares através do método dos mínimos quadrados.

Após selecionados os padrões e tendo sido os dados preenchidos corretamente na planilha, o botão processar (Figura 16) é habilitado, tornando possível a realização de todos os cálculos necessários à avaliação metrológica do instrumento em questão.

5.1.3 Exemplo de calibração para um transmissor de temperatura

Para verificação do método foi realizada a calibração de um instrumento de medição de temperatura com indicador digital acoplado, tendo este os seguintes parâmetros operacionais:

Faixa de trabalho: 10 °C a 30 °C

Resolução: 0,01 °C

A seleção do equipamento foi feita conforme Figura 14 e Figura 15, gerando em seguida a planilha de calibração correspondente (Figura 16).

Os padrões selecionados para a cadeia de medição foram os seguintes:

1 – Indicador digital:

- Incerteza padrão combinada: 0,00001792 °C

- Resolução: 0,0001 °C
 - Graus de liberdade efetivos: infinito
- 2 – Termorresistência padrão de trabalho:
- Incerteza padrão combinada: 0,03 °C
 - Resolução: N.D.
 - Graus de liberdade efetivos: infinito

Os dados obtidos durante o procedimento de calibração foram preenchidos na planilha e estão expressos na Figura 18.

1ª Aquisição		2ª Aquisição		3ª Aquisição		4ª Aquisição	
Padrão - °C	Instrumento	Padrão - °C	Instrumento	Padrão - °C	Instrumento	Padrão - °C	Instrumento
10,1088	9,9	10,1031	9,91	10,1043	9,91	10,1104	9,91
15,1785	14,99	15,1799	14,99	15,1802	14,99	15,1832	14,98
20,156	19,97	20,1498	19,96	20,154	19,97	20,1572	19,98
25,1921	25,01	25,1878	25,01	25,1887	25,01	25,1861	25,01
30,1291	29,97	30,1309	29,96	30,1299	29,97	30,1339	29,97

FIGURA 18 - INDICAÇÕES DO PADRÃO E INSTRUMENTO

Depois de selecionados os padrões, é habilitado o botão processar, que após a realização de cálculos, fornece uma tabela resumindo o resultado da calibração em cada nível, expressando este as estimativas, variâncias e erros fiduciais (onde o valor fiducial é a amplitude da faixa de medição) (Figura 19), um gráfico exibindo o ajuste linear em toda a faixa de medição (Figura 20) e um segundo gráfico com os erros oriundos da diferença entre as estimativas e a equação ajustada, a barra de incerteza padrão combinada em cada estimativa e a curva de incerteza em função da variável independente (Figura 21).

Estimativa		Variância experimental (s ²)		Erro Fiducial
Padrão	Instrumento	Padrão	Instrumento	
10,10665	9,9075	1,227E-05	2,5E-05	-0,995750%
15,18045	14,9875	3,91E-06	2,5E-05	-0,964750%
20,15425	19,97	1,0543E-05	6,6667E-05	-0,921250%
25,188675	25,01	6,3758E-06	0	-0,893375%
30,13095	29,9675	4,41E-06	2,5E-05	-0,817250%

FIGURA 19 - RESULTADO DA CALIBRAÇÃO EM CADA NÍVEL

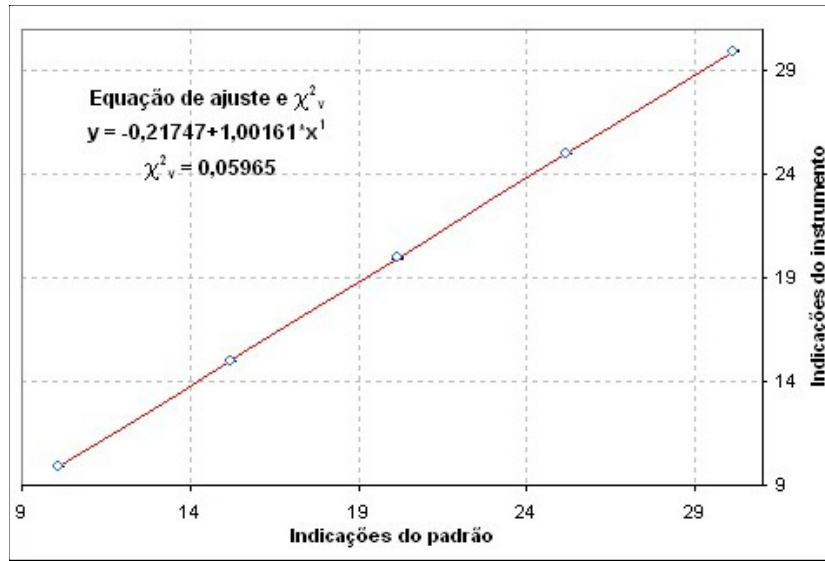


FIGURA 20 - EQUAÇÃO DE AJUSTE PARA TODA A FAIXA DE MEDIÇÃO

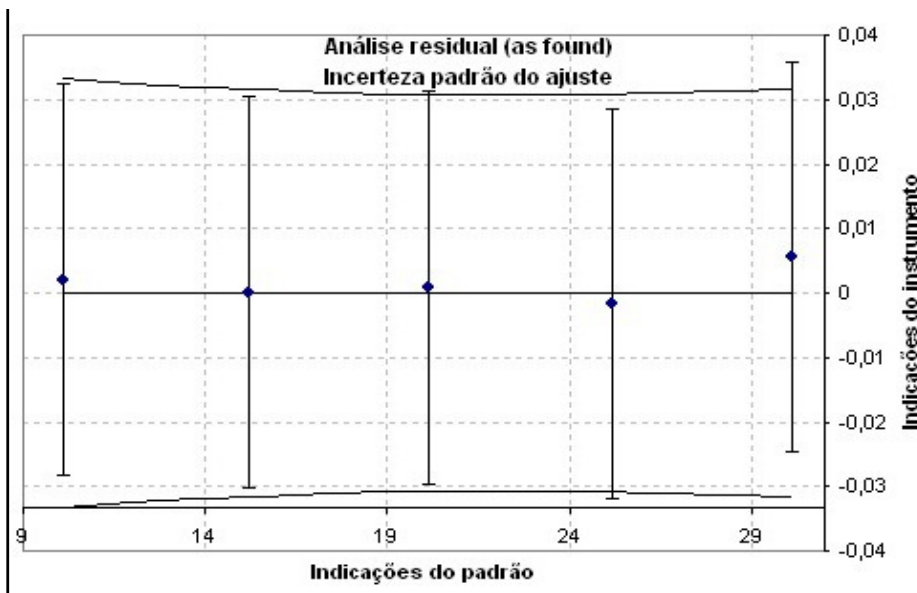


FIGURA 21 - INCERTEZA PADRÃO COMBINADA DO AJUSTE

CAPÍTULO 6 DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Foi apresentado um método para avaliação metrológica de instrumentos existentes em estações de gás natural, tornando possível a determinação da equação de ajuste da indicação obtida em campo em relação ao valor verdadeiro convencional, bem como uma estimativa da incerteza padrão combinada.

É possível com o registro histórico das calibrações anteriores se obter a tendência de evolução dos erros sistemáticos ao longo do tempo, de modo a se determinar automaticamente a deriva, ou seja, a variação lenta de uma característica metrológica de um instrumento de medição (INMETRO, 2003), como uma fonte de incerteza adicional.

A rastreabilidade da medição é garantida, uma vez que em cada registro de calibração se tem associados os padrões utilizados, bem como o resultado de calibrações destes.

O software apresentado encontra aplicabilidade para calibração de instrumentos, cujo mensurando é medido diretamente. Uma limitação a ser superada é a determinação do valor de um mensurando como combinação de várias grandezas de entrada, como ocorre no caso de calibração de instrumentos de medição de vazão, cujo mensurando é determinado a partir da medição de grandezas como pressão, temperatura, fração molar dos constituintes do gás natural, dentre outros.

Conforme pôde ser exposto na Equação 26, é necessário determinar o desvio padrão dos resíduos em cada nível, uma vez que não se possui conhecimento prévio sobre o mesmo. É preciso que o instrumento a ser calibrado ou o padrão possua suficiente sensibilidade e resolução, de modo a tornar possível a detecção das variações aleatórias de medição do mensurando, pois o método não pode ser aplicado quando a variância residual for igual a zero (o que faria com que o denominador da Equação 26 fosse zero).

Por fim, a abordagem empregada nesse trabalho oferece uma solução para a determinação da incerteza de medição quando o valor indicado pelo instrumento for diferente daqueles listados num relatório de calibração tradicional. Além disso, é possível verificar que, salvo na ocorrência medições que venham a fazer com que a o erro sistemático em determinado nível y_i se distancie muito do melhor ajuste obtido pelo método dos mínimos quadrados, as incertezas obtidas em cada nível y_i estão coerentes com a curva de incerteza padrão do ajuste linear, tornando possível, para cada indicação do instrumento x_i , a obtenção do valor verdadeiro convencional y_i e incerteza padrão combinada $\sigma_y(x_i)$

CAPÍTULO 7 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Uma vez determinada a equação de ajuste que relaciona as indicações obtidas por instrumentos instalados em campo e aquelas que seriam obtidas por um instrumento padrão, bem como a sua incerteza associada, é necessário corrigir as indicações obtidas com base nesse ajuste e propagar a incerteza de medição para a medição de vazão, massa ou energia, de forma automatizada numa central de supervisão. Uma vez realizando essa etapa, colaborar-se-á com o aumento da confiabilidade da medição como um todo.

REFERÊNCIAS

- ABNT; INMETRO; SBM, 1998. *Guia Para a Expressão da Incerteza de Medição..* 2 ed. Rio de Janeiro: SERIFA Editoração e Informática S/C Ltda.
- ABNT, 1997. *NBR 13772: Termorresistência – Calibração por comparação com termorresistência de referência.* Rio de Janeiro: ABNT.
- ABNT, 1997. *NBR 13773: Termorresistência industrial de platina – Requisitos e métodos de ensaio.* Rio de Janeiro: ABNT.
- BAKER, R. C., 2000. *Flow measurement handbook: industrial designs, operating principles, performance and applications.* Cambridge: Cambridge University Press.
- BENEDICT, R. P., 1984. *Fundamentals of temperature, pressure, and flow measurements.* 3 ed. New York: Wiley-Interscience.
- BUSSAB, W. D. O. & MORETTIN, P. A., 2002. *Estatística básica.* 5 ed. São Paulo: Saraiva.
- DELMÉE, G. J., 1995. *Manual de medição de vazão.* 2 ed. São Paulo: Edgard Bücher.
- DIECK, R. H., 1997. *Measurement uncertainty: methods and applications.* 2 ed. Research Triangle Park: ISA Press.
- DIETRICH, C. F., 1991. *Uncertainty, Calibration and Probability: The Statistics of Scientific and Industrial Measurement.* 2 ed. Bristol: Adam Hilger.
- FIDLER, J., 2003. *Interval estimators.* [Online] Available at: <http://home.xnet.com/~fidler/triton/math/review/mat170/estimate/interval/interval1.htm> [Acesso em 5 Fevereiro 2003].
- FOX, R. W. & MCDONALD, A. T., 2001. *Introdução à mecânica dos fluidos.* 5 ed. Rio de Janeiro: LTC Livros Técnicos e Científicos Editora S.A..

IEC, 1995. *International Standard 751: Industrial platinum resistance thermometer sensors. ementa 2*. Genève: IEC.

INMETRO, 2003. *Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia*. Rio de Janeiro: INMETRO.

INSTRUMENT SOCIETY OF AMERICA – ISA, 1992. *ANSI/ISA-5.1-1984 (R1992), Instrumentation Symbols and Identification*. Research Triangle Park: ISA Press.

LIRA, I., 2002. *Evaluating the Measurement Uncertainty: Fundamentals and Practical Guidance*. Londres: Institute of Physics Publishing.

MANGUN, B. W. & FURUKAWA, G. T., 1990. *NIST Technical Note 1265: Guidelines for Realizing the International Temperature Scale of 1990 (ITS-90)*, Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology.

MICKAN, B. e. a., 1996. Systematic investigation of pipe flows and installation effects using laser Doppler anemometry: Part I. Profile measurements downstream of several pipe configurations and flow conditioners. *Flow measurement and instrumentation*, Volume 7, pp. 141-149.

MICKAN, B. e. a., 1996. Systematic investigation of pipe flows and installation effects using laser Doppler anemometry: Part II. The effect of disturbed flow profiles on turbine gas meters – a describing empirical model. *Flow measurement and instrumentation*, Volume 7, pp. 151-160.

MICKAN, B. e. a., 1998. Systematic investigation of flow profiles in pipes and their effects on gas meter behaviour. *Measurement*, Volume 22, pp. 1-14.

MOREIRA, L., 2001. *Calibração de sensores de temperatura. rev. 1*. São Paulo: Help-temperatura.

MOREIRA, L., 2001. *Sensores de temperatura: Princípios e aplicações. rev. 1*. São Paulo: Help-temperatura.

NETER, J., KUTNER, M. H., NACHTSHEIM, C. J. & WASSERMAN, W., 1996. *Applied Linear Statistical Models*. 4 ed. s.l.:WCB/McGraw-Hill.

OLIVIER, P. D., 2001. Turbine Flowmeters. Em: *Flow Measurement of the Practical Guide Series*. Research Triangle Park: ISA Press, pp. 473-514.

RICHTER, P. H., 1995. *Estimating Errors in Least-Squares Fitting*, s.l.: s.n.

RUGGIERO, M. A. G. & LOPES, V. L. R., 1996. Ajuste de curvas pelo método dos quadrados mínimos. Em: *Cálculo numérico: aspectos teóricos e computacionais*. São Paulo: Makron Books Ltda, pp. 268-294.

SMITH, J. M., NESS, H. C. V. & M., A. M., 2000. *Introdução à termodinâmica da engenharia química*. 5 ed. Rio de Janeiro: LTC Livros Técnicos e Científicos Editora S.A..

SONNTAG, R. E., C., B. & V., W. G. J., 1998. *Fundamentos da termodinâmica*. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda..

SPIEGEL, M. R., 1993. *Estatística*. 3 ed. São Paulo: Makron Books.

SWOKOWSKI, E. W., 1994. Cálculo vetorial. Em: *Cálculo com geometria analítica*. São Paulo: Makron Books, pp. 559-635.

VUOLO, J. H., 1998. *Fundamentos da teoria dos erros*. 2 ed. s.l.:s.n.