

4 Resultados Experimentais

Este capítulo apresenta os valores apresentados pelas ferramentas de diagnóstico coletadas durante a calibração e durante a operação dos medidores, comparando-os com a metodologia apresentada no Cap. 3. Em sua maioria são apresentados os resultados comparativos de apenas um dos medidores utilizados, neste caso o de número de série 08-060434 (que será identificado apenas como “medidor 08-060434”). Quando relevante, são apresentados os dados dos outros dois medidores, cujos números de série são 08-060435 e 08-060436. Ressalta-se que todos os gráficos são apresentados exatamente como disponibilizados pelo equipamento, através de seu programa de computador, e em virtude disto alguns parâmetros estão escritos na língua inglesa.

Apresenta-se ainda, neste capítulo, os resultados das estimativas de incerteza para as medições de vazão (instantânea) e volume (através da vazão média) para o medidor 08-060434.

4.1. Resultados das ferramentas de diagnóstico

A seguir são apresentados os resultados dos dados coletados, tanto durante a calibração em laboratório quanto durante sua operação no campo, relativos às ferramentas de diagnóstico disponíveis.

4.1.1. Medição dos tempos de trânsito

O Anexo C apresenta o certificado do teste de zero realizado pelo fabricante. Neste documento é possível verificar os limites estabelecidos pelo fabricante a diferença entre os tempos de trânsito t_{AB} e t_{BA} em condições de vazão igual a zero: 0,050 μ s. É possível verificar ainda que o medidor foi aprovado, apesar dos valores medidos não estarem disponíveis.

A Tab. 6 apresenta os resultados das medições dos tempos de trânsito realizadas em campo por cada um dos 8 transdutores do medidor 08-060435 em condições de vazão igual a zero. Os dados foram coletados com o medidor

instalado na Estação de Cacimbas durante um momento onde não existia escoamento de gás, e apesar de não poder ser considerado um teste de vazão zero, uma vez que as condições de teste não estavam sendo controladas, os resultados mostram uma boa estabilidade dos tempos de trânsito medidos, com diferenças bem abaixo dos 0,050 μs para cada corda.

Tabela 6 – Tempos de trânsito, por transdutor, sem escoamento para o medidor 08-060435.

Transdutor	Média dos tempos de trânsito (μs)	
A1	546,124	A1 - A2
A2	546,110	0,014
B1	797,505	B1 - B2
B2	797,531	0,026
C1	798,833	C1 - C2
C2	798,808	0,025
D1	547,665	D1 - D2
D2	547,673	-0,008

Onde A1, B1, C1 e D1 representam os transdutores que lançam pulsos em sentido contrário ao sentido do escoamento (*upstream*), e A2, B2, C2 e C2 representam os transdutores que lançam seus pulsos no mesmo sentido do escoamento (*downstream*).

4.1.2. Processamento do Sinal Digital

A avaliação detalhada das ferramentas de diagnóstico discutidas no item 3.2.2 não é possível em função da indisponibilidade de dados que permitam avaliar a detecção do ponto P1. Entretanto, através da análise das Fig. 48 e 49, retiradas do software do medidor, mostra-se que todos os pulsos lançados foram aprovados em todos os testes realizados pela eletrônica do medidor, visto que a *performance*, tanto durante a calibração quanto durante a operação, é igual a 100%.

4.1.3. Processamento de grupos de sinais

A Tab. 7 apresenta os valores médios da *turbulência* em cada corda, determinados conforme a Eq. (25), para o medidor 08-060434 durante a calibração (100% de Q_{max}) e durante a operação. A escolha do ponto de 100% de Q_{max} se deve ao fato de que velocidades mais elevadas do escoamento

implicam em maior turbulência. As Fig. 35, 36 mostram a variação da *turbulência*, por corda, durante o período de tempo em que os dados foram coletados. A Fig. 37 apresenta os dados coletados em operação, porém na mesma base de tempo das corridas realizadas durante a calibração, ou seja, 48 s. As Fig. 38 e 39 mostram a variação da velocidade de escoamento no mesmo período. Nota-se que, apesar da velocidade do escoamento durante a calibração ser maior do que a velocidade de operação, a *turbulência* em operação para a corda A é cerca de 21% maior. Isto pode indicar uma perturbação do escoamento.

Tabela 7 - *Turbulência*, por corda, do medidor 08-060434 durante a calibração (100% de Q_{max}) e durante sua operação.

	Corda A (%)	Corda B (%)	Corda C (%)	Corda D (%)
Calibração	3,72	2,62	2,61	3,62
Operação	4,49	1,47	2,15	2,70

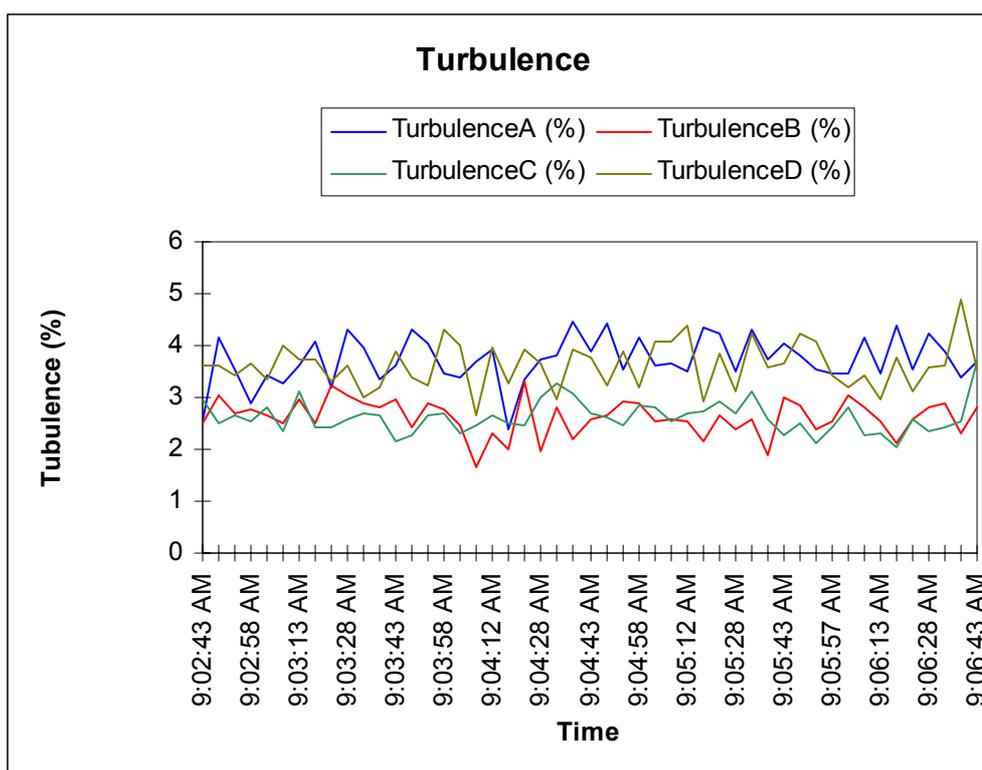


Figura 35 - Variação da turbulência do medidor 08-060434 durante sua calibração (100% de Q_{max}).

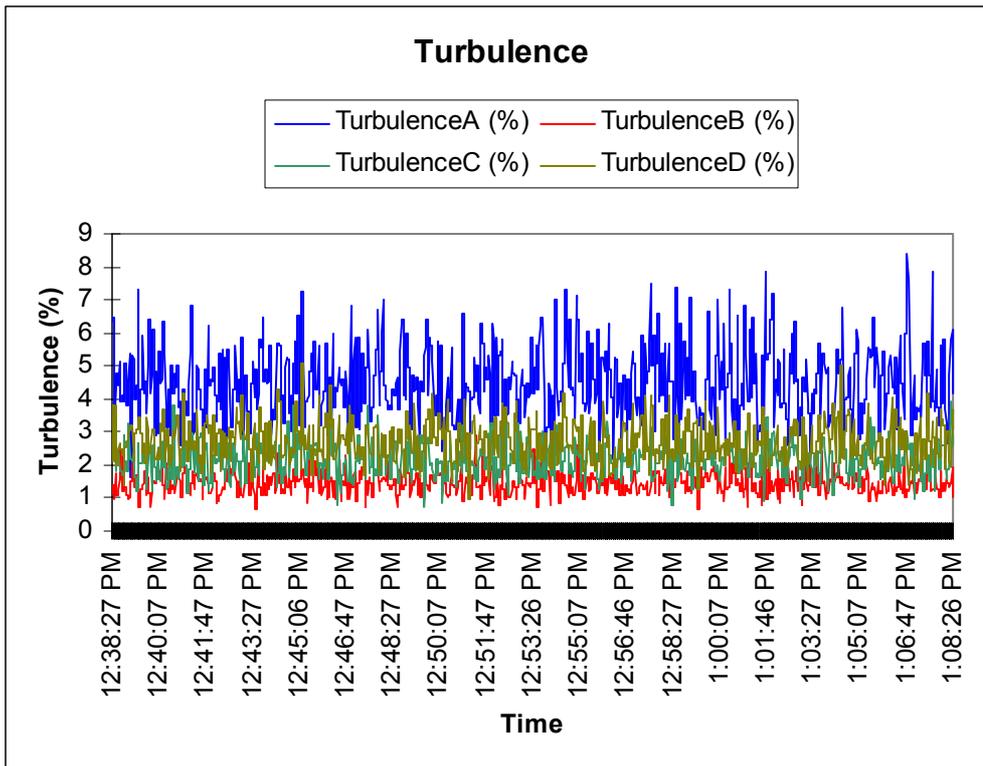


Figura 36 - Variação da turbulência do medidor 08-060434 durante sua operação (tempo total de coleta).

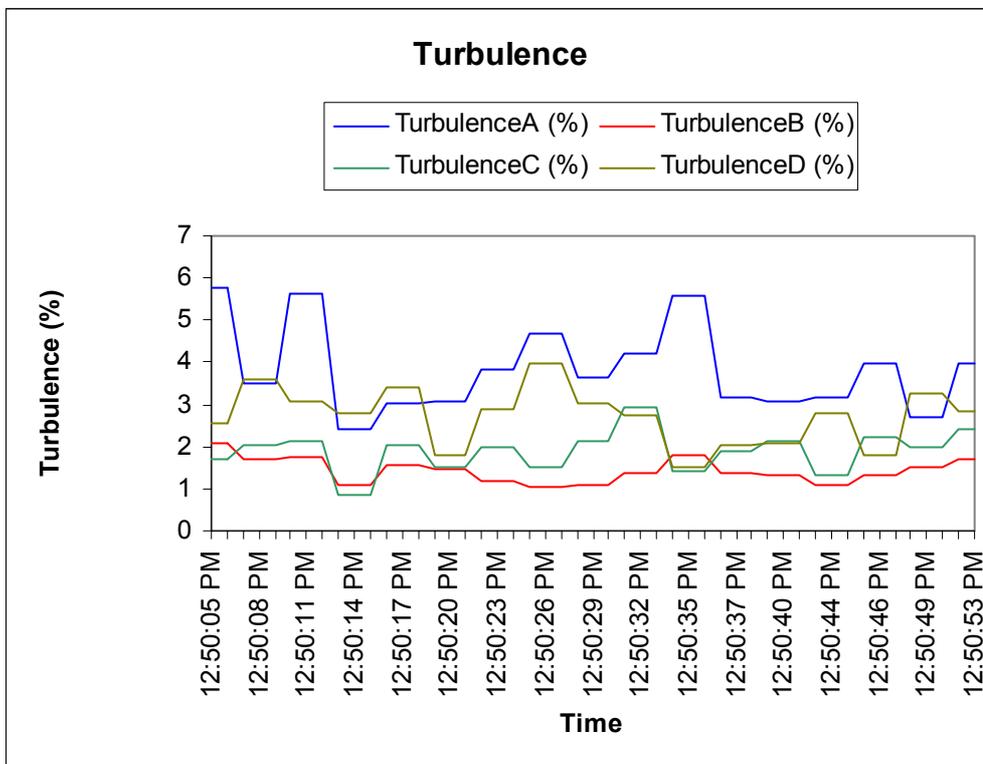


Figura 37 - Variação da turbulência do medidor 08-060434 durante sua operação (48 s).

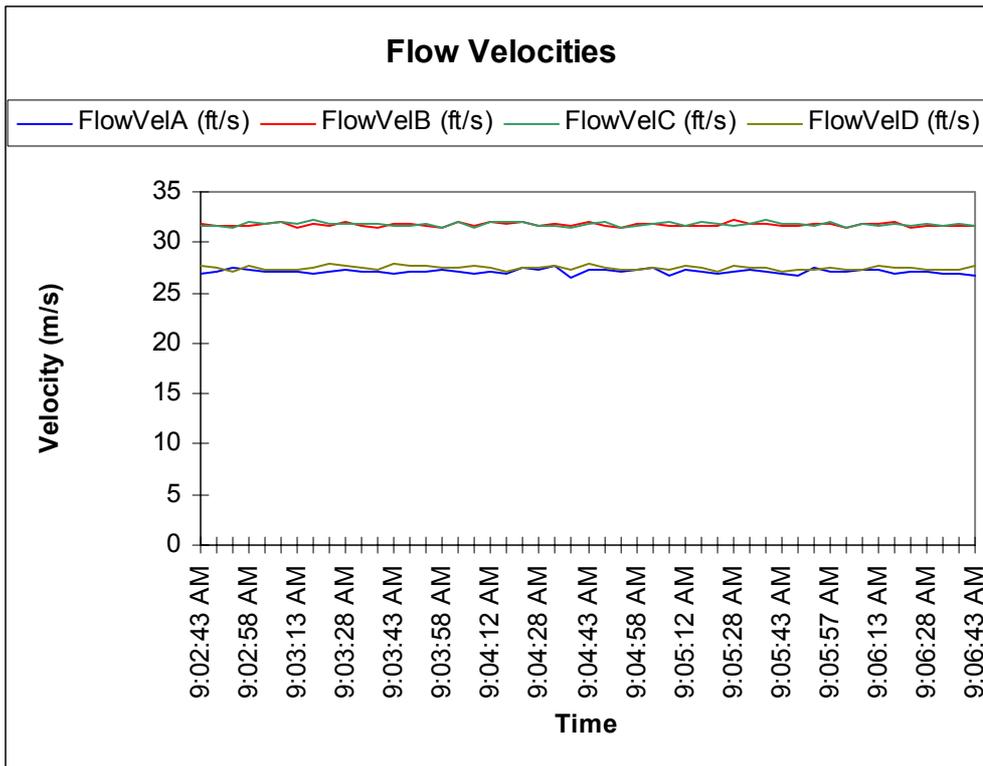


Figura 38 - Variação da velocidade de escoamento do medidor 08-060434 durante sua calibração (100% de Q_{max}).

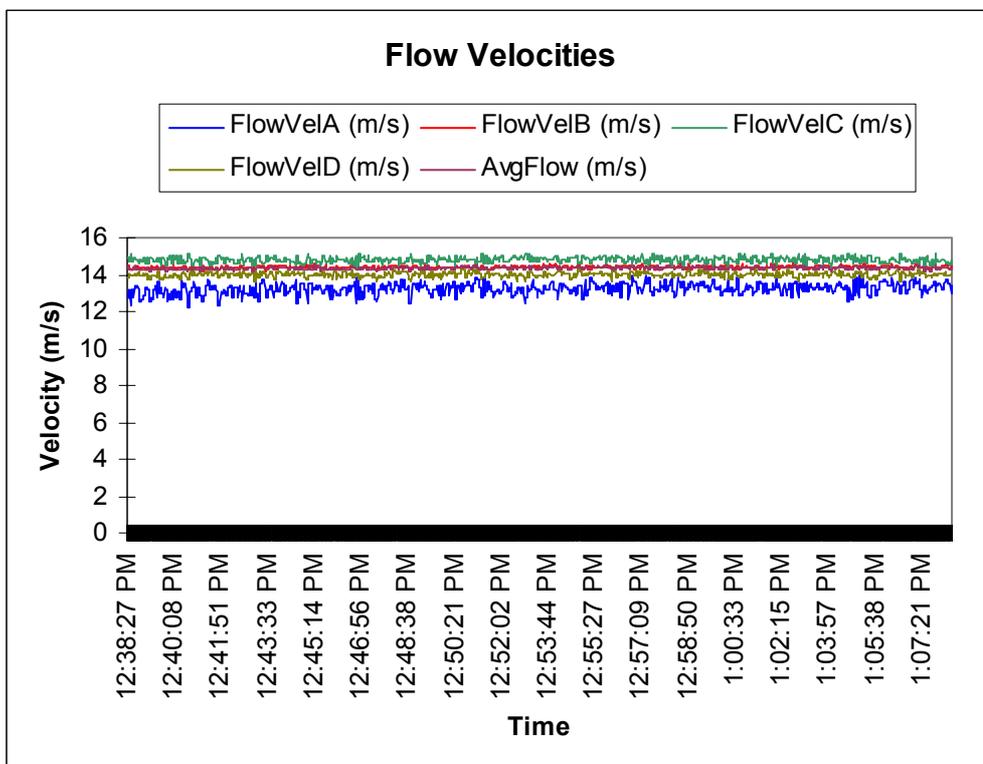


Figura 39 - Variação da velocidade de escoamento do medidor 08-060434 durante sua operação.

Outro critério para o descarte de medições do tempo de trânsito é o desvio padrão dos tempos cronometrados para cada grupo, que não deve ser maior do que 2 μ s. A Tab. 8 apresenta a média dos desvios padrões dos tempos de trânsito dos grupos de valores cronometrados por cada um dos transdutores do medidor 08-060434, durante a calibração (100% de Q_{max}) e durante sua operação, para a mesma faixa de velocidade de escoamento representada na Fig. 39.

Tabela 8 - Valores médios, em μ s, do desvio padrão dos grupos de tempos de trânsitos cronometrados por transdutor, para o medidor 08-060434.

Transdutor	A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2
Calibração	0,81	0,67	1,12	0,82	1,14	0,83	0,81	0,67
Operação	0,42	0,38	0,28	0,25	0,37	0,34	0,30	0,26

Onde A1, B1, C1 e D1 representam os transdutores à jusante do escoamento, e A2, B2, C2 e C2 representam os transdutores a montante.

Verifica-se, neste caso, que todos os valores encontram-se abaixo do limite especificado na literatura [22].

4.1.4. Velocidade do som

A Tab. 9 apresenta a comparação entre as velocidades do som medidas e calculadas, para o medidor 08-060434 durante sua calibração. As Tab. 10 e 11 apresentam a mesma comparação para os medidores 08-060435 e 08-060436.

Tabela 9 - Desvio de SOS para o medidor 08-060434 durante a calibração em escoamento.

Velocidade (m/s)	SOS medida (m/s)	SOS calculada (m/s)	Diferença (%)
0,76	420,86	421,28	-0,099
3,05	421,24	421,61	-0,088
6,10	421,53	421,88	-0,082
12,19	421,55	421,90	-0,083
21,34	421,55	421,93	-0,092
30,48	421,40	421,81	-0,099

Tabela 10 - Desvio de SOS para o medidor 08-060435 durante a calibração em escoamento.

Velocidade (m/s)	SOS medida (m/s)	SOS calculada (m/s)	Diferença (%)
0,76	420,83	421,30	-0,112
3,05	421,21	421,61	-0,096
6,10	421,50	421,88	-0,089
12,19	421,53	421,90	-0,088
21,34	421,52	421,93	-0,098
30,48	421,38	421,81	-0,103

Tabela 11 - Desvio de SOS para o medidor 08-060436 durante a calibração em escoamento.

Velocidade (m/s)	SOS medida (m/s)	SOS calculada (m/s)	Diferença (%)
0,76	421,88	421,45	0,103
3,05	422,04	421,60	0,106
6,10	422,17	421,66	0,121
12,19	422,22	421,80	0,099
21,34	422,10	421,69	0,097
30,48	421,67	421,23	0,104

A análise dos dados apresentados acima mostra alguns valores ligeiramente superiores aos permitidos pela ISO 17089 [23], mas dentro da tolerância permitida pela AGA 9 [7]. Percebe-se ainda uma tendência de valores medidos menores que os calculados para os medidores 08-060434 e 08-060435, e o contrário para o medidor 08-060436; porém pouca variabilidade entre si. Cabe ressaltar que a documentação elaborada pelo cliente [19] exige somente atendimento à AGA 9 [7].

Os itens a seguir apresentam os resultados das demais verificações que podem ser realizadas a partir dos dados de velocidade do som medidos para o medidor 08-060434.

4.1.4.1.

Comparação entre os valores medidos em cada corda

As Fig. 40 e 41 mostram, respectivamente, a variação da SOS em cada corda durante sua calibração (5% de Q_{max}) e durante a operação. Os valores médios e as diferenças são apresentados na Tab. 12.

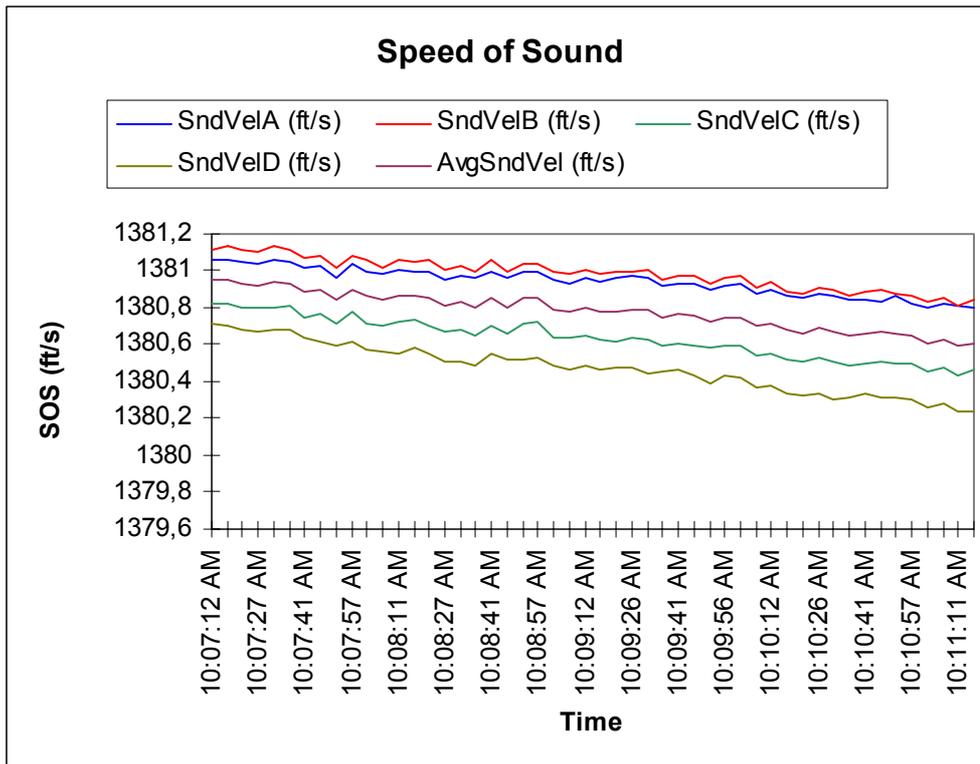


Figura 40 - Variação da SOS, por corda, do medidor 08-060434 durante sua calibração (5% de Q_{max}).

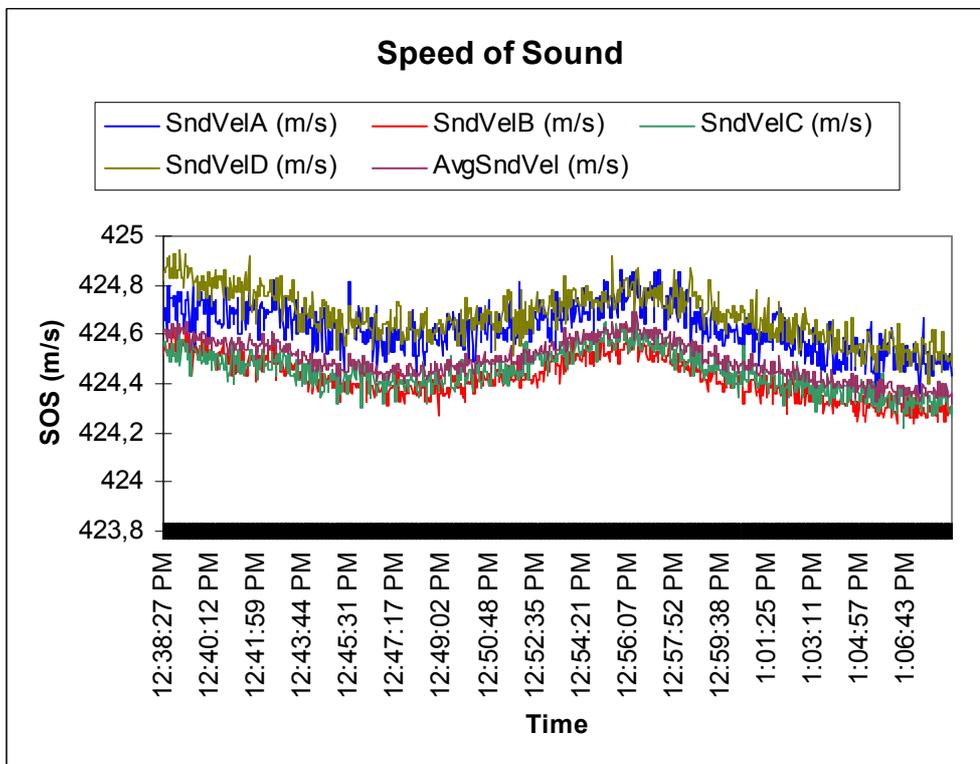


Figura 41 - Variação da SOS, por corda, do medidor 08-060434 durante sua operação.

Tabela 12 - Velocidades do som em cada corda e diferenças entre os valores medidos (em m/s), para o medidor 08-060434.

Calibração	SOS		Corda A	Corda B	Corda C	Corda D
			420,91	420,92	420,82	420,77
	Diferenças					
	A - B	A - C	A - D	B - C	B - D	C - D
	-0,01	0,09	0,14	0,11	0,16	0,05
Operação	SOS		Corda A	Corda B	Corda C	Corda D
			424,63	424,42	424,45	424,68
	Diferenças					
	A - B	A - C	A - D	B - C	B - D	C - D
	0,21	0,18	-0,05	-0,03	-0,26	-0,23

Os resultados se mostram dentro do limite estabelecido pelo fabricante, que é de 0,3048 m/s (1 ft/s), e em virtude disto espera-se que todas as cordas estejam funcionando corretamente.

A opção por apresentar os valores da calibração para 5% de Q_{\max} se dá em virtude de que, neste caso, baixas velocidades podem resultar em mistura insuficiente da composição do gás e, principalmente, falta de uniformidade da temperatura ao longo da extensão vertical do tubo. A falta de uniformidade da composição e da temperatura poderia resultar em variações significativas das velocidades do som medidas em cada corda, o que não se observa neste caso. Isto pode ser atribuído ao fato de que os dados foram coletados durante a calibração em laboratório, onde se espera que as condições de mistura na composição do gás e uniformidade da temperatura sejam bem controlados, mesmo em condições extremas.

Por outro lado, a Fig. 40 mostra uma redução das velocidades do som durante a calibração. Considerando que não houve mudanças na composição do gás durante a calibração, e analisando a Eq. (22), pode concluir que houve uma redução na temperatura do gás, que pode ter sido causada, por exemplo, em virtude de uma troca térmica entre o gás e o meio ambiente.

Na Fig. 41 também se verifica uma variação entre as velocidades do som no decorrer da coleta de dados, que neste caso podem ter ocorrido tanto em função de variações na composição do gás quanto em variações da temperatura do gás. O importante neste caso é que todas as cordas seguem a mesma tendência, mostrando que os resultados podem ser considerados confiáveis.

4.1.4.2. A função Eta (η)

Conforme discutido anteriormente, a correta medição dos tempos de trânsito dos pulsos ultrassônicos lançados a favor e contra o escoamento é, provavelmente, a melhor garantia de que o equipamento opera corretamente. Neste aspecto a função Eta indica se existem medições incorretas dos tempos de trânsito e qual(is) corda(s) apresenta(m) problema(s).

As Tab. 13 e 14 apresentam, respectivamente, os valores de Eta para o medidor 08-060434 durante a calibração no CEESI e em operação no Terminal de Cacimbas.

Percebe-se que os valores se mantem abaixo de $\pm 2 \mu\text{s}$ durante a calibração, com tendência de elevação com o aumento da velocidade do escoamento. Durante a operação, por sua vez, os valores apresentados se mostram ligeiramente maiores, porém dentro dos limites estabelecidos na literatura [22]. Tal diferença pode ser atribuída a variações na temperatura e na composição do gás, fato que não se observa sob condições de laboratório.

Tabela 13 - Valores de Eta para o medidor 08-060434 durante sua calibração.

Velocidade (m/s)	Eta (μs)				
		BA	BD	CA	CD
0,76	Média	0,1	0,6	-0,4	0,2
	Mínimo	0,0	0,5	-0,4	0,1
	Máximo	0,1	0,7	-0,3	0,2
3,05	Média	0,1	0,3	-0,2	0,0
	Mínimo	0,1	0,3	-0,2	0,0
	Máximo	0,1	0,3	-0,2	0,0
6,10	Média	0,1	0,3	-0,2	0,0
	Mínimo	0,1	0,2	-0,2	0,0
	Máximo	0,1	0,3	-0,1	0,0
12,19	Média	0,0	0,1	-0,1	0,0
	Mínimo	0,0	0,1	-0,2	-0,1
	Máximo	0,1	0,2	-0,1	0,0
21,34	Média	-0,3	-0,1	-0,3	-0,2
	Mínimo	-0,4	-0,2	-0,4	-0,2
	Máximo	-0,2	0,0	-0,2	-0,1
30,48	Média	-0,7	-0,5	-0,6	-0,5
	Mínimo	-0,8	-0,6	-0,7	-0,6
	Máximo	-0,5	-0,4	-0,5	-0,3

Os valores apresentados nas Tab. 13 e 14 mostram que o medidor está cronometrando corretamente os tempos de trânsito e, portanto, as velocidades medidas ao longo de cada caminho acústico estão corretas. Desde que a correlação entre a velocidade média medida e a velocidade média real do

escoamento, representado por K_n e calculada através da Eq. (15), esteja correta, pode-se garantir com elevada confiança que o medidor opera corretamente.

Tabela 14 - Valores de Eta para o medidor 08-060434 em operação.

Velocidade (m/s)	Eta (μ s)				
	BA	BD	CA	CD	
14,35	Média	-0,8	-1,0	-0,7	-0,9
	Mínimo	-0,9	-1,2	-0,9	-1,3
	Máximo	-0,5	-0,9	-0,6	-0,7

4.1.5. Perfil de Velocidades

As Fig. 42 e 43 mostram as variações de *cross flow*, assimetria e Fator de Perfil, conforme definições do item 3.2.5, para dados coletados durante a calibração e com o medidor operando na Estação de Cacimbas. A Tab. 15 apresenta os valores médios, máximos e mínimos para os mesmos dados.

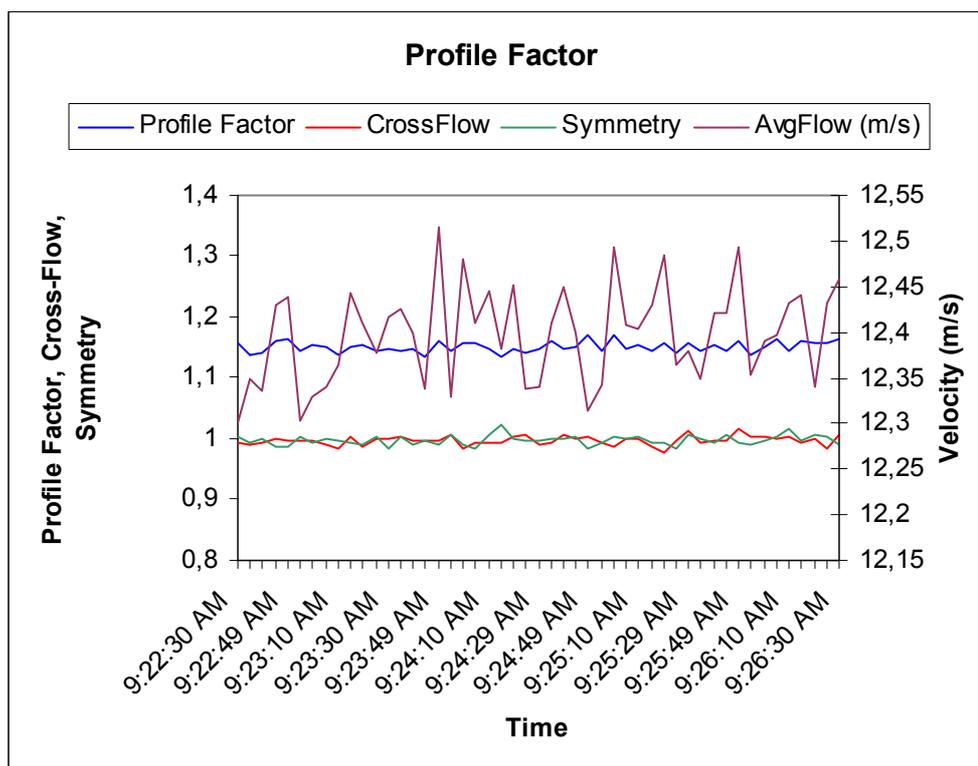


Figura 42 - Parâmetros do perfil de velocidades para o medidor 08-060434 durante sua calibração (40% de Q_{max}).

No intuito de realizar uma comparação mais próxima possível entre condições de calibração e operação, foi escolhido o ponto de 40% de Q_{max}

durante a calibração (velocidade de escoamento na ordem de 12 m/s), já que durante a operação observou-se uma velocidade de escoamento da ordem de 14 m/s.

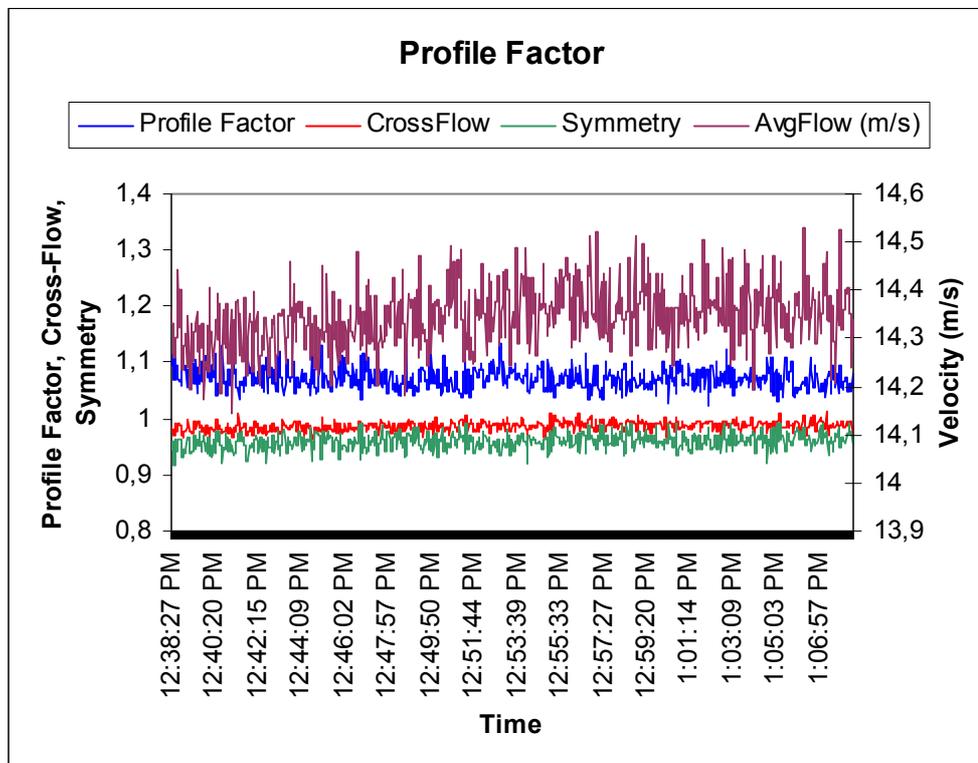


Figura 43 - Parâmetros do perfil de velocidades para o medidor 08-060434 durante sua operação.

Tabela 15 - Valores médios, mínimos e máximos para o Fator de Perfil, assimetria e *crossflow* e ângulo do *swirl* do medidor 08-060434, durante sua calibração e operação.

		Velocidade do escoamento (m/s)	Fator de Perfil	Assimetria	<i>Crossflow</i>	Ângulo do <i>swirl</i> (graus)
Calibração	Média	12,398	1,151	0,998	0,997	0,0
	Mínimo	12,301	1,134	0,982	0,978	-1,0
	Máximo	12,514	1,169	1,024	1,016	0,0
Operação	Média	14,345	1,072	0,960	0,987	-2,0
	Mínimo	14,143	1,023	0,916	0,962	-3,0
	Máximo	14,529	1,133	0,993	1,013	-1,0

Percebe-se boa similaridade entre a assimetria e o *crossflow* durante a calibração e a operação, e uma diferença mais acentuada para o Fator de Perfil, refletido também no ângulo do *swirl* calculado.

Conforme discutido anteriormente, o acompanhamento periódico destes parâmetros pode indicar alterações no funcionamento do medidor ou distorções

no perfil do escoamento, que poderiam resultar erros sistemáticos nos volumes medidos.

Não existem requisitos nas normas para o ângulo máximo permitido do *swirl*. A aprovação de modelo emitida pelo INMETRO [20] estabelece a necessidade de um trecho reto a montante de 15 vezes o diâmetro nominal da linha (15D), podendo ser reduzido para 10D em caso de utilização de um condicionador de escoamento. Teoricamente, uma instalação que atenda a essa exigência seria suficiente para garantir os requisitos de transferência de custódia e medição fiscal.

O projeto da Estação de Medição, EMED, atende às exigências da AGA 9 [7], que são mais restritivos do que a aprovação de modelo do INMETRO e determinam que o trecho reto a montante deve ter, no mínimo 20D, com um condicionador de escoamento instalado a 10D do medidor. A análise dos dados da Tab. 15 permite perceber ainda que, mesmo atendendo os requisitos da norma, o comprimento do trecho reto a montante não é suficiente para o desenvolvimento completo do perfil de velocidades, conforme citação da ISO 17089 [23].

4.2. Atendimento aos requisitos da AGA 9 e da ISO 17089

A seguir será avaliado o atendimento aos requisitos das normas [7] e [23]. Ressalta-se que, neste caso, o cliente [19] solicitou apenas o atendimento aos requisitos da AGA 9 [7], através da documentação emitida ao mercado para fornecimento dos medidores.

4.2.1. Condições de operação

Em geral o cliente (ou usuário) final é quem determina as condições de operação as quais o medidor estará submetido, através do documento denominado “Folha de Dados”. Cabe então ao fabricante/fornecedor especificar um equipamento que atenda a tais condições.

A Tab. 16 apresenta as especificações retiradas do catálogo do fabricante e da Folha de Dados do cliente, neste caso, a Transpetro [19].

Tabela 16 - Especificações do fabricante e do cliente.

Parâmetro	Catálogo Fabricante	Folha de Dados		Unidade
		Máximo	Mínimo	
Pressão	6,89 a 275,79	98,07	58,84	bar
Temperatura do gás	-20 a +100	51,6	15,0	°C
Temperatura ambiente	-40 a +65	-20	60	°C

O catálogo do fabricante não apresenta informações sobre a composição do gás, entretanto esta informação é definida na Folha de Dados, conforme a Tab. 17.

A composição mostrada na Tab. 17 está dentro dos limites especificados na AGA 8 [12], mostrados na Tab. 18.

Tabela 17 - Composição do gás especificada pelo cliente.

C1 (% molar)	92,71
C2 (% molar)	2,19
C3 (% molar)	1,16
iC4 (% molar)	0,19
nC4 (% molar)	0,36
iC5 (% molar)	0,08
nC5 (% molar)	0,08
C6+ (% molar)	0,31
C7 (% molar)	-
C8 (% molar)	-
H ₂ O (% molar)	-
O ₂ (% molar)	-
N ₂ (% molar)	1,51
CO ₂ (% molar)	1,41

Tabela 18 – Limites para gás natural de acordo com a AGA 8. [12]

Componente / Propriedade	Faixa Normal	Faixa Extendida
Densidade	0,56 a 0,87	0,07 a 1,52
C1 (% molar)	45 a 100,0	0 a 100,0
C2 (% molar)	0 a 10,0	0 a 100,0
C3 (% molar)	0 a 4,0	0 a 12,0
iC4 + nC4 (% molar)	0 a 1,0	0 a 6,0

Componente / Propriedade	Faixa Normal	Faixa Extendida
iC5 + nC5 (% molar)	0 a 0,3	0 a 4,0
C6+ (% molar)	0 a 0,2	0 a ponto de orvalho
H ₂ O (% molar)	0 a 0,05	0 a ponto de orvalho
O ₂ (% molar)	-	0 a 21,0
N ₂ (% molar)	0 a 50,0	0 a 100,0
CO ₂ (% molar)	0 a 30,0	0 a 100,0
H ₂ (% molar)	-	0 a 100,0
CO (% molar)	-	0 a 3,0
He (% molar)	0 a 0,2	0 a 3,0
H ₂ S (% molar)	0 a 0,02	0 a 100,0

4.2.2.

Requisitos do medidor

4.2.2.1.

Corpo do medidor

O catálogo do fabricante apresenta os materiais e normas que são atendidas na fabricação do corpo, flanges, conexões e montagem dos transdutores. O *Data Book*⁸ do medidor apresenta os Relatórios de Inspeção que comprovam o atendimento aos requisitos de resistência a corrosão e variação do diâmetro interno.

O projeto do medidor possibilita a substituição dos transdutores sem necessidade de despressurização do mesmo, entretanto esta não é uma operação muito comum em função dos riscos de segurança pessoal envolvidos, considerando as elevadas pressões empregadas no escoamento do gás natural.

A Fig. 44 mostra o medidor, destacando a tomada de pressão existente no corpo do mesmo. O atendimento ao requisito da ISO 17098 [23] que determina uma diferença entre os diâmetros internos do medidor e das tubulações a montante e a jusante menor que um 1% poderia ser comprovada através de medições realizadas nestas tubulações, entretanto estas medições não estão disponíveis.

⁸ *Data Book* é o conjunto de documentos que comprovam o atendimento aos requisitos exigidos pelas normas e/ou cliente que é fornecido juntamente com o equipamento.

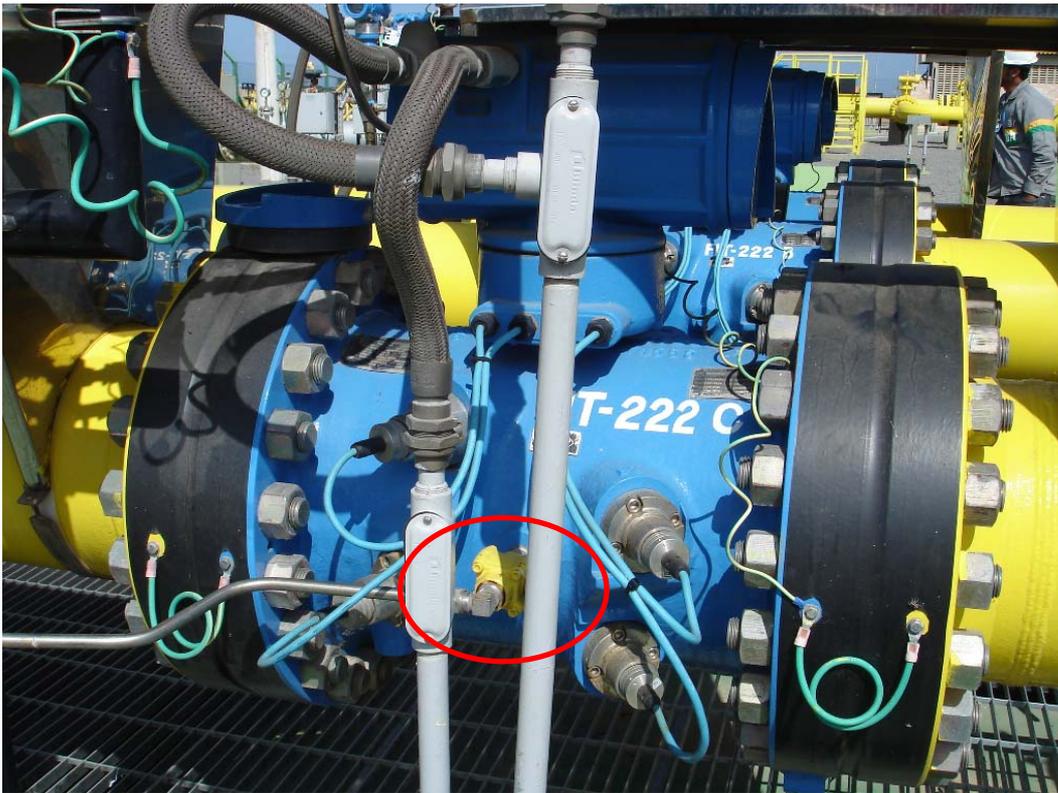


Figura 44 - Medidor e detalhe da tomada de pressão.

4.2.2.2. Transdutores

São atendidos todos os requisitos exigidos pelas normas, seja através das informações disponíveis em catálogo, seja através da documentação apresentada no *Data Book*. Os parâmetros dos transdutores são, inclusive, configuráveis na eletrônica do próprio medidor, o que permite a troca dos transdutores com garantia de confiabilidade dos valores medidos.

4.2.2.3. Eletrônica

Os medidores utilizados atendem aos requisitos relativos a fonte de alimentação e comunicação com computadores de vazão. Entretanto, não foi apresentada documentação comprobatória para os requisitos da ISO 17089 [23] a respeito da flutuação do escoamento e a SNR. É possível verificar o valor da SNR e do Ganho (item 2.3.1) através do programa de computador (item 4.2.2.4). As Fig. 45 e 46 mostram, respectivamente, o Ganho em cada canal para o medidor durante a calibração (100% de Q_{max}) e em operação. A escolha do ponto de 100% de Q_{max} se deve ao fato de que velocidades mais elevadas do

escoamento implicam em maior turbulência, e conseqüentemente maior atenuação do sinal ultrassônico. Pode-se verificar que o Ganho encontra-se na mesma ordem de grandeza em ambos os casos, o que significa que não há deterioração do sinal ou presença de líquidos na linha.

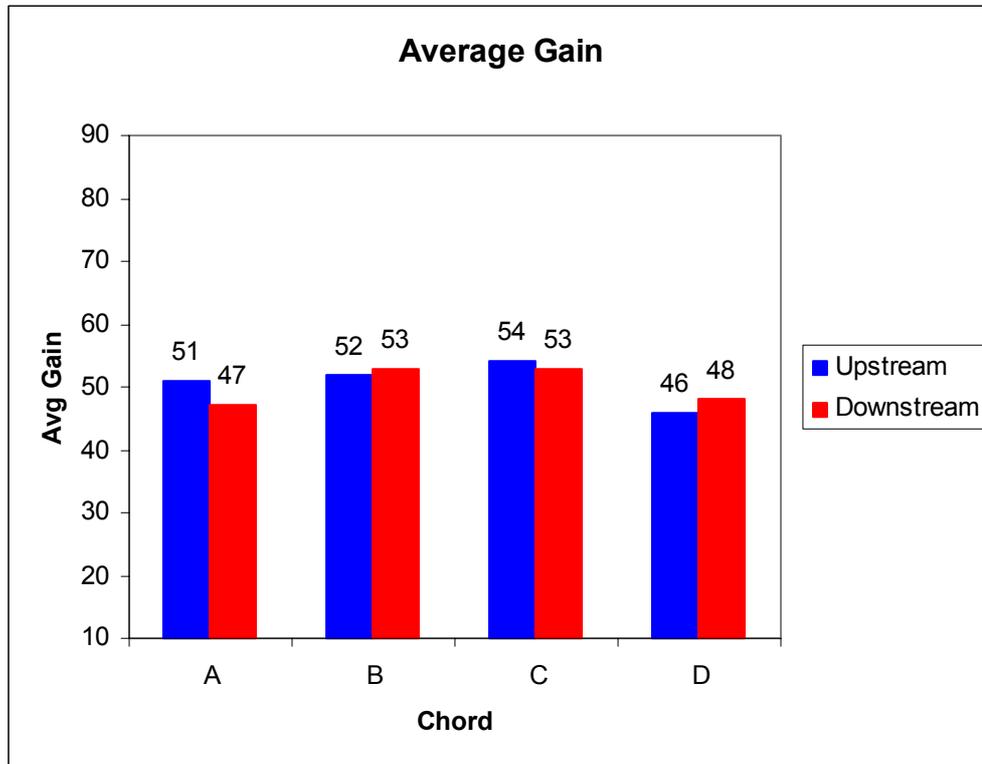


Figura 45 - Ganho, por canal, do medidor 08-060434 durante a calibração do ponto 100% Q_{max} .

É possível perceber ainda que o Ganho das cordas internas é levemente superior do que o das cordas externas. Isto ocorre, pois o sinal ultrassônico sofre uma maior atenuação nas cordas internas devido ao fato do caminho acústico ser maior para as mesmas.

Em relação a SNR, verifica-se uma menor variabilidade em condições de laboratório (Fig 47) do que em condições normais de operação (Fig 48). Este comportamento não é incomum, em virtude das dificuldades de reproduzir as condições de laboratório em instalações industriais. O importante neste caso é garantir que os valores da SNR estejam dentro dos limites aceitáveis definidos pelo fabricante.

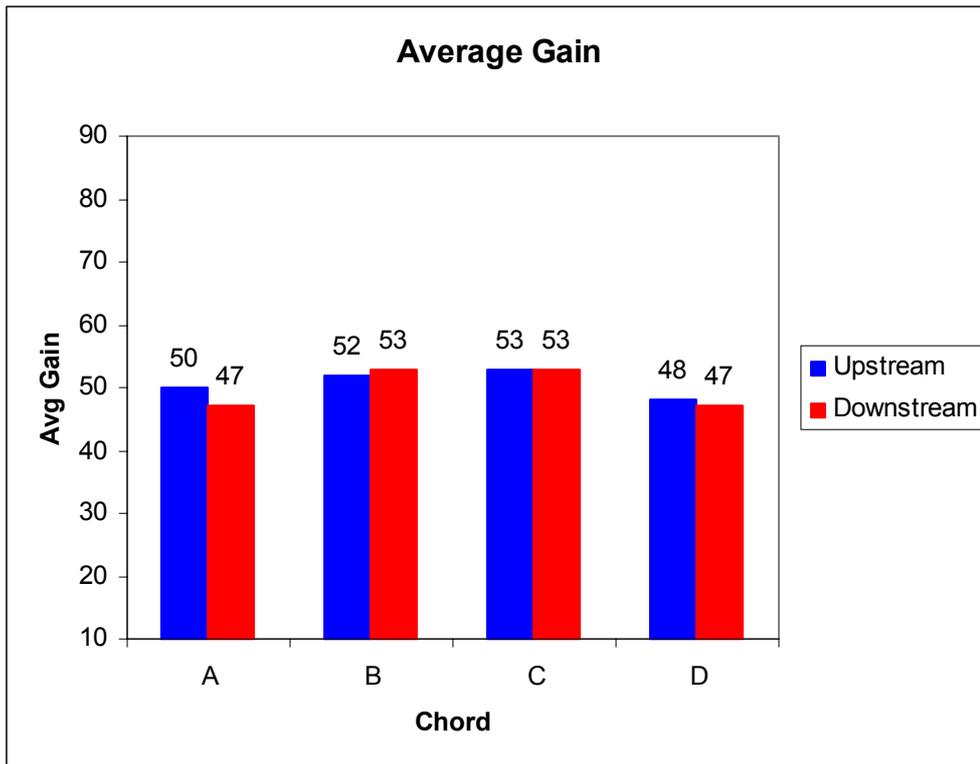


Figura 46 - Ganho, por canal, do medidor 08-060434 durante sua operação.

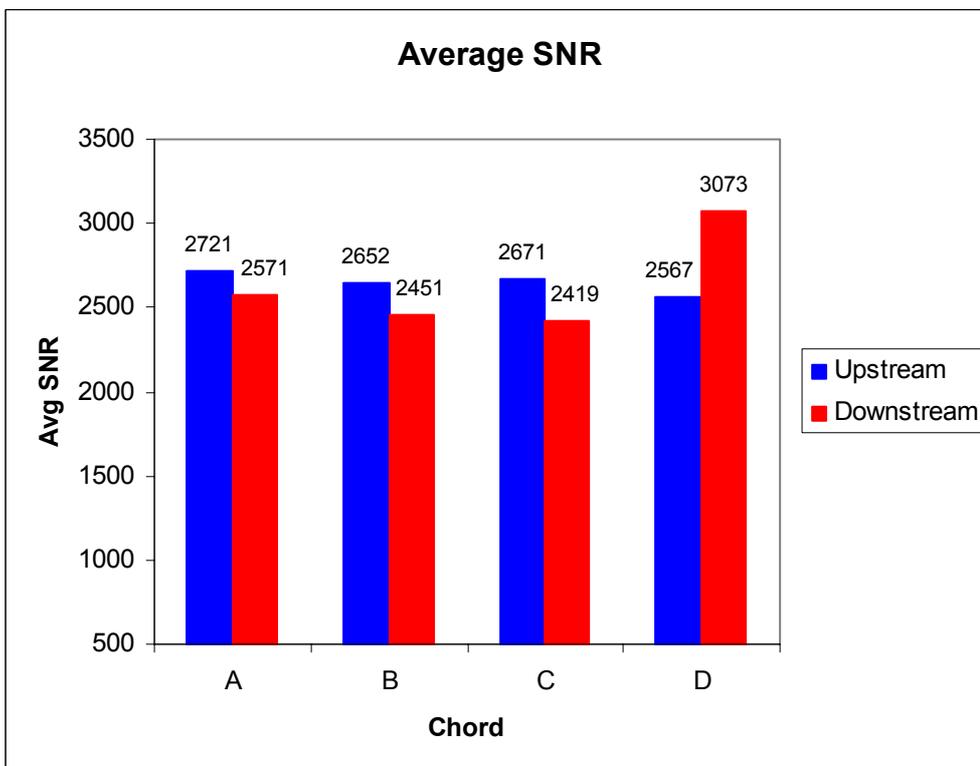


Figura 47 - SNR, por canal, do medidor 08-060434 durante a calibração do ponto 100% Q_{max} .

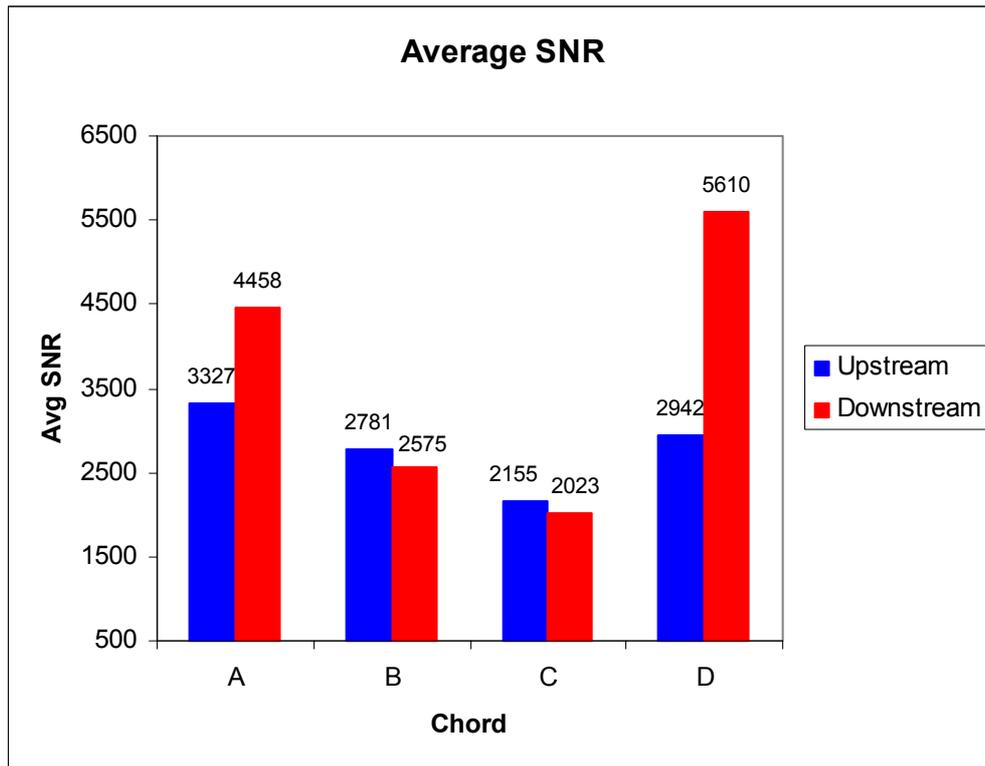


Figura 48 - SNR, por canal, do medidor 08-060434 durante sua operação.

A análise dos gráficos apresentados nas Fig 47 e 48 revela que as cordas mais externas (A e D) estão menos sujeitas a ruídos para os pulsos lançados contra o escoamento (*downstream*), pois apresentam maiores valores de SNR.

A rejeição de medições inválidas, conforme mostrado no item 3.2.3, é verificada através do monitoramento da *performance* do medidor. Feito isto, os gráficos mostrados nas Fig. 49 e 50 mostram, respectivamente, a *performance* do medidor durante a calibração a 100% de Q_{max} e durante a operação. Mais uma vez a opção por apresentar a *performance* para o valor de 100% de Q_{max} se dá em virtude de ser esperada uma redução desta para elevadas velocidades de escoamento, o que não se verifica neste caso. É possível verificar ainda que em ambos os casos a *performance* é igual a 100%, o que significa que todos os valores de tempo de trânsito medidos estão sendo utilizados na determinação da velocidade de escoamento, e conseqüentemente da vazão.

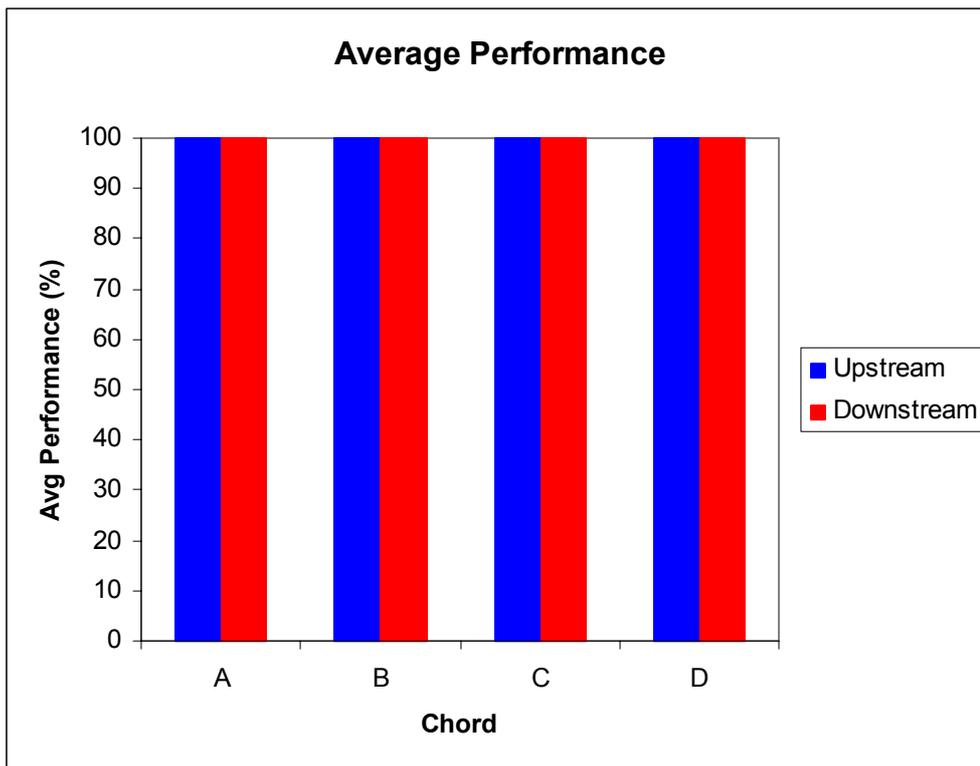


Figura 49 - *Performance* do medidor 08-060434 durante a calibração do ponto 100% de Q_{max}

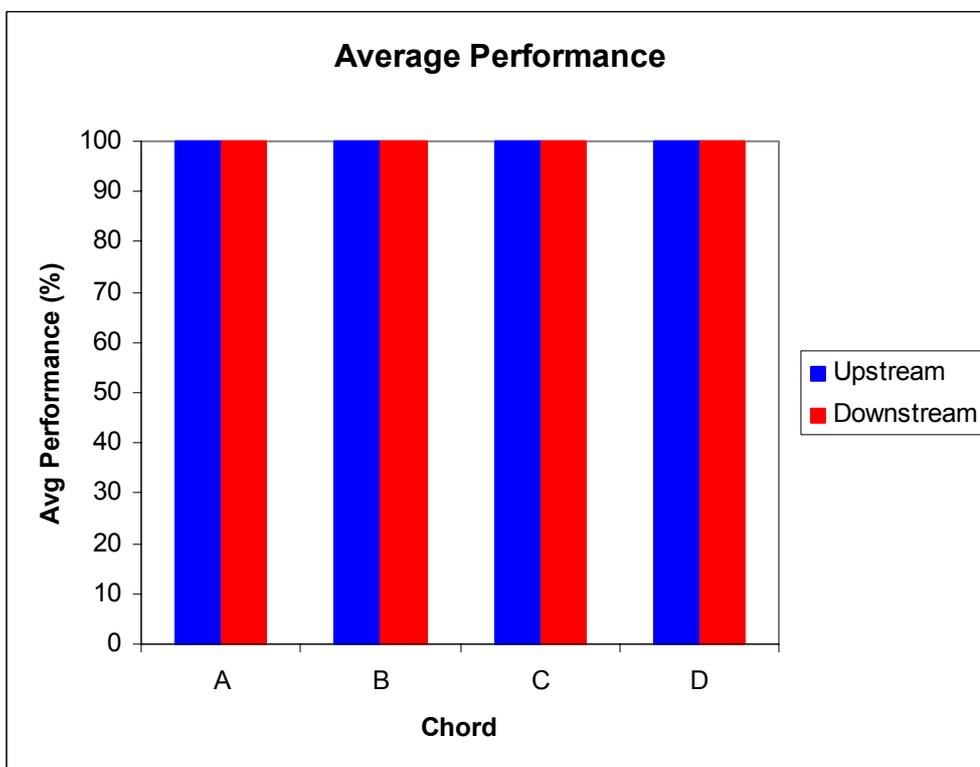


Figura 50 - *Performance* do medidor 08-060434 durante sua operação.

4.2.2.4. Programas de computador (item 3.3.1.5)

A eletrônica dos medidores utilizados pode ser utilizada como computador de vazão, dispensando, a princípio, a utilização de um equipamento específico para esta finalidade. Todos os requisitos exigidos são atendidos: armazenamento de dados em memória não volátil; proteção da configuração contra mudanças acidentais; e registro das revisões de *firmware*. As configurações da Unidade de Processamento de Sinal podem ser realizadas no local. As Fig. 51 e 52 mostram exemplos (não relacionados aos medidores utilizados nesta dissertação) de telas do *software* utilizado para configuração do medidor, onde é possível verificar, entre outras, as indicações de:

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

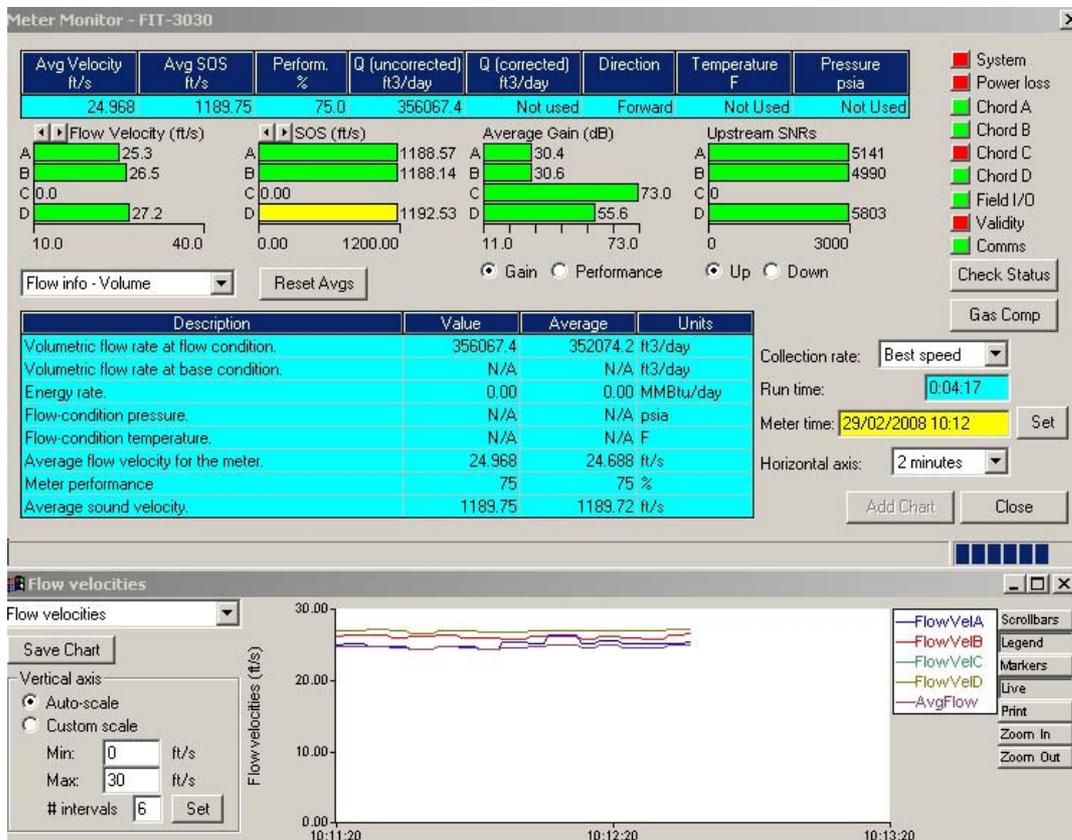


Figura 51 – Exemplo de tela do programa de computador dos medidores utilizados.

É possível verificar ainda o espectro do sinal ultrassônico e diversas indicações de alarme.

Todos os parâmetros e grandezas medidas podem ser armazenadas durante um período de tempo estipulado pelo cliente / operador, num total de 157 informações a cada medição. Entre as informações que podem ser registradas estão os tempos de trânsito e a *turbulência* em cada corda, a assimetria do escoamento, o *crossflow* e o Fator de Perfil.



Figura 52 - Exemplo de tela do programa de computador dos medidores utilizados.

4.2.2.5. Desempenho do medidor

Os medidores utilizados tem diâmetro igual a 12", o que significa que seus requisitos de desempenho são mais rigorosos, conforme descrito no item 3.3.1.6. Em virtude do princípio de funcionamento da tecnologia de medição por ultrassom, o fabricante apresenta em seu catálogo os limites de operação em termos de velocidade de escoamento, e não de vazão, a saber:

$$v_{\min} = 0,6096 \text{ m/s (2 ft/s)}$$

$$v_t = 3,048 \text{ m/s (10 ft/s)}$$

$$v_{\max} = 30,480 \text{ m/s (100 ft/s)}$$

Conforme descrito no item 3.4.1, os medidores foram calibrados para as seguintes velocidades de escoamento: 0,762; 3,048; 6,096; 12,192; 21,336 e 30,480 m/s. Cada uma destas velocidades corresponde a uma vazão sob condições (de pressão e temperatura) de escoamento e uma vazão sob condições de referência⁹.

A partir dos dados coletados durante a calibração pode-se verificar o atendimento aos requisitos definidos nas normas AGA 9 [7] e ISO 17089 [23], conforme descritos nos itens a seguir.

- **Repetitividade**

A repetitividade pode ser determinada através do desvio padrão dos valores medidos dividido pela raiz quadrada do número de medições. Os valores calculados estão explicitados na Tab. 19.

Tabela 19 - Repetitividade do medidor 08-060434 durante a calibração.

Ponto	Velocidade (m/s)	Repetitividade (%)
1	0,762	0,15
2	3,048	0,15
3	6,096	0,17
4	12,192	0,06
5	21,336	0,16
6	30,480	0,06

Percebe-se que a repetitividade em todos os pontos calibrados é menor do que o valor máximo estipulado em ambas as normas para $Q > Q_t$ (0,2%), sendo Q_t a vazão de transição definida nas normas AGA 9 [7] e ISO 17089 [23], de forma que se verifica o atendimento integral a este requisito.

- **Reprodutibilidade**

O VIM [21] define reprodutibilidade como “grau de concordância entre os resultados das medições de um mesmo mensurando efetuadas sob condições variadas de medição”; portanto, para uma avaliação da reprodutibilidade seria necessário a alteração das condições de calibração ou mesmo a calibração do

⁹ As condições de referência definidas pela ANP são: 101,325 kPa e 20° C [2]

medidor em outro laboratório. Em virtude disto não foi possível avaliar este parâmetro.

- **Resolução e Taxa de Amostragem**

Da mesma forma que para a repetitividade, verifica-se, a partir dos dados coletados durante a operação do medidor (Tab. 20), o atendimento integral aos requisitos das normas para $Q > Q_t$. Para o caso específico da taxa de amostragem, apesar de terem sido coletados dados a cada 5 segundos durante a calibração, este intervalo de tempo é configurável, e a Tab. 20 apresenta dados coletados a cada 1 segundo.

Tabela 20 - Dados do medidor 08-060435 coletados durante sua operação.

Date	Time	QMeter (m3/day)	FlowVelA (m/s)	FlowVelB (m/s)	FlowVelC (m/s)	FlowVelD (m/s)	AvgFlow (m/s)
25/06/2009	12:38:27 PM	81310,7	13,037	14,484	14,898	13,834	14,358
25/06/2009	12:38:28 PM	81164,3	12,705	14,486	14,965	13,802	14,332
25/06/2009	12:38:29 PM	81164,3	12,705	14,486	14,965	13,802	14,332
25/06/2009	12:38:30 PM	81164,3	12,705	14,486	14,965	13,802	14,332
25/06/2009	12:38:31 PM	80973,0	13,185	14,378	14,709	14,028	14,298
25/06/2009	12:38:32 PM	80973,0	13,185	14,378	14,709	14,028	14,298
25/06/2009	12:38:33 PM	80973,0	13,185	14,378	14,709	14,028	14,298
25/06/2009	12:38:34 PM	80760,3	12,321	14,257	15,093	13,935	14,261
25/06/2009	12:38:35 PM	80760,3	12,321	14,257	15,093	13,935	14,261
25/06/2009	12:38:36 PM	80760,3	12,321	14,257	15,093	13,935	14,261
25/06/2009	12:38:37 PM	80821,8	13,228	14,313	14,735	13,897	14,271
25/06/2009	12:38:38 PM	80821,8	13,228	14,313	14,735	13,897	14,271
25/06/2009	12:38:39 PM	80821,8	13,228	14,313	14,735	13,897	14,271
25/06/2009	12:38:40 PM	80990,1	12,777	14,378	14,902	13,954	14,301
25/06/2009	12:38:41 PM	80990,1	12,777	14,378	14,902	13,954	14,301
25/06/2009	12:38:42 PM	80990,1	12,777	14,378	14,902	13,954	14,301
25/06/2009	12:38:43 PM	81783,6	13,410	14,474	14,907	14,069	14,441
25/06/2009	12:38:44 PM	81783,6	13,410	14,474	14,907	14,069	14,441
25/06/2009	12:38:45 PM	81783,6	13,410	14,474	14,907	14,069	14,441
25/06/2009	12:38:46 PM	81118,6	13,290	14,385	14,768	13,938	14,324
25/06/2009	12:38:47 PM	81118,6	13,290	14,385	14,768	13,938	14,324
25/06/2009	12:38:48 PM	81118,6	13,290	14,385	14,768	13,938	14,324
25/06/2009	12:38:49 PM	81564,7	13,380	14,456	14,817	14,102	14,403
25/06/2009	12:38:50 PM	81564,7	13,380	14,456	14,817	14,102	14,403

- **Leitura com vazão zero e Desvio de SOS**

Os valores de leitura com vazão zero e dos desvios da velocidade do som são provenientes de testes realizados no laboratório do próprio fabricante (teste de zero). Em geral utiliza-se nitrogênio (N_2) nesta verificação, além de medição de pressão e temperatura de acordo com os requisitos das normas [7] e [23]. Abaixo são apresentados os valores da velocidade do som calculados a partir do algoritmo da AGA 10 [8], medidos pelo equipamento em teste, e a diferença percentual entre eles.

SOS calculada = 353,59 m/s

SOS medida = 353,78 m/s

Diferença = 0,054%

O desvio de SOS foi também determinado durante a calibração com escoamento. As Tab. 9, 10 e 11 apresentam os valores médios medidos pelos medidores utilizados neste dissertação, os valores calculados a partir da AGA 10 [8], e a diferença percentual para cada velocidade calibrada.

- **Máxima dispersão da SOS**

A Tab. 21 apresenta os valores máximos e mínimos da velocidade do som medidos pelo equipamento, por ponto, durante a calibração, além das diferenças entre os mesmos. Verifica-se grande estabilidade dos valores medidos, onde a diferença máxima de 0,18 m/s ocorre para a velocidade de escoamento mais elevada (30 m/s).

Tabela 21 - Valores máximos e mínimos de SOS para o medidor 08-060434 durante a calibração com escoamento.

Velocidade (m/s)	SOS máxima (m/s)	SOS mínima (m/s)	Diferença (m/s)
0,76	420,91	420,80	0,110
3,05	421,31	421,18	0,125
6,10	421,55	421,51	0,037
12,19	421,59	421,52	0,070
21,34	421,62	421,48	0,143
30,48	421,51	421,33	0,180

- **Máximo erro permitido, Máximo erro pico a pico e Velocidade para Q_t**

Os dados presentes na Tab. 22 são provenientes do certificado de calibração do medidor de número de série 08-060434. Nesta tabela é possível verificar o atendimento integral aos requisitos das normas referentes aos máximos erros permitidos para $Q < Q_t$ em toda a faixa calibrada. Cabe ressaltar que os valores da Tab. 22 referem-se a dados coletados antes de qualquer ajuste no medidor.

Tabela 22 - Erros do medidor 08-060434 durante a calibração.

Velocidade (m/s)	Q _M (m ³ /h)	Q _T (m ³ /h)	Erro (%)
0,76	184,35	183,82	-0,29
3,05	759,53	757,63	-0,25
6,10	1473,64	1469,82	-0,26
12,19	2933,99	2924,05	-0,34
Velocidade (m/s)	Q _M (m ³ /h)	Q _T (m ³ /h)	Erro (%)
21,34	5101,08	5080,25	-0,41
30,48	7228,61	7192,65	-0,50

Tomando, agora, o maior valor do erro (para $v = 30$ m/s) e o menor valor (para $v = 3$ m/s), temos que máximo erro pico a pico é igual a 0,25%, valor que também atende aos requisitos de ambas as normas para $Q < Q_t$ em toda a faixa calibrada.

Com relação à velocidade para Q_t , as informações disponíveis no catálogo do fabricante não atendem a ISO 17089 [23], visto que a AGA 9 [7] não prevê este requisito. Entretanto, cabe ressaltar que todos parâmetros medidos e/ou calculados atendem as especificações mais rigorosas de ambas as normas, que são aquelas definidas para a vazão de operação menor do que a vazão de transição ($Q < Q_t$)

A Tab. 23 apresenta, resumidamente, os requisitos das normas, [7] e [23], e os valores medidos / calculados.

Tabela 23 - Requisitos das normas AGA 9 [7] e ISO 17089 [23], e valores para o medidor de número de série 08-060434

Grandeza	Unidade	AGA 9		ISO 17089				Medidor
		Q < Q _t	Q > Q _t	Classe 1		Classe 2		
				Q < Q _t	Q > Q _t	Q < Q _t	Q > Q _t	
Repetitividade	%	0,4	0,2	0,4	0,2	0,5	0,25	0,17
Reprodutibilidade	%			0,6	0,3	1,2	0,6	-
Resolução	m/s	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002	0,001
Taxa de Amostragem	s	≤ 1	≤ 1					1
Leitura com vazão zero	m/s	0,006	0,006	0,006	0,006	0,012	0,012	0,002
Desvio de SOS	%	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,099
Máxima dispersão da SOS	m/s	0,5	0,5					0,18
Máximo erro permitido	%	1,4	0,7	1,4	0,7	2	1	0,50

Grandeza	Unidade	AGA 9		ISO 17089				Medidor
				Classe 1		Classe 2		
		Q<Q _t	Q>Q _t	Q<Q _t	Q>Q _t	Q<Q _t	Q>Q _t	
Máximo erro pico a pico	%	1,4	0,7		< 0,7		< 1	0,25
Velocidade para Q _t	m/s			1,5	1,5	1,5	1,5	3,048

4.2.2.6.

Requisitos de instalação (item 3.3.1.8)

O Anexo D mostra o desenho da estação de medição onde os medidores estão instalados. Percebe-se o atendimento integral as especificações para um projeto conservativo unidirecional de acordo com a AGA 9 [7], ou seja, um trecho reto de 10D (3300 mm) entre a entrada da tubulação do medidor e o condicionador de fluxo, um trecho reto de 10D entre o condicionador de fluxo e o medidor, e um trecho reto de 5D (1850 mm) entre o medidor e a primeira perturbação a jusante.

4.2.3.

Análise do atendimento aos requisitos da AGA 9 e da ISO 17089

Os resultados apresentados mostram atendimento integral a AGA 9 [7], conforme solicitação do cliente. Para o caso da ISO 17089 [23], apenas os requisitos para a velocidade para a vazão de transição, Q_t, e as diferenças entre as velocidades do som medidas e calculadas durante a calibração com escoamento não estão sendo completamente atendidos.

Também é possível verificar que a instalação dos medidores na Estação de Cacimbas atende completamente os requisitos das normas, [7] e [23], e da aprovação de modelo [20], que, em princípio, poderiam garantir as condições de escoamento necessárias para que os medidores operem dentro dos limites de erros máximos permitidos e incertezas. A comprovação das condições de escoamento necessárias para o bom funcionamento do medidor vem da análise adequada das ferramentas de diagnóstico, o que se verifica neste caso. Há que se considerar, por outro lado, que a estação de medição está em operação contínua a, relativamente, pouco tempo (desde novembro de 2008).

Ressalta-se, entretanto, que a observação contínua das ferramentas de diagnóstico pode sinalizar alterações nas condições de escoamento que interfiram na exatidão do medidor.

4.3. Resultados das estimativas de incerteza

A seguir são apresentados os resultados para as estimativas de incerteza equacionadas no item 3.4 desta dissertação.

4.3.1. Estimativa da incerteza de medição de vazão pelo medidor em calibração

A incerteza expandida de leitura, $U_{leitura}$, obtida a partir dos dados coletados (ver Tab. 20), é igual a 0,1 m³/dia. Para o desenvolvimento dos cálculos a seguir, será considerado que $U_{leitura} = 0,1$ m³/h. Desta forma, a Eq. (36) resulta em:

$$u_{leitura} = \frac{0,1}{\sqrt{3}} = 0,0577 \text{ m}^3/\text{h}$$

A Tab. 24 apresenta os resultados de u_{QT} (Eq. (35)) para cada faixa de velocidade.

Tabela 24 – Incerteza de medição de vazão do medidor 08-060434.

Ponto	Velocidade (m/s)	σ_{QT} (m ³ /h)	$u_{leitura}$ (m ³ /h)	u_{QT} (m ³ /h)	u_{QT}/QT (%)
1	0,762	1,88	0,0577	1,8764	1,018
2	3,048	7,91	0,0577	7,9136	1,042
3	6,096	17,61	0,0577	17,6060	1,195
4	12,192	12,41	0,0577	12,4072	0,423
5	21,336	57,00	0,0577	57,0046	1,118
6	30,480	31,09	0,0577	31,0945	0,430

A Tab. 25 apresenta os resultados para a estimativa da incerteza do MF, conforme Eq. (34).

Tabela 25 - Incerteza do MF para o medidor 08-060434.

Ponto	$(u_{QT}/QT)^2$	$(u_{QM}/QM)^2$	u_{MF}/MF	U_{MF}/MF
1	1,036	0,0132	1,024	2,05
2	1,086	0,0132	1,048	2,10
3	1,427	0,0132	1,200	2,40
4	0,179	0,0132	0,438	0,88
5	1,249	0,0132	1,123	2,25
6	0,185	0,0132	0,445	0,89

A Tab. 26 apresenta os resultados da calibração, os valores de MF_i calculados pela Eq. (33) e os valores de $MF(Q_{Ti})$ calculados através da Eq. (38).

Tabela 26 - Valores de MF encontrados na calibração e valores calculados conforme a Eq. (38).

Ponto	Velocidade (m/s)	Q_T (m ³ /h)	Q_M (m ³ /h)	MF_i	$MF(Q_{Ti})$
1	0,762	183,40	184,35	1,0052	1,0022
2	3,048	763,15	759,53	0,9952	1,0010
3	6,096	1471,34	1473,64	1,0016	1,0003
4	12,192	2925,93	2933,99	1,0028	1,0006
5	21,336	5093,40	5101,08	1,0015	1,0031
6	30,480	7196,02	7228,61	1,0045	1,0040

Considerando os valores apresentados na Tab. 26, a Eq. (39) resulta em:

$$u_{ajuste} = 0,32\%$$

Os resultados das Eq. (40), (41), (42) e (43) são apresentados na Tab. 27.

Tabela 27 - Resultados da calibração do medidor 08-050434.

Ponto	u_{MF}/MF (%)	u_{fit} (%)	u_{fit}/MF (%)	c_T	$c_T \cdot u_{QT}/MF$	$U_{calibração}/Q_{calibração}$ (%)	
						Pontual	Média
1	1,024	0,32	0,3193	$-2,49 \cdot 10^{-6}$	-1,44E-07	2,15	0,31
2	1,048	0,32	0,3197	$-1,53 \cdot 10^{-6}$	-8,80E-08	2,19	0,32
3	1,200	0,32	0,3199	$-5,29 \cdot 10^{-7}$	-3,05E-08	2,48	0,36
4	0,438	0,32	0,3198	$8,18 \cdot 10^{-7}$	4,72E-08	1,09	0,16
5	1,123	0,32	0,3190	$1,10 \cdot 10^{-6}$	6,34E-08	2,34	0,34
6	0,445	0,32	0,3187	$-6,14 \cdot 10^{-7}$	-3,53E-08	1,10	0,16

4.3.2.

Resultados para a incerteza de medição de vazão nas condições de referência

O resultado apresentado a seguir é referente aos dados coletados durante a operação do medidor 08-050434, a saber:

$$Q_o = 3\,284,83 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$P = 5\,249,78 \text{ kPa man.}$$

$$T = 22,31 \text{ }^\circ\text{C}$$

Os limites superior e inferior das análises cromatográficas durante a coleta dos dados é apresentada na Tab. 28.

Tabela 28 – Valores limites da composição do gás natural medido.

Componente (% molar)	Limite Superior	Limite Inferior
C1	93,65	92,29
C2	2,06	2,50
C3	0,74	1,10
iC4	0,21	0,33
nC4	0,25	0,45
iC5	0,09	0,20
nC5	0,07	0,11
nC6	0,13	0,18
nC7	0,00	0,00
nC8	0,00	0,00
nC9	0,00	0,00
nC10	0,00	0,00
N2	1,66	1,74
CO2	1,13	1,10
CO	0,00	0,00
O ₂	0,00	0,00
H ₂	0,00	0,00
H ₂ S	0,00	0,00
He	0,00	0,00
H ₂ O	0,00	0,00

Os valores de Z e Z_r, calculados conforme a norma [12], e considerando os dados apresentados na Tab. 28, são apresentados na Tab. 29.

Tabela 29 – Valores limites de Z e Z_r.

Parâmetro	Limite superior	Limite inferior
Z _r	0,997904	0,997786
Z	0,896129	0,889752

Com isso, os valores limites de Q_r, considerando os valores limites de Z e Z_r, são:

Limite superior – Q_{rsup} = 193 018,70 m³/h

Limite inferior – Q_{rinf} = 191 667,82 m³/h

Média – Q_{rm} = 192 343,26 m³/h

Desta forma, a Eq. (52) resulta em:

$$u_{\text{variação}} = 390 \text{ m}^3/\text{h}$$

Ou, percentualmente:

$$\frac{u_{\text{variação}}}{Q_r} = 0,203 \%$$

Considerando os limites da variação da pressão e da temperatura suas incertezas padronizadas encontradas nos respectivos certificados de calibração dos transmissores (Anexo A), temos:

$$\partial P = 8,164 \text{ kPa}$$

$$\partial T = 0,476 \text{ }^\circ\text{C}$$

Desta forma, as Eq. (50) e (51) resultam em:

$$\frac{\partial Z}{\partial P} = -0,000018128 \text{ kPa}^{-1}$$

$$\frac{\partial Z}{\partial T} = 0,00140126 \text{ K}^{-1}$$

A Tab. 30 apresenta o resultado para a estimativa da incerteza da medição de vazão nas condições de referência, u_{Q_r} , para os dados coletados durante a operação do medidor.

Tabela 30 – Resultado da estimativa da incerteza da medição de vazão nas condições de referência para o medidor 08-060434.

u_{Q_o}/Q_o (%)	u_P (kPa)	u_T (K)	u_Z	u_{Z_r}	u_{Q_r}/Q_r (%)	U_{Q_r}/Q_r (%)	
						Pontual	Média
2,48 ¹⁰	8,164	0,476	0,0005	0,0006	1,30	2,59	0,37

Onde a incerteza da média foi calculada considerando o mesmo número de medições da calibração dos medidores ($n = 48$).

¹⁰ Maior valor calculado dentro os valores da Tab. 27.

4.3.3. Análise dos resultados das estimativas de incerteza

As normas, [7] e [23], não fazem referência a requisitos de incerteza das estações de medição onde se utilizam medidores ultrassônicos, somente a erros máximos admissíveis. Além disto, os erros estão referenciados à medição de vazão, porém não está claro se valores instantâneos ou valores médios. No Brasil, cabe a ANP, através do RTM [2], definir os valores máximos permitidos para a incerteza de medição.

A metodologia apresentada nesta dissertação aborda tanto a incerteza para valores instantâneos quando para valores médios, que na prática são totalizados de forma a apresentar como resultado a medição de um volume. Neste aspecto, verifica-se que, apesar dos valores elevados para a incerteza da medição da vazão instantânea, a incerteza da medição do volume se mostra reduzida, apesar das considerações feitas pelo método proposto e dos dados disponíveis.

Em geral a totalização dos volumes produzidos, transferidos ou transportados e feita de hora em hora. Considerando que os dados podem ser coletados a cada segundo, os resultados para a incerteza da medição da vazão média, e conseqüentemente do volume, poderiam ser ainda mais reduzidos, chegando ao limite inferior que é a resolução de leitura do medidor.