

6

Harmonização dos valores de referência para a unidade de volume de gás natural

A crescente utilização do gás natural como fonte de energia exige aumento da malha de transporte, de transferência e de pontos de medição de vazão. Conseqüentemente cresce a demanda por confiabilidade e harmonização dos valores de referência estáveis em alta pressão. Com isso a estabilidade de valores de medição ao longo do tempo está ganhando importância bem como a exigência de se manter as variações entre valores de referência num patamar mínimo tecnicamente possível.

A combinação das realizações de cadeias equivalentes e independentes de rastreabilidade, por meio de processo de harmonização dos valores de referência para a unidade de volume de gás natural, resulta em uma redução considerável no CMC das bancadas de calibração em relação aos seus valores iniciais. Implica, portanto em um aumento da estabilidade para medição de qualquer parâmetro. A harmonização pode ser considerada como a primeira etapa para a realização de uma unidade unificada do volume para o gás natural em condições operacionais.

O estabelecimento de um valor de referência harmonizado para a unidade do volume do gás natural em condições operacionais pode ser aplicado, não somente nas instalações de calibração em que se originam, mas repassado a outras bancadas, refletindo na medição de transferência de custódia.

Bancadas de calibração de medidores de vazão de diferentes laboratórios apresentam pequenas diferenças sistemáticas do valor de referência para medição de vazão, ou seja, o metro cúbico do gás de referência em um laboratório "1" pode diferir daquele obtido por outro laboratório "2". As diferenças entre os dois laboratórios podem variar dependendo da pressão, vazão de operação e do diâmetro do medidor a ser calibrado. Para se verificar a necessidade de harmonização e se avaliar o resultado final, uma comparação inicial entre dois laboratórios de medição de vazão em alta pressão deve ser realizada para confirmar a existência da diferenças dos valores medidos com base nos dois conjuntos de valores de referência. A comparação entre o desempenho dos laboratórios de calibração de medidores de vazão a alta pressão deve ser reali-

zada por conjuntos de transferência de vazão com condições de verificar se as diferenças na comparação são grandes o suficiente para impedir bons serviços de calibração aos demandantes desses serviços.

O desvio entre os resultados da medição dos participantes pode ser quantificado por comparações bi ou multilaterais. Baseadas nesse desvio quantificado, uma nova estimativa do melhor valor de referência conhecido podem ser determinada. A figura 6.1 representa o processo de harmonização entre dois valores de referência. O centro do alvo é o valor considerado verdadeiro, os laboratórios apresentam desvio em relação ao valor verdadeiro e entre si. Através da harmonização, um fator de correção é aplicado e obtêm-se um valor de referência em que a soma das informações contribui para que a incerteza do resultado diminua.

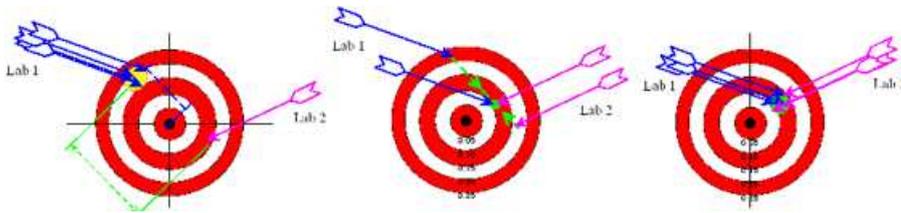


Figura 6.1: Representação da harmonização de valores de referência

Este valor denomina-se valor de referência harmonizado (HRV) caso seja realizado a partir de duas ou mais cadeias de rastreabilidade independentes. O valor calculado ($HVR = W_{lab1} \cdot valorref_1 + W_{lab2} \cdot valorref_2 + \dots$) é a melhor média ponderada diferente dos valores de referência (obviamente: $w_1 + w_2 + \dots = 1$) [20].

Os laboratórios de calibração têm de compartilhar uma visão comum com respeito aos serviços equivalentes e imparciais demandados. Com o objetivo de criar valores de referência comuns para medições de vazão a alta pressão de gás, obtêm-se uma redução das diferenças nos valores medidos e melhoram-se os CMC das bancadas de calibração em circuitos de alta pressão [13].

A experiência de harmonização ocorrida entre diferentes INM é discutida neste trabalho. Utiliza-se um procedimento no qual as informações são combinadas por duas ou mais estruturas independentes e equivalentes de medição de vazão de gás a alta pressão.

Neste capítulo são discutidos os pré-requisitos do processo de harmonização, o procedimento adotado e os resultados obtidos.

6.1

Comparações interlaboratoriais

A participação em programas de comparação interlaboratorial é um método eficaz para assegurar a qualidade dos resultados de uma calibração praticada por um determinado organismo metrológico de referência nacional. As comparações internacionais conduzidas sob a gestão do CIPM são denominadas comparações-chave (KC). KC é um tipo de comparação definida pelos Comitês Consultivos existentes no âmbito do BIPM, com a finalidade de avaliar as principais técnicas e métodos utilizados numa determinada área ou segmento metrológico. Pode envolver comparações das representações dos múltiplos e submúltiplos das unidades do SI e suas unidades derivadas, bem como comparações de complexos sistemas de calibração. As comparações-chave possuem ainda particularidades, podem ser conduzidas pelo próprio BIPM, por um de seus Comitês Consultivos, ou por segmentos regionalizados que hoje compõem geograficamente a metrologia mundial, chamados de Organizações Metrológicas Regionais (RMO). Através dessa configuração, as comparações conduzidas pelos dois primeiros organismos citados geram um valor de referência da comparação. Para manter essa cadeia de referência no nível regional (RMO) é necessário instituir institutos nacionais de metrologia engajados que participaram na comparação do BIPM ou dos Comitês Consultivos. No Brasil o Inmetro tem participado de comparações-chave conduzidas no âmbito do BIPM e do Sistema Interamericano de Metrologia (SIM), que é o RMO das Américas.

Essa modalidade de comparação é conduzida pelos três organismos já mencionados e atende as necessidades específicas não contempladas pelas comparações-chave, podendo envolver serviços de calibração cuja avaliação se torna importante por se tratar de uma atividade de grande demanda e que gera certificados cujo teor também se quer comparar. O Inmetro está envolvido em comparações suplementares no âmbito do SIM em algumas das grandezas físicas que hoje integram programas de comparações-chave. A figura 6.2 ilustra as diferentes RMO, destacando o SIM estruturado em cinco subsistemas regionais.

6.2

A comparação-chave para vazão de gás natural em alta pressão

Dentre as atividades internacionais do CIPM/BIPM para o reconhecimento mútuo de certificados da calibração, as comparações-chaves foram organizadas em todos os campos importantes da metrologia, dentre outras para a medição de vazão de gás natural em alta pressão. Em paralelo à iniciativa

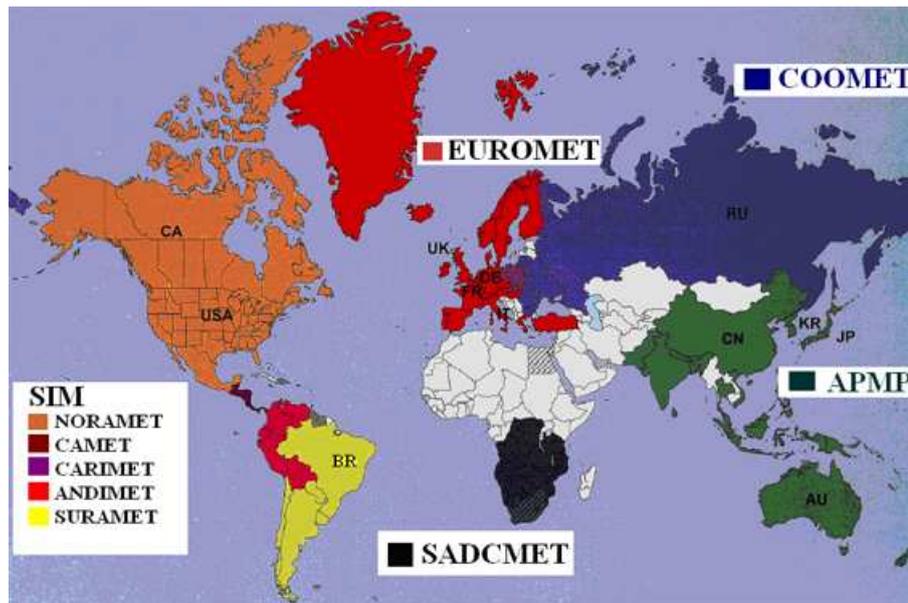


Figura 6.2: Sistema Interamericano de Metrologia no contexto das RMO que integram o sistema metrológico mundial

dos principais INM europeus na busca de um valor de referência mais estável, o CIPM decidiu realizar a comparação-chave com ampla participação de todos institutos nacionais de metrologia a fim de obter os valores de referência da comparação-chave para a medição de vazão do gás natural a alta pressão. Após quatro anos de negociação com os institutos de metrologia, somente três institutos atenderam aos requisitos para participarem das comparações-chave de gás natural a alta pressão, sendo eles o PTB, NMi/VSL e LNE. O resultado de uma comparação-chave é o valor de referência da comparação-chave (KCRV), o qual pode ser considerado a melhor realização disponível dessa grandeza física. As atividades europeias na busca de harmonização do metro cúbico do gás europeu seguiram as mesmas orientações e regulamentos e finalizaram seu trabalho em 2004. Desta maneira as comparações-chaves conduzidas sob a supervisão do CIPM/CCM permitam a confirmação do “metro cúbico harmonizado do gás natural europeu” como a melhor realização da unidade efetuada até o momento.

Concluída a comparação para o gás em alta pressão, o valor de referência da comparação-chave (KCRV) então definido pelos laboratórios participantes, dada a consistência e legitimidade do processo foi considerado à época como a melhor realização do metro cúbico harmonizado.

Esse metro cúbico de gás foi realizado de forma independente pelos três INM nas instalações de alta pressão dos laboratórios PIGSAR, NMi/VSL e LNE-LADG. Fornece um resultado estável e tem uma incerteza menor do

que as realizações individuais nas instituições participantes. O resultado dessa comparação realizada sob a gestão do CIPM constitui-se na base de referência para definição do metro cúbico europeu harmonizado de gás natural.

Essa comparação-chave foi realizada por conceituados laboratórios que (utilizam padrões primários) representados por seus institutos nacionais de metrologia (INM). Resultado desse trabalho, o valor de referência da comparação-chave foi aprovado pelo BIPM em 2005 e publicado na página na internet do BIPM em 2006.

6.3

Incerteza como uma mensuração da qualidade

O conceito da incerteza associado à medição trouxe a noção de exatidão, que é tida como uma medição para a qualidade de um resultado da medição. A incerteza é definida como parâmetro associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem fundamentalmente ser atribuídos a um mensurando.

A exatidão do medidor ou incerteza da medida é importante quando um medidor de fluxo é calibrado. A maioria dos laboratórios define o desempenho de sua bancada de provas e calibração em termos da incerteza total da medição.

A melhor capacidade de medição e calibração (CMC), isto é, a menor incerteza que um laboratório pode declarar associada ao resultado da medição, é o parâmetro que deve ser considerado para correlacionar a medição propriamente dita com a exatidão requerida.

Para que o laboratório possa disponibilizar o nível de qualidade requerido, de modo a situá-lo ou mantê-lo como referência metrológica no País, é necessário que disponha de equipamentos de medição e padrões adequados, que atendam às especificações e aos critérios de aceitação estabelecidos. Estes critérios de aceitação devem ser muito bem estabelecidos pelos laboratórios para seus equipamentos e padrões, pois podem influenciar diretamente no valor da CMC e na incerteza de medição dos serviços de calibração realizados. Portanto os laboratórios devem definir critérios de aceitação para os equipamentos e padrões do laboratório de modo a obter a CMC e incerteza de medição que assegurem a exatidão requerida nos processos de medição.

A CMC - que agrega em si a incerteza da medição - é utilizada para definir o grau de equivalência entre dois conjuntos de resultados de medição, ou entre dois conjuntos de valores de referência, ou entre dois sistemas de calibração que disseminam os valores de referência.

A figura 6.3 ilustra o princípio segundo o qual as incertezas associadas a dois valores de referência se combinam para que sejam estabelecidas a

equivalência e a contribuição média entre os dois conjuntos de resultados da medição.

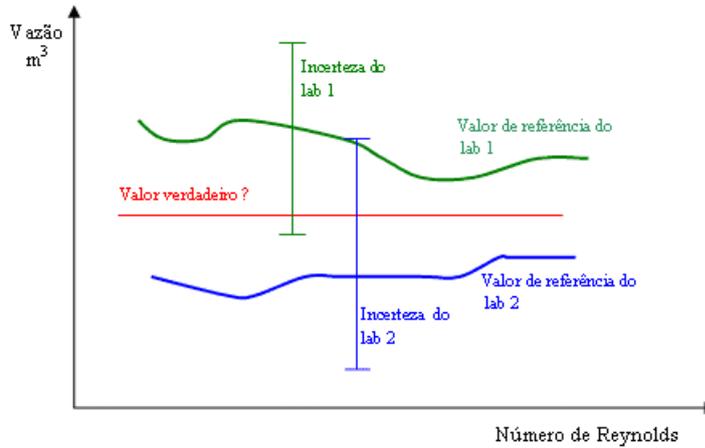


Figura 6.3: Processo de estabelecimento da equivalência entre sistemas de medição

O exemplo da referência [13] ilustra o processo de harmonização que supõe dois conjuntos de valores “ R_{V1} ” e “ R_{V2} ” que diferem 0,25% e possuem, respectivamente, incertezas “ U_{RV1} ” de 0,20% e “ U_{RV2} ” de 0,30%. Em uma primeira etapa as incertezas são utilizadas para assegurar que “ R_{V1} ” e “ R_{V2} ” representem a mesma unidade SI, isto é, não diferem significativamente de uma para outra se definindo a diferença permitida “ Δ_{perm} ”, calculada pela expressão:

$$\Delta_{perm} = \sqrt{u_{RV1}^2 + u_{RV2}^2} \quad (6-1)$$

O resultado mostra uma diferença permitida de 0,36%. Considerando que a diferença real é de 0,25% pode-se continuar com o processo. Determinando-se a equivalência dos dois conjuntos, pode-se calcular média ponderada dos dois conjuntos através do cálculo dos coeficientes de peso “ W_1 ” e “ W_2 ”, respectivamente.

$$W_1 = \frac{1}{1 + \left(\frac{u_1}{u_2}\right)^2} \quad (6-2)$$

$$W_2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{u_2}{u_1}\right)^2} \quad (6-3)$$

Os dois coeficientes de peso calculados para o exemplo são $W_1 = 0,31$ e $W_2 = 0,69$. Finalmente, a incerteza do novo valor de referência é obtida. Supondo-se uma incerteza de 0,1% para o processo de comparação, uma incerteza para harmonização dos valores de referência de $u_{harm} = 0,19\%$ é encontrada pela seguinte expressão:

$$u_{harm} = \sqrt{W_1^2 \cdot u_2^2 + W_2^2 \cdot u_2^2 + u_{comp}^2} \quad (6-4)$$

A figura 6.4 ilustra o exemplo apresentado

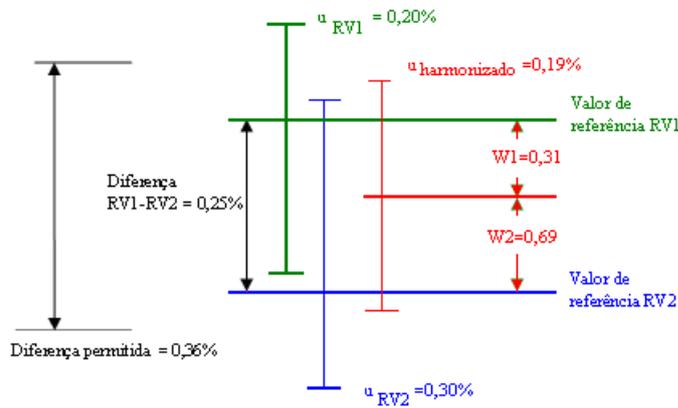


Figura 6.4: Ilustração do processo de combinação de incertezas. (Fonte: modificado de [13])

Na situação real têm-se dois princípios diferentes de realização conduzindo quase aos mesmos resultados da medição e com valores diferentes de incerteza. O exemplo ilustra que a base considerada constitui-se em algoritmo prático e conveniente para se organizar valores de referência harmonizados com as propriedades desejadas, o que resulta no aumento da estabilidade (reprodutibilidade) e na redução da incerteza.

Os valores de referência harmonizados denotam o progresso em metodologia aplicada a medições de vazão a alta pressão para o gás natural. Nos tópicos seguintes são discutidos o procedimento básico e as exigências técnicas.

6.4

Procedimentos para a harmonização dos valores de referência para a unidade de volume de gás natural

O processo de harmonização dos valores de referência para a unidade de volume de gás natural inicia-se com a formação de uma equipe de técnicos, envolvendo participantes de cada laboratório (INM). O processo se desenvolve segundo as etapas caracterizadas no fluxograma da figura 6.5.

6.4.1

Etapa 1 - Pré-requisitos

A metodologia aplicada para a harmonização é baseada em um conjunto de pré-requisitos. Essas condições devem ser discutidas e acordadas entre os INM e laboratórios participantes antes que as comparações sejam realizadas.

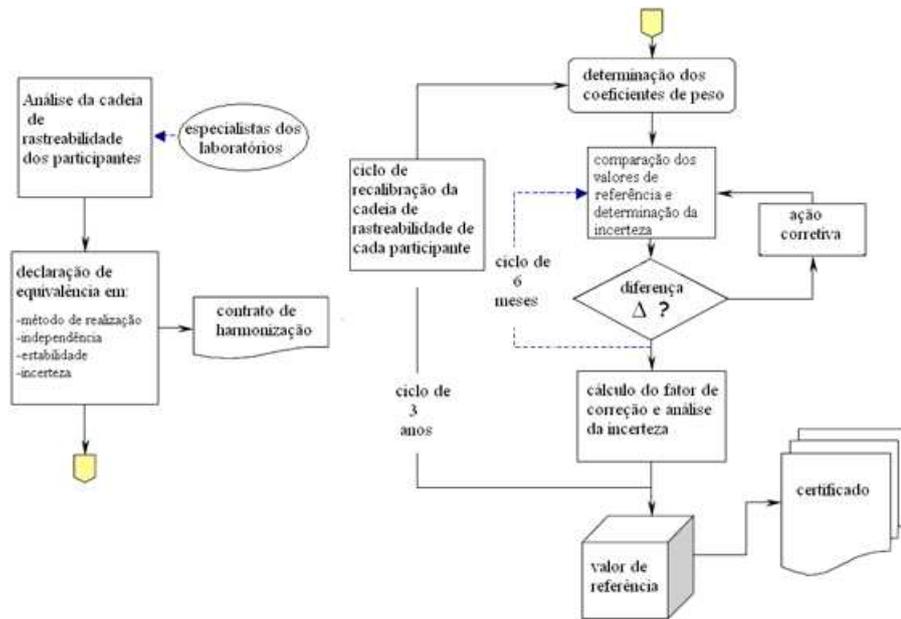


Figura 6.5: Seqüência de atividades para realizar a harmonização dos valores de referência para a unidade de volume de gás natural

6.4.1.1 Sistemas independentes

Uma cadeia de rastreabilidade é considerada independente se nenhuma ligação direta na realização da grandeza do volume existir entre as duas cadeias de rastreabilidade de alta pressão em relação a equipamentos, procedimentos e pessoal. A única referência comum consiste em padrões internacionais primários para o tempo, comprimento, massa e temperatura.

Dois sistemas de medição são chamados mutuamente independentes quando não exibem ligações direta entre suas cadeias de rastreabilidade. Ou seja, na origem não compartilham de valores de referência comuns para a unidade vazão, podendo, entretanto, compartilhar os mesmos padrões primários (internacionais) para as grandezas tempo, comprimento, massa e temperatura. O laboratório “1” sob a supervisão do laboratório “2” deve apresentar valores de referência baseados em um sistema inteiramente independente de comparações a partir de seu padrão primário, valendo-se do mesmo critério para o laboratório “2” em relação ao laboratório “1”, desde que os processos sejam realizados de maneira independente.

6.4.1.2 Equivalência das cadeias de rastreabilidade

A planilha de estimativa da incerteza de cada um dos laboratórios deve ser estabelecida, compreendida e aceita mutuamente. O nível de confiança deve

ser tal que as diferenças entre os dois sistemas não sejam significativas. O grau de equivalência é baseado no desempenho histórico e nas incertezas declaradas. Ajustam-se os valores de referência, utilizados para se estabelecer valores de referência harmonizados sobrepondo-se vazões e pressões similares, ou seja, nas mesmas condições operacionais. Definem-se então as faixas de pressão, de vazão e temperatura de referência. Por razões práticas, a harmonização deve realizar-se nas condições de pressão e vazão dentro das faixas operacionais dos laboratórios participantes.

6.4.1.3

Determinação da incerteza

O cálculo da incerteza da medição associada a cada uma das instalações deve ser transparente, compreendido e aceito. Uma equipe de especialistas dos laboratórios envolvidos responsáveis pela harmonização deve detalhar todos os componentes das incertezas associadas à realização do conjunto de valores de referência que têm influência no valor de referência harmonizado. Todo o processo deve ser esclarecido e, se necessário, ações corretivas devem ser implementadas. E o consenso entre as equipes dos laboratórios deve ser obtido como pré-requisito à harmonização.

6.4.1.4

Diferenças entre valores de referência

As diferenças observadas entre os dois conjuntos de valores de referência devem ser inferiores à raiz quadrada da soma dos quadrados das incertezas correspondentes, isto é, as diferenças não devem ser significativas se o processo de harmonização for desejado.

6.4.1.5

Estabilidade das cadeias

A estabilidade refere-se à reprodutibilidade dos valores de referência ao longo do tempo, devendo ser demonstrada para cada subsistema de medição. A equipe de peritos deve verificar os dados históricos disponíveis provenientes das organizações participantes. Os valores de referência devem ser apresentados pela média histórica do período juntamente com a faixa da incerteza estabelecida.

O grau de equivalência é estabelecido baseado no desempenho histórico e determinação das incertezas (papel relevante da declaração da CMC). Procura-se o melhor valor de referência conhecido, que deve ser baseado na informação

obtida das bancadas combinadas. O seu valor de referência deve então refletir aquele originário da bancada à qual está associado o menor valor de CMC.

6.4.2

Etapa 2 - Declaração da equivalência e de cooperação

Deve-se redigir um contrato, pela equipe de especialistas técnicos, contendo todas as etapas necessárias para obter os valores de referência comuns em longo prazo.

6.4.3

Etapa 3 - Determinação dos coeficientes de peso

Depois de completada as análises da incerteza de cada bancada de calibração, o desvio do metro cúbico de gás natural a alta pressão deve ser representada em função do número de Reynolds. Os valores de referência comuns são baseados na média ponderada do metro cúbico individual a alta pressão de cada cadeia. O cálculo do coeficiente de peso de cada cadeia de rastreabilidade é baseado na relação dos quadrados da incerteza de cada cadeia de rastreabilidade de acordo com:

$$W_i = \frac{\frac{1}{u_i^2}}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{u_j^2}} \quad (6-5)$$

Sendo “u” a incerteza do participante “i” e “n” o número laboratórios participantes.

Após a conclusão da análise da incerteza de cada bancada de calibração, é determinada o desvio do metro cúbico de gás natural a alta pressão em várias vazões e nas pressões selecionadas (em dois ou três patamares de pressão). Para o cálculo das incertezas essas são determinadas em função do número de Reynolds, e CMC são estabelecidos. Subseqüentemente, a média ponderada do metro cúbico real a alta pressão individual de cada cadeia deve ser calculada.

6.4.4

Etapa 4 - Teste de comparação

Para a realização da etapa teste de comparação, deve-se utilizar um conjunto de transferência itinerante entre os laboratórios participantes. Este padrão de transferência é formado por três conjuntos de medidores do tipo turbina com capacidades de vazão diferentes para permitir o máximo de sobreposição das faixas de vazão. Nenhuma descontinuidade significativa deve ser observada nos resultados embora três tamanhos diferentes de medidores e patamares diferentes de pressão devem ser utilizados. Os resultados das

comparações são utilizados para calcular o valor de referência harmonizado, utilizando-se a média quadrática ponderada. Desta maneira o melhor valor de referência conhecido para as duas bancadas é estabelecido [23].

6.4.4.1 Conjunto de transferência

Na realização de comparação para a obtenção do valor de referência utilizam-se três conjuntos de transferência (100 D, 250 D e 400 D) conforme a disposição ilustrada na figura 6.6 [23].

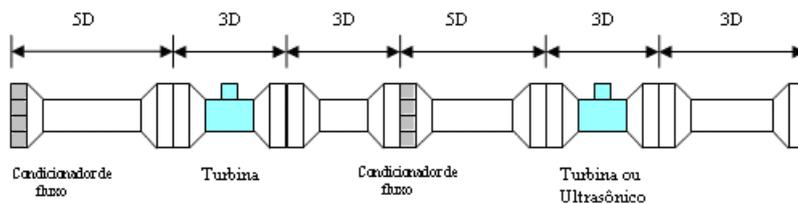


Figura 6.6: Conjunto de transferência. (Fonte: modificado de [15])

O conjunto consiste de uma seção de entrada com um retificador de fluxo, um medidor tipo turbina, outra seção com retificador de fluxo, outro medidor tipo turbina ou medidor ultra-sônico e seção da saída final conforme a figura 6.6. Os retificadores de fluxo são utilizados para anular efeitos de instalação. A 3D da tubulação de saída é instalado um sensor de temperatura a 1D da tomada do medidor tipo turbina. Os padrões de transferência podem ser dispostos por três conjuntos formados por dois tipos diferentes de medidores do tipo turbina com as seguintes características e capacidade de vazão:

- dois medidores tipo turbina G-250 (100 D), com uma faixa de vazão de 100 m³/h a 400 m³/h;
- dois medidores tipo turbina G-1.600 (250 D), com uma faixa de vazão de 300 m³/h a 2.500 m³/h;
- dois medidores tipo turbina G-4.000 (400 D), com uma faixa de vazão de 600 m³/h a 6.000 m³/h.

6.4.4.2 Matriz de teste

A matriz de teste deve ser desenvolvida a partir da comparação entre as duas bancadas do laboratório participantes. Cada calibração é realizada pelo menos três vezes para cada medidor tipo turbina dos conjuntos. Uma grande escala em pontos de vazão a alta pressão deve ser realizada. Uma

faixa considerável de medição deve ser obtida, isto é, a vazão real medida varia de 100 m³/h a 6.000 m³/h, e a faixa de pressões varia de 20 bar a 50 bar. No total 30 pontos devem ser testados, obtendo-se um grande número de desvios juntamente com suas incertezas. As vazões devem ser representadas graficamente como valores de número de Reynolds permitindo, assim, as comparações nas condições operacionais e técnicas, caso as bancadas não sejam fisicamente similares. O mensurando de uma intercomparação é o desvio do medidor “φ” definido como $\varphi = \left(\frac{V_{\text{volume indicado}}}{V_{\text{volume referencia}}} - 1 \right) \cdot 100\%$. A prática comum para medidor do tipo turbina operando em alta pressão é descrever o desvio do medidor “φ” como uma função polinomial do logaritmo do número de Reynolds, conforme expresso pela equação:

$$\varphi = \sum_{i=0}^n a_i \cdot \log^i(Re) \tag{6-6}$$

Os coeficientes lineares “a_i” podem ser determinados utilizando-se o método dos mínimos quadrados.

6.4.5

Etapa 5 - Avaliação dos resultados dos ensaios de comparação

Os resultados dos testes de cada medidor do conjunto padrão devem ser representados em um gráfico em função do número de Reynolds conforme ilustrado na figura 6.7.

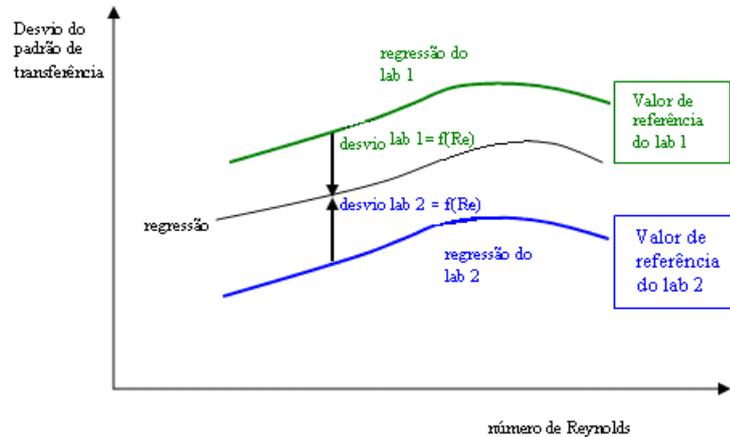


Figura 6.7: Diferenças possíveis entre resultado de medições do ensaio de comparação

A curva média ponderada de cada medidor deve ser representada por uma equação polinomial com os resultados dos testes do laboratório “1” e do laboratório “2”. Os coeficientes de peso são calculados dos níveis da incerteza dos dois sistemas independentes na etapa 4. A curva do desvio de cada medidor

individual é expressa conforme equação polinomial relacionada ao número de Reynolds, para que o procedimento não seja sensível a pressão, é determinada pelas expressões:

Resultado de ensaio do laboratório “1”, turbina “x”:

$$\varphi_{x,1} = a_{0,1} + a_{1,1}Re + a_{2,1}Re^2 + a_{3,1}Re^3 \quad (6-7)$$

Resultado de ensaio do laboratório “2”, turbina “x”:

$$\varphi_{x,2} = a_{0,2} + a_{1,2}Re + a_{2,2}Re^2 + a_{3,2}Re^3 \quad (6-8)$$

Sendo nestas expressões, “ R_e ” o número de Reynolds relacionado ao diâmetro da tubulação. A média ponderada (regressão) do desvio da curva de cada medidor de transferência é calculada de acordo com:

$$\varphi_{x,c} = \sum W_i(a_{0,i} + a_{1,i}Re + a_{2,i}Re^2 + a_{3,i}Re^3 + \dots) \quad (6-9)$$

sendo “ c ” é o valor de referência harmonizado.

6.4.5.1

Fator de harmonização

O fator de harmonização é obtido pelo cálculo do desvio de cada resultado de ensaio com respeito à curva média ponderada. A diferença de cada resultado de ensaio em relação à curva média ponderada deve ser determinada. Após a determinação do desvio harmonizado individual de cada curva, as diferenças entre os laboratórios participantes e o valor harmonizado (em função do número de Reynolds) devem ser determinadas para cada número de Reynolds e para cada medidor individual nos patamares de pressão estabelecidos.

O fator de harmonização “ H ” é determinado pela expressão:

$$H_{x,i} = \varphi_{x,i} - \varphi_{x,c} \quad (6-10)$$

Sendo “ x ” o medidor do tipo turbina específico, “ i ” número do laboratório, e “ c ” o valor de referência harmonizado. Os dados devem ser demonstrados graficamente de uma maneira transparente para que a equipe de especialistas possa facilmente avaliar o resultado final da comparação.

6.4.6

Etapa 6 - Máxima diferença permitida entre as cadeias de rastreabilidade

O desvio do resultado de medição entre os laboratórios participantes (ou parceiros em potencial) não pode exceder a raiz quadrada da soma dos quadrados de ambos os níveis de incerteza individual, dado pela expressão:

$$|L_i - L_j| \leq \sqrt{u_i^2 + u_j^2} \quad (6-11)$$

para todo i, j onde $i \neq j$ e

L_i : nível ajustado de alta pressão do participante i

L_j : nível ajustado de alta pressão do participante j

u : incerteza total do nível do participante (CMC)

Os desvios são baseados na subtração das equações polinomiais, calculada conforme a seção precedente. Nesta etapa deve-se decidir em continuar ou não o processo de harmonização, conforme o fluxograma da figura 6.5. Todos os resultados do ensaio devem estar dentro de um nível de tolerância pré-definido. Se a diferença permitida for excedida, um processo de busca do problema deverá ser realizado pela equipe de especialistas, resultando em eliminação desta rodada ou de uma parada no processo de harmonização.

6.4.7

Etapa 7 - Cálculo do retorno para a cadeia de rastreabilidade individual

Cada laboratório participante deverá corrigir os valores originais do metro cúbico de gás natural a alta pressão por meio do modelo de correção. Obtendo-se os coeficientes de peso e os fatores de harmonização de acordo com as etapas precedentes, o modelo da correção é representado conforme o seguinte algoritmo:

$$desvio_{est,i} = a_{0,i} + a_{1,i}Re + a_{2,i}Re^2[\%] \quad (6-12)$$

Sendo que;

$desvio_{est,i}$ é o desvio estimado referente a nível unificado para o número “ i ” de laboratório;

$a_{0..2,i}$ são constantes para o número do laboratório “ i ”;

e, Re , o número de Reynolds relacionado ao diâmetro nominal da tubulação.

O fator de correção de cada medidor individual de referência para cada laboratório é determinado a partir da seguinte expressão:

$$FC_i = desvio_{est,i}[\%] \quad (6-13)$$

Cada laboratório deve processar o fator de harmonização em todo padrão que é utilizado para disseminar a rastreabilidade. Este processo é realizado através dos serviços de calibrações demandados pelo laboratório.

A incerteza para a determinação do metro cúbico harmonizado é calculada de acordo com:

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^m W_i^2 (u_i^2 + u_{A desvio,i}^2)} \quad (6-14)$$

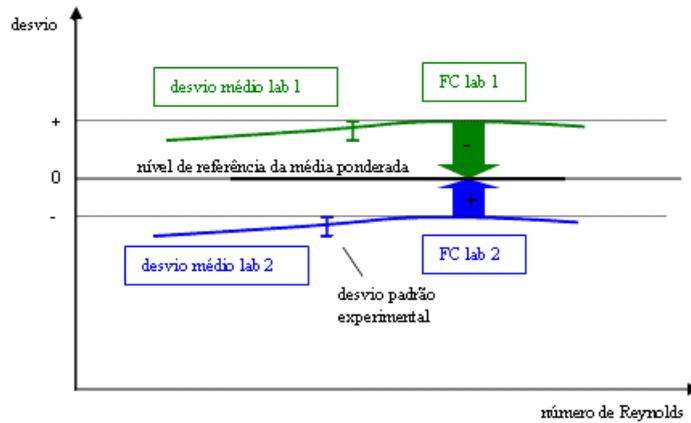


Figura 6.8: Processo de harmonização

Nessa expressão, “ $u_{A\text{desvio},i}$ ” é a média do desvio padrão experimental. A correção do desvio pelo fator de correção é um processo puramente matemático, as correções do desvio aplicam-se às curvas do desvio de um medidor padrão de nível nacional e nenhum componente extra de incerteza necessita ser adicionado.

Para as cadeias participantes em um mesmo regime de escoamento (número de Reynolds), $u_{c,i} = u_c$, sendo “ $u_{c,i}$ ” o nível da incerteza da cadeia individual após a conclusão do processo de retorno.

6.4.8

Retornos na etapa 4 - mantendo os valores de referência unificados

Obviamente, o processo de harmonização não é uma atividade realizada uma única vez. Os participantes devem verificar continuamente o nível dos padrões de referência em relação ao nível de referência unificado, através de uma re-calibração ou verificação periódica. O primeiro laço de verificação representado na figura 6.5 é utilizado para manter uma verificação semestral de comparação. Esta verificação é realizada utilizando-se os mesmos conjuntos de transferência utilizados no processo de harmonização e que devem ser mantidos para esta finalidade.

6.4.9

Etapas 8 - Estabelecidos os valores harmonizados para cada medidor de referência

Em cada etapa da cadeia de rastreabilidade de medição de vazão o valor de referência unificado deverá ser disseminado para a sociedade. Os certificados de calibração garantirão que todos os padrões utilizados estejam rastreados a este valor unificado, conforme ilustrado na figura 6.5.

6.4.10

Etapa 9 - Valores de referência nacionais: a base para a harmonização

O segundo laço de retorno da figura 6.5 representa o ciclo de três anos de re-calibração. Para as bancadas de calibração dos laboratórios “1” e “2” este ciclo de re-calibração é realizado de acordo com os procedimentos de cada laboratório para se manter a estrutura da harmonização. Uma mudança no valor de referência harmonizado pode alcançar uma incerteza associada à medição de até 0,05%.

6.5

A experiência europeia de harmonização dos valores de referência

Desde os anos setenta foram estabelecidos na Holanda valores de referência de medições de vazão de gás natural sob condições operacionais, juntamente com o rápido desenvolvimento do transporte e distribuição de gás na região. Já naquela época, foi identificada a dependência da pressão no desempenho de medidores do tipo turbina relacionada com diferentes condições de operação. Este comportamento conduzia a faturamentos diferentes para a mesma quantidade de gás. Para eliminar as desvantagens para os usuários causadas por princípios de medição, pressão de operação ou tamanhos diferentes, o INM holandês desenvolveu três laboratórios de calibração de vazão em alta pressão, para realizar medições de vazão de gás confiável em para todas as condições operacionais. Foram desenvolvidas três instalações de ensaio de alta pressão: em Groningen (1973), Bergum (1975) e Westerbork (1978).

No início dos anos noventa uma instalação de alta pressão foi desenvolvida em Dorsten, na Alemanha, o PIGSAR que opera sob supervisão do PTB, para a realização valores de referência. Com o desenvolvimento de um padrão primário, uma cadeia rastreabilidade curta foi desenvolvida.

Os clientes do NMi/VSL em Bergum e do PIGSAR/PTB observaram pequena, mas constantes diferenças entre as duas unidades de calibração, ou seja, um “metro cúbico” de gás oferecido em no NMi de Bergum sempre foi um pouco menor do que o obtido no PIGSAR em Dorsten. As diferenças entre as duas instalações são dependentes da pressão, do fluxo e do diâmetro do medidor sob calibração. Essas pequenas diferenças têm um significativo impacto econômico considerando o valor e as grandes quantidades envolvidas na transferência de custódia. Com o objetivo de ter vantagens econômica, responsáveis por estações de medição de vazão de gás selecionavam o laboratório para realizar a calibração de seus medidores dependendo da condição de vendedor ou comprador de gás natural. Ou seja, enviavam seus medidores para serem

calibrados no NMI em Bergum se estava vendendo o gás e para o PIGSAR em Dorsten se estavam comprando o gás [13].

O processo de harmonização do metro cúbico de gás natural na Europa conduziu ao metro cúbico de gás europeu harmonizado. Reduzindo as diferenças entre valores de referência, e tornando as calibrações equivalentes, independente do local da realização da calibração. Este processo começou em junho 1999 entre PIGSAR/PTB (Alemanha) e NMI/VSL (Holanda) e foi finalizado em maio 2004 com a definição, realização e disseminação do metro cúbico harmonizado do gás europeu.

As comparações-chaves realizadas para a vazão de gás natural com o objetivo de obter a melhor realização do metro cúbico do gás entre institutos nacionais de metrologia (INM) seguiram as recomendações do BIPM preparadas pelo grupo consultivo do BIPM com participação de membros de todos os principais INM.

A figura 6.9 ilustra a interação entre as cadeias de rastreabilidade, participantes, suas capacidades de calibração, os padrões primários completamente independentes referentes aos laboratórios NMI/VSL, PIGSAR/PTB e LNE. A figura ilustra também a faixa de medição e de calibração bem como as fontes da rastreabilidade, que conduziram ao valor de referência europeu harmonizado.

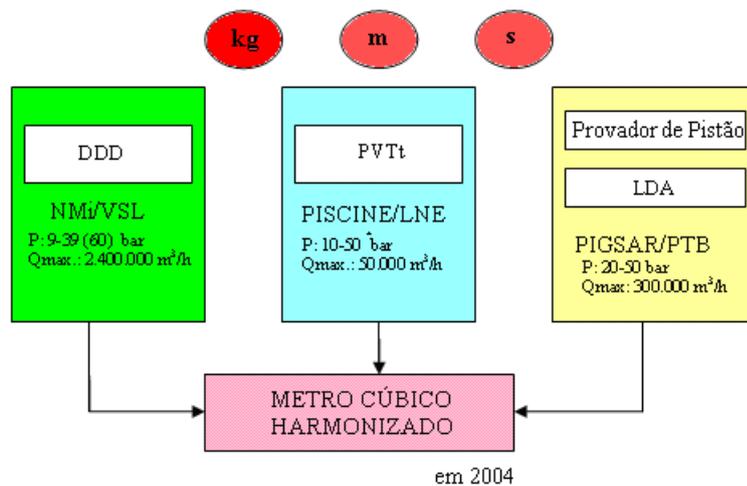


Figura 6.9: Faixa de medição dos três padrões primários nacionais independentes NMI/VSL, LNE e PTB e sua interação para realizar o metro cúbico de gás natural europeu harmonizado. (Fonte: modificado de [14])

6.5.1

Pré-requisitos para o procedimento de harmonização realizado

O valor de referência harmonizado europeu para o metro cúbico do gás natural compreende a média ponderada de três realizações nacionais

individuais e diferentes do metro cúbico do gás. Esta média ponderada é baseada nos pré-requisitos metrológicos descritos anteriormente e realizados de acordo com [14]:

- Os laboratórios do PIGSAR/PTB, NMi/VSL e LNE operam independentemente a realização da cadeia de rastreabilidade para a medição de vazão de gás. O NMi/VSL possui como sistema primário o DDD, o laboratório PIGSAR tem na sua cadeia de rastreabilidade o “provador de pistão” e LDV, o LNE francês utiliza o método primário PVTt.
- A planilha de incerteza de cada um destes sistemas foi apresentada, compreendida e aceita mutuamente.
- Foi estabelecida uma diferença permitida entre os três sistemas primários, menor do que a raiz quadrada da soma dos quadrados das incertezas correspondentes.
- Foi demonstrada a estabilidade que se refere à reprodutibilidade dos valores de referência ao longo dos anos para cada cadeia (conjunto de valores de referência).
- O grau de equivalência, baseado no desempenho histórico e nas incertezas aceitas, foi então estabelecido.

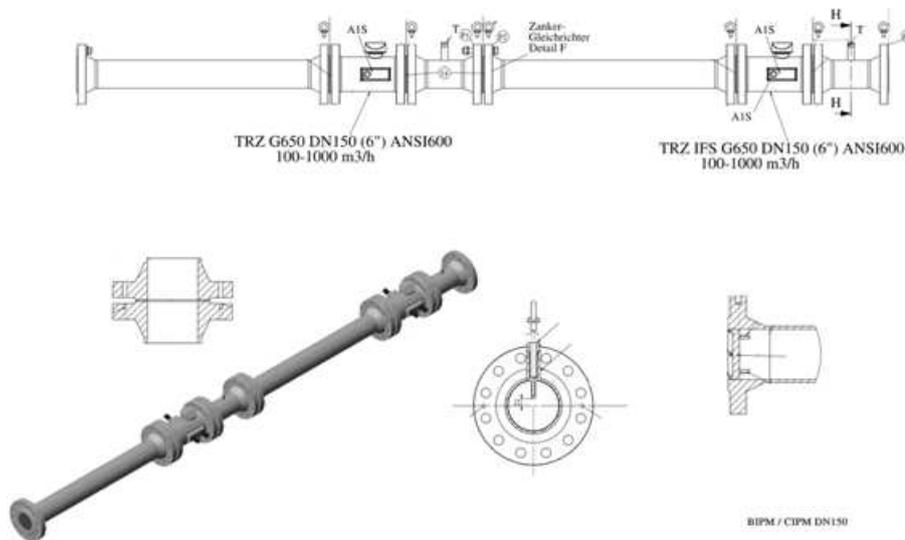


Figura 6.10: Padrão de transferência ultra-sônico e de medidor tipo turbina (G1000) durante o CIPM KC. (Fonte: modificado de [21])

Este procedimento foi aplicado a todas as faixas de vazão e de pressão operacionais dos laboratórios PIGSAR, NMi/VSL e LNE. Essas condições citadas consideradas como o pré-requisito, foram aplicadas em três conjuntos de medidores do tipo turbina em série para permitir uma máxima da sobreposição.

Um conjunto de transferência G650 foi utilizado, compreendendo uma turbina e um medidor ultra-sônico montados em série para realizar as comparações em três patamares de pressão diferentes. Este conjunto demonstrou excelente reprodutibilidade e estabilidade, a representação do conjunto está ilustrada na figura 6.10.

6.5.2

Capacidade de calibração das bancadas participantes da harmonização para o gás natural

O grau de sobreposição das faixas de vazão e de pressão pode ser considerado muito bom, permitindo comparações detalhadas nas mesmas condições para a vazão e pressão disponíveis, conforme ilustrado na figura 6.11.

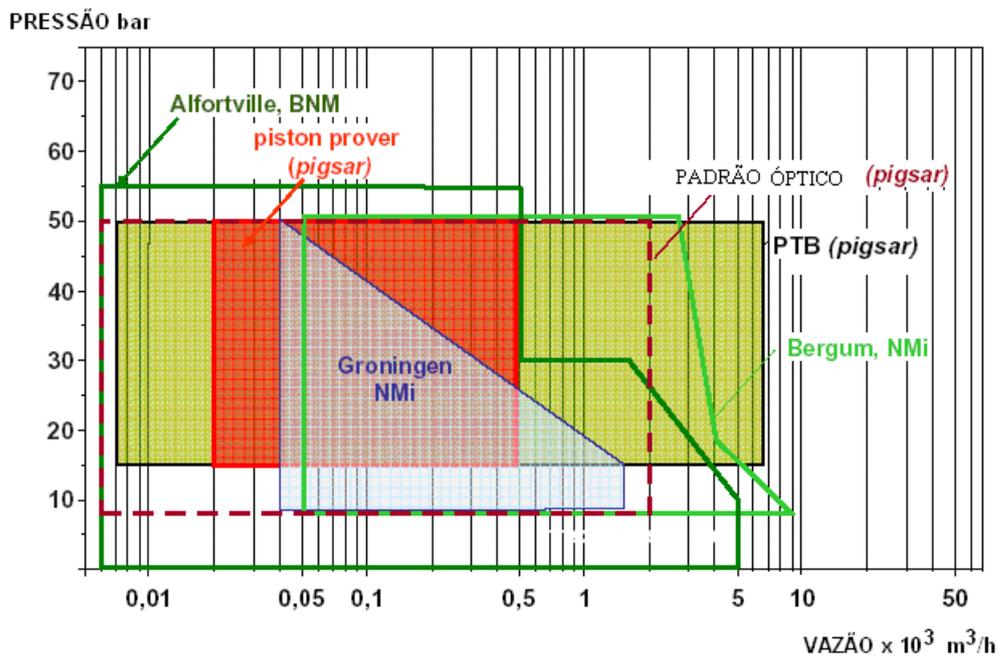


Figura 6.11: Potencialidades da calibração e da medição das bancadas nacionais europeias Laboratório PIGSAR, NMI/VSL e LNE-LADG. (Fonte: modificado de [14])

A harmonização é realizada sobrepondo-se as faixas de vazão e de pressão. Todos os participantes concordaram em melhorar sua cadeia de rastreabilidade metrológica para obter valores de referência mais estáveis com incertezas menores.

O principal benefício para o cliente final é a equivalência da calibração dos medidores em qualquer bancada de prova e de calibração na Alemanha, Holanda e França. A harmonização foi realizada pelo PIGSAR/PTB, NMI/VSL e LNE [16].

6.5.3

O CIPM KCRV como o valor de referência harmonizado europeu

As comparações-chave entre padrões primários nacionais de vazão de gases a alta pressão foram realizadas de acordo as instruções do CIPM MRA (acordo de reconhecimento mútuo) e exigências do comitê Consultivo do CIPM para massa e as quantidades relacionadas. Os membros responsáveis pelo CCM grupo de trabalho para Fluxo de Fluido (WGFF) indicaram o PTB e NMi/VSL como os laboratórios pilotos para esta comparação-chave. Todos os INM com os principais laboratórios do mundo foram convidados a participar, apenas os laboratórios PIGSAR, NMi/VSL, e LNE atenderam as condições exigidas para participar. O objetivo destas comparações-chaves foi verificar as potencialidades reivindicadas da capacidade da calibração e medição (CMC) do INM e para quantificar o grau de equivalência do fluxo nacional padrões mantidos entre os INM participantes. Para obter o valor de referência na quantificação pretendida, estas comparações-chaves produziram um conjunto de resultados:

- conjunto de tabelas que apresenta as diferença de medidas entre os participantes e comparações-chaves,
- quantificação as equivalências do laboratório a laboratório com as incertezas associadas a estas diferenças,
- grau da equivalência dos laboratórios participantes das comparações-chaves.

As comparações-chaves foram conduzidas em 2004 e os resultados finais foram publicados em janeiro 2006.

Comparações foram realizadas em diversas pressões e vazões para obter os melhores valores de referência disponíveis. A figura 6.12 ilustra os pontos de calibração realizados durante a comparação-chave na faixa de vazão entre 65 m³/h e 1000 m³/h e patamares de pressão de 10 bar, 20 bar e 47 bar para a obtenção dos dados desejados, a demonstração da equivalência dos laboratórios e do valor de referência para a comparação-chave (KCRV).

Para obter o KCRV ou o valor de referência harmonizado, foi utilizada a média ponderada dos resultados da calibração das bancadas envolvidas.

Os INM apresentaram-se equivalentes em suas incertezas declaradas, sendo os valores de incerteza associado as medições apresentaram-se sobrepostas. Obtendo-se uma excelente equivalência dos três INM com o KCRV. O KCRV é considerado a melhor realização disponível do metro cúbico de gás natural à alta pressão, é considerado o nível de referência harmonizado europeu.

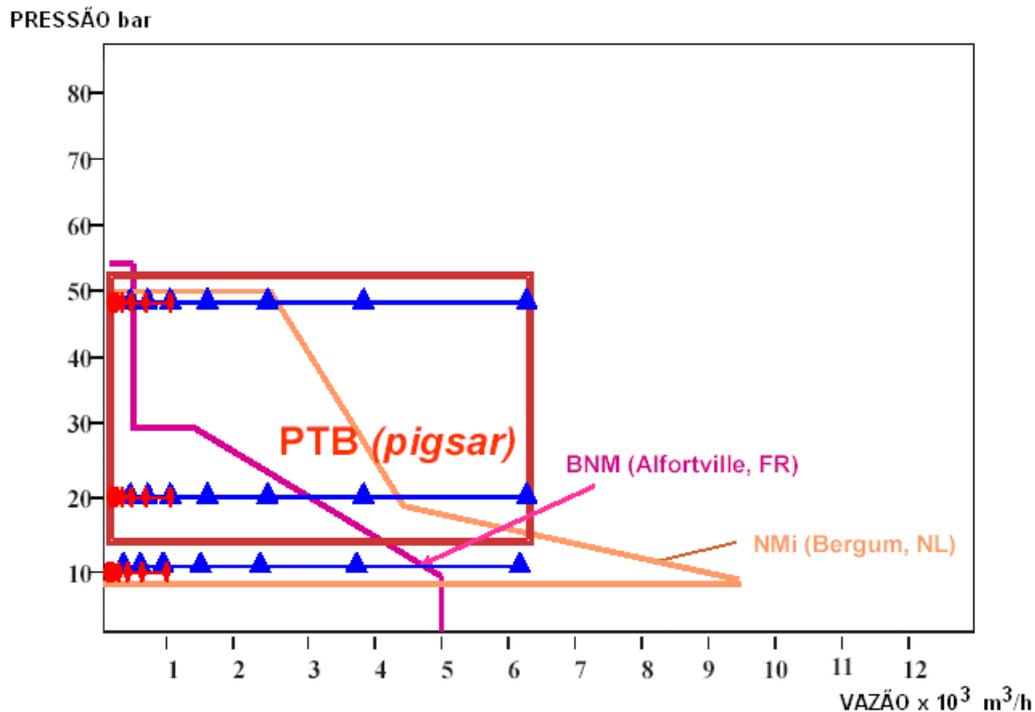


Figura 6.12: Visualização das faixas de pressão e vazão dos participantes da comparação-chave para gás natural. (Fonte: modificado de [15])

6.5.4

Resultados da harmonização dos valores de referência para a unidade de volume do gás natural

O esforço para se determinar um valor de referência equivalente para o gás natural resultou em uma cooperação extensiva entre os INM que possuem bancadas de calibração para o gás natural em alta pressão na Europa.

O CIPM e seu gabinete o BIPM decidiu, em conformidade com o CIPM *Mutual Recognition Arrangement* (MRA), a condução de comparações-chaves entre padrões primários nacionais no campo medição de vazão em alta pressão de gases. Em 2004 a primeira comparação-chave para o gás natural a alta pressão foi conduzida pelo PTB (Alemanha), NMI-VSL (Holanda) e LNE (França). Os resultados foram finalmente documentadas no protocolo CCM.FF-K5.a em agosto 2005, sendo aprovado pela CCM e BIPM e publicado no KCDB (banco de dados) do BIPM, em Janeiro de 2006. O valor de referência de comparação-chave K5.a foi aprovado por todas as autoridades metrológicas.

A tabela 6.1 apresenta o resultado da harmonização entre esses participantes com os valores de incertezas declaradas.

A figura 6.13 ilustra o elevado grau de equivalência dos valores calculados, observa-se que os desvios representados pelas barras verticais estão sobrepondo todos os valores dos participantes e o KCRV. A curva em azul da figura 6.13

Tabela 6.1: Impactos e benefícios da harmonização no cálculo da incerteza

Harmonização	U_{total} (antes)	U_{harm} (depois)
PTB (max.)	0,16%	0,134%
NMi (max.)	0,24%	0,156%
LNE (max.)	0,30%	0,207%
PTB (min.)	0,16%	0,129%
NMi (min.)	0,24%	0,151%
LNE (min.)	0,22%	0,194%

representa o KCRV em função das bancadas e representa a melhor realização disponível do metro cúbico para o gás natural à alta pressão. A incerteza associado ao valor de KCRV é menor do que aquelas apresentadas inicialmente pelas bancadas participantes.

Conforme ilustrado na figura 6.13, a intercomparação durante o procedimento da harmonização entre PTB, NMi/VSL e LNE estabelece a referência comum (linha azul). Observa-se que todas as barras verticais que representam a incerteza dos laboratórios sobrepõem a referência comum. Essa curva em azul é a referência europeia harmonizada.

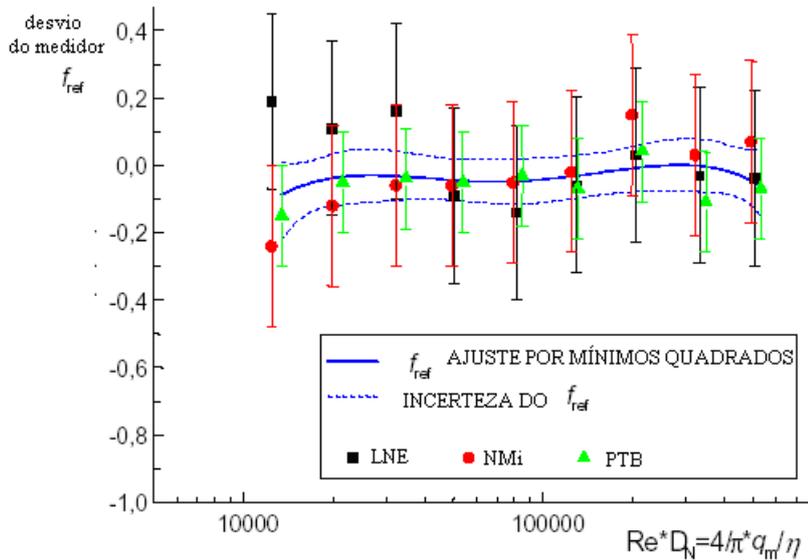


Figura 6.13: Representação gráfica do valor de referência harmonizado entre PIGSAR/PTB, NMi/VSL e LNE. (Fonte: modificado de [15])

Com o procedimento de harmonização entre PIGSAR/PTB, NMi/VSL e

LNE/LADG obteve-se uma incerteza menor do que as contribuições individuais. Todos os três institutos mantêm suas bancadas independentes e individuais e continuam desenvolvendo melhorias a fim fornecer o metro cúbico de gás mais estável e confiável.

O resultado desta colaboração foi o nascimento do “metro cúbico europeu harmonizado de gás natural” realizado por três institutos nacionais independentes de metrologia. O benefício para o cliente dos laboratórios é ter equivalência de calibração para medidores de vazão na Alemanha, Holanda e França, sendo que todas as bancadas de calibração podem apreciar o benefício de uma incerteza pequena e estável a partir do valor de referência harmonizado.

6.6

Benefícios obtidos com a harmonização do valor de referência

O uso crescente do gás natural como fonte de energia na Europa, exigiu a construção de uma vasta rede de gasodutos para permitir a distribuição de um volume superior a 400 bilhões de metros cúbicos de gás por ano. Nessa malha de gás ainda em expansão, diversos pontos de transferência de custódia vêm sendo instalados. Em conseqüência, houve demanda crescente pela confiabilidade de valores de referência estáveis para balizar as medições de vazão de gás distribuídas em redes de alta pressão.

Um “valor de referência equivalente” para vazão de gás natural foi obtido como resultado de extensiva cooperação entre três institutos nacionais de metrologia, que disponibilizaram seus laboratórios nacionais e bancadas para calibração de gás natural em alta pressão. Resultado de um esforço multinacional e da sinergia de trabalhos desenvolvidos por institutos nacionais de metrologia, a determinação do valor de referência que teve início em 1999, envolvendo o PTB (Alemanha) e o NMi/VSL (Holanda), foi concluído em 2004 com a inclusão do LNE (França). À época, na Europa, apenas esses laboratórios nacionais mostraram-se em condições de participar do processo regional de comparação da medição de vazão de gás natural a alta pressão com vistas à obtenção do reconhecimento internacional.

Um valor de referência internacionalmente aceito para a medição do metro cúbico do gás mostrou-se adequado como referência metrológica para medição de vazão no mercado de gás. Resultado desse esforço de harmonização metrológica, o valor de referência europeu para o metro cúbico padrão de gás natural foi, à época, (e continua sendo) disseminado na Europa. Em outros países foi aceito como a referência nacional, como é o caso do Canadá através do NRC, e da *Transcanada Calibration* (TCC). O instituto de metrologia chinês AQSIIQ está em negociações para adotar o *Key Comparison Reference*

Value (KCRV) para a bancada de calibração dos medidores da *West-East Gas Pipeline Project* (WEPP). Este valor de referência harmonizado europeu é o valor de referência que resulta da comparação-chave coordenada pelo CIPM/BIPM para medição de vazão de gás natural a alta pressão.

O PIGSAR/PTB (Alemanha), NMi/VSL (Holanda) e o LNE (França) compartilham desta maneira valores de referência harmonizados. As diferenças entre os valores da medição obtidas por esses laboratórios foram minimizadas, porém a incerteza na repetitividade das medições realizadas nas instalações se mantém. A combinação dessas realizações independentes e a equivalência das cadeias de rastreabilidade associadas resultaram em uma redução considerável na *Calibration Measurement Capability* (CMC) das bancadas de calibrações utilizadas.

O acordo de harmonização para se estabelecer consenso para esse valor de referência para o metro cúbico de gás natural celebrado entre PTB (Alemanha), NMi/VSL (Holanda) e LNE (França) foi então disponibilizado para outros institutos nacionais de metrologia e para outros laboratórios de calibração que adotaram como referência para suas realizações do valor de referência de forma independente. A condição necessária é o atendimento a todos os pré-requisitos, devendo também oferecer uma redução adicional na incerteza harmonizada, isto é, um ganho na estabilidade do valor de referência.

A experiência europeia da harmonização do valor de referência para o volume padrão de gás é uma garantia para o consumidor. Somente na Alemanha, 100 bilhões de metros cúbicos de gás natural são transportados por ano através de gasodutos até que finalmente atinjam os consumidores. Esses são valores de vazão que se traduzem em valores econômicos, estimados em 20 bilhões de euros. As melhores instalações de ensaio e calibração para medições de vazão em circuitos de alta pressão de gás natural conseguem, sob condições ótimas de ensaio, viabilizar medições com incerteza hoje estimada em 0,15%, cuja relevância econômica se traduz em desvios do valor acordado em contratos de transferência de custódia que sempre lesarão uma das partes envolvidas.

6.7

Comparação-chave bilateral CIPM CCM.FF-K5.a.1

Em 2007 o Transcanada Calibration (TCC), que é a instalação de calibração de alta pressão responsável pelo padrão nacional canadense para vazão de gás natural pelo NRC realizou uma comparação-chave bilateral entre NRC-TCC e PTB-PIGSAR.

O objetivo da comparação-chave CIPM (CCM.FF-K5.a.1), foi demons-

trar o grau de equivalência e coerência do padrão canadense NRC TCC com o Valor de Referência Harmonizado CIPM-KCRV [41].

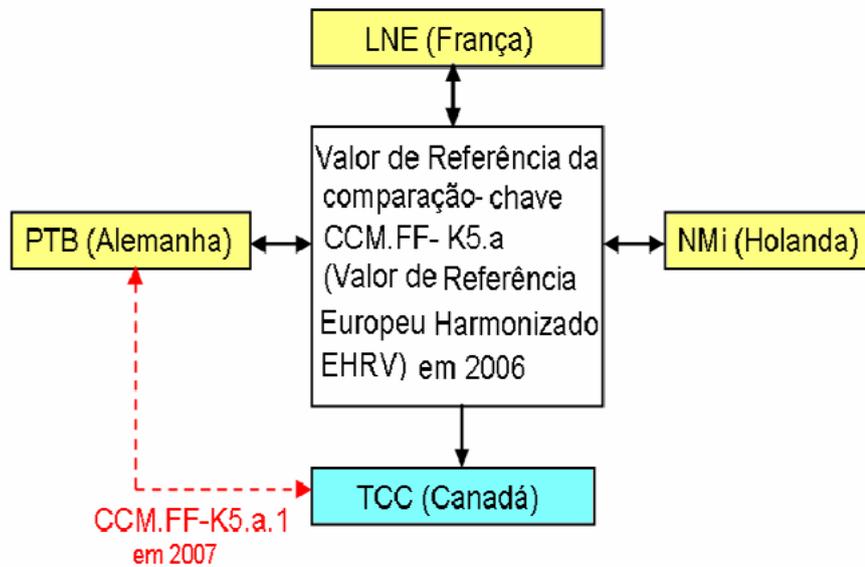


Figura 6.14: Rastreabilidade dos participantes em relação ao valor de referência da CCM.FF-K5.a e a comparação bilateral CCM.FF-K5.a.1. (Fonte: modificado de [41])

6.8

Vantagens e desvantagens da harmonização de valores de referência

O procedimento de harmonização do valor de referência para a unidade do volume de gás natural tem as seguintes vantagens:

- a redução das diferenças entre valores medidos por laboratórios de calibração adotando-se um valor de referência comum e compartilhado por todos;
- o estabelecimento de um valor comum de referência baseado no grau de equivalência, calculado com base em coeficientes de peso estabelecido a partir das incertezas totais dos valores originais de referência;
- o estabelecimento dos níveis de incerteza correspondentes a partir de um valor comum de referência;
- a redução considerável da incerteza de medição obtida pela combinação das cadeias independentes e equivalentes de rastreabilidade praticada pelos laboratórios participantes;
- a implementação de programas para a melhoria técnica de cada cadeia de rastreabilidade, criando oportunidade para melhorias contínuas dos níveis de incerteza associados à medição.

Importante ressaltar que a cooperação internacional para estabelecer um valor unificado de referência também tem como consequência o compartilhamento de projetos de pesquisa em metrologia. Observa-se ainda que a combinação de cadeias independentes e equivalentes de rastreabilidade contribui para a estabilidade dos valores de referência. Somente a partir desse esforço contínuo na busca da harmonização de valores de referência é que a disseminação das unidades de medida obterá reduções adicionais da incerteza associada à medição.

Não obstante os diversos aspectos positivos que decorrem do processo de harmonização do valor de referência do metro cúbico de gás natural, as seguintes desvantagens podem ser mencionadas:

- programas de re-calibração requerem não apenas complexa sincronização dos diferentes subsistemas de medição, mas conhecimento especializado sobre esses sistemas;
- o processo de harmonização requer procedimento de verificação pontual que deve ser implementado e monitorado a cada realização da unidade de volume de gás natural, precaução que demanda tempo e onera o processo;
- o processo de harmonização implica em perda de autonomia dos laboratórios envolvidos, uma vez que uma determinada organização passa a depender da estrutura de rastreabilidade realizada por outra, não obstante este aspecto deva ser entendido como medida de precaução para controle metrológico do laboratório.

6.9

Considerações finais sobre harmonização de valores de referência

Antes de se criar um valor comum de referência para a medição de vazão de gás natural em alta pressão, os seguintes aspectos devem ser considerados:

- as eventuais diferenças na realização entre as cadeias de rastreabilidade de alta pressão das bancadas de ensaio e calibração;
- as eventuais diferenças do desvio e da incerteza entre as respectivas cadeias de rastreabilidade;
- a necessidade de se estabelecer cooperação metrológica entre as partes envolvidas;
- as ações para garantir a cooperação e comparabilidade das cadeias de rastreabilidade para, assim, se obter confiabilidade e estabilidade dos valores de referência usados nas bancadas para medição de vazão de gás em alta pressão.