

4

Infra-estruturas nacionais para medição de gás natural

Selecionados como laboratórios de referência para a presente pesquisa de mestrado, os institutos nacionais de metrologia estudados dispõem de padrões primários para a medição de vazão de gás natural e possuem infra-estruturas laboratoriais sofisticadas operando em circuito de alta pressão, adequadas às necessidades do setor.

Conforme será discutido neste capítulo, essa é a infra-estrutura metrológica necessária para se implementar o importante processo de harmonização de valores de referência metrológica tão necessário para fundamentar processos de transferência de custódia de expressivo impacto econômico. No capítulo serão estudadas as experiências da Holanda, Alemanha e da França e caracterizada a tão necessária estratégia brasileira para se implementar a padronização primária em medição de vazão de gás.

O desenvolvimento do setor do petróleo e gás no Brasil e o impacto econômico resultou em urgente necessidade de se estabelecer confiabilidade metrológica no sistema brasileiro de distribuição e comercialização de gás natural. Cerca de 57 milhões de metros cúbicos de gás natural são transportados diariamente pela malha de gasodutos hoje instalada no País, isso justifica investimentos substanciais no setor e na infra-estrutura de metrologia no País [29]. Transferência de custódia de gás natural constitui-se em um excelente exemplo da importância econômica da metrologia, envolvendo aspectos técnicos, gerenciais e legais.

4.1

Calibração de medidores de vazão nas condições operacionais

Cada laboratório deve ter a preocupação permanente de monitorar e controlar as grandezas de influência em seus processos de medição, mantendo-as dentro de níveis aceitáveis de controle metrológico para o adequado desenvolvimento de suas atividades. As condições operacionais podem afetar diferentes medidores de diferentes maneiras. Alguns dos fatores que podem influenciar o desempenho do medidor são as condições do fluido (i.e. composição química, densidade, viscosidade, as condições operacionais da calibração, estas influenci-

adas pelas propriedades de interferência pressão e temperatura, e também por condições geométricas do medidor e das tubulações da bancada). Ao calibrar um medidor, o metrologista deve sempre identificar os parâmetros de desempenho que afetam a sua exatidão procurando reproduzir, em laboratório, tão próximo como possível, a situação real de operação durante o processo de calibração.

As calibrações dos medidores devem, de preferência, ocorrer próximo às condições operacionais de campo, utilizando-se como fluido de trabalho o gás natural já que este é o fluido real. A partir da utilização de uma bancada de provas que trabalhe nas condições operacionais (condições que devem refletir aquelas encontradas no campo i.e. pressão e vazão), atendendo medidores de diversas tecnologias e diâmetros, busca-se a realização de calibração permitindo-se avaliar medidores de vazão de gás com maior confiabilidade metrológica. Com isto reduz-se os embates legais e questionamentos dos processos de medição empregados em transferência de custódia, assim garantindo, para ambas as partes - entregador e recebedor do gás - a certeza de uma adequada transação comercial.

Para reduzir erros na medição de vazão de gás natural e garantir a confiabilidade metrológica do sistema de medição como um todo, se realiza periodicamente calibrações dos instrumentos de medição. As medições de vazão em medidores tipo turbina dependem do tipo de gás, densidade, viscosidade e das condições operacionais de pressão e das condições de escoamento dos fluidos, conforme ilustrado na figura 4.1.

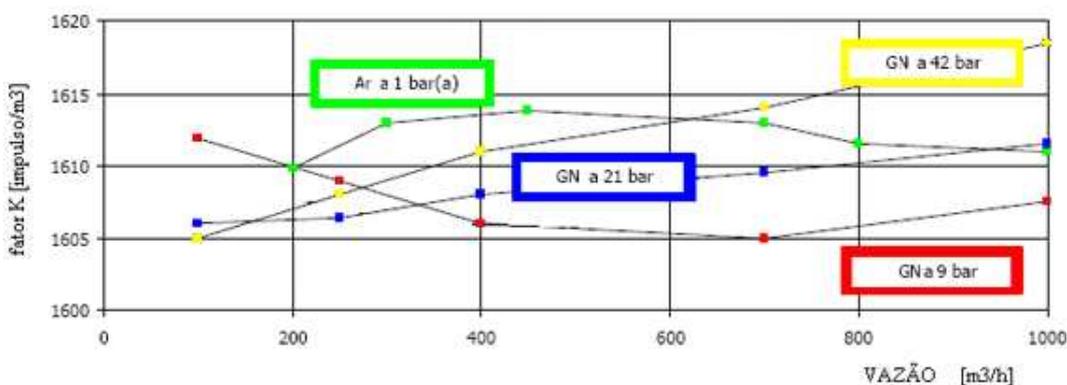


Figura 4.1: Fator K de uma turbina em diferentes condições de operação. (Fonte: modificado de [19])

4.2

Laboratórios para medição de vazão de gás natural em alta pressão

A influência das condições operacionais e a natureza do gás na calibração de medidores de vazão em linhas de alta pressão constituem parâmetros críticos para a calibração em laboratório de medidores de vazão. As capacitações laboratoriais mais sofisticadas para medição de vazão de gás datam da segunda metade da década de 70. Dentre elas destacam-se laboratórios nacionais de metrologia de alguns países industrializados produtores de petróleo e gás. O *Netherlands Measurements Institute* (NMI) da Holanda representa um desses casos de interesse. Igualmente merecendo destaque pela sua importância e características da infra-estrutura laboratorial, instalações de alta pressão para calibração de medidores de vazão foram construídas também na Alemanha (Laboratório PIGSAR - *Prüfinstitut für Gaszähler, Ein Service Angebot der Ruhrgas AG*) e no Canadá (Laboratório TCC- *TransCanada Calibrations*).

As infra-estruturas laboratoriais existentes para calibração utilizando o gás natural como fluido de trabalho estão, via de regra, localizadas próximas a gasodutos que forçam o gás por um by-pass para a realização de calibração, retornando o gás para o gasoduto. Como exemplo de laboratórios que possuem bancadas de prova e calibração próximas de gasodutos podem ser citadas as instalações do NMI (em Westerbor, na Holanda) e *Transcanada* (em Winnipeg, no Canadá). Outras infra-estruturas laboratoriais estão localizadas próximas às estações de entrega do gás, permitindo que a calibração seja realizada para uma ampla faixa de pressão e vazão em circuito fechado (*loop*). Como exemplo de bancada de prova e calibração próxima a estações de entrega destacam-se as instalações do NMI (em Bergum, na Holanda), o PIGSAR (em Dorsten, na Alemanha) e a *Gaz de France* (em Paris, na França).

Recentemente, no Brasil, o Sítio de Testes do CTGÁS, localizado em Macaíba no Rio Grande do Norte, por sua capacitação na calibração de medidores de vazão em alta pressão com GN, tem merecido a atenção da indústria petrolífera que o apóia. Atualmente, poucos são os laboratórios adequadamente capacitados para realizar medição de vazão em circuitos de alta pressão no mundo. Neste contexto, uma infra-estrutura é dita adequada quando um laboratório de vazão é capaz de reproduzir condições próximas das condições de operação no campo, preservados os níveis de pressão e vazão e operando com gás natural como fluido de trabalho. Os laboratórios que hoje satisfazem essa condição encontram-se ilustrado na figura 4.2.

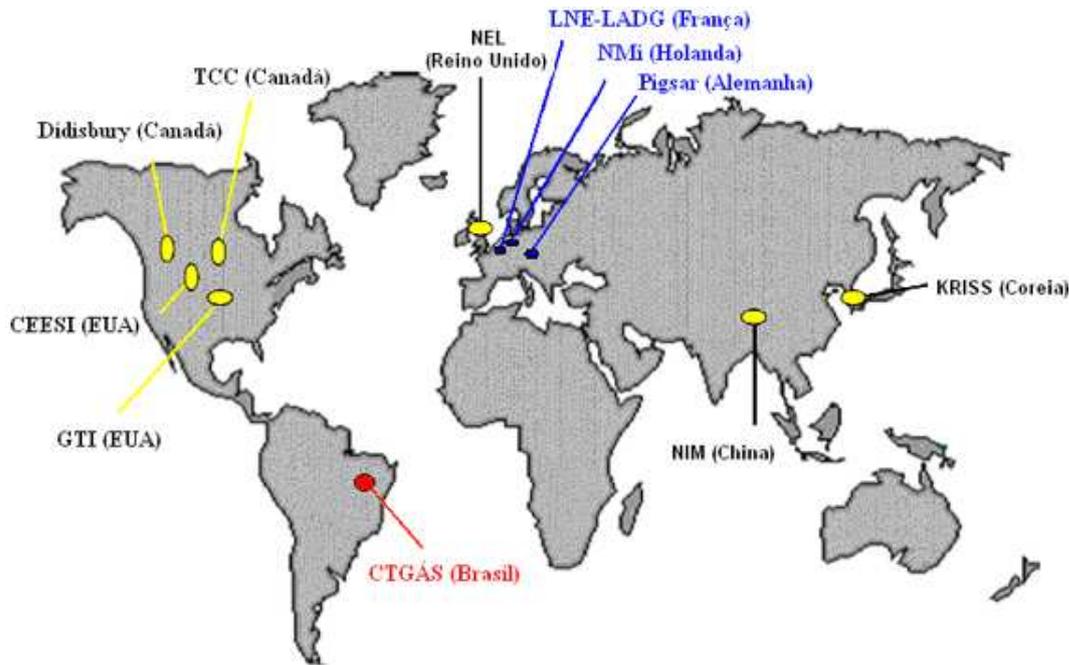


Figura 4.2: Principais laboratórios de vazão de gás a alta pressão

4.3

Infra-estrutura laboratorial para medição de vazão de gás na Holanda

A determinação do balanço mássico ou volumétrico de gás no transporte e na distribuição em uma determinada região requer criterioso processo de determinação da confiabilidade da medição da vazão de gás, que deve ser demonstrada para todas as condições operacionais. Nos anos setenta, a Gasunie (Holanda) juntamente, com o NMI (*Netherlands Meetering Institute*, instituto holandês de metrologia) construíram três instalações de alta pressão para calibração de medidores de vazão, cujas condições de operação aproximam-se das condições reais de operação em campo. As três instalações de calibração a alta pressão foram construídas em Groningen, em 1973; em Bergum, em 1975 - controlada pelo NMI desde 1989 - e em Westerbork, em 1978. A Gasunie passou a realizar pesquisa, ensaios e calibração de medidores de gás próximo das condições operacionais reais. Os valores de referência para gás medido sob condições operacionais de pressão, vazão e tipo de fluido foram estabelecidas na Holanda pelo NMI/VSL.

Com o propósito de modificar a sua infra-estrutura laboratorial para a atividade de calibração propriamente dita, o laboratório de vazão do Instituto Holandês de Metrologia (NMI, em Groningen) capacitou-se para ensaiar medidores de vazão, tendo sido equipado com as instalações e equipamentos de ensaios, sob condições operacionais controladas até uma pressão de 40 bar. Durante os ensaios conduzidos nessas instalações a alta pressão, verificou-se que

a curva de desempenho da turbina de medição, operada com ar atmosférico, diferia consideravelmente da curva de calibração do mesmo medidor quando operado com gás natural em alta pressão. As experiências realizadas levaram a Gasunie a optar pela calibração de todos seus medidores em instalação com gás natural, utilizando suas bancadas de alta pressão construídas e dedicadas para esta finalidade. A bancada de calibração (em Bergum, na Holanda, inaugurada em 1975) opera em pressões entre 8 bar a 50 bar e com uma vazão máxima de 130.000 m³/h.

O laboratório de Bernoulli (em Westerbork, na Holanda inaugurado em 1978) é um dos laboratórios com maior capacidade para calibração de medidores de gás, operando a uma pressão de 65 bar e com uma capacidade de vazão de 2.400.000 m³/h.

A figura 4.3 ilustra a estrutura da cadeia de rastreabilidade das instalações de calibração de medidores de vazão pra gás natural dos laboratórios do NMI (Holanda) e caracteriza as respectivas capacidades de medição de cada nível da cadeia. No desenho esquemático a linha cheia mostra o fluxo de rastreabilidade e em linha tracejada o processo de harmonização.

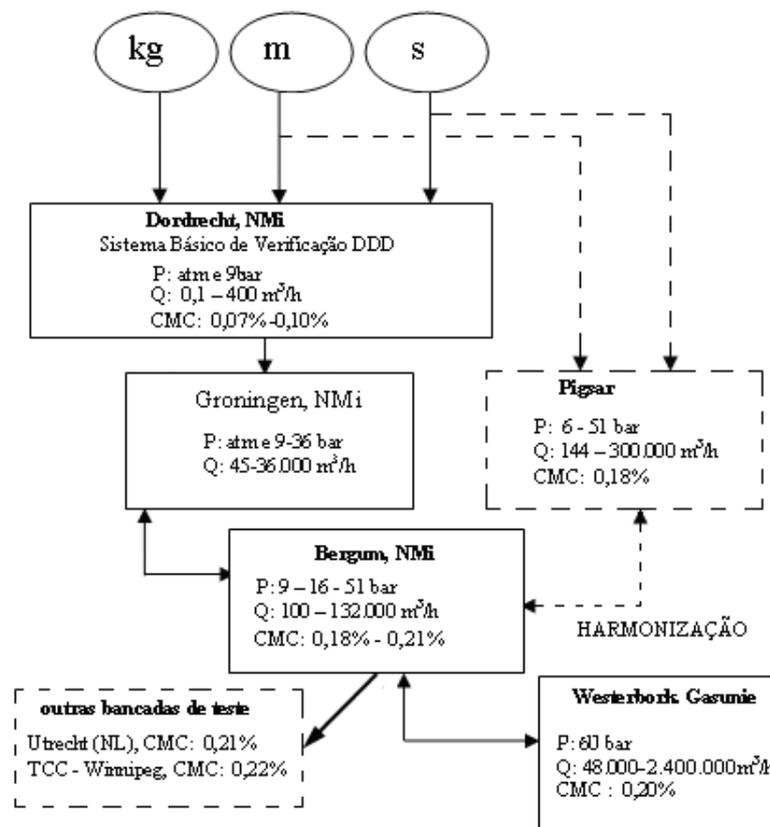


Figura 4.3: Instalações e rastreabilidade do NMI (Holanda). (Fonte: modificado de [13])

4.3.1

Rastreabilidade dos padrões holandeses para medição de vazão

Segundo o preceito metrológico diz-se que uma medida é rastreável quando todas as etapas derivadas da realização primária de sua unidade, (considerando-se as contribuições da incerteza associada a cada uma das etapas) são estabelecidas e bem conhecidas. Os métodos aplicados na Holanda para a rastreabilidade dos padrões do laboratório Bernoulli em Westerbork são descritos a seguir.

Para medições de volume, a rastreabilidade aos padrões internacionais significa que o medidor comercial de vazão de gás é calibrado por comparação a um padrão. Esse padrão é calibrado com base em outro padrão de classe superior e esse segundo padrão por sua vez calibrado contra um padrão de classe superior e assim sucessivamente, até que os padrões internacionais da massa, do tempo e do comprimento sejam referenciados. A realização da unidade de volume na Holanda segue o caminho inverso daquela praticada pelo BIPM, laboratório mundial de metrologia responsável pela manutenção do (kg). Em Delft as unidades de base das grandezas do comprimento e do tempo são realizadas, seguindo para Dordrecht, onde o (m³) do fluido é realizado e finalmente para o laboratório em Westerbork [19]. Este processo é realizado através das seguintes etapas:

i) O quilograma-padrão (kg) da Holanda sob custódia do NMI em Delft é comparado ao quilograma-padrão (kg) do BIPM.

ii) As unidades do comprimento e do tempo são realizadas em Delft utilizando-se preceitos metrológicos de acordo com as práticas internacionais recomendadas pelo BIPM.

iii) A primeira realização da unidade de volume (m³) do gás natural em escoamento é realizada em Dordrecht por meio do dispositivo dinâmico de deslocamento (DDD). O DDD é equipado com um vaso de pressão contendo um flutuador que separa o gás natural do líquido, relacionando o volume de gás escoado com o mesmo volume de líquido deslocado e pesado. A partir da determinação de densidade do líquido obtém-se o volume escoado. A rastreabilidade da medida da densidade e de sua relação às diferentes temperaturas é realizada pelos laboratórios do NMI/VSL em Dordrecht e em Delft.

iv) O “provador de campânula” é calibrado utilizando-se o DDD.

v) Um conjunto de 3 medidores do tipo bocal sônico (CVM) constitui a unidade primária de transferência. Essa unidade de transferência é calibrada utilizando-se um “provador de campânula”, sendo posteriormente transferida para o laboratório de Groningen, então adotada como sua referência

metrológica. A capacidade de vazão dessa unidade é de 1200 m³/h à pressão de 1 bar.

vi) No laboratório do NMi, em Groningen, um conjunto de padrões de trabalho é formado por 10 medidores do tipo CVM. Uma série de padrões de transferência são calibrados. Utilizando-se o procedimento de ampliação da faixa de trabalho dos padrões obtém-se uma faixa de trabalho de 5 m³/h a 4000 m³/h e pressões entre 8 bar e 35 bar são alcançadas (máximo 36.000 m³/h).

vii) No laboratório de Bergum, é utilizado um procedimento similar ao utilizado no laboratório de Groningen. Os padrões de trabalho de Bergum são constituídos por uma série de padrões de transferência, todos calibrados. A rastreabilidade é assegurada pelos padrões de transferência calibrados em Groningen conforme descrito na etapa “vi”. Para isto utiliza-se um procedimento de ampliação de capacidade, obtendo-se vazão entre 5 m³/h e 4000 m³/h e pressões entre a 8 bar e 50 bar (máximo 132.000 m³/h). Um conjunto especial de padrões de transferência é utilizado para a calibração dos padrões do laboratório de Bernoulli, em Westerbork, à pressão de 60 bar.

viii) No laboratório de Westerbork, um conjunto de 10 padrões de trabalho são calibrados utilizando-se para isto o procedimento de ampliação de faixa de trabalho, um conjunto de padrões de transferência é calibrado no laboratório de Bergum, de acordo com a etapa “vii” (vazão máxima de 1.500.000 m³/h).

ix) Harmonização: Em 1999, o laboratório NMi/VSL (Holanda) e o PTB (Alemanha) concordaram disseminar o mesmo valor de referência de volume (metro cúbico) de gás natural, juntamente com o BNM (França) em 2004.

Os padrões de referência nas instalações holandesas são estabelecidos pelo NMi. Os laboratórios e padrões da referência em “Dordrecht”, “Groningen”, “Bergum” e “Westerbork” integram a cadeia de rastreabilidade nacional holandesa para vazão de gás a alta pressão.

A figura 4.4 ilustra a cadeia da rastreabilidade da Holanda com a seqüência de calibração para realização dos os valores de referência, para diferentes valores de pressão, variando da pressão atmosférica à pressão de 60 bar.

O NMi desenvolveu tecnologias para melhorar (i) a cadeia de rastreabilidade para medição de vazão na Holanda (i.e. dispositivo dinâmico do deslocamento BVS 2000, Piston Prover Gas-Oil, NMi TraSys e Z/Z-meter); (ii) a estabilidade dos valores de referência da cadeia de rastreabilidade; (iii) e para reduzir as incertezas associadas à medição de vazão de 4.000 m³/h a 60 bar, atingindo-se o patamar de 0,1% [20].

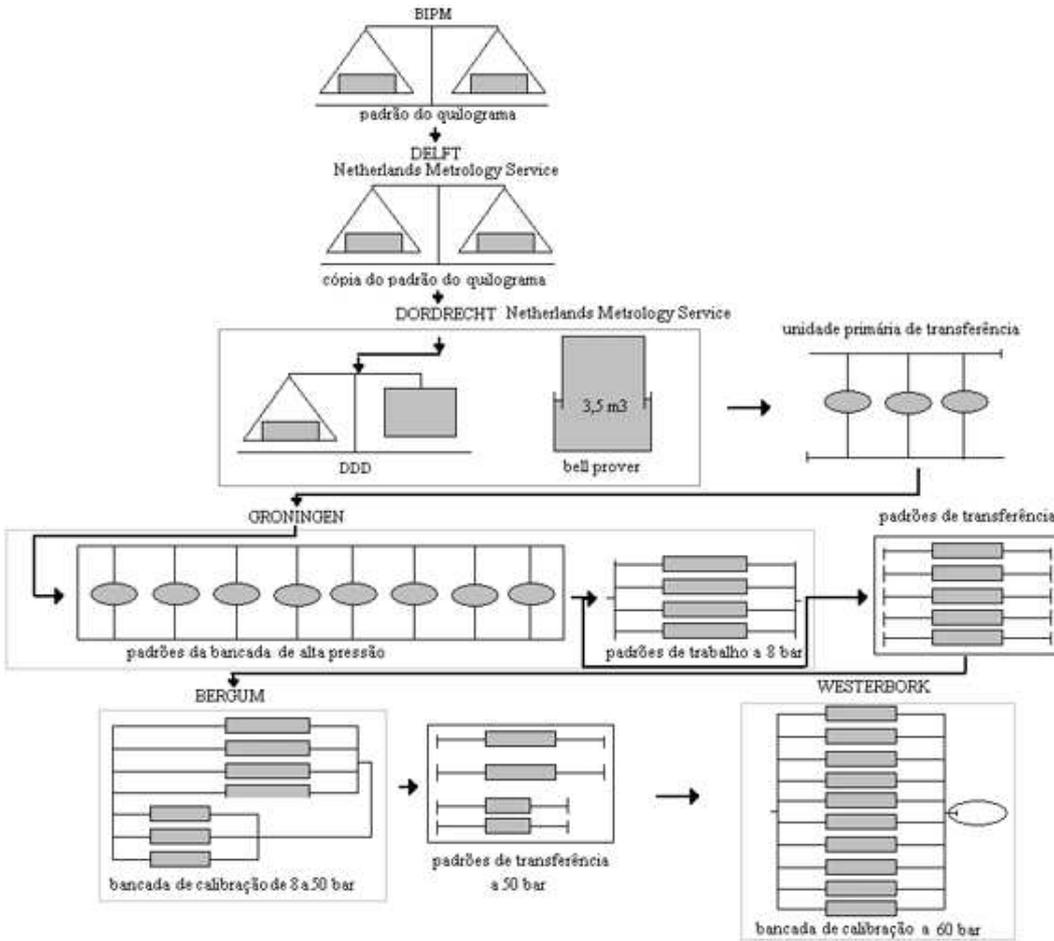


Figura 4.4: Cadeia de rastreabilidade da vazão do gás natural na Holanda

4.3.2

Processo de ampliação da faixa de trabalho dos padrões

Conforme representado na figura 4.4, a cadeia de rastreabilidade para medição de vazão na Holanda é formada pela interação e complementação das capacidades dos laboratórios e instalações apresentadas na figura 4.4, considerando-se a faixa de vazão e os níveis de pressão. Um procedimento específico de aumento da faixa de trabalho dos padrões de referência conhecido como *bootstrapping* (calibração e extrapolação) é utilizado quando esta não atende a capacidade de medição pretendida. Obtém-se, assim, com esse procedimento, um aumento na faixa de pressão ou de vazão, que possibilita a calibração de um medidor de maior capacidade operacional instalado na bancada, utilizando-se para isso uma configuração de montagem em série com um conjunto de medidores operando em paralelo. A figura 4.5 ilustra essa configuração para a situação em que os medidores instalados em paralelo possuem o mesmo porte. Para viabilizar a comparação, um medidor primário de referência é montado na posição em linha “L” e um conjunto de “n” medidores

secundários de referência idênticos são montados nas demais posições dos tramos “ T_1 ” a “ T_n ”. Para o processo de ampliação da vazão a válvula reguladora “P” da figura 4.5 não opera e é utilizado o *by-pass*.

i) Cada um dos “n” medidores na posição “T” é calibrado em sua vazão máxima em relação ao medidor primário de referência. Intrínsecos ao processo de calibração estão presentes as contribuições de incerteza do tipo “A” e “B”, tal qual preconiza o guia para expressão da incerteza de medição ISO GUM.

ii) O medidor primário de referência é substituído por um medidor com capacidade de medição mais elevada. A repetitividade constitui-se no requisito básico para este medidor.

iii) O medidor de capacidade maior pode ser calibrado na vazão máxima do padrão primário original. Utilizando-se cada um do “n” medidores instalados nas posição em paralelo “T”, a incerteza do tipo A é reduzido por um fator \sqrt{n} .

iv) O medidor na posição em linha “L” deve ser calibrado em diversas vazões múltiplas de “n” da vazão original. Se “n” medidores forem utilizados em paralelo, a incerteza do tipo “A” da etapa precedente será reduzida pelo mesmo fator. Para múltiplos menores do que “n” uma redução similar pode ser obtida realizando-se várias trocas dos medidores na posição “T”.

v) Os medidores na posição “T” são calibrados nestas mesmas vazões de “n” com referência ao medidor na posição “L”.

As etapas “ii” e “v” devem ser repetidas até que a capacidade máxima de vazão dos padrões de transferência seja alcançada.

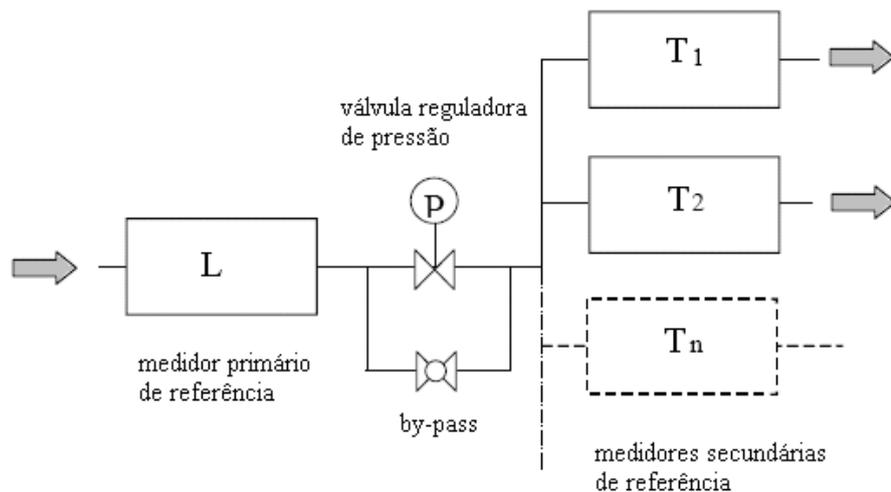


Figura 4.5: Circuito de multiplicação de vazão e pressão

Para o processo de ampliação da pressão o desvio do regulador é fechado e a válvula reguladora de pressão “P” é ajustada na pressão desejada. A vazão

é ajustada por uma válvula a montante do escoamento. O processo pode ser repetido como o processo da vazão supracitado. Os medidores na posição “T” são calibrados também para “n” vazões. Entretanto, essas vazões são reduzidas por um fator que resulta do quociente entre as pressões i.e. “ P_L/P_T ”. Apesar do aumento na incerteza tal qual apresentado acima há uma incerteza adicional resultando da redução da pressão, ou seja, uma contribuição da incerteza decorrente das diferenças na compressibilidade. Nesse processo de ampliação de faixa de pressão ocorrem mudanças na temperatura, na compressibilidade do gás, fatores esses que têm um elevado impacto na incerteza. O “*fator F*” da ampliação da vazão em função das pressões de cada estágio é obtida pela seguinte expressão:

$$F = n \cdot \frac{P_L}{P_T} \quad (4-1)$$

4.3.3

Processo de ampliação de vazão e pressão

Um conjunto de dez medidores CVM (bocais sônicos) é utilizado no primeiro passo do processo para se obter uma maior capacidade operacional de vazão e pressão (8 bar). Essa capacidade operacional de vazão e pressão até 65 bar é obtida com base em procedimento realizado com os medidores do tipo turbina. Os conjuntos de medidores tipo turbinas são utilizados também na intercomparação de vazão a alta pressão de gás nas instalações de calibração do medidor, com a finalidade da calibração e no processo de harmonização [7].

Os medidores CVM constituem uma ligação essencial na cadeia de rastreabilidade da Holanda que tem a rastreabilidade para as várias instalações de calibração. Os medidores CVM têm um desempenho ligeiramente dependente da pressão. Os medidores do tipo turbina são utilizados para vazões mais elevadas não sendo dependente da pressão, mas somente do regime de escoamento (número de Reynolds). Para vazões baixas o fator do medidor é determinado também pela densidade do gás e, conseqüentemente, pela pressão. De um modo geral a dependência inerente do perfil de velocidade é atenuada pelo uso de condicionador de fluxo internos. Já para padrões de transferência, o perfil de velocidades é amenizado por meio de condicionador de fluxo externo. Os conjuntos de medidores turbina são utilizados na intercomparação de instalações de ensaio de alta pressão. Diversos estágios no processo podem então ser executados usando somente um conjunto de padrões de transferência.

A figura 4.6 ilustra os diversos estágios da cadeia de rastreabilidade da vazão do gás natural e a interação entre as potencialidades das instalações dos laboratórios do NMi (Holanda).

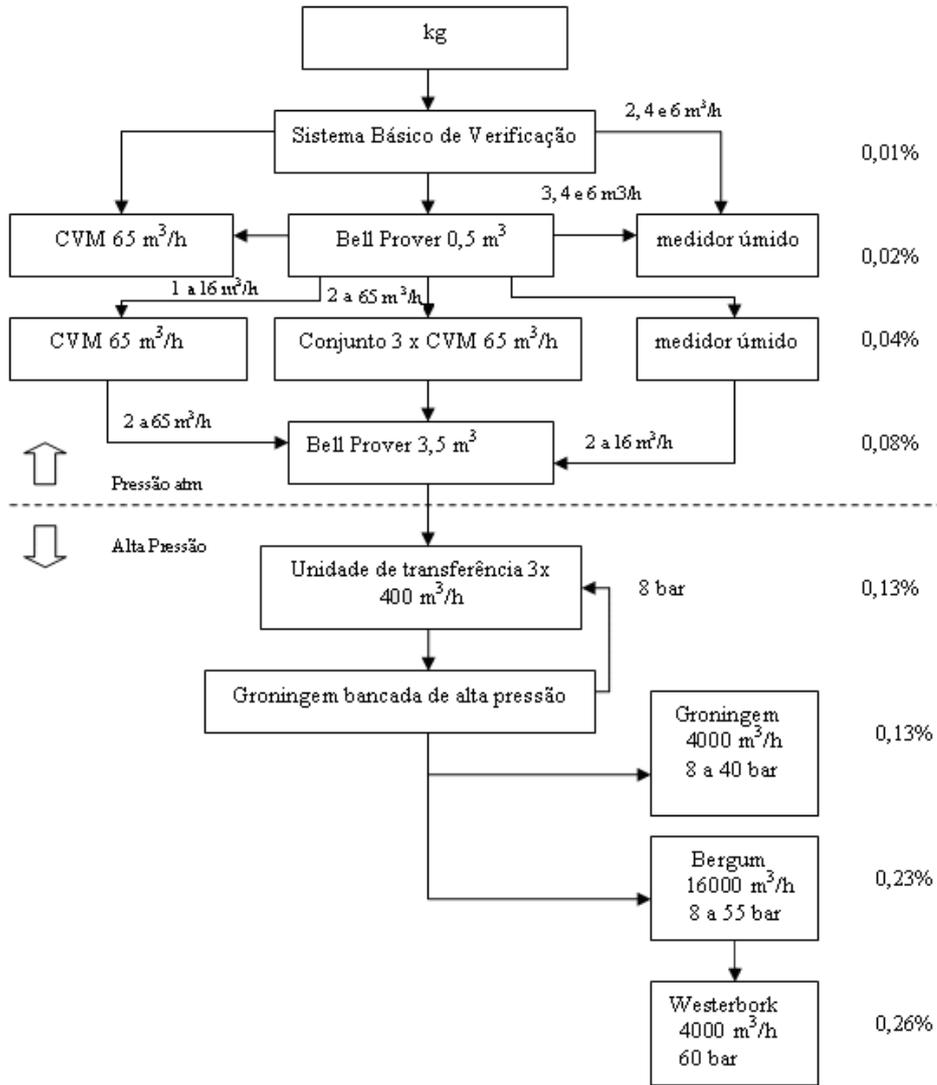


Figura 4.6: Cadeia de rastreabilidade da vazão do gás natural na Holanda e capacitação para medição de vazão dos laboratórios

Para exemplificar o procedimento de operação do sistema de ampliação das faixas de vazão e pressão, conforme a configuração apresentada na figura 4.3, se obtém a ampliação da vazão utilizando-se um conjunto de 10 medidores instalados na posição “T” e um na posição “L”. Aumentando-se, desta maneira, a capacidade operacional do padrão de 4 m³/h na pressão atmosférica até 4.000 m³/h a 100 bar em somente 5 etapas, sendo essas resumidas na tabela 4.1.

Como prática para obter melhores resultados do processo de ampliação das faixas de pressão e de vazão recomenda-se:

- fazer uso de um padrão primário que opera na pressão (ou próximo da pressão) da bancada de calibração. Evita-se, assim, um número maior de etapas de calibração e, conseqüentemente, o aumento de incerteza de medição;

Tabela 4.1: Ampliação das faixas de vazão e pressão. Modificado de [37]

ETAPA	MEDIDOR L		ROTA DE RASTREABILIDADE	MEDIDORES F			Resultado da ampliação
	Q [m ³ /h]	P _L [bar]		Q [m ³ /h]	ΣQ [m ³ /h]	P _T [bar]	
1T	4	1	referência >medidor	4	-	1	
1L	40	1	medidor < referência	4	40	1	Aumenta volume
2T	40	1	referência >medidor	40	-	1	
2L	40	10	medidor < referência	40	400	1	Aumenta pressão
3T	40	10	referência >medidor	40	-	10	
3L	40	100	medidor < referência	40	400	10	Aumenta pressão
4T	40	100	referência >medidor	40	-	100	
4L	400	100	medidor < referência	40	400	100	Aumenta volume
5T	400	100	referência >medidor	400	-	100	
5L	4000	100	medidor < referência	400	4000	100	Aumenta volume

- utilizar padrões de transferência com elevada capacidade de vazão. Os padrões de transferência devem ser capazes de medir uma vazão mínima que iguale a vazão máxima do padrão primário dividido pela redução na pressão;
- utilizar padrões de medição de vazão que possuam uma mesma capacidade de vazão, quanto maior o número de medidores, menor será a incerteza adicional que contribui para se obter o volume desejado. As etapas anteriores devem ser repetidas para se obter a vazão máxima dos padrões de transferência.

Tabela 4.2: Complementariedade e capacidade das instalações de calibração do NMi (Holanda)

Tipo de Instalações	Localização do laboratório	Vazão operacional máxima [m ³ /h]	Fluído de trabalho	Pressão operacional [bar]
Alta vazão	Dordrecht	12 000	ar	1
Alta pressão	Groningen	36 000	GN	9 a 41
Alta pressão	Bergum	132 000	GN	9 a 51
Alta pressão	Westerbork	2 400 000	GN	60

A tabela 4.2 resume as a capacidade de medição das instalações dos laboratórios do NMI.

4.4

Infra-estrutura laboratorial para medição de vazão de gás na Alemanha

Na década de noventa, o laboratório de calibração de alta pressão PIGSAR foi instalado em Dorsten, na Alemanha. Atuando por delegação do PTB (*Physikalisch Technische Bundesanstalt*) o laboratório utiliza um “provador de pistão” (para a comparação do volume) na base da sua cadeia de rastreabilidade para a realização dos valores de referência e calibração dos medidores de gás. A bancada de calibração opera em circuito fechado para medição de referência e o padrão de medição deriva da composição das unidades de base de comprimento (metro) e de tempo (segundo) [18].

O laboratório PIGSAR é a infra-estrutura laboratorial de referência nacional da Alemanha para medição de vazão de gás natural em alta pressão. A bancada está capacitada para calibrar medidores do tipo turbina, ultrassônicos, vortex, Coriolis e dispositivos de pressão diferencial (placa de orifício) e medidor Venturi. Utiliza como fluido de trabalho o gás natural e está capacitado para operar medidores com diâmetro nominal de até 16 pol, na faixa de trabalho com pressão variando de 15 bar a 50 bar, e com vazões de 8 m³/h a 6.500 m³/h. É acreditado pelo DKD (*Deutscher Kalibrierdienst*) da Alemanha e participa do processo de harmonização juntamente com o NMI (Holanda) e BNM (Bureau National de Métrologie) da França. O PIGSAR ainda provê a rastreabilidade aos padrões secundários do laboratório TCC (*Transcanada Calibrations*) [6].

O trabalho de harmonização mundial com o BIPM habilitou o Laboratório PIGSAR a representar e disseminar o valor de referência unificado para a unidade do volume de gás natural de alta pressão. Segundo a regulamentação alemã, os medidores de gás devem ser calibrados o mais próximo possível das condições operacionais de pressão existentes no campo. Como regra geral, a pressão de calibração deve ser tal que se situe na faixa formada tendo, como mínimo, a metade da pressão de operação e, no máximo, o dobro desta última. As diferentes condições operacionais da pressão de campo e do laboratório representa cerca de 0,17% na incerteza total de medição de vazão.

Em 1999 o PTB reconheceu o Laboratório PIGSAR como laboratório detentor do padrão de referência alemão para a unidade metro cúbico de gás natural em alta pressão. Assim, coube ao laboratório PIGSAR a responsabilidade para manter e difundir a unidade alemã de referência do volume de gás natural sob condições de alta pressão. O desempenho metrológico e a capa-

cidade operacional do Laboratório PIGSAR - adequadamente instrumentado e dispondo de competência técnica de alto nível - permitiu a este conceituado laboratório de vazão na Alemanha obter o reconhecimento internacional capacitando-o para de representar uma das principais instalações de calibração de medição de vazão do mundo [6].

4.4.1

Descrição do funcionamento da infra-estrutura de calibração do PIGSAR

No sistema laboratorial do PIGSAR para medição de vazão o fluxo do gás é inicialmente filtrado na entrada da estação e estabilizado por uma unidade de regulagem da temperatura e pressão. Este dispositivo permite ao gás fluir (selecionados pelo acionamento de válvulas) pelo banco de padrões de trabalho alimentando um dos três medidores de referência conforme ilustrado na figura 4.7.

As demais instalações incluem uma seção de trabalho desenvolvida para calibração dos medidores, o sistema primário “provador de pistão”, um conjunto de medidores de transferência e um banco de bocais sônicos. A figura 4.7 apresenta o desenho esquemático do laboratório PIGSAR, onde se observa que o padrão primário atual é um *prover* de deslocamento mecânico, o “provador de pistão”. O “provador de pistão” é a referência utilizada para calibrar os padrões de trabalho (um conjunto de nove turbinas) que, por sua vez, serve para calibrar os medidores de vazão instalados no sistema. A cadeia de rastreabilidade do laboratório PIGSAR é criada a partir do “provador de pistão”.

O padrão primário do Laboratório PIGSAR é um “provador de pistão” com diâmetro interno de 250 mm e com vazão máxima de 480 m³/h. A cadeia de rastreabilidade do “provador de pistão” do Laboratório PIGSAR opera com níveis de incerteza de medição inferiores a todas as outras bancadas de alta pressão de calibração de medidores de gás natural existentes. O “provador de pistão” é integrado permanentemente na bancada, reduzindo significativamente o tempo de recalibração e melhorando a repetitividade da medição.

4.4.2

Cadeia de Rastreabilidade do Laboratório PIGSAR

A cadeia de rastreabilidade tem como referência básica na sua hierarquia a realização das unidades de base das grandezas *comprimento e tempo*, o que permite a determinação das dimensões do “provador de pistão” e do movimento do pistão. A cadeia de rastreabilidade é realizada nos vários estágios de

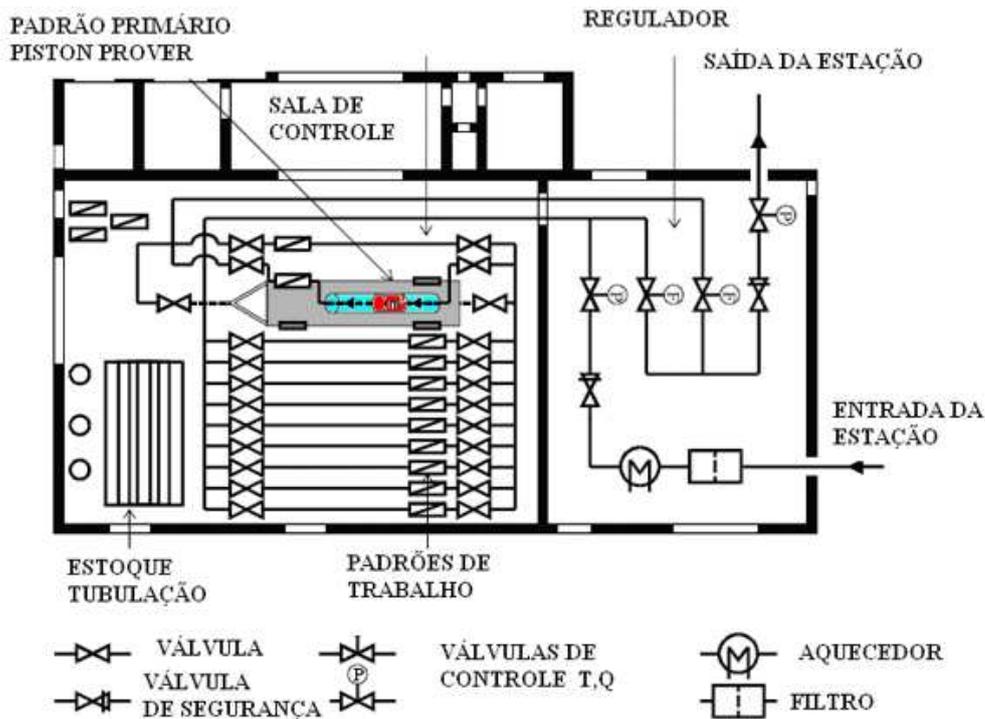


Figura 4.7: Bancada de calibração do PIGSAR (Fonte: modificado de [17])

calibração dos padrões através das sucessivas comparações. O padrão primário “provador de pistão” realiza uma vazão de referência rastreável às unidades de base *metro* e *segundo*, com uma incerteza declarada na sua calibração. A cadeia de rastreabilidade para os padrões de trabalho da bancada compreende dois padrões de trabalho G250 e quatro estágios de calibração (para os padrões de trabalho G1000).

A figura 4.8 ilustra esquematicamente a configuração da bancada de calibração. Nesta figura os níveis 1 e 2 referem-se respectivamente à realização das unidades de comprimento (m) e de volume (m³). Os demais níveis (3 a 6) referem-se ao procedimento de calibração. No primeiro estágio do processo da calibração, um padrão de transferência é instalado a jusante do “provador de pistão”. O gás percorre o circuito pelo conjunto de padrões de trabalho em paralelo nos medidores G250 (4x), G1000 (4x), e G100 turbina (1x) e escoam na direção dos medidores a serem calibrados. O número dos padrões de trabalho utilizados depende da capacidade de vazão do medidor a ser calibrado. Na etapa final do processo, o medidor de gás comercial é calibrado nos níveis (4^o ou 6^o) conforme ilustrado na figura 4.8 [9].

Os estágios de calibração da cadeia de rastreabilidade do Laboratório PIGSAR desenvolvem-se segundo os seguintes níveis:

Nível 3: O “provador de pistão” e o padrão de transferência estão montados em série no mesmo tramo, o padrão de transferência (G250) é

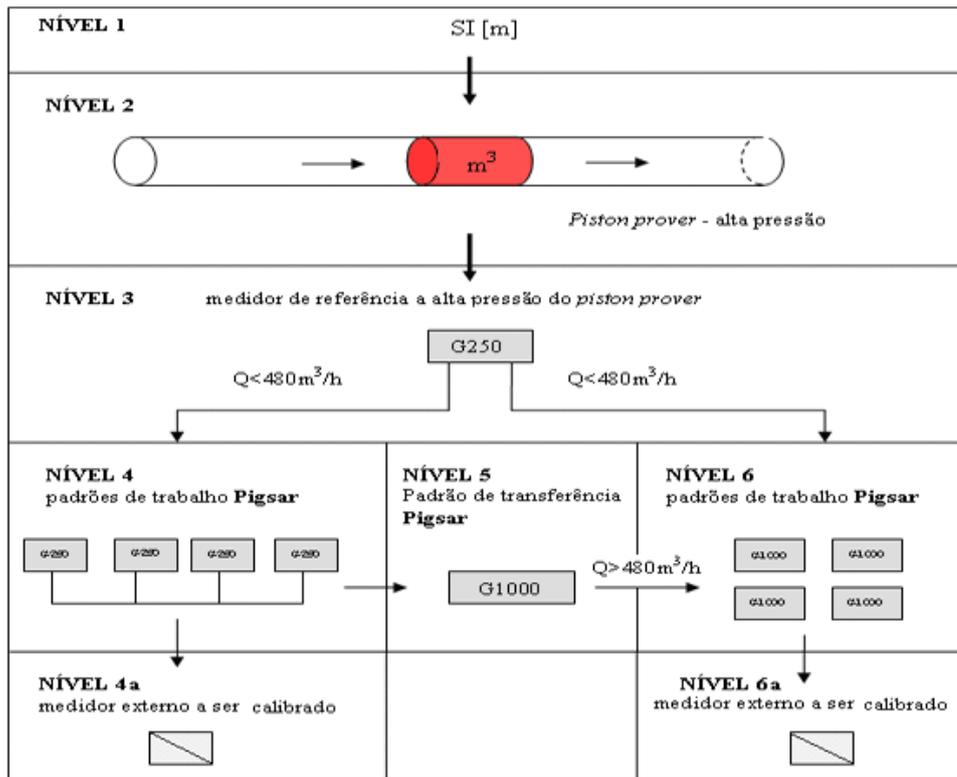


Figura 4.8: Bancada de calibração do Laboratório PIGSAR. (Fonte: modificado de [6])

calibrado utilizando-se o “prorador de pistão”.

Nível 4: Utilizando-se esse padrão de transferência calibram-se os quatro padrões de trabalho G250 e os quatro padrões de trabalho G1000 até uma vazão de $480 m^3/h$.

Nível 5: Utilizando-se os quatro padrões de trabalho G250 montados em paralelo, calibra-se o padrão de transferência G1000.

Nível 6: Utilizando-se o padrão de transferência G1000 calibram-se os demais quatro padrões de trabalho G1000.

4.4.3

Determinação das incertezas nos estágios de calibração

Como a medição e avaliação dos processos são basicamente os mesmos para cada estágio da calibração, o modelo somente tem que ser desenvolvido para um estágio e pode então ser aplicado repetidamente para todos os estágios restantes, utilizando-se os resultados do estágio precedente. O mensurando da bancada é o desvio da leitura em (m^3/s), e o valor de referência é dado em vazão (expressa pelo número de Reynolds) na pressão “P” e na temperatura “T” que é rastreado através da cadeia de calibração para o padrão primário pelas

grandezas comprimento e tempo. Dado estes desvios do medidor em diversas vazões, uma função do desvio do medidor pode ser calculada por regressão.

Em cada estágio da calibração, as contribuições individuais da incerteza e a incerteza total do medidor de vazão de gás calibrado devem ser determinadas. Para cada estágio, a incerteza total dependente da vazão representada pelo número de Reynolds e das contribuições da estimativa de incerteza.

A incerteza total é determinada para os vários níveis da calibração devido à superposição de diversos efeitos. Em cada estágio há novas contribuições da incerteza (aleatórias) causadas pela disseminação das leituras de medidor, da pressão, da diferença da pressão, da temperatura e do efeito do empacotamento do gás. A contribuição da função do desvio dos níveis precedentes não reflete diretamente a incerteza total do medidor de referência na mesma vazão no estágio precedente, mas é reduzida pelo cálculo médio da regressão.

Para uma análise de incerteza do desvio do medidor “ f_N ” calibrado em cada estágio “ N ”, o seguinte modelo é utilizado [13]:

$$f_N = \frac{V_N \cdot p_N}{T_N K_N \cdot \sum_{i=1}^n \frac{V_i \cdot p_i}{T_i K_i \cdot (1 + f_i)}} \quad (4-2)$$

Nesta expressão,

i : índice do medidor calibrado no estágio anterior

N : medidor calibrado no estágio atual

n : número de medidores em paralelo usado para calibração

f : desvio do medidor

V : volume indicado pelo medidor (ou volume deslocado pelo “provador de pistão” no primeiro estágio)

P : pressão

T : temperatura

K : compressibilidade

Para o medidor calibrado no último estágio (medidor mássico) o desvio do medidor “ f_N ” é determinado pela seguinte expressão:

$$f_N = \frac{m_N}{\sum_i \frac{V_i \cdot P_i}{(1 + f_i)}} - 1 \quad (4-3)$$

Nesta expressão “ ρ ” é a massa específica.

É importante analisar as incertezas de medição obtidas na calibração de equipamentos e padrões, pois estas influenciam diretamente nos cálculos das incertezas repassadas para os serviços de calibração.

A figura 4.9 ilustra a cadeia da rastreabilidade dos padrões primários e capacitação laboratorial do PTB (Alemanha) para a realização e disseminação das unidades de volume e vazão de gás natural.

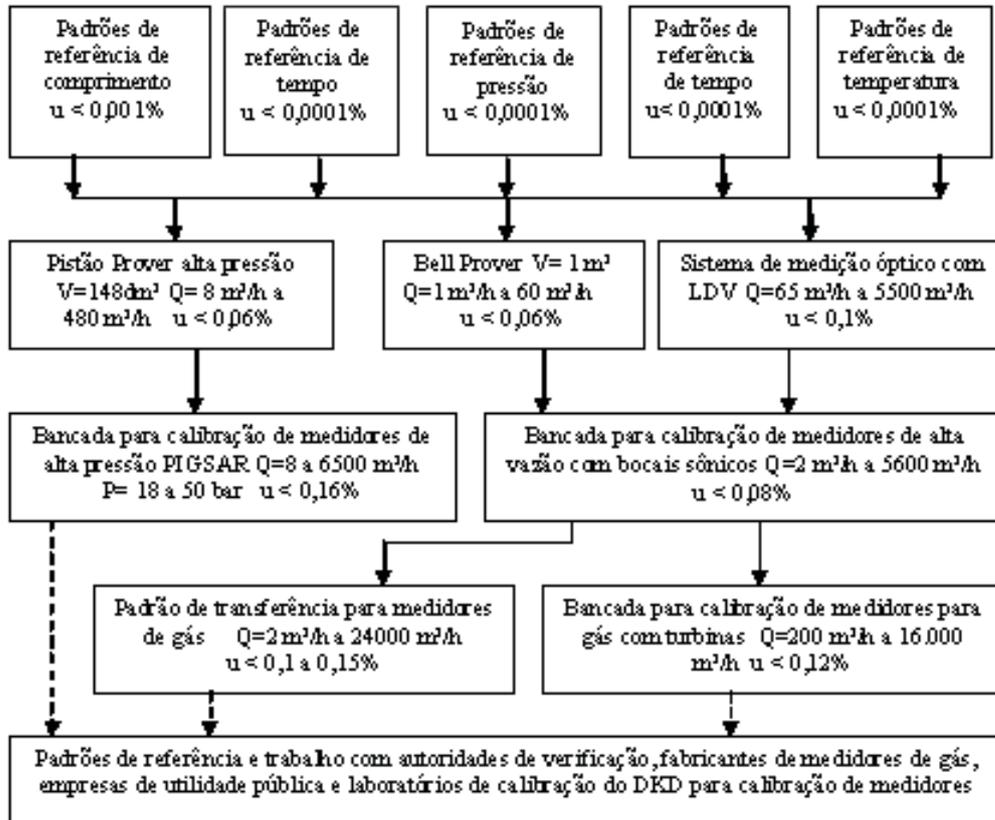


Figura 4.9: Representação esquemática da cadeia de rastreabilidade dos padrões e capacidades de medição de vazão de gás do PTB

4.4.4

Capacidade das instalações de alta pressão no Laboratório PIGSAR

A figura 4.9 apresenta as características dos padrões e a cadeia de rastreabilidade do Laboratório PIGSAR especificando as incertezas associadas a cada processo de medição. Todas as fontes de influência no cálculo da incerteza e as correlações entre padrões conectados em paralelo devem ser consideradas. Isto permite que a calibração de qualquer medidor externo em qualquer condição de pressão e temperatura dentro da escala de operação da bancada seja rastreada às unidades de base do SI.

A tabela 4.3 resume os dados técnicos da bancada do Laboratório PIGSAR. A melhor capacidade de medição declarada pelo laboratório PIGSAR é de 0,16%.

Num esforço de buscar a comparabilidade de seus sistemas metrológicos, em 1999 os valores de referência para volume de gás natural a alta pressão

Tabela 4.3: Especificação técnica das instalações de alta pressão no PIGSAR

Vazão	8 m ³ /h a 6500 m ³ /h em condições operacionais acima de 350.000 m ³ /h nas condições de referência
Pressão	16 bar a 50 bar (estabilidade durante o ensaio < 20 mbar)
Temperatura	8 °C a 20 °C (estabilidade durante o ensaio < 0,1K)
Tamanho dos medidores	Até 400 diâmetros nominal
Comprimento da tubulação de entrada	Até 15,5 m
Padrão de trabalho	8 estações em paralelo com medidores tipo turbina 1 estação em paralelo com <i>piston prover</i>
Número de estação de trabalho	5
Incerteza na determinação da densidade	0,1% (diretamente do densímetro) 0,15% (da composição do gás)
Incerteza da medição (calibração)	Máxima 0,16% Valor harmonizado 0,15%

da Alemanha e Holanda foram harmonizados. Em 2004, o instituto francês de metrologia (LNE) associou-se ao projeto de harmonização dando origem à criação do que foi denominado “metro cúbico de gás natural de alta pressão europeu”. Este valor de referência para medição de vazão tem sido representado desde então pelos Laboratório da Alemanha PIGSAR da França (Alfortville) e da Holanda (Bergum e Westerbork). Fundamentado no acordo de harmonização metrológica desenvolvido, o Laboratório PIGSAR representa e dissemina um único valor de referência harmonizado pela Alemanha, Holanda e França, valor este unificado para a unidade do volume de gás natural mantido em alta pressão. Os procedimentos e os resultados do projeto de harmonização são discutidos em detalhes no capítulo 6. Como evolução do processo de harmonização, o Laboratório PIGSAR desenvolveu o padrão primário óptico contendo um bocal subcrítico baseado no princípio de laser Doppler velocimetria (LDV) para a aplicação na realização da unidade de volume a alta pressão, descrito no capítulo 5.

4.5

Infra-estrutura laboratorial para medição de vazão de gás natural na França

Criado em 2000 sob a supervisão do Laboratoire National de Metrologie et d'Essais (LNE/BNM, França), o Laboratoire Associé de Débitmétrie Gazeuse (LNE/LADG) estabeleceu parceria entre CESAME/LNE e a divisão da pesquisa de Gaz de France para promover a padronização primária em medição de vazão de gás.

O LNE/LADG é o Instituto de Metrologia Nacional da França para a medição vazão de gás a alta pressão. Há mais de 25 anos, laboratórios do

LNE/LADG utilizam bocais sônicos como padrões de transferência para vazão obtendo desta forma a referência de vazão em suas bancadas de calibração para o ar e gás natural [20]. Esses bocais sônicos são padronizados pela norma ISO 9300 e calibrados individualmente sob pressão na bancada primária denominada PISCINE. As bancadas secundárias de calibração (CESAME e PLAT) são utilizadas para calibrar os medidores de fluxo na faixa de vazão entre 9 m³/h a 80.000 m³/h, com pressão variando da pressão atmosférica à pressão de 4,5 MPa. As bancadas do CESAME/LNE e PLAT da *Gaz de France* estão localizadas, respectivamente, nas cidades de Poitiers e em Arfortville. A cadeia de rastreabilidade do LNE/LADG está ilustrada na figura 4.10.

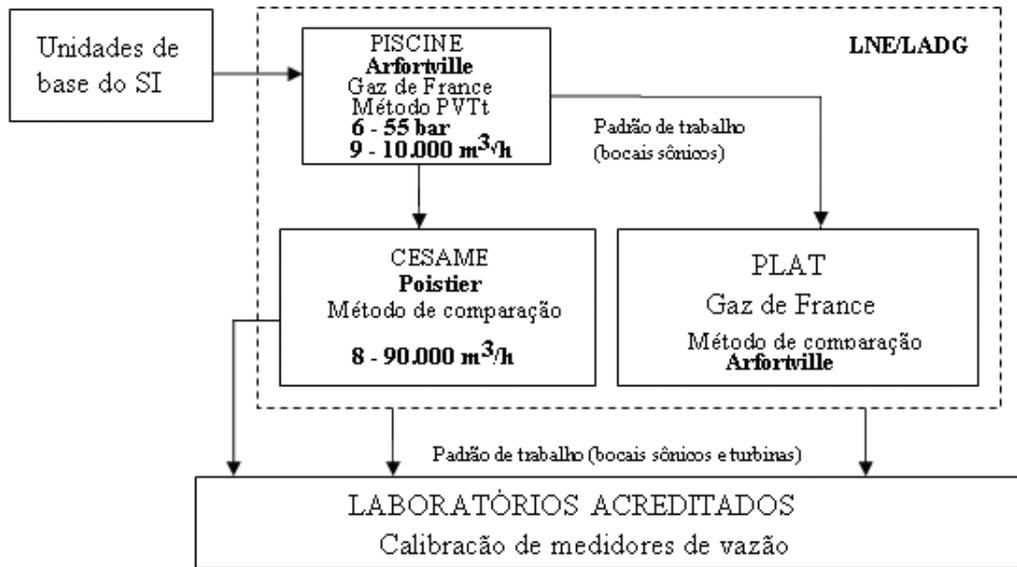


Figura 4.10: Cadeia de rastreabilidade do LNE/LADG. (Fonte modificada de [12])

4.5.1

Descrições da bancada primária de calibração PISCINE

A bancada primária de calibração PISCINE utiliza o método fundamental pressão, temperatura, volume e tempo (PVTt) para calibrar bocais sônicos com gás natural [20]. Esse método de calibração consiste em medir uma vazão mássica constante de gás que flui pelos medidores de referência do tipo bocal sônico (previamente calibrados) e que preenche um tanque padrão cujo volume foi previamente calibrado. A massa específica do gás é medida antes e depois da operação, permitindo determinar a massa inicial e final do gás. A vazão mássica de referência é determinada com base no enchimento do tanque de volume conhecido, sincronizado pela respectiva medição do tempo de escoamento. Finalmente, o coeficiente de descarga, “*C_d*” do bocal é calculado a partir do

escoamento do gás, do tempo de enchimento e das condições termodinâmicas no bocal. O coeficiente da descarga é dependente somente do regime de escoamento - caracterizado pelo número de Reynolds “*Re*”. É possível utilizar-se esse sistema com ar ou gás natural. O conjunto completo composto pelo vaso de pressão e tubulação é mergulhado em um tanque de água com temperatura controlada, permitindo desta forma manter a temperatura do gás durante o processo de calibração em $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.

4.5.2

Descrições das bancadas secundárias de calibração

As bancadas secundárias de calibração do LNE/LADG utilizam o método que ficou denominado “método de comparação” para calibrar medidores de vazão de gás. A *Gaz de France* utiliza uma bancada de calibração de vazão secundária denominada PLAT. Essa bancada utiliza o gás natural da rede de transporte. O gás é inicialmente filtrado e sua temperatura é controlada, enquanto um regulador controla a pressão a montante dos bocais de referência. Válvulas reguladoras são utilizadas para ajustar a pressão a montante dos bocais sônicos de referência, isto é, no sistema de medição do fluxo onde se realiza a calibração. Até seis bocais sônicos (de um conjunto total de 20 bocais) são utilizados como medidores de referência nas bancadas secundárias. O gás é finalmente retornado a baixa pressão para a rede do sistema de medição da *Gaz de France*. A operação dessas bancadas são automatizadas e a aquisição de dados igualmente executada automaticamente.

O CESAME/LNE em Poitiers possui uma bancada secundária de calibração. Para serviços de calibração utiliza a vazão controlada por 12 bocais sônicos instalados em paralelo tomados como vazão de referência, com pressão e temperatura medidas a montante dos bocais. O medidor sob ensaio é instalado na seção de teste a jusante dos bocais de referência. A calibração é executada com o ar seco pressurizado por compressores. Três tanques de armazenamento, com um volume total de 100 m^3 a uma pressão de 200 bar, são utilizados para prover à bancada o ar pressurizado. A bancada opera em circuito aberto de calibração.

4.5.3

Cadeia de rastreabilidade do LNE/LADG

A cadeia de rastreabilidade do LNE/LADG inicia-se com a realização das unidades de base características (Pa, K, V, m^3 , s) para a calibração da bancada primária de calibração PISCINE. A figura 4.11 ilustra a cadeia de

rastreabilidade para a bancada primária. Similarmente configura-se a cadeia de rastreabilidade da bancada secundária, porém sem a medição de volume.

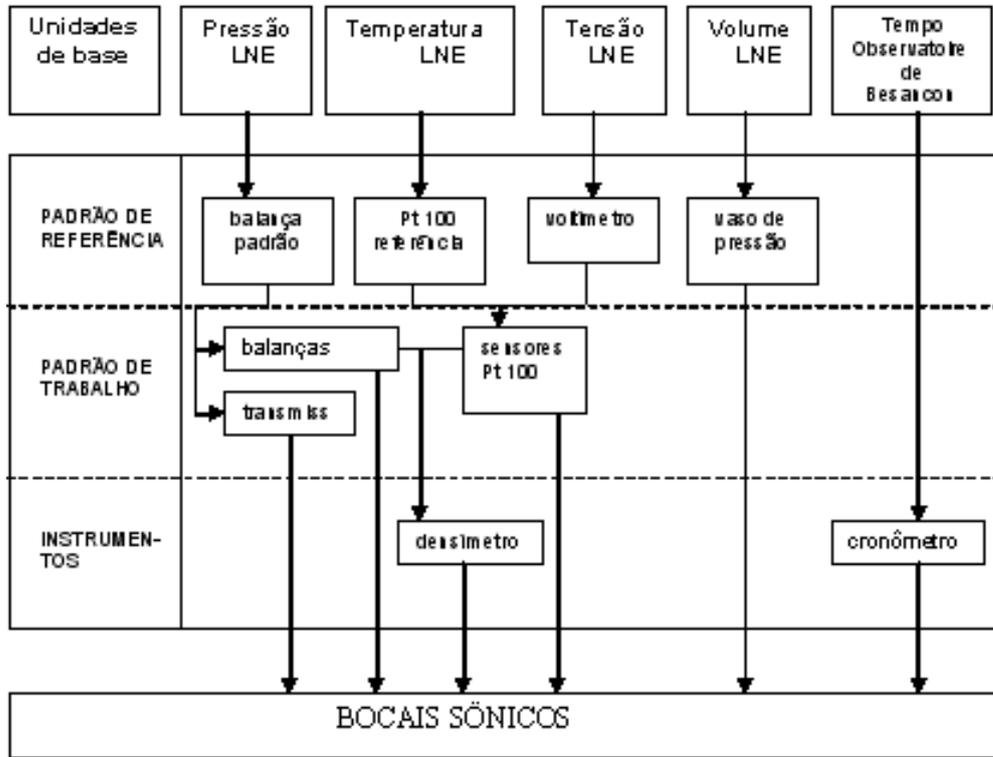


Figura 4.11: Cadeia de rastreabilidade para a bancada primária (LNE/LADG)

4.5.4

Descrição dos estágios de calibração

A cadeia de rastreabilidade do LNE/LADG tem sua origem na bancada primária de calibração PISCINE e é completada com as bancadas de calibração secundárias equipadas com bocais sônicos utilizados como medidores de referência [21].

A cadeia de rastreabilidade para a vazão do gás é representada na figura 4.12. Esta cadeia possui uma configuração ligeiramente diferente dependendo do tamanho do bocal sônico utilizado como referência, isto é, com outro estágio sempre que o diâmetro da seção de estrangulamento for maior que 20 mm. Os medidores externos são calibrados no estágio “1a” ou “2a” conforme ilustrado na figura 4.12 [20].

A calibração se realiza em três estágios, a saber:

Estágio 0 - O volume do vaso da bancada primária é calibrado pelo LNE pela medição do peso de água utilizada para este procedimento. A cadeia de rastreabilidade dos transmissores utilizados para realizar as medições da massa específica, pressão, temperatura e tempo é ilustrada na figura 4.11.

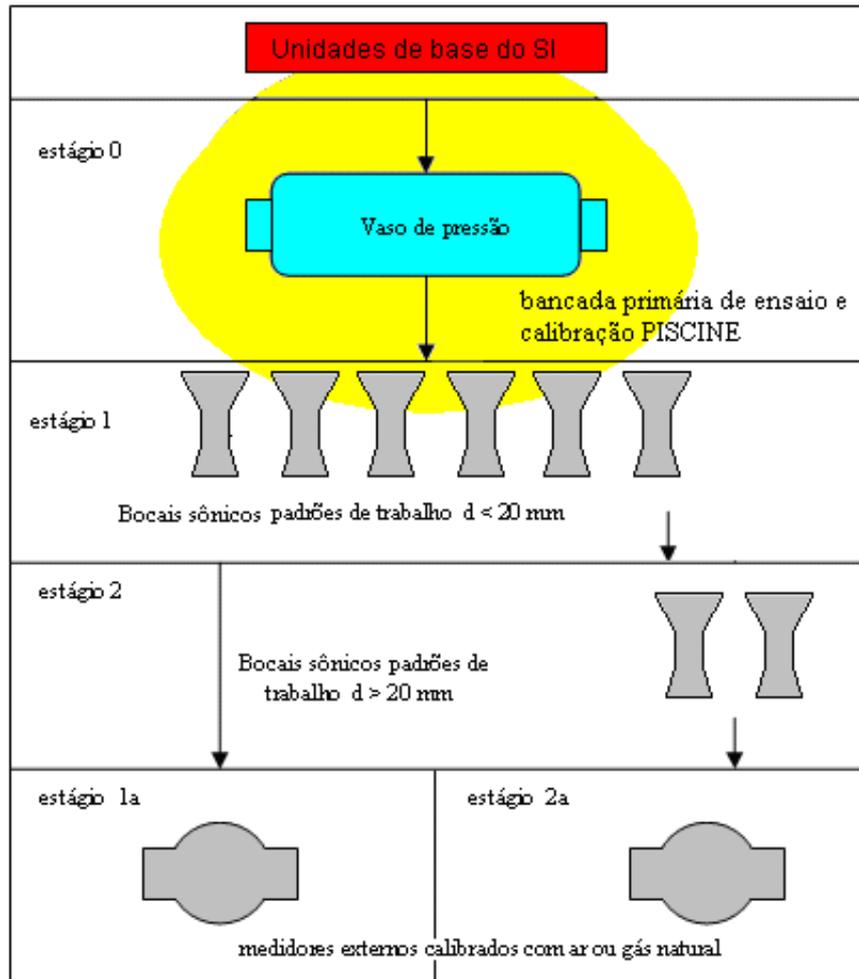


Figura 4.12: Cadeia de rastreabilidade para vazão de gás. (Fonte: modificado de [20])

Estágio 1 - Cada “bocal sônico pequeno” ($d < 20$ mm) é calibrado individualmente na bancada de calibração primária mantida a alta pressão (PISCINE) utilizando-se o método PVTt. O coeficiente de descarga de cada bocal sônico “CD” na faixa de trabalho de 0,6 até 5,5 MPa é calculado para um determinado regime de escoamento caracterizado pelo “número de Reynolds”.

Estágio 2 - Cada “bocal sônico grande” ($d > 20$ mm) é calibrado em relação a um conjunto de bocais sônicos menores instalados nas bancadas secundárias de calibração. O coeficiente da descarga do bocal sônico é calculado para um determinado regime de escoamento (número de Reynolds).

Nota: Nos estágios “1a” e “2a”, o medidor de fluxo externo é submetido à medição e calibrado em relação a um conjunto de bocais sônicos. Nesse sistema o fluido utilizado na calibração pode ser ar comprimido ou gás natural. O erro da indicação é determinado entre a vazão mássica do bocal sônico de referência e a e vazão mássica calculadas nas condições do medidor.

4.5.5

Capacidade dos laboratórios do LNE/LADG

A cadeia metrológica do sistema Francês de medição da vazão de gás natural a alta pressão é estruturada com base nas capacitações dos laboratórios LADG, CESAME e PLATE.

4.5.5.1

Bancada primária de calibração PISCINE

O laboratório primário de calibração do LADG está localizado na estação da *Gaz de France* em Alfortville. Sua bancada denominada PISCINE é considerada padrão primário para a medição do fluxo do gás pressurizado na França. A bancada foi certificada pelo *Bureau National de Métrologie* (BNM) o departamento nacional de metrologia francês e o laboratório que a opera foi acreditado pelo organismo francês de acreditação (COFRAC). Esta bancada foi projetada especialmente para calibrar os bocais do tipo Venturi, que são operados em condições sônicas. Estes bocais sônicos foram construídos de acordo com a norma ISO 9300 e são calibrados com gás natural em uma pressão absoluta de 6 bar a 55 bar, com capacidade para medição de vazão na faixa de 9 m³/h a 10.000 m³/h.

A bancada de calibração é conectada à tubulação principal que fornece gás natural proveniente da rede da *Gaz de France*. O sistema utiliza um compressor para alcançar a pressão de operação de 60 bar. A bancada consiste de uma seção primária de calibração onde o bocal é instalado, dispondo ainda de um tanque e equipamento para controlar a pressão e as seqüências de calibração. Duas válvulas de *shut-off* (de tempo de fechamento rápido) estão instaladas a montante e a jusante do tanque. O tempo de enchimento é medido por um cronômetro enquanto a pressão de calibração é controlada por um redutor de pressão projetado especialmente para esta aplicação. Nenhum condicionador do fluxo é usado a montante do bocal.

O método de calibração consiste em medir a vazão mássica constante que atravessa o bocal sob calibração e os parâmetros durante o preenchimento do volume do tanque. Inicialmente uma pressão constante é estabelecida a montante do bocal sônico enquanto a válvula de *shut-off* a montante é fechada e o gás enche o reservatório (que tem um volume previamente conhecido), assegurando uma vazão mássica constante até que a válvula seja fechada. A quantidade de gás armazenada na instalação durante o intervalo do tempo que separa o fechamento das válvulas é calculada a partir da medição da pressão, volume, temperatura e do tempo (PVTt), medidos antes e depois do acionamento das válvulas de fechamento. A composição do gás e a sua massa

específica são também medidas. A conhecida equação 4-4 deduzida a partir dos princípios básicos é utilizada para determinar o coeficiente de descarga “ C_D ”:

$$Q_m = AC_D C_R \sqrt{P_0 \rho_0} \quad (4-4)$$

Nesta expressão, a pressão “ P_0 ” e a massa específica “ ρ_0 ” a montante são medidas e o coeficiente “ C_R ” é calculado pela equação de estado, seguindo as recomendações da norma AGA-8, em função da composição do gás e das medições de pressão e temperatura, “ A ” é a área da seção da garganta. O coeficiente da descarga é dependente somente do número de Reynolds. Este sistema está capacitado para operar com ar ou gás natural.

4.5.5.2

Bancada secundária de calibração CESAME

O CESAME é a denominação da bancada secundária utilizada para a calibração de medidores de vazão a alta pressão na França. Opera segundo uma faixa de vazão de 8 m³/h a 90.000 m³/h, com pressões absolutas variando de 1 a 50 bar, podendo mediante adaptações especiais operar a 150 bar. Um conjunto de doze bocais sônicos, com vazões nominais que cobrem a faixa de 1,5 m³/h a 1.000 m³/h opera em condições sônicas e é utilizado para medições da vazão mássica padrão. A seção de teste da bancada tem comprimento de 50 m e diâmetros que variam de 25 DN a 300 DN.

Os bocais sônicos utilizados têm rastreabilidade ao padrão primário nacional PISCINE pelo método PVTt, enquanto todos os demais equipamentos possuem rastreabilidade aos padrões nacionais do LNE. As incertezas das medições de vazão mássica e volumétrica estão descritas na tabela 4.4 e foram determinadas de acordo com os preceitos da ISO GUM.

Tabela 4.4: Incertezas estimadas para as faixas operacionais de vazão do laboratório CESAME

Vazão operacional kg/s	Incerteza (2σ)	
	Vazão mássica	Vazão volumétrica
$Q_m < 7,55$	$\pm 1,9 \cdot 10^{-3} Q_m$	$\pm 2 \cdot 10^{-3} Q_v$
$7,55 < Q_m < 14$	$\pm 2 \cdot 10^{-3} Q_m$	$\pm 2,1 \cdot 10^{-3} Q_v$
$14 < Q_m < 32$	$\pm 2,1 \cdot 10^{-3} Q_m$	$\pm 2,2 \cdot 10^{-3} Q_v$

4.5.5.3

Bancada secundária de calibração PLATE e COKE

As bancadas para calibração de medidores de vazão PLATE e COKE da Rede Auxiliar de Medição (MMR) da divisão da pesquisa de Gaz de France foram certificadas pelo BNM e os laboratórios acreditados pelo COFRAC para calibração de medidores de vazão mássica e volumétrica. A calibração é executada em uma faixa variando de 9 m³/h a 40.000 m³/h, para uma faixa de pressão que varia de 0,1 bar a 40 bar.

As duas bancadas de calibração de medidores de vazão utilizam o gás natural como fluido de calibração, proveniente da rede da transmissão da Gaz de France. O gás é filtrado e sua temperatura é controlada. Em cada bancada de calibração um regulador controla a pressão a montante dos bocais de referência. Os bocais da referência estão instalados nos tramos, que são escolhidos de acordo com a vazão a ser gerada para as calibrações, de um conjunto de 22 bocais. Cada linha inclui uma válvula pneumática e as válvulas a montante são utilizadas para ajustar a pressão dos bocais da referência do sistema de medição de vazão. O gás é então retornado à rede de Gaz de France.

A determinação da vazão mássica é realizada utilizando-se os bocais do tipo Venturi operados em condições sônicas. A massa de gás através do conjunto de bocais é determinada a partir de medições de pressão e densidade de estagnação. Os coeficientes do fluxo de cada bocal são determinados inicialmente por uma calibração individual na bancada primária PISCINE. Esse fluxo mássico indicado pelo medidor calibrado é determinado com base na pressão e temperatura medidas em sua posição, e na medição da densidade medida a montante dos bocais. Os efeitos do gás real são corrigidos pelo fator de compressibilidade para as condições termodinâmicas nas posições em que as medições são realizadas. Essas várias medições permitem (via comparação entre e os fluxos mássicos de referência e o calibrado) que seja determinado o desvio do medidor.

Tabela 4.5: Incertezas das medições de vazão mássica e volumétrica das bancadas PLATE e COKE

Faixa de calibração		Incerteza		
Pressão [Pa]	Vazão [kg/s]		Vazão mássica de referência q_m	
$1,1 \cdot 10^5$	0,002	0,0044	$\pm 3,1 \cdot 10^{-3} q_m$	$\pm 3,4 \cdot 10^{-3} q_v$
$30 \cdot 10^5$	0,0044	8,61	$\pm 1,19 \cdot 10^{-3} q_m$	$\pm 2,4 \cdot 10^{-3} q_v$

As incertezas de medição são dadas na tabela 4.5 para temperatura de

gás entre 18°C e 22°C (gás natural), tendo a massa específica um valor típico de $\rho_n = 0,776 \pm 0,040 \text{ kg/m}^3$.

4.5.5.4

Incertezas padrão

As variáveis da entrada para a calibração de um medidor de fluxo do tipo bocal sônico que opera com gás natural são: a temperatura, pressão, volume, massa específica, fator de compressibilidade e a natureza do método de cálculo. A determinação da incerteza é desenvolvida em duas etapas. A primeira descreve a calibração de um bocal sônico na bancada primária enquanto a segunda etapa faz uso de alguns valores de saída da primeira etapa, considerando-os valores da entrada. Ou seja, referem-se à calibração de medidores de fluxo de gás nas bancadas secundárias, tanto para gás natural e para o ar. Embora o procedimento da calibração permaneça sempre o mesmo para as bancadas secundárias, as incertezas padrão dependem do fluido de trabalho. Todas essas incertezas - do tipo “A” ou do tipo “B” - são avaliadas de acordo com o ISO GUM [34].

Somente a incerteza padrão associada à medição da massa específica é avaliada por ambos os métodos, isto é, parcialmente por uma análise estatística. A incerteza do tipo “A” para a incerteza padrão na medição da massa específica é aplicada devido a diversas observações independentes que foram realizadas nas mesmas condições de medição. As demais incertezas são obtidas a partir dos dados fornecidos na calibração pelo Instituto Nacional de Metrologia da França, o LNE [14].

Nas bancadas secundárias, a vazão mássica gerada por um bocal sônico é calculada a partir das seguintes condições: de estagnação “ P_0 ” e “ ρ_0 ”, do coeficiente real do gás “ C_R ” e do coeficiente de “ $A \cdot C_D$ ”, este correlacionado ao número de Reynolds, usando-se um processo iterativo. O coeficiente “ $A \cdot C_D$ ” dos bocais sônicos é influenciado pelo número de Reynolds (notadamente pela viscosidade). Em uma faixa completa da calibração, o deslocamento dos valores do coeficiente de “ $A \cdot C_D$ ” não excedem 0,5%. Neste caso, a incerteza do cálculo da viscosidade resulta em uma adição da incerteza na ordem de 0,025% na vazão mássica gerada por um bocal sônico. Quando diversos bocais são utilizados, as incertezas associadas são menores do que a incerteza de um único bocal. As quantidades da entrada são correlacionadas à expressão para a incerteza padrão combinada “ $uc(y)$ ” [20] e calculado com base no ISO GUM [34], resultando em:

$$u_C^2(y) = \sum_{i=1}^n c_i^2 \cdot u^2(x_i) + 2 \cdot \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n c_i \cdot c_j \cdot u(x_i)u(x_j)r(x_i, x_j) \quad (4-5)$$

No caso de combinação de bocais diferentes, o coeficiente de correlação resulta mais elevado, para tal utiliza-se o valor unitário. Utilizando-se esta consideração para um ou vários bocais para a equação 4-5, a incerteza associada à vazão mássica total é obtida pela seguinte expressão:

$$u_c^2(y) = \left(\sum_{i=1}^n c_i \cdot u(x_i) \right)^2 \quad (4-6)$$

4.6

A estratégia brasileira para medição de vazão de gás em alta pressão

Gestor do sistema metrológico brasileiro, o Inmetro está desenvolvendo uma infra-estrutura laboratorial para medição dinâmica de fluidos no Campus do Inmetro em Xerém e apoiando a implantação de laboratórios de vazão e de velocidade de fluidos no País. Para tal conta com suporte dos recursos da Finep e da Petrobras através da Rede Temática em Metrologia regulamentada pela ANP. Já foram aprovados seguintes projetos:

- Implementação de infra-estrutura laboratorial para prover rastreabilidade de medidas materializadas de volume e de provadores. Aprovado em outubro de 2006 pela ANP. Recurso da Rede Temática de Metrologia da Petrobras, investimento acordado em 1 milhão de reais.
- Implantação de infra-estrutura laboratorial para prover rastreabilidade na medição de velocidade de escoamentos de fluidos. Aprovado em outubro de 2006 pela ANP. Recurso da Rede Temática de Metrologia da Petrobras, investimento orçado em 3 milhões de reais. Projeto em cooperação com o Laboratório de Turbulência da COPPE.
- Implantação de Laboratório de Velocidade de Fluidos. Convênio FINEP, investimento orçado em 3 milhões de reais. Projeto em cooperação com o Laboratório de Turbulência da COPPE.
- Projeto de laboratório de vazão de óleo do IPT, que conta com recursos de aproximadamente de 5,4 milhões de reais da Rede Temática em Metrologia.
- Desenvolvimento de laboratório de vazão de gás natural com circuito fechado, com a vazão e pressão controlados. O laboratório será instalado no “Sítio de Testes” em Macaíba (RN), ao lado do laboratório de vazão de gás natural a alta pressão. O projeto contará com recursos da Petrobras

via Rede Temática de Metrologia da Petrobras, regulamentada pela ANP. O executor do projeto é o CTGÁS, tendo o Inmetro como co-executor. O recurso de 8 milhões de reais foi obtido da Rede Temática de Metrologia da Petrobras. Os medidores de vazão padrão serão rastreados ao NMI da Holanda [38].

4.6.1

O laboratório do IPT/SP para medição de vazão

O conjunto de laboratórios de calibração e ensaios do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) integra o Sistema Nacional de Metrologia e Qualidade Industrial (SINMETRO). É um laboratório acreditado pelo Sistema Brasileiro de Acreditação que possui reconhecimento internacional. O Laboratório de Vazão de Gás do IPT possui também acreditação pelo DKD (o serviço alemão de calibração) para medição de vazão de gás e calibração de medidores. A figura 4.13 ilustra de forma esquemática a capacitação laboratorial em vazão de gás do IPT.

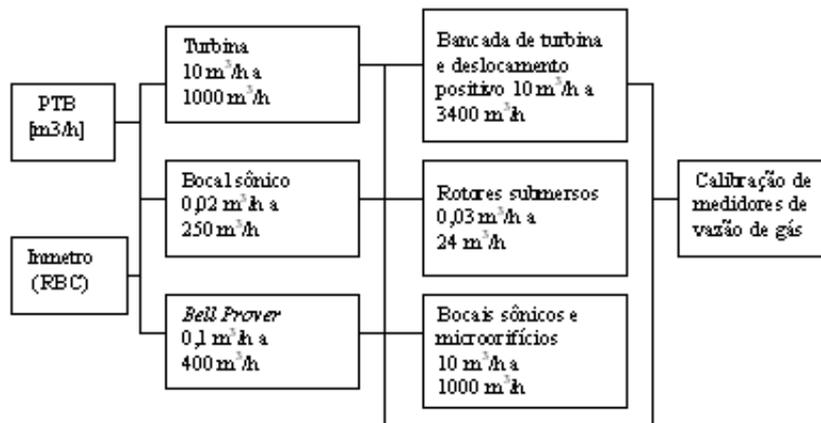


Figura 4.13: Capacitação do laboratório de vazão de gás do IPT

O fluido de trabalho do Laboratório de Vazão de Gás do IPT é o ar, operando nas condições ambientais (pressão, temperatura). A bancada de calibração de alta vazão possui três turbinas e três medidores do tipo deslocamento positivo, a vazão de operação está na faixa de 10 m³/h a 3.400 m³/h, diâmetros de até 12 pol, “provador de campânula” como padrão de referência (500 litros e 4.000 litros de capacidade) com incerteza de 0,17% associada à medição da vazão. A figura 4.14 ilustra as bancada de testes para calibração de medidores de gás do Laboratório de Vazão de Gás do IPT.

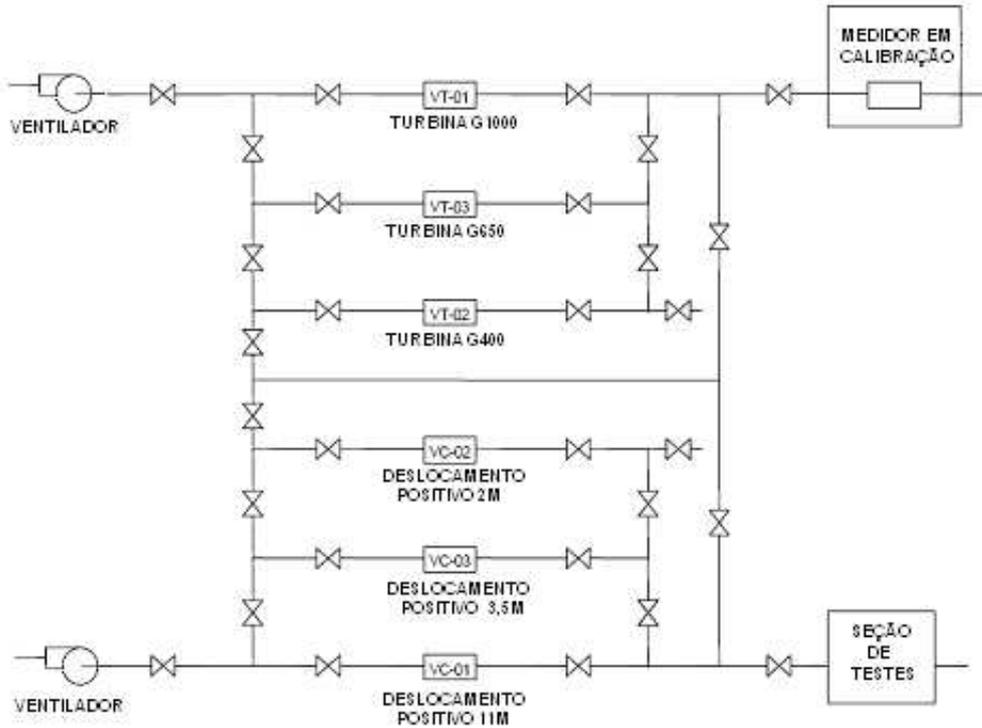


Figura 4.14: Bancada para calibração de medidores de gás do IPT

4.6.2

O laboratório Sítio de Testes do CTGÁS

Instalado no Rio Grande do Norte, o CTGÁS [39] instalou um Sítio de Testes para avaliação metrológica de instrumentos de medição de vazão de gás natural com o propósito primordial de dar suporte à medição legal da vazão relacionada a contratos de transferência de custódia. Este empreendimento tem como parceiros o CTGÁS, a FINEP e a Petrobras. Com tal instalação, o CTGÁS pretende disponibilizar serviços hoje inexistentes na América Latina, disponibilizando uma infra-estrutura laboratorial para medição de vazão de gás comparável às melhores instalações hoje em operação.

No Brasil, as calibrações laboratoriais são atualmente realizadas utilizando-se o ar como fluido de trabalho, sob condições próximas às de atmosfera, o que pode introduzir erros que são contabilizados como perdas significativas para a medição.

A partir da utilização de uma bancada de calibração que trabalhe nas condições operacionais de pressão e vazão, condições muito próximas daquelas encontradas em campo, atendendo medidores de diversas tecnologias e diâmetros, o CTGÁS capacita-se para realizar a avaliação metrológica de medidores de vazão de gás notadamente os medidores com maior confiabilidade metrológica.

A capacidade de calibração na faixa de pressão de operação varia de 50 bar a 60 bar, para uma faixa de temperatura de operação que varia de 20°C a 30°C, atendendo medidores cujos diâmetros variam de 4 polegadas a 16 polegadas, com capacidade de vazão máxima de até 50.000 m³/h.

4.6.2.1

Produtos e resultados esperados

A implantação do Sítio de Testes do CTGÁS tem por objetivos específicos:

- estudar novos conceitos de medição utilizados para transferência de custódia;
- disponibilizar um padrão primário para a medição de vazão de gás natural;
- prover acesso a rastreabilidade para medição, ensaios e calibrações de medidores de vazão;
- obter a acreditação do laboratório junto ao Inmetro capacitando-se para prestar de serviços internacionalmente reconhecidos de calibração de medidores de gás natural;
- servir como agente aglutinador dos laboratórios de medição de vazão de gás existentes no País, auxiliando o Inmetro e colaborando para a realização de novos programas interlaboratoriais;
- realizar ensaios (inclusive de longa duração) em medidores de vazão de forma a verificar o seu desempenho metrológico segundo condições adversas de operação.
- realizar ensaios para aprovação de modelos e verificação metrológica legal de medidores de vazão.

4.6.2.2

Características operacionais do Sítio de Testes do CTGÁS

As alterações do trajeto do gasoduto denominado Nordeste bem como a perda de carga que lhe é agregada não deverão interferir nas atividades normais do transporte e entrega do gás natural.

As condições de operação atuais no gasoduto Nordeste são:

- vazão média do gasoduto Nordeste 1.200.000 m³/dia;
- temperatura do gás de 23 °C;
- pressão aproximada de operação de 50 kgf/cm².

Foi instalado um desvio no gasoduto Nordesteão da Petrobras que transporta o gás natural proveniente da UPGN de Guamaré, localizado na área rural da cidade de Macaíba no Rio Grande do Norte, junto à estação de entrega da companhia distribuidora de gás Potigás, no km 140 do gasoduto.

O sistema é inter-travado com a operação do gasoduto, garantindo que problemas durante ensaio de medição sejam rapidamente solucionados, isolando-se o Sítio de Testes do restante do gasoduto, permitindo a operação do gasoduto sem qualquer interferência. Carretéis e junta telescópica são utilizados para o ajuste longitudinal do tramo de ensaio.

O sistema de medição permitirá que várias tecnologias de medição sejam validadas, quaisquer que sejam os medidores de vazão (tipo turbina, Coriolis, ultra-sônico, rotativo e placa de orifício). A medição da composição do gás natural será realizada utilizando-se um cromatógrafo de processo com interface de comunicação para o sistema de aquisição de dados.

A instrumentação assistida prevê um sistema supervisor, que também deverá incluir o controle de ensaios para permitir o registro do histórico automático do uso dos medidores padrão utilizados. A quantidade de medidores padrão permite que o Sítio de Testes opere na vazão máxima do gasoduto. Para isso, são utilizados medidores padrão em paralelo que consigam atender à essa vazão.

4.6.2.3

Fases de implantação do Sítio de Testes

- Fase 1: Construção do manifold e desvio do gasoduto;
- Fase 2: Construção do loop de calibração;
- Fase 3: Desenvolvimento do padrão primário.

Fase 1: construção do manifold de ensaio e desvio do gasoduto

Nesta fase foi realizado o desvio do gasoduto e a montagem do manifold de calibração da instalação. Para a operação da instalação, será necessária a interação com a companhia transportadora, visto que o fluxo do gasoduto estará sendo desviado momentaneamente durante a calibração. A conclusão desta fase permitirá que sejam calibrados medidores, obtendo-se vazão entre zero e a vazão máxima do gasoduto, via acionamento das válvulas de controles. Os ensaios e as calibrações serão feitos somente nas condições de pressão e temperatura do gasoduto disponível no momento da operação. A figura 4.15 apresenta o desenho esquemático da bancada do Sítio de Teste na fase I.

Fase 2: disponibilização do *loop* de calibração

O *loop* de calibração pode ser entendido como um sistema fechado montado para a execução de calibração com escoamento de gás natural. Por

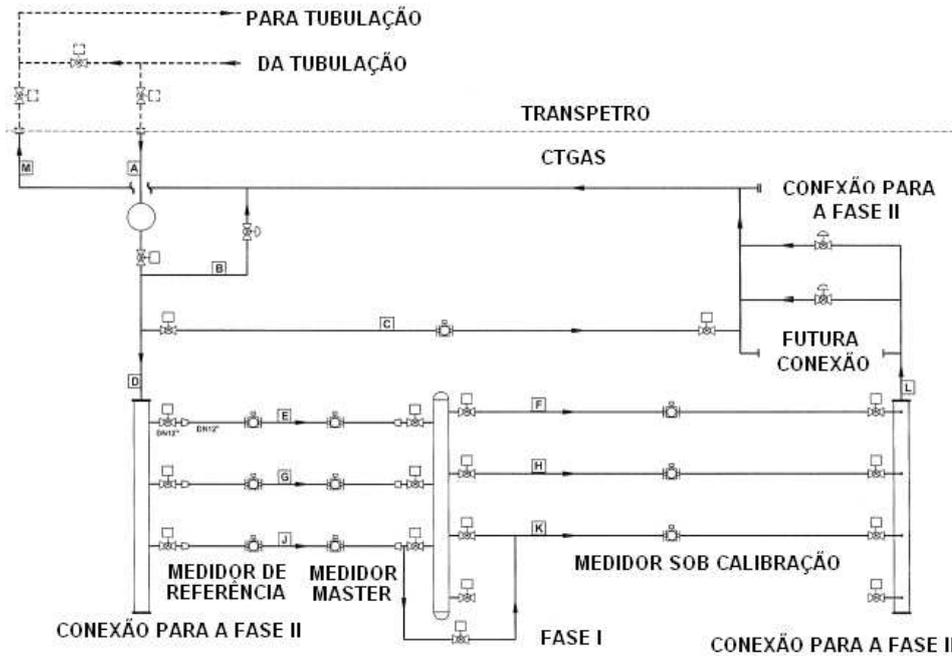


Figura 4.15: Desenho esquemático da bancada de provas do Sítio de Testes. (Fonte: modificado de [39])

se tratar de um sistema fechado, não traz efeitos indesejáveis à operação do gasoduto, fazendo com que o Sítio de Testes possa ser entendido como um consumidor de gás natural, que posteriormente pode vir a devolver parte do gás utilizado. Assim, a operação do Sítio de Testes passa a ser independente do gasoduto, trazendo um caráter menos cooperativo a instalação, como normalmente ocorre nos EUA, onde os laboratórios não fazem parte de companhias produtoras, transportadoras e distribuidoras, cumprindo o papel de consumidor de gás natural.

A maior vantagem de implantação do *loop* de calibração está na disponibilização de instalação capaz de atuar numa ampla faixa de vazão, pressão e temperatura operacionais, passando a concorrer num segmento importante de prestação de serviços na América Latina.

Fase 3: desenvolvimento de padrão primário de referência

Com o propósito de assegurar independência para o Sítio de Testes, o projeto de sua construção prevê acesso da cadeia de rastreabilidade ao SI. Pretende-se, assim, que o CTGÁS busque reconhecimento nacional e sul-americano para atuar como referência para assuntos de medição de vazão de gás natural.

O desenvolvimento do padrão primário passa necessariamente pelas seguintes etapas:

- Definição do tipo de padrão primário a ser construído;

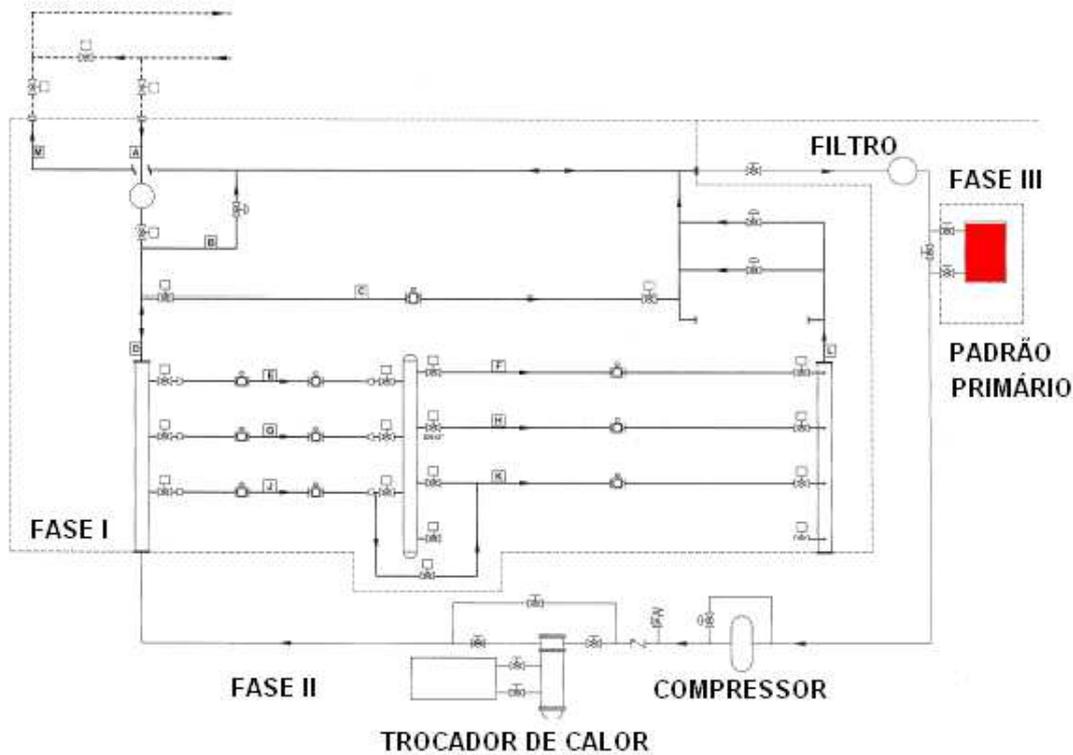


Figura 4.16: Desenho esquemático bancada com loop e inclusão do padrão primário. (Fonte: modificado de [39])

- Contratação do projeto básico do padrão;
- Construção do padrão primário;
- Levantamento da incerteza associada à medição e criação dos procedimentos de calibração segundo normas e práticas internacionais.

A figura 4.16 apresenta o desenho esquemático da bancada do Sítio de Teste contemplando todas as fases previstas.

4.7

Complementaridade da capacitação laboratorial para calibração de medidores de gás para grandes vazões

Estudadas as características dos principais laboratórios primários para medição de vazão de gás em operação no mundo, o presente tópico da Dissertação confronta os dados para analisar as complementaridades e superposições dessas melhores capacidades de medição. As melhores capacidades de medição de vazão desses laboratórios estudados estão resumidas na tabela 4.6 e ilustradas nas figuras 4.17 e 4.18.

Especialmente nas faixas de vazão mais elevadas (acima de 3000 m³/h e pressão de 20 bar) poucos são os laboratórios que possuem bancadas de calibração com essa capacidade. Alguns desses laboratórios possuem capacidades

Tabela 4.6: Principais instalações laboratoriais de calibração de medidores de gás a alta pressão

PAÍS	LABORATÓRIO	GÁS	PRESSÃO OPERACIONAL [bar]	VAZÃO OPERACIONAL [m ³ /h]	INCERTEZA ESTIMADA [%]
Alemanha	PIGSAR	GN	6 - 51	144 – 300.000	0,18
Brasil	IPT	Ar	ambiente	10 – 3.400	0,17%
	CTGÁS	GN	50 - 60	50.000	-
Canadá	Transcanada	GN	70 bar	50 000	0,22
Dinamarca	Danish Reference Laboratory Gaseous Flow	Ar	0 – 800 kPa	0,025 – 4.000	
EUA	CEESI	GN	70 bar	34 000	0,2%
	SwRI – Southwest Research Institute	GN	140 – 1450 kPa 1035 – 8275 kPa	13.000 200.000	
França	PISCINE/LADG	GN	6 - 55	9 – 10.000	0,3%
	CESAME/LNE		1 - 50	9 – 80.000	0,3%
	PLATE	GN	0,1 - 40	9 – 40.000	
	COKE	GN	0,1 - 40	9 – 40.000	
Holanda	NMI/Dordrecht	GN	atm - 9	1 – 400	0,07 – 0,1
	NMI/Groningen	Ar e GN	9 - 36	45 – 36.000	
	NMI /Bergum	GN	9 - 51	100 – 132.000	0,18 – 0,21
	NMI – Westerbork	GN	60	48.000 – 2.400.000	0,20
Noruega	K-Lab	GN	10 a 156 bar	290 000	0,3%
UK	NEL	Ar	2 a 50 bar	15 000	0,3%

extremamente elevadas, a exemplo de Westerbork (Holanda), CEESI (EUA) e TCC (Canadá), que operam em uma ampla faixa de vazão e em uma faixa limitada de pressão, porém elevada. A bancada do Laboratório PIGSAR (Alemanha) opera em uma ampla faixa de vazão e pressão, sobrepondo com a de alta pressão do *Metering Research Facility* (MRF) do *Gas Technology Institute* (GTI), e a bancada em Chengdu (China), que dispõe de rastreabilidade ao NMI (Beijing). A bancada do Laboratório PIGSAR (Alemanha) sobrepõe também a do Didsbury (o padrão nacional do NRC no Canadá). Todos os valores mostrados nas figuras 4.17 e 4.18 são resultados da avaliação de potencialidade da calibração e da melhor capacidade de medição declarada (CMC) desses laboratórios.

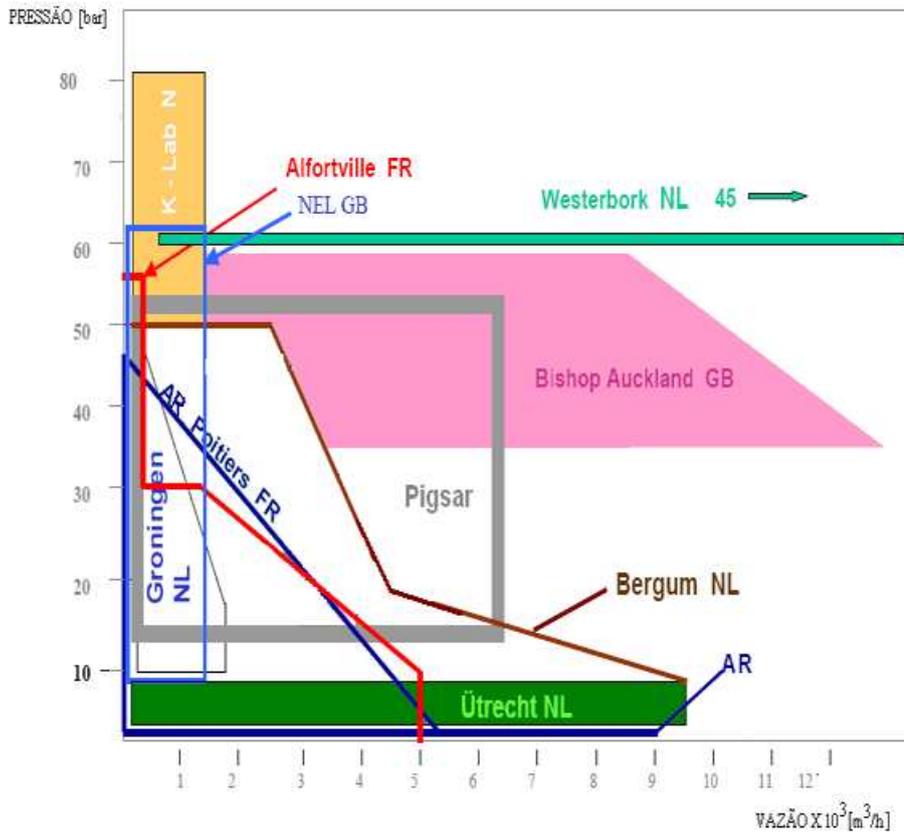


Figura 4.17: Capacitação de laboratórios da Europa para medição vazão de gás natural em alta pressão. Fonte: modificado de [17]

A figura 4.17 ilustra as complementaridades e superposições (metrologia requer redundância!) das bancadas de calibração dos laboratórios responsáveis pela medição de vazão em alta pressão na Europa (Alemanha, Holanda França, Noruega e Grã Bretanha). A capacidade de medição do Laboratório PIGSAR (Alemanha) sobrepõe outras bancadas européias, exceto as bancadas holandesas para alta pressão do laboratório NMi localizadas em Utrecht (Holanda) para alta vazão e de Westerbork (Holanda).

A figura 4.18 ilustra as potencialidades das bancadas de calibração dos laboratórios para medição de vazão de gás em alta pressão em operação fora da Europa (EUA, Canadá, China, Coreia, e Brasil).

Observa-se a capacidade de operação do Sítio de Teste do CTGÁS em Macaíba/RN, no Brasil, operando numa faixa de pressão de 50 bar a 60 bar e uma faixa de vazão entre 1.500.000 m^3/dia a 2.000.000 m^3/dia de gás natural.

A sobreposição (*overlap*) das capacidades de medição definidas nas condições operacionais dos laboratórios de calibração de medidores de vazão de gás natural constitui condição fundamental para o processo de harmonização dos valores de referência (valores harmonizados) do volume de gás natural a ser

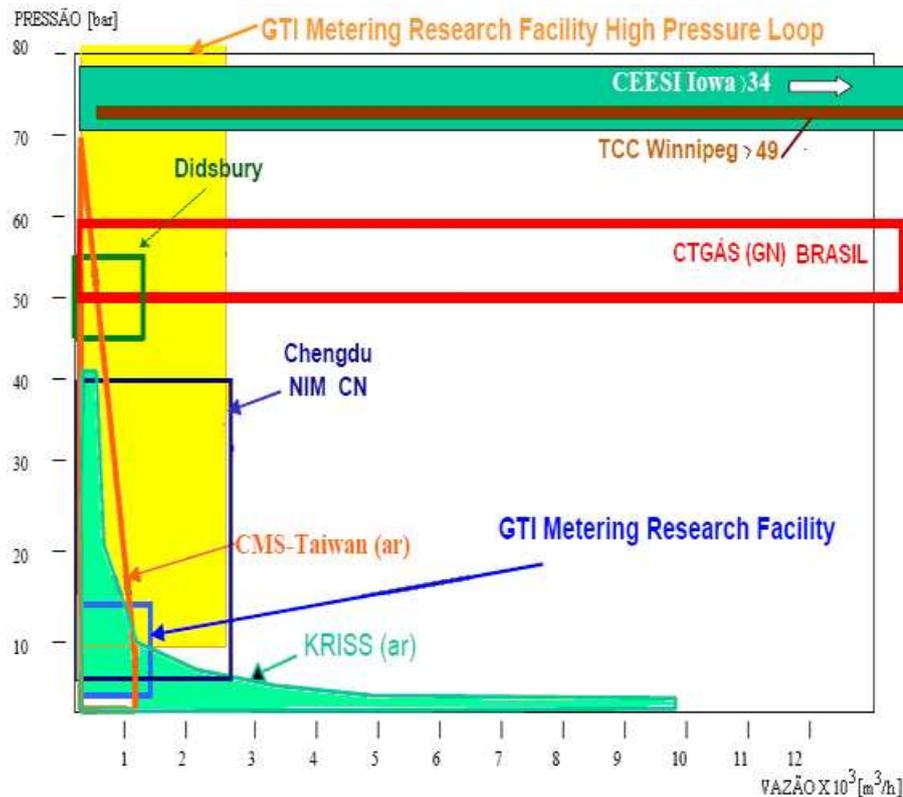


Figura 4.18: Capacitação de laboratórios da Europa para medição vazão de gás natural em alta pressão. (Fonte: modificado de [17])

adotado pelos laboratórios que participam desse processo. Importante registrar que certo grau de redundância é sempre desejável já que facilita o processo de comparação. A complementaridade das capacidades de medição nas condições operacionais dos laboratórios de calibração de medidores de vazão em relação à pressão e vazão de operação fornece a possibilidade de atender demandas de calibração para quase todos os tipos de medidores de vazão e faixas de operação.

De fato não existe um laboratório de vazão de gás que atenda a todas as vazões e pressões em que operam os medidores de vazão de gás natural, devido ao alto investimento necessário e do espaço físico para a sua instalação.

4.8

Síntese das incertezas declaradas dos laboratórios de vazão

A rastreabilidade das medições de vazão de gás ocorre quando todas as etapas da realização primária das unidades que lhe dão origem são realizadas, avaliadas as incertezas associadas a cada uma das etapas do processo de medição. Um padrão de referência em uma instalação de calibração de medidor de vazão de gás deve ser rastreado e ter uma incerteza declarada dentro de

níveis aceitáveis, quer do ponto de vista técnico ou econômico. A incerteza do padrão de referência é o ponto de partida para se determinar a incerteza associada ao medidor de vazão sob calibração valor que é então indicado no respectivo certificado de calibração.

O CMC que é definido como a melhor capacidade de medição e incerteza está normalmente disponível aos clientes de uma instalação de calibração. Valores típicos de incertezas declaradas dos laboratórios que possuem instalação de calibração de medidores de vazão de gás natural em alta pressão estão ilustrados na figura 4.19. Ressalta-se que dentre os laboratórios apresentados na figura o laboratório da Transcanada é o único que não possui um padrão primário para medição de vazão de gás natural [39].

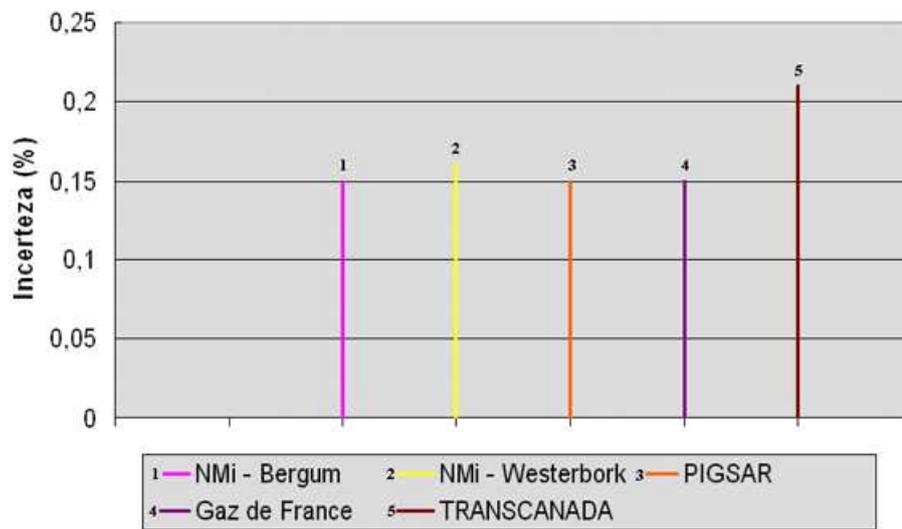


Figura 4.19: Incertezas praticadas por diferentes laboratórios primários capacitados para medição de vazão