3
Metodologia

Neste capítulo são apresentados: os medidores utilizados para o desenvolvimento desta dissertação, as ferramentas de diagnóstico disponíveis para o modelo e os requisitos das normas utilizadas nos projetos de medição de vazão de gás natural com medidores ultrassônicos. Apresenta-se ainda o equacionamento para as estimativas de incerteza da medição de vazão durante a calibração, de medição de vazão nas condições de referência, e de medição do volume de gás natural totalizado em determinado período de tempo utilizando-se os medidores disponibilizados.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0713644/CA

3.1.
Medidores disponibilizados

Para o desenvolvimento desta dissertação foram coletados dados obtidos de três medidores utilizados na Estação de Transferência de Custódia de Cacimbas, instalação pertencente a Transpetro [19] (subsidiária da Petrobras responsável pelo transporte e armazenamento de petróleo e seus derivados, biocombustíveis e gás natural) e localizada no município de Linhares-ES. Esta estação tem por finalidade a transferência de custódia do gás natural produzido pela Unidade de Negócio do Espírito Santo (UN-ES) para a própria Transpetro. O gás natural produzido é injetado no Gasoduto Sudeste-Nordeste (Fig. 16), conhecido como GASENE, abastecendo diversas industrias e cidades em seu trajeto.

Os medidores utilizados possuem quatro pares de transdutores ultrassônicos, também conhecidos como feixes ou cordas, e são aprovados para aplicações em transferência de custódia e medições fiscais pelo INMETRO [20]. Alguns dados de projeto e condições de operação dos medidores encontram-se na Tab. 3. Uma fotografia dos medidores é mostrada na Fig. 17.

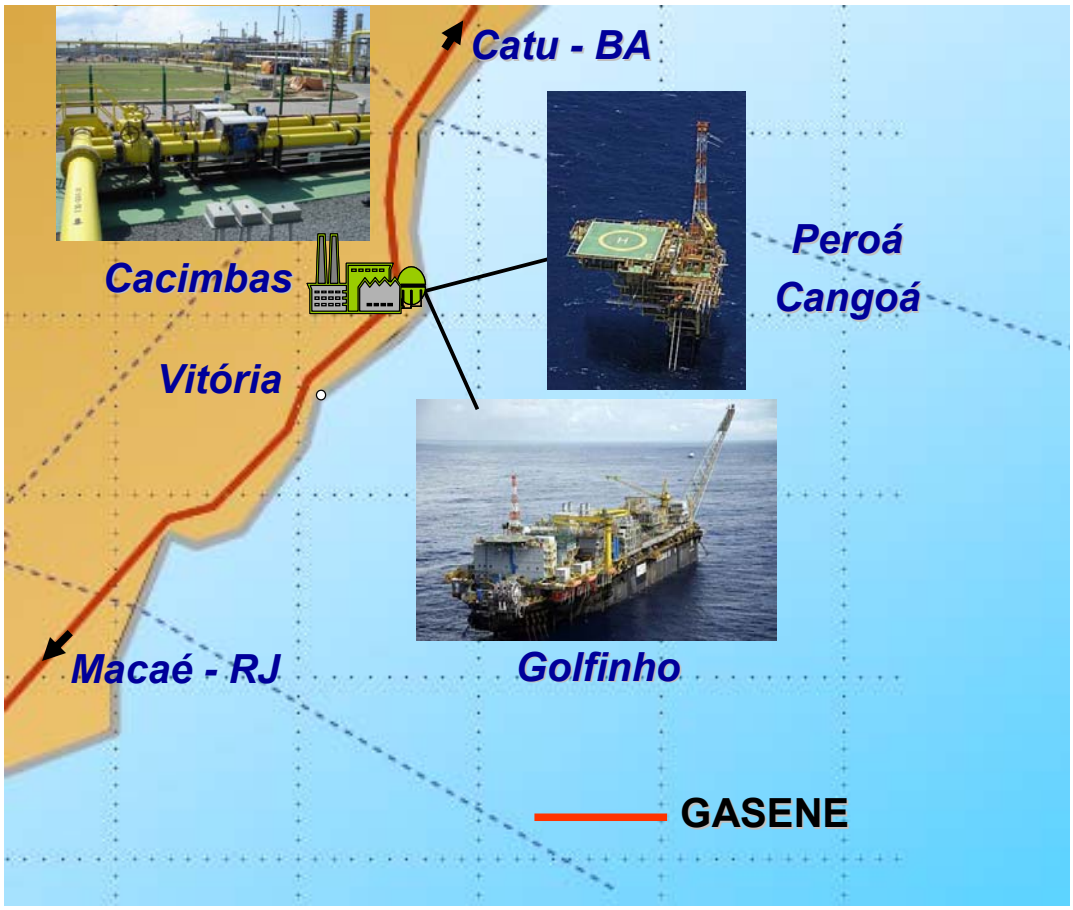


Figura 16 – Fluxograma simplificado da movimentação através da Estação de Tratamento de Gás de Cacimbas.

Tabela 3 – Dados dos medidores utilizados nesta dissertação.

Fabricante / Modelo	Daniel / SeniorSonic
Diâmetro Nominal	12”
Conexão ao processo	Flange 600# ANSI B16.5 RF
Alcance de medição min / máx	250 / 10 000 m^3/h
Faixa de velocidade	0,9 a 25 m/s
Limites de pressão	5,88 a 9,81 MPa (60 a 100 kgf/cm^2)
Limites de temperatura	-20 a 100 ºC
Exatidão[4]	±0,1% da amplitude da faixa nominal
Repetitividade	±0,05%

[4] De acordo com o Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia – VIM – [21], exatidão é um conceito qualitativo e portando não deveria ser expresso por um valor. A repetitividade pode ser utilizada com um dos indicadores da exatidão da medição.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0713644/CA

Figura 17 – Medidores utilizados no desenvolvimento desta dissertação.

3.2.
Diagnósticos disponíveis nos medidores utilizados

Os medidores utilizados para o desenvolvimento desta dissertação possuem quatro pares de transdutores ultrassônicos, dispostos em quatro posições radiais e em dois planos verticais distintos, como mostra a Fig 18.

A Eq (18), obtida a partir da integral dos polinômios de Gauss-Legendre aplicada a este medidor, resulta em:

$$v_m = 0{,}1382.v_a + 0{,}3618.v_b + 0{,}3618.v_c + 0{,}1382.v_d \qquad (24)$$

onde:

v_a - Velocidade do escoamento ao longo da corda A;

v_b - Velocidade do escoamento ao longo da corda B;

v_c - Velocidade do escoamento ao longo da corda C, e

v_d - Velocidade do escoamento ao longo da corda D.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0713644/CA

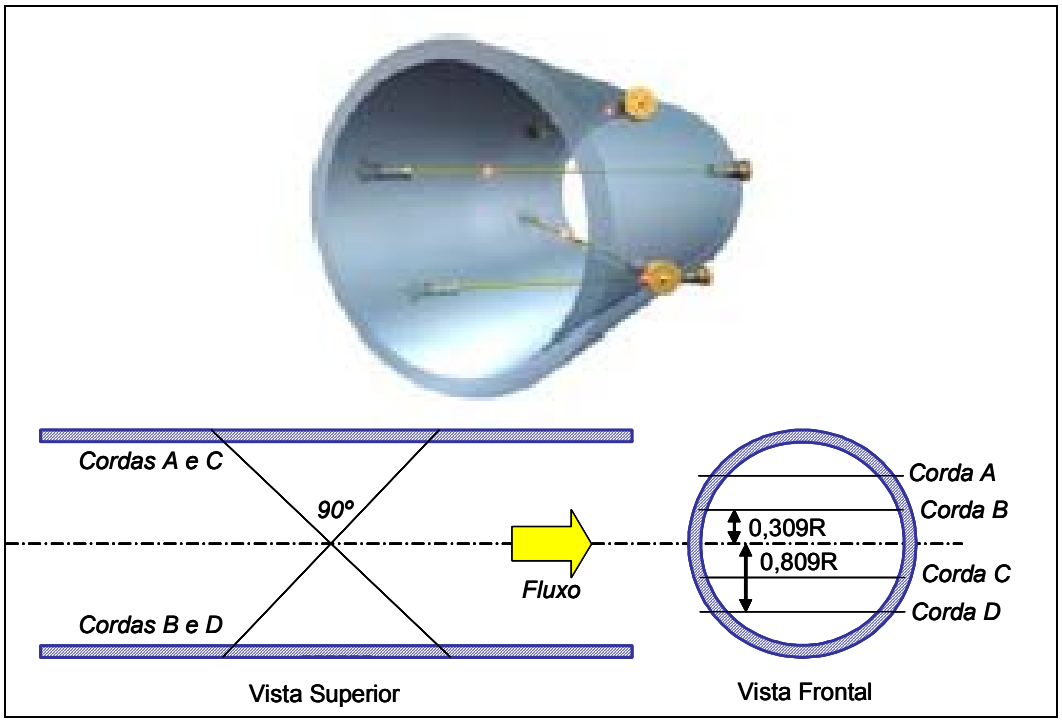


Figura 18 – Disposição dos transdutores ultrassônicos dos medidores utilizados no desenvolvimento da dissertação.

Os oito transdutores deste equipamento são excitados cerca de 50 vezes por segundo, e todos os tempos de trânsito dos pulsos ultrassônicos viajando através do fluido são cronometrados, gerando uma grande quantidade de dados que podem ser processados e que geram informações que podem ser utilizadas como diagnóstico de seu funcionamento. Estes diagnósticos, quando corretamente avaliados, podem confirmar a autenticidade dos valores medidos e indicar a necessidade, ou não, de manutenção e/ou recalibração do medidor.

3.2.1. Medição dos tempos de trânsito

A medição, ou cronometragem, dos tempos de trânsito é o primeiro passo para determinação da vazão instantânea nos medidores ultrassônicos, e em virtude disto essas medições precisam ter boa exatidão e ser confiáveis. O processo de medição dos tempos de trânsito é composto pelas seguintes etapas:

- excitar o transdutor ultrassônico emissor com sinais elétricos;
- lançar os sinais ultrassônicos através do fluido que preenche o medidor;

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0713644/CA

- garantir que os sinais ultrassônicos atravessem o escoamento e encontrem o transdutor receptor;
- converter o sinal ultrassônico recebido pelo transdutor receptor em sinais elétricos;
- detectar um ponto de partida confiável do sinal elétrico recebido.

Para cada uma destas etapas é possível fazer verificações adicionais no funcionamento do medidor.

O medidor ultrassônico utiliza um tempo de trânsito "líquido", *t*, que é o tempo realmente gasto pelo sinal ultrassônico para percorrer a distância L_p entre as faces dos transdutores emissor e receptor, para o cálculo da velocidade média do escoamento. Sua eletrônica, entretanto, mede um tempo de trânsito "bruto", *T*, que considera os atrasos (ou *delay*) provenientes da própria eletrônica, dos cabos, conversão do sinal elétrico em mecânicos e vice-versa nos transdutores, etc. Este atraso é determinado experimentalmente, pelo fabricante, sem escoamento, durante o teste de zero, e *t* é então obtido subtraindo-se *T* e o *delay*.

Idealmente, se a velocidade do escoamento é igual a zero, os tempos de trânsito t_{AB} e t_{BA} devem ser iguais, o que implicaria em uma reciprocidade perfeita entre os transdutores e suas respectivas eletrônicas tanto operando como emissores quanto operando como receptores. Na prática, entretanto, existe sempre uma pequena diferença entre os tempos de trânsito t_{AB} e t_{BA}.

3.2.2. Processamento do Sinal Digital

O tempo de trânsito é cronometrado tendo como ponto de partida o sinal elétrico que excita o transdutor emissor e como ponto de chegada o ponto chamado "cruzamento em zero" do sinal ultrassônico detectado. Este cruzamento em zero é definido como P1, e pode ser observado na Fig. 19.

Visando garantir a confiabilidade, a consistência e a representatividade do ponto P1, emprega-se um processamento do sinal digitalizado, sendo este processamento uma importante ferramenta de diagnóstico.

Os transdutores dos medidores utilizados operam a uma freqüência típica de cerca de 125 kHz, resultando em um período de aproximadamente 8 microsegundos. O sinal ultrassônico é digitalizado com uma taxa de amostragem

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0713644/CA

de 1,25 MHz, o que implica em um Intervalo de Amostragem, *Ta*, de 0,8 microsegundo.

Um bom projeto de medidor ultrassônico deve considerar a freqüência do ruído gerado pelas principais fontes que podem estar próximas ao medidor e trabalhar em uma freqüência distante desta, de forma que os ruídos possam ser facilmente filtrados.

A detecção do ponto P1 pelo transdutor que opera como receptor está baseada em três propriedades, representadas na Fig. 19: a Amplitude (%Amp); a Energia contida (Pe); e a Detecção do movimento inicial (Pf).

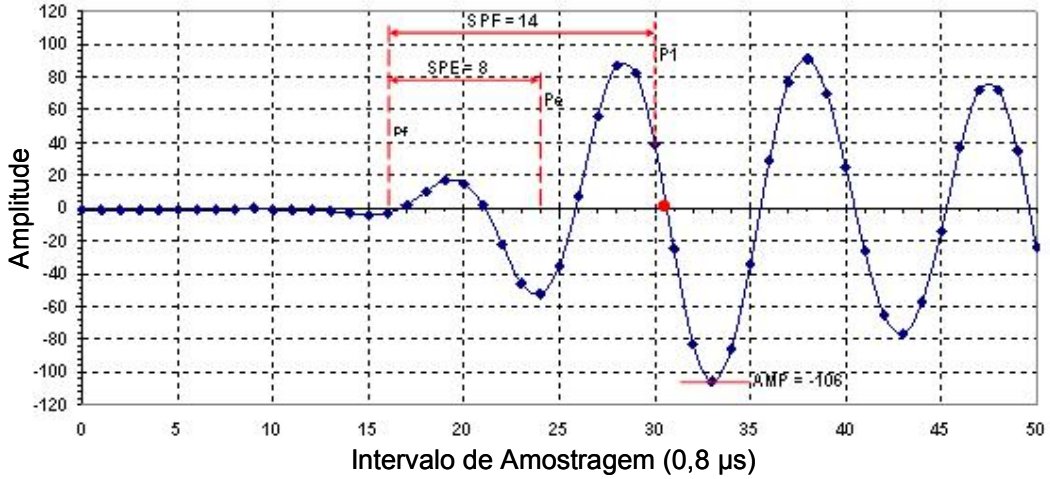


Figura 19- Exemplo de pulso ultrassônico digitalizado no transdutor receptor.[22]

A amplitude (% Amp) é determinada a partir do primeiro pico a jusante do ponto de detecção P1, verificado no sinal recebido onde fora aplicado o controle automático de ganho. A energia contida é determinada a partir do quadrado da amplitude do sinal ajustada por uma curva suavizada do perfil de contorno, conforme mostra a Fig. 20. Esta curva representa a energia contida no pulso ultrassônico recebido, e a energia contida Pe é definida como o intervalo de tempo igual a um quarto do ponto de máxima energia.

A ferramenta de diagnóstico Ganho, apresentada no item 2.3.1, efetua a medição da atenuação da onda ultrassônica. O ganho é influenciado diretamente pela impedância acústica do gás, que é calculada a partir do produto entre sua massa específica e a velocidade do som. A massa específica do gás, por sua vez, é influenciada diretamente pela pressão.

Visando manter constante a amplitude do sinal recebido, independentemente das condições de operação, é aplicado um “controle automático de ganho”.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0713644/CA

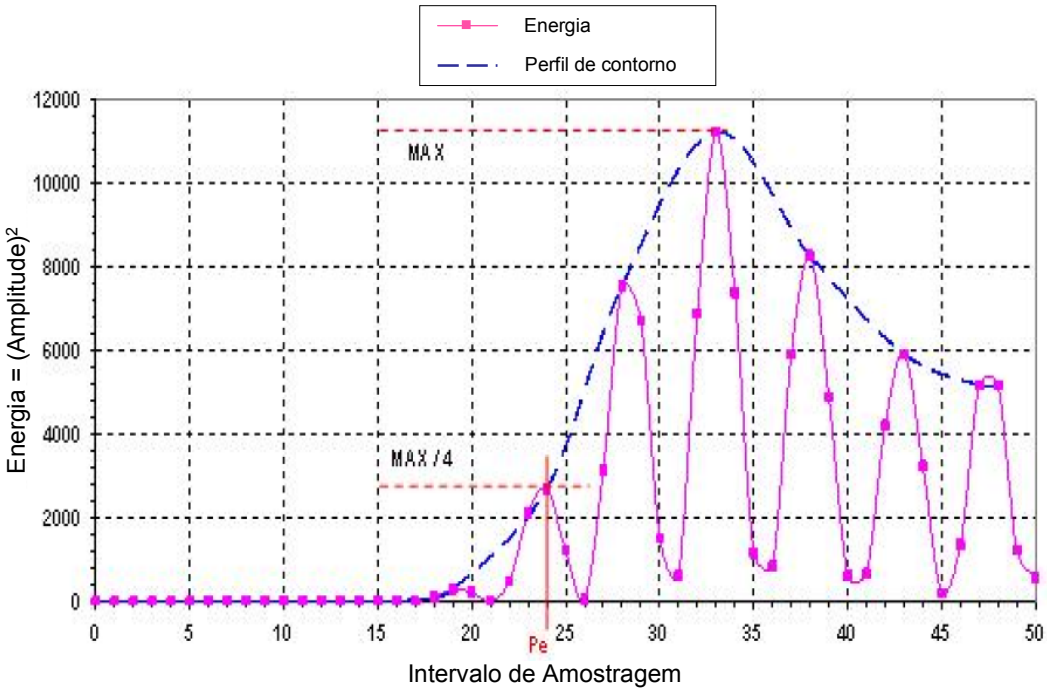


Figura 20 - Energia contida no pulso ultrassônico. [22]

Uma questão de primordial importância na medição dos tempos de trânsito é a detecção do movimento inicial do pulso recebido pelo transdutor receptor. Esta detecção é feita através da diferenciação numérica da curva que representa a energia contida, como mostra a Fig. 21, de forma que a mudança em sua inclinação define o ponto Pf, que por sua vez define o começo efetivo do sinal.

O ponto de cruzamento em zero, P1, é caracterizado por três parâmetros, a saber:

- SPF = P1 – Pf
- SPE = P1 – Pe
- Amp = amplitude do pico mais próximo a jusante de P1.

E os valores ideais para estes três parâmetros são:

- T SPF = 15 Ta
- T SPE = 8 Ta
- T Amp = -80%

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0713644/CA

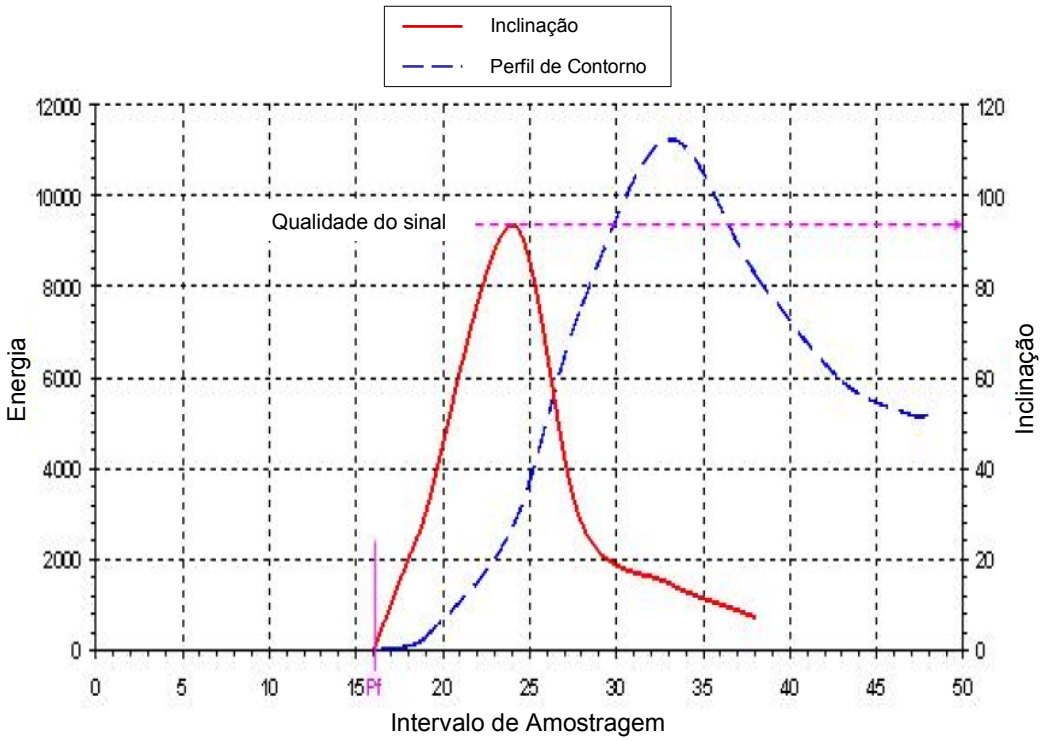


Figura 21 - Detecção do primeiro movimento.[22]

O algoritmo de processamento do sinal digital realiza verificações nos sinais recebidos e seleciona aquele cujos valores estejam o mais próximo possível dos ideais.

Para o caso do exemplo mostrado na Fig. 19, tem-se: SPF = 14 Ta, SPE = 8 Ta e Amp = -106%.

3.2.3. Processamento de grupos de sinais

Normalmente os valores de saída do medidor, velocidades do escoamento e velocidades do som em cada uma das cordas são calculados a partir de um grupo (ou lote) de 20 tempos de trânsito em ambas as direções. A média Δt deste grupo de 20 tempos de trânsito é utilizada então para calcular a vazão instantânea, e o desvio padrão $\sigma\Delta t$ destes valores é utilizado para calcular um parâmetro que permite avaliar as flutuações da velocidade do escoamento, denominado "*turbulência*".

$$Turbulência = \frac{\sigma\Delta t}{\Delta t} \qquad (25)$$

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0713644/CA

A *turbulência* é uma característica do escoamento do gás natural, que normalmente possui Número de Reynolds elevados. Esta característica do escoamento pode influenciar o desempenho do medidor, por isso o acompanhamento deste parâmetro é importante.

A aceitação ou rejeição dos sinais de um determinado grupo de valores de tempos de trânsito medidos depende dos seguintes testes:

- Nível de ruído e relação sinal ruído – A Fig. 22 mostra um sinal onde se observa um ruído a montante de Pf, que é o ponto de detecção do movimento inicial do pulso ultrassônico. Este ruído pode ser proveniente de uma fonte externa, como por exemplo, uma válvula de controle, ou de um "curto circuito"[5] entre o transdutor e o corpo do medidor. A Energia (que é igual ao quadrado da amplitude) é utilizada tanto para avaliar o nível de ruído quanto a SRN, e os sinais ultrassônicos são rejeitados quando o nível de ruído é elevado ou a SRN é baixa;
- Desvio padrão dos valores de um grupo de tempos de trânsito – Quando $\sigma\Delta t$ de um determinado grupo de tempos de trânsito é elevado (> 2 microsegundos), valores maiores do que 2 vezes $\sigma\Delta t$ (ou seja, 4 microsegundos, que é o mesmo que metade do período do pulso ultrassônico) são rejeitados.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0713644/CA

[5] Ocorre quando o pulso ultrassônico é transmitido através do corpo do medidor, e não através do fluido contido em seu interior.

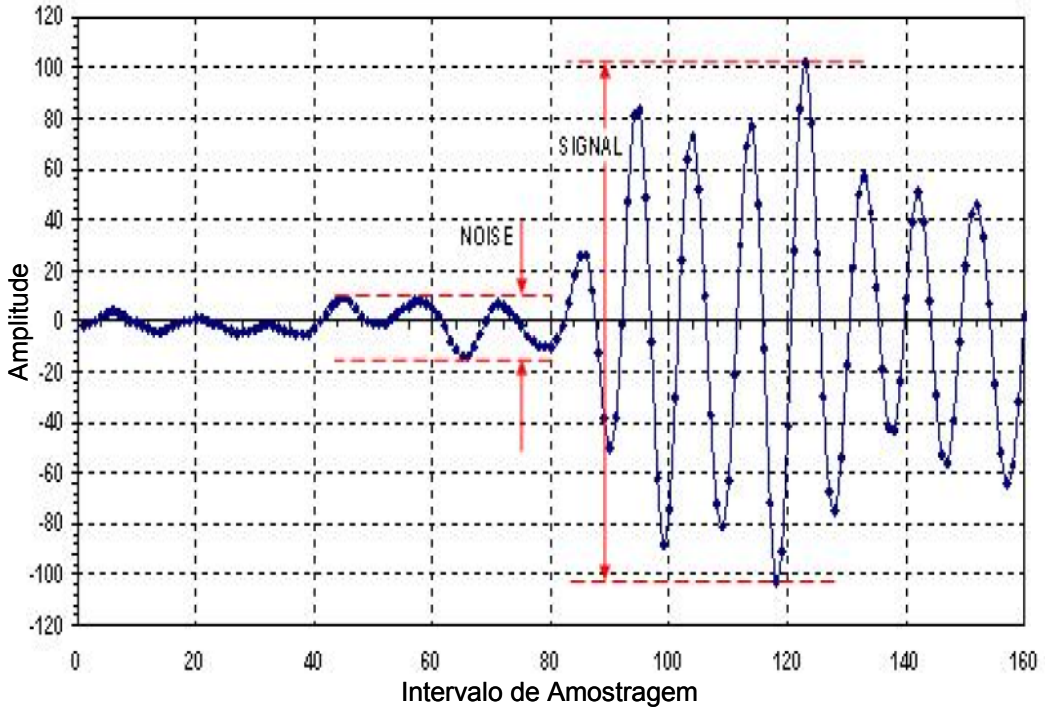


Figura 22 - Detecção de ruído no sinal ultrassônico.[22]

- Média dos valores de um grupo de tempos de trânsito – É esperada uma similaridade entre os sinais recebidos a montante e a jusante, uma vez que ambos tem a mesma origem. Quando estes valores apresentam diferenças os sinais são descartados.
- Qualidade do sinal – A Fig. 21 mostra o parâmetro qualidade do sinal, que quantifica a velocidade de subida do sinal. Os sinais que apresentam variações menores do que um determinado valor, especificado pelo fabricante, são rejeitados.
- Velocidade do som – Conhecendo-se a composição do gás escoando e suas condições operacionais (pressão e temperatura) é possível calcular a velocidade do som no gás. Elevadas divergências entre os valores medidos a partir dos tempos de trânsito e os valores calculados devem ser investigadas.

Conforme descrito no item 2.3.2, a *performance* é definida como o percentual de sinais aceitos em um determinado lote. Idealmente seu valor deve ser igual a 100%, o que significa que os sinais ultrassônicos foram aprovados em todos os testes acima relacionados. Quando a *performance* é menor do que 100%, tem-se que um ou mais sinais foram reprovados em algum dos testes citados e, conseqüentemente, não foram utilizados no cálculo da vazão.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0713644/CA

Os medidores permitem ainda a gravação da forma de onda e seu espectro de freqüência de cada transdutor excitado. A simples inspeção visual destas gravações pode identificar a presença de ruído ou qualquer distorção da qualidade do sinal ultrassônico. Além disto, gravações realizadas sob condições normais de funcionamento podem ser utilizadas como uma impressão digital (do inglês *fingerprint*) do medidor para comparações e avaliações de quaisquer mudanças futuras.

A Fig. 23 apresenta um exemplo de sinal ultrassônico com baixo nível de ruído a montante; uma boa qualidade do sinal, já que existe uma elevação razoavelmente íngreme; e um amortecimento aceitável. Pode-se perceber uma distorção do sinal, mas esta acontece após a detecção do cruzamento em zero, e, portanto, não deve afetar sua detecção.

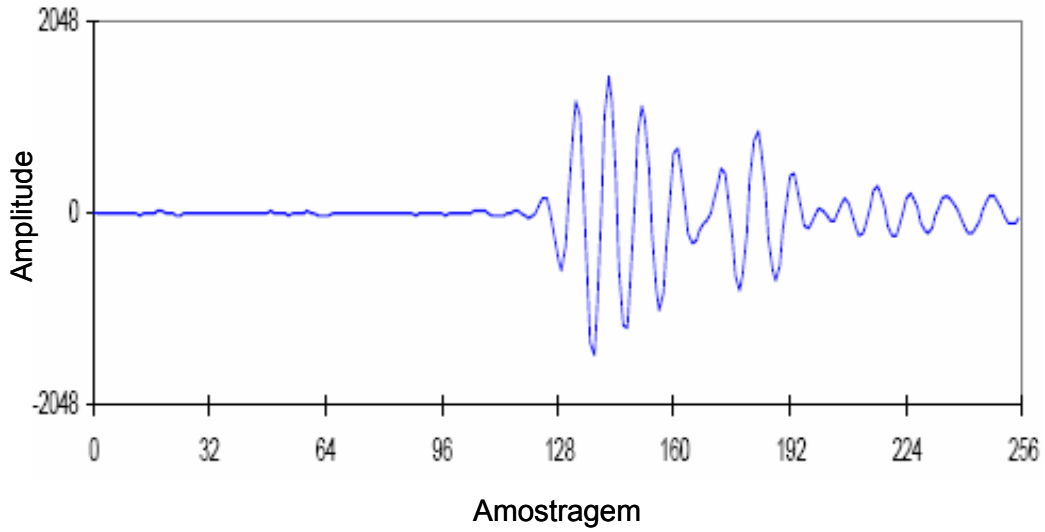


Figura 23 - Exemplo de forma de onda de um sinal ultrassônico recebido.[22]

3.2.4. Velocidade do som

Conforme descrito no item 2.3.5, a velocidade do som, ou SOS (do inglês *Speedy of Sound*), pode ser utilizada como ferramenta de diagnóstico de diversas maneiras. Um destas maneiras é a comparação entre a velocidade do som medida e a velocidade do som calculada teoricamente. Além deste, podem ser realizadas outras 4 verificações, a saber:

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0713644/CA

3.2.4.1.
Comparação entre os valores medidos em cada corda

Uma velocidade de escoamento razoavelmente alta (> 6 m/s) pode assegurar uma boa mistura na composição do gás e a uniformidade da temperatura ao longo da extensão vertical do tubo. Sob estas condições, todas as cordas devem medir a mesma velocidade do som.

A AGA 9 [7] estabelece que a diferença entre os quatro valores medidos individualmente por cada corda deve ser menor do que 0,5 m/s. Neste caso, a probabilidade de que todas as cordas estejam funcionamento corretamente é maior do que a probabilidade de todas as cordas apresentarem o mesmo erro sistemático.

Esta verificação apresenta a vantagem adicional de não necessitar de cálculos externos (por exemplo a partir da AGA 10 [8]), ou de dados adicionais como a pressão, a temperatura ou a composição do gás.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0713644/CA

3.2.4.2.
Comparação do valor médio com o valor de cada corda

Como dito anteriormente, as diferenças entre os valores medidos por cada corda, sob as mesmas condições (pressão, temperatura e composição do gás), podem ser atribuídas às tolerâncias de fabricação dos medidores e também aos atrasos (*delay*) na medição dos tempos de trânsito.

Esta pequenas diferenças podem ser utilizadas como uma impressão digital do medidor. Se estas diferenças (ou esta impressão digital) não mudam com o passar do tempo, é uma boa indicação que a medição dos tempos de trânsito também não sofreram alterações.

3.2.4.3.
Comparação entre os valores medidos pelas cordas de comprimentos diferentes

Os medidores utilizados são projetados para terem caminhos acústicos com dois comprimentos distintos: para as cordas externas A e D o comprimento do caminho acústico L_p é igual a 1,7 vezes o raio R do medidor; para as cordas internas B e C, $L_p = 2{,}7.R$.

Se a velocidade do som é a mesma nas cordas internas e nas cordas externas, indica que os tempos de trânsito e os tempos de atraso estão sendo medidos corretamente.

3.2.4.4. A função Eta (η)

A função *Eta* (*η*) [22], calculada de acordo com a Eq. (26), representa uma importante ferramenta de diagnóstico, capaz de indicar a medição correta dos tempos de trânsito e identificar uma corda qualquer onde uma possível medição incorreta esteja presente. Quando as medições dos tempos de trânsito estão incorretas esta função mostra quais cordas apresentam dificuldade e em qual direção os erros ocorreram.

$$\eta = \frac{Lp_{longo} \times Lp_{curto}}{Lp_{longo} - Lp_{curto}} \times \frac{c_{longo} - c_{curto}}{c_{longo} \times c_{curto}} \tag{26}$$

onde:

c = Velocidade de som

L_p = comprimento da corda

e,

curto = corda externa (A ou D)

longo = corda interna (B ou C)

O valor de *η* é, geralmente, igual a 0 ± 2 μs [22] quando não existem erros na medição dos tempos de trânsito e as velocidades do som medidas em cada corda são iguais. Valores maiores do que ± 2 μs indicam um erro na medição dos tempos de trânsito. Por ser uma verificação instantânea, não é necessário manter gráficos de tendência para a função *Eta*.

Tomando por base a medição dos tempos de trânsito, a função *Eta* pode ser determinada a partir da Eq. (27) [22].

$$\eta = \frac{Lp_{longo} \times te_{curto} - Lp_{curto} \times te_{longo}}{Lp_{longo} - Lp_{curto}} \tag{27}$$

onde *te* = erro no tempo de trânsito.

A Eq. (26) permite o cálculo de *η* na presença de escoamento, e deve ser o modo preferencial de calculo desde que a temperatura e a composição do gás

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0713644/CA

sejam estáveis, de forma que a velocidade do som em todas as cordas sejam iguais. A Eq. (27) é mais indicada para quantificar o efeito de η em condições de medições incorretas nos tempos de trânsito.

Um erro comum na medição dos tempos de trânsito é originado na identificação equivocada do ponto P1 pela eletrônica do medidor na presença de ruído excessivo. Considerando, por exemplo, um medidor de 12" (Lp_{longo} = 13,69" e Lp_{curto} = 9,33") que apresenta um salto permanente do ponto P1 para o pico seguinte na corda externa A, a medição dos tempos de trânsito a montante e a jusante resultaria em um erro de + 8 μs. Comparando com a corda interna B, onde a medição dos tempos de transito estão corretas, o valor de η seria:

$$\eta = \frac{Lp_{longo} \times te_{curto}}{Lp_{longo} - Lp_{curto}} \approx 25\mu s \quad [22]$$

Para um medidor de quatro cordas como o utilizado no desenvolvimento desta dissertação, existem quatro possíveis combinações de η: BA, CA, BD e CD. A combinação destes quatro valores indica se existe alguma corda com medições incorretas. Valores de η iguais a zero indicam que os tempos de trânsito estão sendo medidos corretamente e se um mesmo erro está presente em duas cordas de comprimento diferentes, o valor de η será igual ao valor do erro.

3.2.5. Perfil de Velocidades

A disposição dos transdutores do medidor utilizado permite avaliar continuamente três distúrbios no perfil do escoamento que podem causar erros nos vazões medidas: a Assimetria, o *Cross Flow* e o Fator de Perfil (do inglês *Profile Factor*) [22]. Estas distorções podem ser estimadas a partir das velocidades medidas individualmente em cada uma das cordas através das Eq. (28), (29) e (30), respectivamente.

$$Assimetria = \frac{(v_a + v_b)}{(v_c + v_d)} \quad (28)$$

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0713644/CA

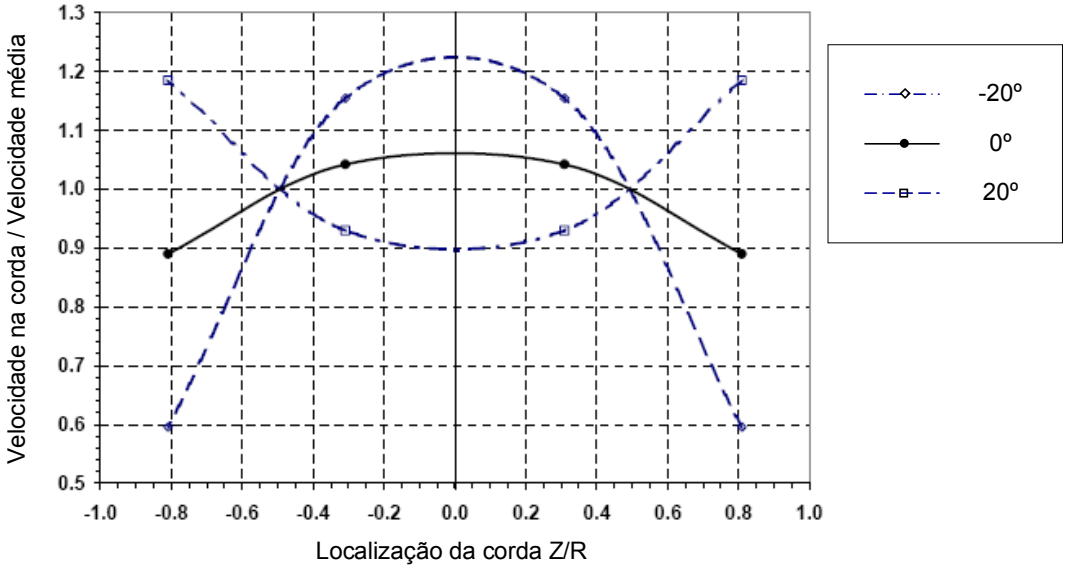
$$CrossFlow = \frac{(v_a + v_c)}{(v_b + v_d)} \tag{29}$$

$$FatordePerfil = \frac{(v_b + v_c)}{(v_a + v_d)} \tag{30}$$

Analisando as Eq. (28), (29) e (30), verifica-se que a Assimetria permite uma comparação entre as velocidades das cordas na metade superior e as velocidades das cordas na metade inferior do medidor. Idealmente este valor deve ser igual a 1, o que indicaria um escoamento perfeitamente simétrico em relação ao eixo horizontal do medidor.

O *Cross Flow* realiza uma comparação entre as velocidades das cordas nos dois planos verticais distintos, que formam um ângulo de 90º entre si. Assim como a Assimetria, o valor ideal para o *Cross Flow* é igual a 1.

A comparação entre as velocidades das cordas externas com as velocidades das cordas internas define o Fator de Perfil, que indica se o escoamento é rotacional (fenômeno conhecido com *swirl*), uma vez que compara velocidades em posições radiais e em planos distintos. Diferentemente da Assimetria e do *Cross Flow*, o valor do Fator de Perfil, para os medidores utilizados no desenvolvimento desta dissertação e em condições ideais de escoamento é igual a 1,042/0,89 = 1,17 [22], para elevados Re. Este valor é determinado através de simulação numérica onde são consideradas as posições das cordas do medidor e as velocidades esperadas nas respectivas trajetórias acústicas para um escoamento completamente desenvolvido.



PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0713644/CA

Figura 24 - Perfis de velocidade com *swirl*. [22]

A Fig. 24 mostra, analiticamente, três perfis de escoamento com diferentes ângulos de *swirl*; e a Fig. 25 apresenta uma relação entre o valor calculado pela Eq. (30) e o ângulo do *swirl*.

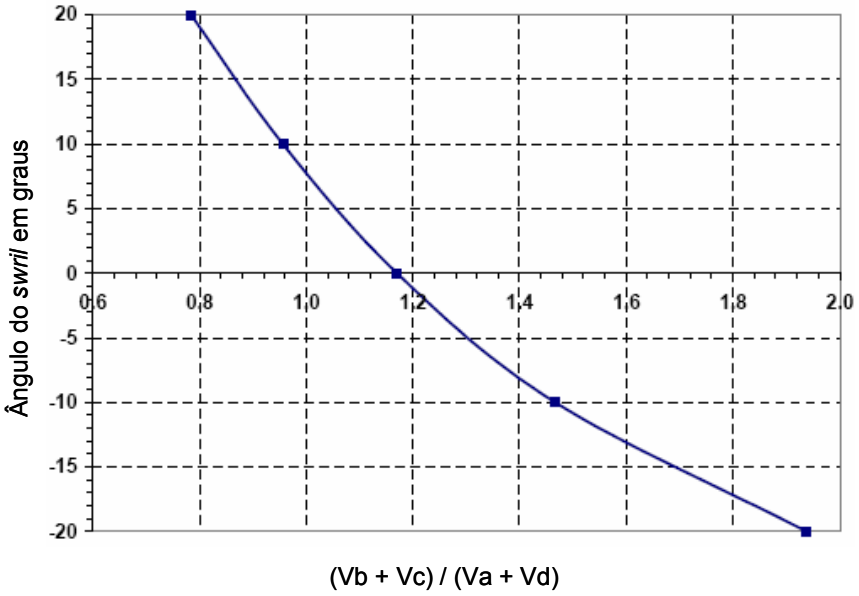


Figura 25 - Ângulo do *swirl*. [22]

Todavia, em condições normais de operação a Assimetria, o *Cross Flow* e o *Swirl* apresentam valores diferentes dos ideais. Estas diferenças podem ser atribuídas às tolerâncias de fabricação do medidor e à dificuldade de se obter um escoamento completamente desenvolvido e uniforme. Estes valores formam uma impressão digital (do inglês *fingerprint*) única do medidor, que pode ser monitorada e indicar alterações no funcionamento do medidor ou no perfil do escoamento.

De uma maneira geral, apenas quatro caminhos acústicos não são suficientes para compensar um escoamento qualquer cujo campo de velocidades seja tridimensional; entretanto, os requisitos para sistemas de medição fiscais e para transferência de custódia são estabelecidos de forma que as condições de escoamento sejam suficientemente boas para garantirem os níveis de incertezas permitidos, e para que os distúrbios do escoamento, Assimetria, *Cross Flow* e Fator de Perfil, possam ser verificados pelo medidor.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0713644/CA

3.3. Visão geral das normas AGA 9, ISO 17089

A seguir são apresentadas as principais exigências e recomendações das normas utilizadas como referência em aplicações de medidores ultrassônicos de múltiplas trajetórias para gás natural. As comparações entre as normas foram feitas por Orlando [14].

3.3.1. Escopo

A norma AGA 9 [7] foi desenvolvida para qualificar medidores ultrassônicos por tempo de trânsito para medição de vazão de gás natural com pelo menos dois pares independentes de transdutores (duas cordas). Ela fornece informações para fabricantes mais orientadas para o desempenho do medidor do que para sua fabricação, através dos requisitos que este deve satisfazer.

A norma ISO 17089 [23] especifica características de construção, desempenho, calibração e instalação de medidores ultrassônicos de um modo geral, para aplicações em transferência de custódia e apropriação (ou alocação).

3.3.2. Terminologia

As duas normas discutem a terminologia e as definições utilizadas ao longo de todo o documento, sendo que a norma ISO 17089 [23] é mais detalhada e aderente ao VIM [21].

3.3.3. Condições de operação

As duas normas exigem que o fabricante especifique as faixas de operação do medidor em relação à pressão, temperatura ambiente e do gás, além de sua composição. A norma AGA 9 [7] exige que o medidor opere, pelo menos, dentro da faixa especificada pela AGA 8 [12].

3.3.4. Requisitos do medidor

A norma AGA 9 [7] descreve os códigos e regulamentos aplicáveis a cada parte do medidor que os fabricantes devem atender. Além disto, o fabricante

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0713644/CA

deve estabelecer um programa de garantia da qualidade para a produção, montagem e teste do medidor, e de seu sistema eletrônico.

3.3.4.1. Corpo do Medidor

As duas normas exigem que os medidores sejam fabricados de modo a atender às especificações de normas reconhecidas, como a ANSI [24], e que a pressão máxima de operação seja inferior à pressão resistida pelo corpo do medidor, flanges, e conexões e montagens dos transdutores. Todos os materiais utilizados devem ser resistentes à corrosão em relação ao gás e fluidos associados. O diâmetro interno do medidor na seção de medição deve ser constante dentro de 0,5% do seu diâmetro interno médio ao longo do seu comprimento. O corpo do medidor pode ser dotado de válvulas de modo que a substituição dos transdutores possa ser feita sem a despressurização do medidor. Pelo menos uma tomada de pressão deve existir no corpo do medidor para que a correção do volume seja feita. Além disso, a ISO 17089 [23] determina que as diferenças entre os diâmetros internos dos flanges do medidor e das tubulações a montante e a jusante devem ser menores do que 1%.

3.3.4.2. Transdutores

A AGA 9 [7] exige que o fabricante forneça informações gerais sobre os transdutores, como dimensões críticas, faixa de operação de pressão e pressão máxima de operação, além de instruções para pressurização e despressurização do medidor e substituição dos transdutores. Todos os transdutores devem ser testados pelo fabricante, com documentação fornecida para comprovação da qualidade. O objetivo é assegurar uma operação confiável do medidor pelo usuário, principalmente se os transdutores tiverem de ser substituídos. A ISO 17089 [23] é menos restritiva, mas exige que a freqüência acústica seja especificada e que a configuração das trajetórias também o seja, juntamente com o método de inserção dos transdutores na tubulação.

3.3.4.3. Eletrônica

A AGA 9 [7] permite que os componentes eletroeletrônicos sejam montados em mais de uma caixa, próximo ou junto ao medidor. As duas normas,

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0713644/CA

[7] e [23], exigem que o fabricante especifique a fonte de alimentação, se alternada ou continua, e a freqüência. Exigem ainda que a comunicação com o(s) computador(es) de vazão deve ser feita via interface serial (RS-232, RS-485, *field bus* ou equivalente) ou por freqüência. Um *loop* de corrente analógica (4-20 mA) pode ser usado. A ISO 17089 [23] exige que o fabricante deve especificar a freqüência máxima de flutuação do escoamento e a relação sinal-ruído. O sistema também deve ser capaz de rejeitar medições inválidas.

3.3.5. Programas de computador

As duas normas, [7] e [23], exigem que os códigos computacionais para controle e operação do medidor sejam armazenados em memória não volátil. Todas as constantes do escoamento e as fornecidas pelo operador devem também ser armazenadas em memória não volátil. Desta forma, evita-se a perda dos dados se houver um corte no fornecimento de energia. A configuração do medidor também deve ser protegida, de modo a evitar mudanças acidentais. Isto pode ser feito inserindo-se um *jumper*, ou através de uma chave com selo localizada no circuito eletrônico. O fabricante deve manter um registro das revisões do programa permanentemente armazenado na memória do medidor (*firmware*). Ao fabricante é permitido não mostrar a um auditor algumas partes dos algoritmos, constantes e configuração por razões de natureza proprietária.

As duas normas, [7] e [23], estabelecem que o medidor deve ser fornecido com a capacidade de configuração remota ou local da Unidade de Processamento de Sinal ou para monitorar a operação do medidor. O *software* deve ser capaz de mostrar ou registrar, no mínimo, as seguintes medições:

- Vazão volumétrica nas condições de operação,
- Velocidade média,
- Velocidade média do som,
- Velocidade do som ao longo de cada corda,
- Velocidade média ao longo de cada corda (somente ISO 17089),
- Qualidade do sinal ultrassônico recebido por cada transdutor.

A AGA 9 [7] estabelece que o sistema de medição deve satisfazer, em geral, os requisitos do *American Petroleum Institute*, API, [25].

As duas normas estabelecem que para finalidade de diagnóstico, o medidor deve fornecer, no mínimo, os seguintes parâmetros medidos:

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0713644/CA

- Velocidade axial média através do medidor,
- Velocidade média ao longo de cada corda,
- Velocidade do som ao longo de cada corda,
- Velocidade média do som,
- Intervalo de amostragem da velocidade,
- Tempo de trânsito de cada corda,
- Porcentagem dos pulsos aceitos para cada corda,
- Relação sinal-ruído ou controle automático de ganho ao longo de cada corda,
- *Status* e indicadores de qualidade da medição,
- Indicação de falha e alarme.

3.3.6. Desempenho do medidor

As duas normas, [7] e [23], separam os medidores de vazão em duas categorias: (a) diâmetros menores que 12"; e (b) diâmetros maiores ou igual a 12". Esta divisão foi estabelecida para permitir os requisitos menos rigorosos para medidores de menor tamanho, onde tolerâncias as tolerâncias dimensionais são mais difíceis de serem mantidas. Os demais requisitos são os mesmos.

As duas normas, [7] e [23], definem três vazões que separam a faixa de operação do medidor em dois intervalos para finalidade de estabelecimento das tolerâncias de desempenho.

- Q_{min}: É o menor de vazão que o usuário pode operar o medidor sem ultrapassar os valores máximos dos erros especificados pelas normas.
- Q_t: É o valor especificado pelo fabricante que divide a faixa de operação do medidor em duas com tolerâncias distintas. Maiores erros são permitidos abaixo deste valor.
- Q_{max}: É a maior vazão especificada pelo fabricante que passa pelo medidor.

A ISO 17089 [23] especifica uma Classe 1 de medidores aplicados em transferência de custódia e Classe 2 de medidores para alocação. A AGA 9 [7] apresenta apenas uma classe, que corresponde à Classe 1 da ISO 17089 [23]. A AGA 9 [7] recomenda que os medidores ultrassônicos sejam calibrados com escoamento para minimizar sua incerteza de medição além dos requisitos

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0713644/CA

mínimos de desempenho. A ISO 17089 [23] exige que apenas os medidores de Classe 1 (transferência de custódia) sejam calibrados, mas recomenda que os de Classe 2 também o sejam.

O desempenho de todos os medidores ultrassônicos, antes de fazer qualquer ajuste de calibração deve satisfazer aos seguintes requisitos das Tab. 4 e 5.

Tabela 4 - Requisitos de desempenho para medidores com diâmetro menor do que 12".

Grandeza	Unidade	AGA 9		ISO 17089			
				Classe 1		Classe 2	
		$Q<Q_t$	$Q>Q_t$	$Q<Q_t$	$Q>Q_t$	$Q<Q_t$	$Q>Q_t$
Repetitividade máxima	%	0,4	0,2	0,4	0,2	0,5	0,25
Reprodutibilidade[6] máxima	%			0,6	0,3	1,2	0,6
Resolução máxima	m/s	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002
Taxa de Amostragem	s	≤ 1	≤ 1				
Leitura máxima com vazão zero	m/s	0,006	0,006	0,012	0,012	0,024	0,024
Desvio máximo de SOS	%	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
Máxima dispersão[7] da SOS	m/s	0,5	0,5				
Máximo erro permitido	%	1,4	0,7	1,4	0,7	2,0	1,0
Máximo erro pico/pico	%	1,4	0,7		< 0,7		< 1
Velocidade para	m/s			1,5	1,5	1,5	1,5

[6] De acordo com a norma ISO 17089 [23], reprodutibilidade é o grau de concordância entre os resultados das medições do equipamento em teste, considerando a vazão constante e variando as condições operacionais.

[7] Do inglês *spread*. Significa que diferença máxima entre os valores da velocidade do som medidos em cada corda não deve ultrapassar os limites especificados.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0713644/CA

Grandeza	Unidade	AGA 9		ISO 17089			
Q_t							

Tabela 5 - Requisitos de desempenho para medidores com diâmetro maior ou igual a 12”.

Grandeza	Unidade	AGA 9		ISO 17089			
				Classe 1		Classe 2	
		$Q<Q_t$	$Q>Q_t$	$Q<Q_t$	$Q>Q_t$	$Q<Q_t$	$Q>Q_t$
Repetitividade máxima	%	0,4	0,2	0,4	0,2	0,5	0,25
Reprodutibilidade máxima	%			0,6	0,3	1,2	0,6
Resolução máxima	m/s	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002
Taxa de Amostragem	s	≤ 1	≤ 1				
Leitura máxima com vazão zero	m/s	0,006	0,006	0,006	0,006	0,012	0,012
Desvio máximo de SOS	%	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
Máxima dispersão da SOS	m/s	0,5	0,5				
Máximo erro permitido	%	1,4	0,7	1,4	0,7	2,0	1,0
Máximo erro pico a pico	%	1,4	0,7		< 0,7		< 1
Velocidade para Q_t	m/s			1,5	1,5	1,5	1,5

A Fig. 26, retirada da ISO 17089 [23], mostra graficamente como avaliar os parâmetros citados nas Tab. 4 e 5.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0713644/CA

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0713644/CA

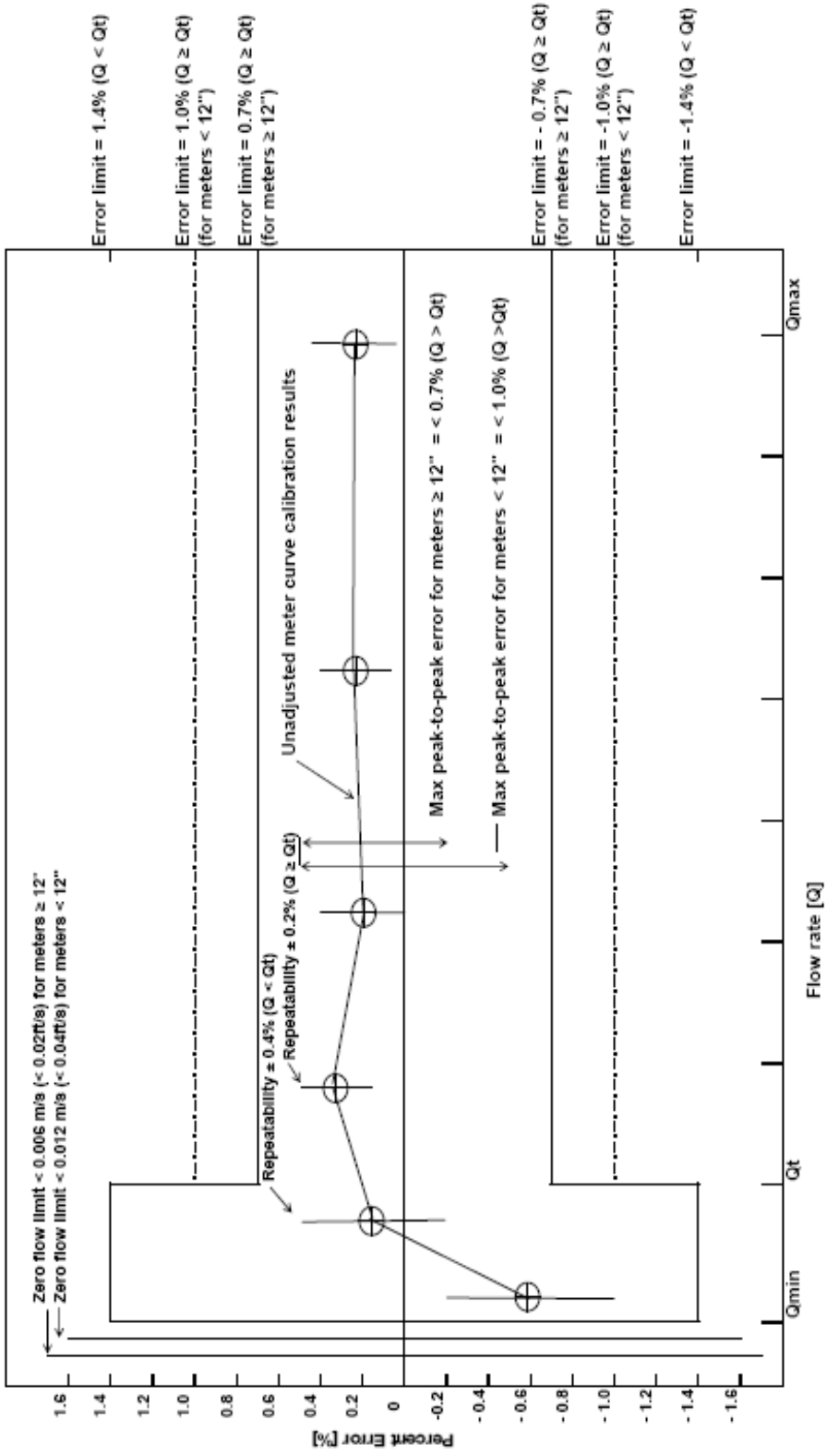


Figura 26 – Representação gráfica dos parâmetros de avaliação de medidores. [23]

3.3.7.
Testes do Medidor

As duas normas, [7] e [23], discutem os testes que devem ser feitos pelo fabricante antes de entregar o medidor ao cliente. Este processo consiste em verificar o desempenho do medidor antes de enviá-lo para campo, e inclui:

- Testes dimensionais. O diâmetro interno do medidor, determinado por 12 medições, deve ser apresentado com resolução de ± 0,0025 mm;
- Testes de vazamento;
- Teste de zero. Este procedimento é também conhecido como *dry calibration*, e é realizado estaticamente, sem escoamento, colocando-se um gás no medidor com velocidade do som calculada pelas normas AGA 10 [8], ISO 12213 [26] ou equivalente. Sem velocidade do escoamento, o tempo de trânsito e a velocidade do som são medidas e comparadas com o valor teórico. Discrepâncias em até ± 0,2 % são toleradas pela AGA 9 [7], e ± 0,1 % pela ISO 17089 [23], que exige que a incerteza de medição da pressão seja melhor do que ± 0,1 %, e a da temperatura menor do que ± 0,2 K.

A AGA 9 [7] exige que o medidor ultrassônico seja calibrado em escoamento para transferência de custódia.

A ISO 17089 [23] exige que os medidores da Classe 1 (transferência de custódia) sejam calibrados em escoamento para diferentes vazões, e recomenda fortemente que os da Classe 2 (alocação) também o sejam. Ela aponta as razões da calibração com escoamento.

- Exigência legal do país;
- Exigência de elevada exatidão;
- Aplicação de transferência de custódia.

Como o medidor pode operar com velocidades de escoamento elevadas, superiores a 30 m/s, a ISO 17089 [23] recomenda que os medidores sejam calibrados na vazão máxima de operação, que então passa ser Q_{max} para atendimento da exigência de tolerâncias de medição e especificação das vazões de calibração.

A AGA 9 [7] recomenda que na calibração em escoamento sejam especificadas, no mínimo, as seguintes vazões ao longo da faixa do medidor:

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0713644/CA

100%, 70%, 40%, 25%, 10% de Q_{max} e Q_{min}. A ISO 17089 [23] recomenda, no mínimo, além das vazões recomendadas pela AGA 9 [7], o acréscimo de 5% de Q_{max}, e sugere que o medidor seja calibrado com os trechos retos associados.

Após a calibração, as duas normas, [7] e [23], sugerem que um parâmetro denominado Erro Médio Ponderado do Escoamento (FWME) seja calculado e utilizado para determinar um *Meter Factor* (MF) único, conforme a Eq. (31). As normas também permitem o uso de outros métodos como o ajuste polinomial.

$$FWME = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{Q_i}{Q_{\max}}.E_i\right)}{\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{Q_i}{Q_{\max}}\right)} \tag{31}$$

onde E_i é o erro percentual indicado pelo medidor na vazão Q_i.

A Eq. (32) apresenta o valor do *Meter Factor* MF.

$$MF = \frac{100}{100 + FMWE} \tag{32}$$

3.3.8. Requisitos de Instalação

As duas normas apresentam exigências e sugestões para diminuição da influência de diferentes parâmetros de instalação e medição sobre o resultado da medição. Entretanto, a preocupação maior é a distância do medidor em relação às perturbações a montante e a jusante do escoamento, e à exigência de comprimentos de trecho reto. Instalações típicas a montante do medidor produzem perfis de velocidade assimétricos, com *swirl*, *crossflow*, ou a combinação destas distorções. Curvas, tubulações coletoras, junções T, condicionadores de escoamento, equipamento de filtragem, variação de diâmetro da tubulação e válvulas são exemplos destes elementos.

As duas normas, [7] e [23], citam pesquisas que demonstraram ser necessários trechos retos com comprimento de pelo menos 50 vezes o diâmetro nominal (ou 50D) para eliminar perfis assimétricos, e pelo menos 200D para o *swirl*, o que tornaria impraticável sua aplicação em instalações industriais. O uso

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0713644/CA

de várias trajetórias acústicas no medidor ultrassônico de condicionadores de escoamento pode reduzir sensivelmente estes valores.

A ISO 17089 [23] indica que o menor comprimento equivalente de trecho reto a montante do medidor é aquele que ao se adicionar um outro de 10D a leitura do medidor não se altera mais do que a repetitividade combinada do laboratório e do medidor.

A AGA 9 [7] recomenda que pelo menos uma configuração a montante e a jusante com um condicionador de escoamento, ou uma sem o mesmo, seja indicada pelo fabricante para garantir que o erro adicional devido à configuração de instalação não ultrapassará 0,3% na faixa entre Q_{min} e Q_{max}, devendo ser validada por dados experimentais. Este valor corresponde ao parâmetro reprodutibilidade da ISO 17089 [23].

A AGA 9 [7] especifica que um projeto conservativo num escoamento unidirecional deve usar um trecho reto com comprimento igual a dez vezes do diâmetro nominal da tubulação, ou 10D, entre a entrada da tubulação do medidor e o condicionador de fluxo, um trecho reto de 10D entre o condicionador de fluxo e o medidor, e um trecho reto de 5D entre o medidor e a primeira perturbação a jusante. Quando o escoamento for bidirecional, os trechos a montante e a jusante devem ser iguais.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0713644/CA

3.3.9. Verificação do medidor no campo

O teste de verificação do medidor no campo consiste em verificar o diagnóstico básico que inclui o perfil de velocidade, a velocidade do som em cada corda, o desempenho do transdutor, a relação sinal-ruído e o ganho. Adicionalmente, o valor medido da velocidade do som pode ser comparado com o calculado pela AGA 10 [8] ou equivalente. Comparando-se uma série de dados ao longo do tempo, incluindo o da primeira instalação e o da calibração, pode-se verificar se o medidor está funcionando corretamente, ou se existem modificações do escoamento.

Quando se deseja saber se o medidor se comporta igualmente no laboratório e no campo, a norma ISO 17089 [23] sugere que as mesmas vazões usadas na calibração sejam utilizadas, acrescentando-se o valor de 120% de Q_{max}, em um *loop* com as seguintes perturbações de escoamento (AGA 9 [7] e ISO 17089 [23]).

- (A) Condições de referência (entrada da tubulação de 80 a 100D a montante do medidor)

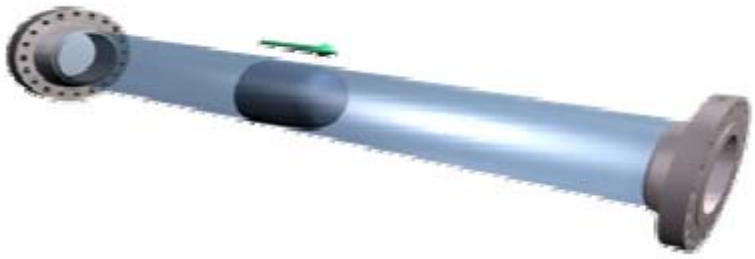


Figura 27 - Configuração (A): Condições de referência

- (B) Duas curvas de 90° em planos perpendiculares a montante do medidor, para medir os efeitos de *swirl* com grau moderado (até 15°) e da assimetria do perfil axial. Curva θ = 0°.

Figura 28 - Configuração (B): Duas curvas de 90° em planos perpendiculares. θ = 0°.

- (C) Duas curvas de 90° em planos perpendiculares a montante do medidor, para medir os efeitos do *swirl* com grau moderado (até 15°) e da assimetria do perfil axial. Curva θ = 90°.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0713644/CA

Figura 29 - Configuração (C): Duas curvas de 90° em planos perpendiculares. θ = 90°.

- (D) Curva única a montante para testar o efeito de um escoamento secundário forte com assimetria e sem *swirl*. Curva θ = 0°.

Figura 30 - Configuração (D): Curva única. θ = 0°.

- (E) Curva única a montante para testar o efeito de um escoamento secundário forte com assimetria e sem *swirl*. Curva θ = 90°.

Figura 31 - Configuração (D): Curva única. θ = 90°.

- (F) Uma válvula gaveta 50% fechada para testar o efeito de perfis fortemente assimétricos.
- (G) Elementos que causem *swirl* com ângulos elevados (maior do que 25°).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0713644/CA

- (H) Expansor com pelo menos 1D de aumento do diâmetro da tubulação.
- (I) Redutor com pelo menos 1D de redução do diâmetro da tubulação.

Figura 32 - Configuração (I): Redutor com pelo menos 1 D de redução do diâmetro da tubulação.

Uma forma de verificação de medidores no campo é a colocação de um outro medidor em série (do mesmo tipo ou não) que servirá de referência. Este medidor de referência só deve ser introduzido em serviço durante a atividade de intercomparação. Os parâmetros principais dos dois medidores devem ser monitorados e comparados para confirmar a concordância entre os mesmos. O volume de gás natural obtido através da integração da vazão deve ser a base de comparação.

3.3.10. Material adicional das normas

As duas normas apresentam um capítulo sobre a teoria básica do medidor ultrassônico e a estimativa da incerteza de medição. A ISO 17089 [23] apresenta adicionalmente um capítulo para auditoria sobre o funcionamento do medidor em campo, e outro a respeito do efeito do ruído sobre o seu desempenho.

3.4. Estimativas das incertezas

A seguir serão apresentados os conceitos e equações para se estimar: 1) a incerteza na calibração dos medidores ultrassônicos utilizados no desenvolvimento desta dissertação; 2) a incerteza dos volumes totalizados pelos mesmos medidores a partir da estimativa da incerteza da vazão, integrada em um determinado período de tempo.

As estimativas das incertezas estão baseadas nos documentos [28], [29] e [30], que estabelecem a seguinte seqüência para se determinar o resultado final:

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0713644/CA

definição do mensurando e seu modelo matemático; identificação das possíveis fontes de incerteza; quantificação das fontes de incerteza; redução das incertezas para uma forma padrão; combinação das incertezas padronizadas e os respectivos coeficientes de sensibilidade; declaração da incerteza expandida, do fator de abrangência e do nível da confiança.

3.4.1. Estimativa da incerteza de medição de vazão nas condições de calibração

A estimativa da incerteza será determinada a partir dos dados reais da calibração coletados em Laboratório. Os medidores utilizados no desenvolvimento desta dissertação foram calibrados no CEESI - *Colorado Engineering Experiment Station Inc.* – cuja incerteza declarada para vazões de até 33 980 m^3/h (≈ 20 000 cfm) e pressões entre 70 e 75 bar é de ± 0,23% [31].

As calibrações foram realizadas considerando-se apenas as vazões nas condições (pressão e temperatura) do escoamento sem nenhuma correção, tanto para o medidor quanto para o padrão de referência; e foram realizadas de acordo com os requisitos da AGA 9 [7], ou seja, para as seguintes faixas de vazão: 100%, 70%, 40%, 25%, 10% de Q_{max} e Q_{min}. Estas vazões representam as seguintes faixas de velocidade de escoamento do gás: 0,762; 3,048; 6,096; 12,192; 21,336 e 30,480 m/s (2,5; 10; 20; 40; 70 e 100 ft/s). Para cada uma destas velocidades foram realizadas 48 medições da vazão do medidor em calibração, uma a cada 5 segundos.

Cada um destes 48 valores foi então comparado com a vazão indicada pelo medidor de referência (padrão), sendo este uma turbina, gerando 48 valores para o *Meter Factor*, MF, de acordo com a Eq. (33).

$$MF = \frac{Q_M}{Q_T} \tag{33}$$

onde Q_M é a vazão indicada pelo medidor de referência (padrão), e Q_T é a vazão indicada pelo medidor em calibração.

Como não estavam disponíveis os valores correspondentes do padrão de referência utilizado na calibração, apenas seu valor médio, considerou-se constante o valor da referência para cada um dos 48 valores registrados durante

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0713644/CA

a calibração. Esta consideração resultou em grande variabilidade do MF (Fig. 33), tornando o resultado bastante conservativo.

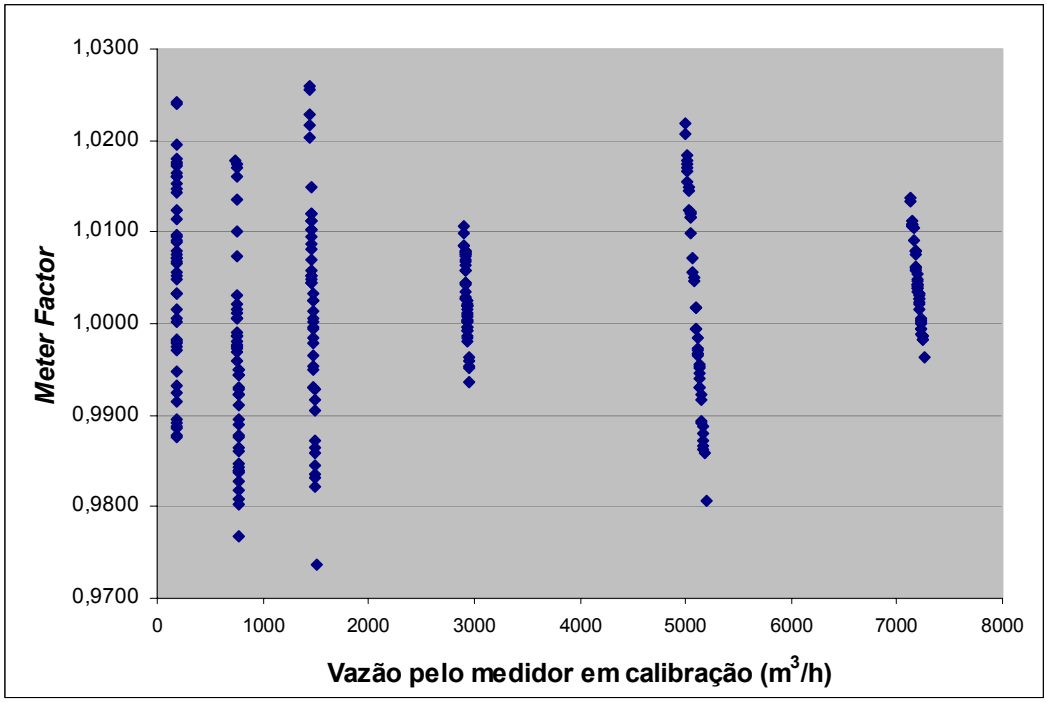


Figura 33 – Variação do MF do medidor 08-060434 durante sua calibração.

A Eq. (34) apresenta a forma de cálculo para a estimativa da incerteza sobre o MF, u_{MF}.

$$\frac{u_{MF}}{MF} = \sqrt{\left(\frac{u_{QM}}{Q_M}\right)^2 + \left(\frac{u_{QT}}{Q_T}\right)^2} \qquad (34)$$

onde:

u_{QM} = Incerteza padronizada de medição de vazão pelo medidor de referência.

u_{QT} = Incerteza padronizada de medição de vazão pelo medidor em calibração;

3.4.1.1. Incerteza de medição de vazão pelo medidor em calibração

A incerteza de medição de vazão pelo medidor em calibração, u_{QT}, tem como contribuições sua repetitividade e sua resolução de leitura. A incerteza

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0713644/CA

devido a repetitividade é determinada, para cada valor de vazão, a partir do desvio padrão, σ_{QT}, dos 48 dados obtidos na calibração. A incerteza devido à resolução de leitura, $u_{leitura}$, é determinada diretamente a partir da observação dos valores coletados. Assim:

$$u_{QT}^2 = \sigma_{QT}^2 + u_{leitura}^2 \tag{35}$$

$u_{leitura}$ é uma incerteza do tipo B, e será determinada considerando-se que a resolução do medidor durante a calibração é igual a sua incerteza expandida, $U_{leitura}$, ou seja:

$$u_{leitura} = \frac{U_{leitura}}{\sqrt{3}} \tag{36}$$

A opção por uma distribuição retangular tem por objetiva determinar um resultado mais conservativo.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0713644/CA

3.4.1.2. Incerteza do *Meter Factor* MF

A estimativa da incerteza do MF será determinada através da Eq. (34), onde a incerteza da referência, u_{QM}, é determinada considerando-se a incerteza expandida, U_{QM}, informada no Certificado de Calibração do medidor em calibração (Anexo A). Esta incerteza é considerada do tipo A, assim:

$$u_{QM} = \frac{U_{QM}}{2} \tag{37}$$

3.4.1.3. Incerteza do ajuste do MF

Da comparação entre a vazão do medidor de referência e as vazões do medidor em calibração (Eq. (33)) surgem 48 valores distintos de MF para cada faixa calibrada. A ISO 17089 [23] sugere uma metodologia para determinação de um MF único a ser utilizado em toda a faixa de trabalho, mas permite a utilização, por exemplo, de um ajuste polinomial.

Os medidores utilizados permitem esta segunda metodologia, que foi então aplicada. Todos os valores encontrados de MF foram plotados em um gráfico,

tendo como correspondentes suas respectivas vazões (Fig. 33), e com o auxílio da ferramenta Excel ajustou-se um polinômio do terceiro grau, já que este resultou no menor desvio médio quadrático, visando representar o comportamento do MF ao longo da faixa de medição.

O polinômio resultante é:

$$MF(Q_T) = -7{,}273.10^{-14}.Q_T^3 + 9{,}420.10^{-10}\,Q_T^2 - 2{,}831.10^{-6}.Q_T + \\ +1{,}00268 \tag{38}$$

Em virtude da vazão em operação ser corrigida pelo MF resultante deste ajuste polinomial, será necessário determinar a estimativa da incerteza em função deste ajuste, u_{ajuste}. A Eq. (39) apresenta a forma de cálculo para estimar esta incerteza.

$$u_{ajuste} = \sqrt{\frac{1}{N-1}.\sum_{i=1}^{N}\left(MF_i - MF(Q_{Ti})\right)^2} \tag{39}$$

3.4.1.4. Incerteza expandida da medição de vazão pelo medidor em calibração

A incerteza padrão combinada da medição de vazão pelo medidor em calibração pode ser determinada pela Eq (40).

$$\frac{u_{calibração}}{Q_{calibração}} = \sqrt{\left(\frac{u_{MF}^2}{MF}\right) + \left(\frac{u_{ajuste}^2}{MF}\right) + \left(\frac{c_T.u_{QT}}{MF}\right)^2} \tag{40}$$

Onde c_T é o coeficiente de sensibilidade de u_{QT}, determinado por:

$$c_T = \frac{\partial(MF)}{\partial Q_T} \tag{41}$$

Finalmente, a incerteza expandida da vazão do medidor em calibração, U, será determinada através da Eq. (42).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0713644/CA

$$\frac{U_{calibração}}{Q_{calibração}} = Fator.de.Abrangência \times \frac{u_{calibração}}{Q_{calibração}} \quad (42)$$

onde o *Fator de Abrangência* para um nível de confiança de 95,45% pode ser aproximado para 2.

A Eq. (42) representa a estimativa da incerteza expandida da medição de **vazão pontual** do medidor em calibração. A estimativa da incerteza de medição da **vazão média** pode ser determinada pela Eq. (43).

$$U_{vazaomedia} = \frac{U_{calibração}}{\sqrt{n}} \quad (43)$$

onde *n* é o número de medições, que neste caso é igual a 48.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0713644/CA

3.4.2. Estimativa da incerteza de medição de vazão nas condições de referência

O modelo matemático utilizado para se calcular a vazão volumétrica do gás natural adotado é:

$$Q_r = Q_o \cdot \frac{P}{P_r} \cdot \frac{T_r}{T} \cdot \frac{Z_r}{Z} \quad (44)$$

onde:

Q_r = vazão de gás nas condições de referência

Q_o = vazão de gás nas condições de operação

P = pressão absoluta do gás na condição de operação

P_r = pressão absoluta do gás na condição de referência = 101,325 kPa

T = temperatura absoluta do gás na condição de operação

T_r = temperatura absoluta do gás na condição de referência = 20 °C

Z_r = fator de compressibilidade do gás nas condições de referência

Z = fator de compressibilidade do gás nas condições de operação

Dados que P_r e T_r são, por definição, fixos, e supondo, portanto, que as incertezas de ambos seja igual a zero, a incerteza padrão combinada sobre a vazão volumétrica nas condições de referência pode ser estimada por:

$$u_{Qr} = \sqrt{\left(\frac{\partial Q_r}{\partial Q_o}\cdot u_{Qo}\right)^2 + \left(\frac{\partial Q_r}{\partial P}\cdot u_P\right)^2 + \left(\frac{\partial Q_r}{\partial T}\cdot u_T\right)^2 + \left(\frac{\partial Q_r}{\partial Z}\cdot u_Z\right)^2 + \left(\frac{\partial Q_r}{\partial Z_r}\cdot u_{Zr}\right)^2} \quad (45)$$

3.4.2.1. Coeficientes de sensibilidade

A partir do modelo matemático descrito na Eq. (44), são definidas as principais fontes de incerteza que contribuem para a incerteza global sobre o valor da vazão volumétrica de gás nas condições de referência Q_r.

Os coeficientes de sensibilidade, relativos a cada uma dessas fontes de incerteza, são obtidos a partir das derivadas parciais desta equação em relação aos respectivos parâmetros de influência. Assim:

$$\frac{\partial Q_r}{\partial Q_o} = \frac{Q_r}{Q_o};\ \frac{\partial Q_r}{\partial P} = \frac{Q_r}{P};\ \frac{\partial Q_r}{\partial T} = -\frac{Q_r}{T};\ \frac{\partial Q_r}{\partial Z_r} = \frac{Q_r}{Z_r};\ \frac{\partial Q_r}{\partial Z} = -\frac{Q_r}{Z} \quad (46)$$

Os coeficientes de sensibilidade apresentados acima se referem a um método aproximado, que não considera a influência que a pressão e a temperatura tem sobre o fator de compressibilidade. Considerando, então, tais influências, o coeficiente de sensibilidade referente à pressão será:

$$\frac{\partial Q_r}{\partial P} = Q_o\cdot\frac{1}{P_r}\cdot\frac{T_r}{T}\cdot\frac{Z_r}{Z} + Q_o\cdot\frac{P}{P_r}\cdot\frac{T_r}{T}.Z_r\cdot\left(-\frac{1}{Z^2}\cdot\frac{\partial Z}{\partial P}\right) = \\ = Q_r\cdot\left[\frac{1}{P} - \frac{1}{Z}\cdot\frac{\partial Z}{\partial P}\right] \quad (47)$$

E o coeficiente de sensibilidade referente à temperatura:

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0713644/CA

$$\frac{\partial Q_r}{\partial T} = Q_o \cdot \frac{P}{P_r} . T_r \cdot \frac{Z_r}{Z} \cdot \left(- \frac{1}{T^2} \right) + Q_o \cdot \frac{P}{P_r} \cdot \frac{T_r}{T} . Z_r \cdot \left(- \frac{1}{Z^2} \cdot \frac{\partial Z}{\partial T} \right) = \\ = -Q_r \cdot \left[\frac{1}{T} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial Z}{\partial T} \right] \quad (48)$$

A Eq. (45) pode ser reescrita, então, da seguinte maneira:

$$\frac{u_{Qr}}{Q_r} = \sqrt{\left(\frac{u_{Qo}}{Q_o} \right)^2 + \left[\left(\frac{1}{P} - \frac{1}{Z} \cdot \frac{\partial Z}{\partial P} \right) . u_P \right]^2 + \\ + \left[\left(\frac{1}{T} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial Z}{\partial T} \right) . u_T \right]^2 + \left(\frac{u_Z}{Z} \right)^2 + \left(\frac{u_{Zr}}{Z_r} \right)^2} \quad (49)$$

Os termos $\partial Z/\partial P$ e $\partial Z/\partial T$ das Eq. (48) e (49) serão determinados numericamente, assim:

$$\frac{\partial Z}{\partial P} = \frac{Z]_{P+\partial P} - Z]_P}{\partial P} \quad (50)$$

E,

$$\frac{\partial Z}{\partial T} = \frac{Z]_{T+\partial T} - Z]_T}{\partial T} \quad (51)$$

3.4.2.2. Estimativas de incerteza da pressão e da temperatura de operação, u_P e u_T

Obtidas através dos certificados de calibração dos transmissores de pressão e temperatura utilizadas para correção da vazão (Anexo B), da condição de operação para a condição de referência.

3.4.2.3. Estimativa das incertezas dos fatores de compressibilidade, u_Z e u_{Zr}

A composição do gás natural é monitorada continuamente no sistema de medição por meio de um cromatógrafo interligado ao computador de vazão. A estimativa da incerteza sobre o valor do fator de compressibilidade pode ser obtida a partir do histórico de dados de operação do sistema, tomando-se como

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0713644/CA

base as diferenças obtidas dos valores de Q_r em virtude das variações na composição do gás sob medição.

$$u_{variação} = \frac{\text{Amplitude de variação de } Q_r}{\sqrt{12}} \tag{52}$$

Os valores de Z e Z_r são calculados de acordo com os algoritmos descritos na AGA 8 [12] e tendo como referências as composições do gás natural apresentadas na Tab. 28. A norma [12] estabelece a incerteza devido ao algoritmo de cálculo em função das pressões e temperaturas de operação (Fig. 34). Os valores apresentados na Fig. 34 serão considerados como sendo as incertezas expandidas, $U_{cálculo}$, e, para a determinação da incerteza padronizada, considera-se que as mesmas são do Tipo B. Assim:

$$u_{cálculo} = \frac{U_{\text{cálculo}}}{\sqrt{3}} \tag{53}$$

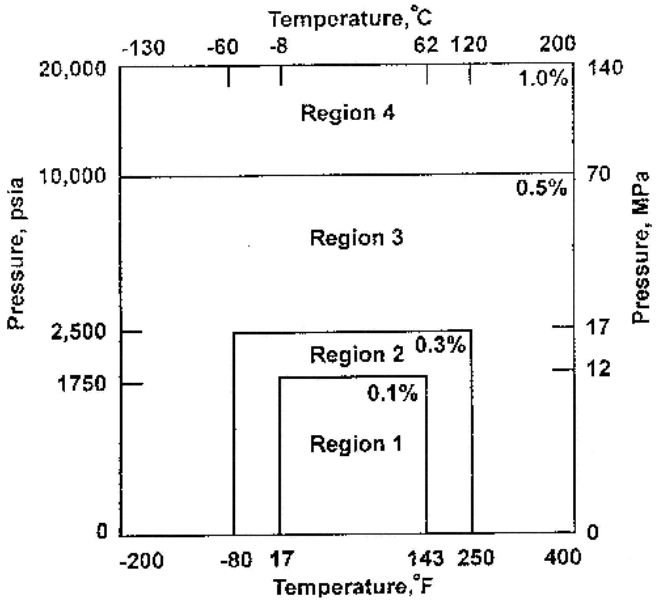


Figura 34 – Estimativas de incerteza sobre o algoritmo de cálculo para o fator de compressibilidade [12].

Desta forma, a incerteza total de Z e Z_r podem ser estimadas através da Eq. (54).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0713644/CA

$$\frac{u_Z}{Q_r} = \frac{u_{Zr}}{Q_r} = \sqrt{\left(\frac{u_{variação}}{Q_r}\right)^2 + \left(\frac{u_{cálculo}}{Q_r}\right)^2} \quad (54)$$

3.4.3.
Estimativa para a incerteza de medição da vazão média (incerteza de medição do volume)

Este tópico apresenta uma metodologia para a determinação da estimativa da incerteza de medição do volume totalizado a partir da vazão instantânea integrada em um determinado período de tempo.

Considerando a vazão sendo integrada durante um período de *t* segundos, o volume *V* pode ser determinado por:

$$V = \int Q.dt \quad (55)$$

Ou, tomando um intervalo de tempo constante para a atualização da vazão:

$$V = (Q_1 + Q_2 + Q_3 + ... + Q_n).\Delta t \quad (56)$$

Considerando ainda que a incerteza padrão do intervalo de tempo $u_{\Delta t}$ é desprezível, ou seja, muito menor do que o intervalo de tempo que está medido e que o processo é estável, de forma as variações de *Q* sejam devidas somente à incerteza de medição da vazão, pode-se escrever:

$$\frac{u_{Q1}}{Q_1} = \frac{u_{Q2}}{Q_2} = \frac{u_{Q3}}{Q_3} = ... = \frac{u_{Qn}}{Q_n} = p \quad (57)$$

onde *p* é constante.

Assim,

$$u_V^2 = (\Delta t)^2.\left[u_{Q1}^2 + u_{Q2}^2 + u_{Q3}^2 + ... + u_{Qn}^2\right] \quad (58)$$

O volume totalizado pode então ser expresso por:

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0713644/CA

$$V = (Q_1 + Q_2 + Q_3 + ... + Q_n).\Delta t = (\bar{Q}.n).\Delta t \quad (59)$$

Desta forma, a estimativa da incerteza de medição do volume pode ser expressa por:

$$\left(\frac{u_V}{V}\right)^2 = \frac{(\Delta t)^2}{(\bar{Q}.n.\Delta t)^2}.\left[u_{Q1}^2 + u_{Q2}^2 + u_{Q3}^2 + ... + u_{Qn}^2\right] \quad (60)$$

Ou,

$$\left(\frac{u_V}{V}\right)^2 = \frac{1}{n^2}.\left[\left(\frac{u_{Q1}^2}{\bar{Q}}\right)^2 + \left(\frac{u_{Q2}^2}{\bar{Q}}\right)^2 + \left(\frac{u_{Q3}^2}{\bar{Q}}\right)^2 + ... + \left(\frac{u_{Qn}^2}{\bar{Q}}\right)^2\right] \quad (61)$$

Assim,

$$\left(\frac{u_V}{V}\right)^2 \approx \frac{1}{n^2}.\left[p^2 + p^2 + p^2 + ... + p^2\right] = \frac{p^2}{n} \quad (62)$$

E, finalmente,

$$\left(\frac{u_V}{V}\right) = \frac{p}{\sqrt{n}} \quad (63)$$

A Eq. (63) permite calcular a estimativa da incerteza da medição do volume onde a vazão de escoamento se mantenha estável. Considerando que o escoamento está em constante variação, é necessário considerar a contribuição de tais variações, que podem ser estimadas por seu desvio padrão, ou seja:

$$s_Q{}^2 = \frac{1}{n-1}.\sum\left(Q_i - \bar{Q}\right)^2 \quad (64)$$

Desta forma, a estimativa da incerteza sobre a vazão instantânea pode ser obtida, aproximadamente, por:

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0713644/CA

$$\frac{u_T^2}{Q_T} = \frac{s_Q^2}{Q_T} + p^2 \tag{65}$$

E a incerteza sobre o volume totalizado pode ser estimada através da Eq. (66):

$$\left(\frac{u_{VT}}{V}\right) = \frac{u_{QT}}{\sqrt{n}} \tag{66}$$

Onde *n* é o número de intervalos de tempo durante os quais o volume é totalizado.

A Eq. (66) permite calcular, a partir da estimativa da incerteza da vazão instantânea nas condições de referência, qual o período mínimo de integração para que o volume totalizado tenha uma faixa de incerteza limite; ou a incerteza estimada para o volume totalizado em determinado período.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0713644/CA