4
Incerteza Sobre Vazão e Volume

4.1.
Incerteza de Medição

O resultado de uma medição é uma aproximação, ou uma estimativa do valor de um mensurando. Assim sendo, a apresentação de um resultado de medição só é completa quando acompanhada de uma quantidade que declara sua incerteza (Mendes, 2005). Em termos estritos, a incerteza de medição é um "parâmetro não-negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando, com base nas informações utilizadas", conforme a 1ª edição luso-brasileira do Vocabulário Internacional de Metrologia versão 2012 - VIM (INMETRO, 2012).

O VIM estabelece que tal "parâmetro pode ser, por exemplo, um desvio-padrão ou a metade da amplitude dum intervalo tendo uma probabilidade de abrangência determinada". Incluindo componentes oriundos de efeitos sistemáticos, engloba componentes estimadas a partir de distribuição estatística de valores medidos (denominadas como sendo do Tipo A), e por experiência ou outras informações, baseadas em funções de densidade de probabilidade (estas denominadas como sendo do Tipo B).

Alguns conceitos associados à incerteza são importantes quando se pretende estimar esta característica de uma grandeza. A simples expressão "incerteza" assume diferentes significados, dependendo de como se aborda determinado problema. Segundo o VIM, alguns importantes conceitos são definidos como:

- Incerteza-padrão - é a incerteza de medição de uma grandeza expressa na forma de um desvio-padrão;
- Incerteza-padrão combinada - Incerteza-padrão obtida ao se utilizarem incertezas-padrão individuais associadas às grandezas de entrada num modelo de medição;

- Fator de abrangência - Número maior do que um pelo qual uma incerteza-padrão combinada é multiplicada para se obter uma incerteza de medição expandida;
- Incerteza expandida - Produto duma incerteza-padrão combinada por um fator maior do que o número um. O fator, aqui definido como um fator de abrangência, depende do tipo de distribuição de probabilidade da grandeza de saída e da probabilidade de abrangência escolhida.

4.1.1. ISO-GUM e ISO-5168

Em 1993, a ISO emitiu o Guia Para Expressão da Incerteza de Medição (*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* – GUM, no original em inglês), como resultado de um dos seus diversos grupos de trabalho. O *ISO-GUM*, revisado em 1995, subsidiou a edição, em 1998, do documento chamado *Measurement of Fluid Flow — Procedures for the Evaluation of Uncertainties*, denominado *ISO-5168* (2005), que aborda aspectos relativos à estimativa de incerteza na medição de vazão. Uma segunda edição foi emitida em 2005.

O princípio basilar da norma ISO-5168 é o estabelecimento de uma metodologia para a estimativa de incerteza de um grandeza (no caso, vazão, mas a metodologia é extensível a qualquer outra), suportada por um modelo matemático desta previamente definido. Conhecidas as variáveis que influenciam o comportamento de uma grandeza e como estas se relacionam, procede-se à estimativa de incerteza, a partir das incertezas individuais de cada variável e de seu peso relativo. A este peso dá-se o nome de coeficiente de sensibilidade.

Seja então uma grandeza definida como uma função de n variáveis de acordo com a equação (25):

$$y = f(x_1, x_2, x_3, ..., x_n) \tag{25}$$

Seguindo a orientação da ISO-5168, a incerteza-padrão de f assumirá o carácter de uma incerteza-padrão combinada. Tendo cada um das variáveis associadas a si uma incerteza-padrão, faz-se necessário identificar os coeficientes de sensibilidade associados a cada variável. Cada coeficiente é determinado como sendo a derivada parcial da função *f* em relação à sua respectiva variável. Uma vez determinados os coeficientes, a incerteza-padrão combinada de *f* será dada como a raiz da soma dos quadrados dos produtos dos coeficientes e das incertezas-padrão das variáveis, conforme a equação (26). O índice *c* apenas reforça a idéia de que esta é uma incerteza combinada. Convenciona-se utilizar o caracter *u* (minúsculo) para denotar uma incerteza-padrão, combinada ou não.

$$u_c(f) = \sqrt{(\frac{\partial f}{\partial x_1}.u(x_1))^2 + (\frac{\partial f}{\partial x_2}.u(x_2))^2 + ... + (\frac{\partial f}{\partial x_n}.u(x_n))^2} \tag{26}$$

Onde:

$\frac{\partial f}{\partial x_i}$ = derivada parcial de *f* em relação a x_i;

$u(x_i)$ = incerteza-padrão da variável x_i.

A incerteza expandida, como definida pelo VIM, está associada a um determinado intervalo de confiança (ou probabilidade de abrangência). Ou seja, é uma quantidade que define um intervalo em torno do resultado de uma ou mais medições que, crê-se, abranja um percentual significativo da distribuição de valores que poderiam ser atribuídos ao mensurando (Orlando, 2009).

Em muitos casos, o número de observações (ou amostras) que dão origem a incertezas-padrão de variáveis de uma grandeza, na forma de desvios-padrão, não é suficientemente grande para garantir um fator de abrangência (*k*) igual a 2, e consequentemente um grau de confiança de aproximadamente 95% para o valor atribuído à grandeza. Quando tal ocorre, é necessário obter um outro fator que possa ser associado ao intervalo de confiança desejado. Será necessário determinar o que se denomina como graus de liberdade efetivos para a grandeza. Para incertezas do Tipo A, o número de graus de liberdade equivale à quantidade de observações (ou medidas, valores, amostras) menos 1. Para incertezas do Tipo B, o número de graus de liberdade é assumido como sendo metade do inverso da raiz da incerteza-padrão relativa da variável (ISO, 2005).

Conhecidas as incertezas-padrão (u_i), bem como seus respectivos coeficientes de sensibilidade (c_i), a incerteza-padrão combinada da grandeza (u_c), e os graus de liberdade para cada variável (v_i), determina-se o número de graus de liberdade efetivos v_{eff} aplicando-se a fórmula de Welch-Satterthwaite:

$$v_{eff} = \frac{u_c^4(f)}{\sum_{i=1}^{n} \frac{(c_i \cdot u_i)^4}{v_i}} \tag{27}$$

Uma vez determinado o número de graus de liberdade efetivos, o mesmo indicará qual o fator que caracterizará a incerteza expandida para um dado grau de confiança. Este fator será oriundo da tabela da distribuição de probabilidade "t" de Student, e correspondente ao intervalo desejado. A tabela 2 associa, como exemplo, os valores para uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95% (Spiegel & Stephens, 2009).

Tabela 2 - Distribuição t de Student

v_{eff}	t Student	v_{eff}	t Student
1	13,97	15	2,18
2	4,53	20	2,13
3	3,31	25	2,11
4	2,87	30	2,09
5	2,65	35	2,07
6	2,52	40	2,06
7	2,43	50	2,05
8	2,37	60	2,04
9	2,32	70	2,04
10	2,28	80	2,03
11	2,25	90	2,03
12	2,23	100	2,03
13	2,21	Infinito	2,00

O produto obtido através da multiplicação de *t* encontrado (o equivalente ao fator de abrangência *k*) pela incerteza-padrão combinada da grandeza será a incerteza expandida. Convenciona-se utilizar o caracter *U* (maiúsculo) para nomear a incerteza expandida.

$$U_{95}(f) = k \cdot u_c(f) \tag{28}$$

Onde:

$U_{95}(f)$ = Incerteza expandida de *f* para intervalo de confiança de ≈ 95%

4.2. Incerteza da Medição de Vazão de Gás por Placa de Orifício

A partir da equação (2), que permite o cálculo da vazão mássica, pode-se verificar as fontes de incerteza de medição e combiná-las para determinação da incerteza da vazão mássica. Considerando que β é a relação entre o diâmetro d do furo da placa e o diâmetro interno D do duto (ambos expressos à temperatura de operação), a expressão da incerteza da vazão mássica de gás será, então:

$$u(Q_m) = \sqrt{\begin{matrix} \left(\dfrac{\partial Q_m}{\partial Cd} \cdot u(Cd)\right)^2 + \left(\dfrac{\partial Q_m}{\partial d} \cdot u(d)\right)^2 + \left(\dfrac{\partial Q_m}{\partial \varepsilon} \cdot u(\varepsilon)\right)^2 + \ldots \\ \ldots + \left(\dfrac{\partial Q_m}{\partial D} \cdot u(D)\right)^2 + \left(\dfrac{\partial Q_m}{\partial \Delta P} \cdot u(\Delta P)\right)^2 + \left(\dfrac{\partial Q_m}{\partial \rho_o} \cdot u(\rho_o)\right)^2 \end{matrix}} \qquad (29)$$

Onde:

$u(Cd)$ = incerteza do coeficiente de descarga;

$u(d)$ = incerteza do diâmetro do furo da placa de orifício;

$u(\varepsilon)$ = incerteza do fator de expansão;

$u(D)$ = incerteza do diâmetro interno do duto;

$u(\Delta P)$ = incerteza da pressão diferencial;

$u(\rho_o)$ = incerteza da massa específica à temperatura de operação;

$\dfrac{\partial Q_m}{\partial d}$ = derivada da vazão mássica relativa ao diâmetro do furo da placa de orifício;

$\dfrac{\partial Q_m}{\partial Cd}$ = derivada da vazão mássica relativa ao coeficiente de descarga;

$\dfrac{\partial Q_m}{\partial \varepsilon}$ = derivada da vazão mássica relativa ao fator de expansão;

$\dfrac{\partial Q_m}{\partial D}$ = derivada da vazão mássica relativa ao diâmetro interno do duto;

$\dfrac{\partial Q_m}{\partial \Delta P}$ = derivada da vazão mássica relativa ao diferencial de pressão;

$\dfrac{\partial Q_m}{\partial \rho_o}$ = derivada da vazão mássica relativa à massa específica em condições de operação.

No entanto, nem todas as variáveis nesta equação são independentes: C_d é função do diâmetro *d* do furo da placa e do diâmetro interno *D* do duto, bem como *ε*, que também é função de *ΔP*. Porém, na maioria dos casos práticos, é suficiente admitir que as incertezas de *ε*, *ΔP* e *ρ* são independentes entre si e independentes das incertezas de *Cd* e *d* (Martins, 1998). A incerteza da massa específica do gás agrega as incertezas da pressão absoluta, da massa molar, da temperatura absoluta e do fator de compressibilidade do gás nas condições de operação.

A incerteza-padrão da vazão volumétrica em condições de referência, considerando a equação (3), será:

$$u(Q_{ref}) = \sqrt{\left(\frac{\partial Q_{ref}}{\partial Q_m} \cdot u(Q_m)\right)^2 + \left(\frac{\partial Q_{ref}}{\partial \rho_{ref}} \cdot u(\rho_{ref})\right)^2} \qquad (30)$$

Onde:

$u(Q_{ref})$ = incerteza da vazão volumétrica em condições de referência;

$\frac{\partial Q_{ref}}{\partial Q_m}$ = derivada da vazão volumétrica em relação à vazão mássica;

$\frac{\partial Q_{ref}}{\partial \rho_{ref}}$ = derivada da vazão volumétrica em relação à massa específica;

$u(Q_m)$ = incerteza da vazão mássica;

$u(\rho_{ref})$ = incerteza da massa específica em condições de referência.

4.3. Incerteza Sobre o Volume: Medição de Vazão por Placa de Orifício

A equação (20) define o cálculo do volume em condições de referência para um ponto de medição de vazão com placa de orifício num dado intervalo de tempo. De posse do modelo, as fontes de incerteza podem ser identificadas e relacionadas na equação (31).

$$u(V_{ref(t)}) = \sqrt{\left(\frac{\partial V_{ref(t)}}{\partial IMV_t} \cdot u(IMV_t)\right)^2 + \left(\frac{\partial V_{ref(t)}}{\partial IV_t} \cdot u(IV_t)\right)^2} \qquad (31)$$

Onde:

$u(V_{ref\,(t)})$ = incerteza do volume em condições de referência no período *t*;

$\dfrac{\partial V_{ref\,(t)}}{\partial IMV_t}$ = derivada do volume em relação ao multiplicador do período *t*;

$\dfrac{\partial V_{ref\,(t)}}{\partial IV_t}$ = derivada do volume em relação ao acúmulo *IV* no período *t*;

$u(IMV_t)$ = incerteza do multiplicador *IMV* para o período de tempo *t*;

$u(IV_t)$ = incerteza da quantidade *IV* acumulada no período de tempo *t*.

Segue-se um desenvolvimento que consiste em determinar $u(IMV_t)$ e $u(IV_t)$. Tendo em vista o foco na medição ultrasônica, uma alternativa é proposta. Supondo que se conheça um determinado volume em condições de referência, computado dentro certo intervalo de tempo, caso seja conhecida a incerteza da vazão volumétrica média (também em condições de referência) neste intervalo na mesma base de tempo, será possível determinar a incerteza do volume nestas condições. Seja, então, a relação:

$$V_{ref\,(\Delta t)} = \overline{Q}_{ref} \cdot \Delta t \qquad (32)$$

Onde:

$V_{ref\,(\Delta t)}$ = volume em condições de referência apurado no tempo Δt;

$\overline{Q}_{ref}$ = vazão média em condições de referência no tempo Δt;

Δt = período de apuração de volume.

A incerteza do volume será então;

$$u(V_{ref\,(\Delta t)}) = \sqrt{\left(\frac{\partial V_{ref\,(\Delta t)}}{\partial \overline{Q}_{ref}} \cdot u(\overline{Q}_{ref})\right)^2 + \left(\frac{\partial V_{ref\,(\Delta t)}}{\partial \Delta t} \cdot u(\Delta t)\right)^2} \qquad (33)$$

Se for considerado que Δt não varia, e é determinado de forma bastante precisa, sua eventual incerteza pode ser desprezada. Isso reduz a equação (33) a:

$$u(V_{ref\,(\Delta t)}) = u(\overline{Q}_{ref}) \cdot \Delta t \tag{34}$$

Onde:

$u(V_{ref\,(\Delta t)})$ = incerteza do volume corrigido no intervalo *Δt*;

$u(\overline{Q}_{ref})$ = incerteza da vazão média corrigida no intervalo *Δt*;

Δt = intervalo de tempo para a computação do volume $V_{ref\,(\Delta t)}$.

A incerteza da vazão volumétrica em condições de referência poderá ser expressa por uma razão entre volume e *Δt*. Neste momento, as incertezas da vazão e do volume serão numericamente iguais.

4.4. Incerteza da Medição de Vazão de Gás por Tempo de Trânsito

A equação (15) descreve o cálculo da vazão volumétrica em condições de operação (não-corrigida). Com base nela, a incerteza da vazão é determinada conforme a equação (35):

$$u(Q_o) = \sqrt{\left(\frac{\partial Q_o}{\partial v} \cdot u(v)\right)^2 + \left(\frac{\partial Q_o}{\partial A} \cdot u(A)\right)^2} \tag{35}$$

Considerando-se que a incerteza sobre a área da secção transversal é inexpressiva ou mesmo nula, a equação (35) reduz-se ao produto da área pela incerteza da velocidade do escoamento:

$$u(Q_o) = A \cdot u(v) \tag{36}$$

De modo geral, os fabricantes desses medidores informam a incerteza sobre a vazão ao longo de uma faixa. Muitas vezes, *u(v)* não está disponível. Porém, se as informações referentes ao cálculo dos tempos de trânsito estiverem ao alcance, pode-se determinar a incerteza da velocidade do escoamento e compará-la com a informação fornecida pelo fabricante.

4.4.1. Incerteza Sobre a Velocidade do Escoamento

A partir da equação (14), que define o cálculo da velocidade do escoamento, pode-se verificar as fontes de incerteza de medição e combiná-las para a determinação da sua incerteza-padrão combinada.

$$u(v) = \sqrt{\left(\frac{\partial v}{\partial k} \cdot u(k)\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial \upsilon} \cdot u(\upsilon)\right)^2} \tag{37}$$

Onde:

$\frac{\partial v}{\partial k}$ = derivada da velocidade do escoamento em relação ao fator *k* (υ);

$u(k)$ = incerteza do fator *k*;

$\frac{\partial v}{\partial \upsilon}$ = derivada da velocidade do escoamento em relação à velocidade ao longo do caminho acústico (*k*);

$u(\upsilon)$ = incerteza da velocidade ao longo do caminho acústico.

4.4.2. Incerteza Sobre a Velocidade ao Longo do Caminho Acústico

A equação (4), que expressa a velocidade υ ao longo do caminho acústico em função dos tempos de trânsito pode ser reescrita como:

$$\upsilon = \frac{L}{2 \cdot \cos(\theta)} \cdot \left(\frac{1}{t_d} - \frac{1}{t_s}\right) \tag{38}$$

A distância L e o ângulo θ são componentes construtivos de um medidor, sendo determinados com grande precisão quando de sua fabricação. O ângulo é fixo e não sofrerá qualquer alteração ao longo da vida útil do equipamento. A distância L também é determinada com grande precisão, embora uma consideração deva ser feita.

A remoção e reinserção dos transdutores num processo, já mencionado, de *dry calibration*, poderia inserir uma componente de variação da distância entre eles, o que levaria a uma incerteza quanto ao seu valor. No entanto, os arranjos mecânicos disponíveis para a remoção e instalação dos transdutores praticamente eliminam essa possibilidade.

Portanto, se forem desconsideradas as incertezas sobre a distância L e o ângulo θ, a expressão para a incerteza de υ resulta em uma função das incertezas dos tempos de subida e de descida t_s e t_d:

$$u(\upsilon) = \sqrt{\left(\frac{\partial \upsilon}{\partial t_d} \cdot u(t_d)\right)^2 + \left(\frac{\partial \upsilon}{\partial t_s} \cdot u(t_s)\right)^2} \qquad (39)$$

4.4.3.
Incerteza Sobre o Fator *k*

O fator k é função do número de Reynolds (*Re*), e este é função da velocidade do escoamento. Esta última, porém, é função do fator k. Isso indica a necessidade de um processo iterativo para a determinação de k, o que em verdade não é feito. A solução para esta questão é assumir o *Re* como sendo função não da velocidade do escoamento, mas da velocidade do caminho acústico, uma vez que esta variável é independente de k, que é determinado *a posteriori*.

Como para valores práticos de Re, k é menor que 1 (conforme a equação (12), uma estimativa para k aproximadamente igual a 1 significa um *Re* de 10^{18}), isso indica que a velocidade ao longo do caminho acústico é maior que a velocidade do escoamento. O *Re*, então, estará ligeiramente superestimado. Com base neste valor, calcula-se então o k conforme o modelo adotado. O número de Reynolds é determinado a partir da velocidade do fluido v, do diâmetro do duto D e da viscosidade cinemática do gás μ.

$$\mathrm{Re} = \frac{v \cdot D}{\mu} \qquad (40)$$

Sendo conhecidos o diâmetro da tubulação e a viscosidade dinâmica do gás, k poderá ser expresso como uma função da velocidade do fluido. No caso em questão, da velocidade do caminho acústico. A incerteza do fator será então expressa analiticamente como:

$$u(k) = \frac{dk}{d\upsilon} \cdot u(\upsilon) \tag{41}$$

A derivada de *k* em relação υ dependerá do modelo adotado.

4.5.
Incerteza Sobre o Volume: Medição de Vazão por Tempo de Trânsito

A equação (24) define o cálculo do volume em condições de referência para um ponto de medição com medidor linear num dado intervalo de tempo. A pressão e a temperatura de referência são constantes, bem como o fator de compressibilidade nestas condições. Este fator irá variar, para as mesmas condições, conforme a composição do gás. Considera-se, porém, para a estimativa da incerteza do volume corrigido, que a composição do gás é invariável. De posse do modelo, as fontes de incerteza do volume em condições de referência (corrigida) para um tempo determinado podem ser identificadas e relacionadas na equação (42).

$$u(V_{ref(\Delta t)}) = \sqrt{\begin{aligned}&\left(\frac{\partial V_{ref(\Delta t)}}{\partial V_{op}} \cdot u(V_{op})\right)^2 + \left(\frac{\partial V_{ref(\Delta t)}}{\partial Z_{op}} \cdot u(Z_{op})\right)^2 + \left(\frac{\partial V_{ref(\Delta t)}}{\partial Z_{ref}} \cdot u(Z_{ref})\right)^2 \ldots \\ &\ldots + \left(\frac{\partial V_{ref(\Delta t)}}{\partial P_{op}} \cdot u(P_{op})\right)^2 + \left(\frac{\partial V_{ref(\Delta t)}}{\partial T_{op}} \cdot u(T_{op})\right)^2\end{aligned}} \tag{42}$$

Onde:

$u(V_{ref(\Delta t)})$ = incerteza do volume corrigido no intervalo de tempo Δt;

$\frac{\partial V_{ref(\Delta t)}}{\partial V_{op}}$ = derivada do volume corrigido em relação ao não-corrigido;

$\frac{\partial V_{ref(\Delta t)}}{\partial Z_{op}}$ = derivada do volume corrigido em relação ao fator de compressibilidade em condições de operação;

$\frac{\partial V_{ref(\Delta t)}}{\partial Z_{ref}}$ = derivada do volume corrigido em relação ao fator de compressibilidade em condições de referência;

$\dfrac{\partial V_{ref(\Delta t)}}{\partial P_{op}}$ = derivada do volume corrigido em relação à pressão;

$\dfrac{\partial V_{ref(\Delta t)}}{\partial T_{op}}$ = derivada do volume corrigido em relação à temperatura;

$u(V_{op})$ = incerteza sobre o volume não-corrigido;

$u(Z_{op})$ = incerteza sobre o fator de compressibilidade em condições de operação;

$u(Z_{ref})$ = incerteza sobre o fator de compressibilidade em condições de referência;

$u(P_{op})$ = incerteza sobre a pressão de operação;

$u(T_{op})$ = incerteza sobre a temperatura de operação.

4.5.1. Incerteza Sobre o Volume Não-Corrigido

O volume não-corrigido (em condições de operação) é obtido através da soma dos volumes não-corrigidos dentro de um certo intervalo de tempo, conforme a equação (21), que são o produto da vazão não-corrigida pelo intervalo de aquisição.

Cada fração de volume é obtida durante o intervalo de aquisição, e consiste no produto deste pela vazão não-corrigida observada neste intervalo, e á indicada como v_n. A incerteza de v_n é calculada a partir da equação supracitada e expressa como:

$$u(v_n) = \sqrt{\left(\frac{\partial v_n}{\partial q_n} \cdot u(q_n)\right)^2 + \left(\frac{\partial v_n}{\partial \Delta t} \cdot u(\Delta t)\right)^2} \qquad (43)$$

Se for considerado que Δt não varia, e é determinado de forma bastante precisa, sua eventual incerteza pode ser desprezada. Com isto, a equação (43) pode ser reduzida a:

$$u(v_n) = \Delta t \cdot u(q_n) \qquad (44)$$

Se o tempo de aquisição pelo computador de vazão for igual ao intervalo de geração de um novo dado de vazão não-corrigida pelo medidor, então q_n será igual a Q_o das equações (15) e (35). Em geral estes tempos são diferentes, sendo o tempo de aquisição menor que o outro.

A exemplo do considerado para placa de orifício na secção 4.3, há situações em que se dispõe de informações de volumes corrigidos a respeito dos quais deseja-se determinar a incerteza, porém sem todos os dados necessários. Então, supondo que se conheça um determinado volume em condições de referência, computado dentro certo intervalo de tempo, caso seja conhecida a incerteza da vazão volumétrica média (também em condições de referência) neste intervalo na mesma base de tempo, será possível determinar a incerteza do volume nestas condições. Com isso, as relações expressas pelas equações (32), (33) e (34) para volume apurados a partir de placa de orifício são aplicáveis à medição por tempo de trânsito.

Logo, a incerteza da vazão volumétrica em condições de referência poderá ser expressa por uma razão entre volume e o intervalo de tempo considerado. Assim, as incertezas da vazão e do volume também serão numericamente iguais.

4.5.2. Incerteza Sobre o Fator de Compressibilidade

Os computadores de vazão calculam o fator de compressibilidade Z para o gás natural, de maneira geral, através da equação de estado proposta pela AGA8. O fator de compressibilidade sofre influências da pressão e da temperatura, e depende da composição do gás. A composição deve ser conhecida, e em termos regulamentares, é necessária a coleta de amostras periódicas de pontos de medição fiscal (conforme definição no capítulo 1) e posterior envio para análise, para a caracterização dos computadores de vazão. Isto inclui os pontos de queima caso caracterizados como tal (ANP, 2013).

Uma outra possibilidade é a determinação contínua da composição através do uso de equipamento específico capaz de analisá-la à medida que o gás flui. A este tipo de equipamento dá-se o nome de cromatógrafo. O computador de vazão poderá então compensar eventuais variações da composição, o que não seria possível se uma dada composição fosse inserida nele, permanecendo fixa.

O algoritmo que implementa a norma, proposto no corpo da mesma, acaba por definir uma incerteza para a determinação de *Z*, dentro dos limites de pressão e temperatura para os quais a equação de estado é válida. O envelope pressão-temperatura mostrado na figura 13 traz as incertezas na determinação de *Z* para diferentes limites.

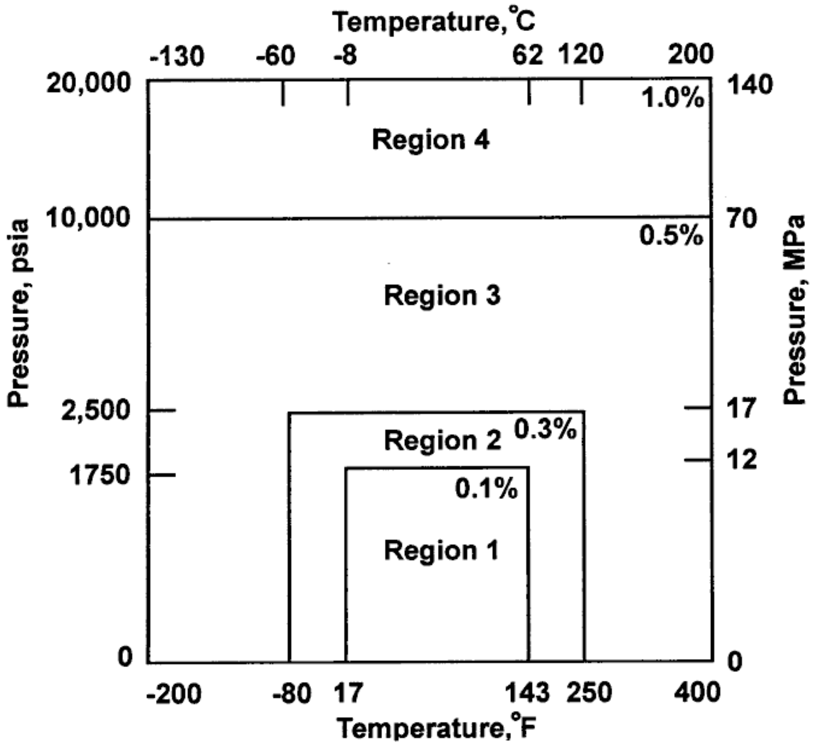

Figura 13 - Envelope pressão-temperatura e faixas de incerteza de Z (AGA, 1992)

A pressão absoluta nos pontos de medição de queima objeto de análise deste trabalho é inferior a 500 kPa. Com relação à temperatura, a faixa analisada estende-se de 20 °C a 76 °C. No entanto, as temperaturas registradas mantém-se predominantemente dentro dos limites da Região 1 da figura 13. Eventuais erros na determinação da vazão ou do volume de gás queimado em tocha a partir de medição ultrasônica em função da composição do gás são desprezíveis (Sá, 2014), fazendo com que uma periódica atualização dessa propriedade num computador de vazão a partir de resultados de análise de amostras de gás também colhidas periodicamente mostre-se inócua do ponto de vista da correta computação de volumes. Já a incerteza na determinação do fator de compressibilidade em condições de operação e de referência é considerada neste trabalho.

4.5.3. Incerteza Associada à Medição de Pressão

A pressão que corrige o volume das condições de operação para as condições de referência é informada ao computador de vazão por um transmissor de pressão, o qual deve ser posicionado em relação aos transdutores conforme as recomendações dos fabricantes (geralmente a jusante dos transdutores). A pressão pode ser determinada por um transmissor a partir de diversos meios. O mais utilizado lança mão de células capacitivas, que deformam-se sob pressão e com isso sofrem uma variação de capacitância (*grosso modo*, são capacitores sensíveis à pressão).

A incerteza associada à medição de pressão é influenciada por aspectos relacionados às características do transmissor, e é determinada por meio de calibração. Desta forma, a incerteza da pressão depende fundamentalmente de quão repetitivo é o transmissor para a faixa de pressão considerada. Tradicionalmente, em função das características da queima de gás, a faixa de pressão para qual os transmissores são calibrados vai de 0 a 500 kPa. As incertezas para a pressão são, geralmente, equivalentes a 0,075 % da pressão de fundo de escala (0,075 % de 500 kPa absolutos, ou 0,375 kPa ao longo da faixa). A informação de pressão pode chegar ao computador de vazão por meio de sinal de corrente elétrica de 4-20 mA ou rede de comunicação.

4.5.4. Incerteza Associada à Medição de Temperatura

A temperatura que corrige o volume das condições de operação para as condições de referência é informada ao computador de vazão por um transmissor de temperatura. Tal como o transmissor de pressão, deve ser posicionado em relação aos transdutores conforme as recomendações dos fabricantes, a jusante destes.

A temperatura é uma grandeza determinada indiretamente, através de seus efeitos sobre outras grandezas mensuráveis. O transmissor de temperatura funciona juntamente com um elemento de temperatura, estando este em contacto com o fluido. Os elementos mais comuns utilizados na medição de temperatura de fluidos em ambiente industrial são: o termopar, que se vale do chamado efeito

Seebeck, produção de uma diferença de potencial elétrico entre duas junções de materiais condutores (ou semicondutores) diferentes quando expostos a diferentes temperaturas; e o elemento de resistência elétrica dependente da temperatura (*Resistance Temperature Detector - RTD*, na sigla em inglês), mais popular na indústria de óleo e gás. O elemento de temperatura gera a informação, que é condicionada pelo transmissor e envia por este ao computador de vazão por meio de sinal de corrente elétrica de 4-20 mA ou rede de comunicação.

A incerteza associada à temperatura carrega aspectos relacionados às características do transmissor e do elemento, e é determinada por meio de calibração, existindo duas possibilidades: calibrando separadamente elemento e transmissor, e combinando posteriormente as incertezas (ao que se dá o nome de calibração em malha aberta); ou calibrando-se o conjunto elemento-transmissor como sendo um único ente (a chamada calibração em malha fechada), obtendo uma incerteza que já considera a contribuição de ambos.

A incerteza da temperatura depende de quão repetitivos são o elemento e o transmissor para a faixa de temperatura considerada. Tradicionalmente, em função das características da queima de gás, a faixa de temperatura para a qual os transmissores são calibrados vai de 0 a 100 °C. As incertezas para a temperatura são, geralmente, equivalentes a 0,2 °C para a faixa citada. Nos cálculos dos computadores de vazão, a correção pela temperatura é feita na escala kelvin. A condição de referência nesta escala é 293,15 K, o equivalente a 20 °C. A temperatura de operação deve ser convertida também para a escala kelvin, somando numericamente à temperatura indicada em °C o valor 273,15, o equivalente na escala a 0 °C.