

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**WEVERTON FERREIRA BARROS**

**ANÁLISE DA VARIABILIDADE INDUZIDA PELA CONCENTRAÇÃO DE CO<sub>2</sub> NAS  
LEITURAS DE MEDIDORES DE VAZÃO ULTRASSÔNICOS PARA GÁS DE  
QUEIMA**

**VITÓRIA - ES**

**2016**

**WEVERTON FERREIRA BARROS**

**ANÁLISE DA VARIABILIDADE INDUZIDA PELA CONCENTRAÇÃO DE CO<sub>2</sub> NAS  
LEITURAS DE MEDIDORES DE VAZÃO ULTRASSÔNICOS PARA GÁS DE  
QUEIMA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Termofluidos.

Orientador: Prof. Dr. Rogério Ramos.

**VITÓRIA - ES**

**2016**

**WEVERTON FERREIRA BARROS**

**ANÁLISE DA VARIABILIDADE INDUZIDA PELA CONCENTRAÇÃO DE CO<sub>2</sub> NAS  
LEITURAS DE MEDIDORES DE VAZÃO ULTRASSÔNICOS PARA GÁS DE  
QUEIMA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de concentração Termofluidos.

Vitória – ES, 29 de Abril de 2016.

**COMISSÃO EXAMINADORA**

---

**Prof. Dr. Rogério Ramos - Orientador**

Universidade Federal do Espírito Santo - UFES

---

**Prof. Dr. Icaro Pianca Guidolini**

Universidade Federal do Espírito Santo - UFES

---

**Eng. Luiz Augusto Rezende**

Centro de Pesquisas e Desenvolvimento - Petrobrás

---

**Prof. Dr. Marcio Ferreira Martins**

Universidade Federal do Espírito Santo - UFES

## **AGRADECIMENTOS**

Sou extremamente grato a Deus por ter me concedido força e sabedoria para a conclusão deste imenso desafio, juntamente com minha família que sempre me apoiou e jamais duvidou de minha capacidade, entendendo os meus momentos de ausência e falta de atenção para com eles.

Obrigado ao meu orientador Rogério Ramos pelo magnífico apoio e paciência oferecidos, mantendo desde sempre um relacionamento profissional e amigável que muito facilitou a evolução desta pesquisa, cumprindo plenamente o posto de orientador.

Agradeço ao programa de incentivo à pesquisa por disponibilizar recursos para o projeto e bolsa, bem como à empresa 2Solve pelo empenho na prestação de serviços relativo ao túnel de vento, em especial aos nobres Ricardo Calheiros, Winston Alcântara e Gabriel Fontoura.

Devo gratidão aos amigos pesquisadores Eric Lima e Filipe Machado, pelo trabalho em equipe oferecido em prol do laboratório e das pesquisas nele desenvolvidas.

Devo muito reconhecimento aos professores Márcio Coelho, Márcio Martins e Elias Dalvi pela admirável atenção concedida quando solicitei auxílio.

Expresso também agradecimentos aos vários amigos e colegas que tive a oportunidade de conviver no decorrer deste mestrado, contribuindo de alguma forma para a evolução de minha carreira profissional.

A todos, dedico este trabalho. Muito obrigado!

## RESUMO

O efeito produzido pelo caráter atenuante do dióxido de carbono sobre o desempenho de um medidor de vazão ultrassônico em aplicações de queima de gás natural foi verificado. Para isso, experimentos foram realizados em túnel de vento com número de Reynolds de  $10^4$  e teor de  $\text{CO}_2$  superior a 60%. Resultados indicam que o medidor ultrassônico apresentou falhas de medição em estágios de variação acentuada deste gás e cujos teores se mostraram acima de 5%, sendo verificado também que uma aproximação dos transdutores tende a reduzir estes erros de medição.

**Palavras-chave:** Gás de queima. Medição de vazão. Medidor ultrassônico. Atenuação. Dióxido de carbono.

## ABSTRACT

The produced effect by the attenuating character of the carbon dioxide on the ultrasonic flowmeter performance in gas flare application was verified. For this, experiments were conducted in wind tunnel with Reynolds number at  $10^4$ . The results indicates that the ultrasonic meter presented measurement failures in stages of abrupt variation of this gas and whose concentration was show higher of 5%, also being verified that an approximation of the transducers tend to reduce this failures of measurement.

**Keywords:** Gas flare. Flow measurement. Ultrasonic meter. Attenuation. Carbon dioxide.

# SUMÁRIO

<b>RESUMO .....</b>	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>v</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>viii</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>xii</b>
<b>LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS .....</b>	<b>xv</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS .....</b>	<b>xvi</b>
<b>1. MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS .....</b>	<b>19</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>22</b>
2.1. Medição de vazão para gás de queima .....	22
2.2. Legislação.....	26
2.3. O tubo de Pitot.....	26
2.4. Medidor de vazão ultrassônico .....	31
<b>3. ANÁLISE DE SIMILARIDADE HIDRODINÂMICA .....</b>	<b>39</b>
<b>4. APARATO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>44</b>
4.1. O túnel de vento.....	44
4.2. A instrumentação .....	46
4.3. Controle e aquisição de dados.....	48
<b>5. METODOLOGIA .....</b>	<b>50</b>
5.1. Caracterização do escoamento pelo tubo de Pitot.....	50
5.2. Modelo de atenuação ultrassônica .....	55
5.3. Injeção de CO <sub>2</sub> no túnel de vento e leituras pelo medidor ultrassônico .....	62
5.3.1 Medições ultrassônicas de vazão com ar atmosférico.....	62
5.3.2 Medições ultrassônicas de vazão com elevado teor de CO <sub>2</sub> .....	62

5.4.	Injeção de CO <sub>2</sub> em <i>dry calibration</i> e leituras pelo medidor ultrassônico .....	65
<b>6.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>67</b>
6.1.	Tubo de Pitot.....	67
6.2.	Efeito da concentração de CO <sub>2</sub> na medição por ultrassom.....	72
6.2.1	Análise da variabilidade induzida pela configuração aproximada dos transdutores ultrassônicos .....	73
6.2.2	Experimentos realizados com os transdutores faceando a parede do túnel de vento.....	75
6.2.3	Análise da variabilidade das medições com os transdutores faceados ao túnel de vento.....	100
6.2.4	Experimentos realizados com os transdutores aproximados.....	108
6.2.5	Análise da variabilidade das medições após aproximação dos transdutores.....	113
6.2.6	Análise do desempenho obtido com os transdutores faceados e aproximados .....	117
6.2.7	Experimentos realizados com a aproximação dos transdutores em <i>dry-calibration</i> .....	120
<b>7.</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>131</b>
<b>8.</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>133</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>134</b>
	<b>APÊNDICES .....</b>	<b>141</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Geometria e detalhes de um tubo de Pitot de nariz elipsoidal, conforme a ISO 3966 .....	28
Figura 2 – Esquema básico de medidor de vazão por ultrassom de um canal .....	31
Figura 3 – Análise de semelhança térmica referente a aplicação do túnel de vento.....	41
Figura 4 – Esquema do túnel de vento e instalação utilizada .....	45
Figura 5 – Túnel de vento utilizado nos experimentos .....	46
Figura 6 – Transdutores ultrassônicos instalados no carretel metálico do túnel de vento .....	47
Figura 7 – Referência para os pontos de medição do tubo de Pitot .....	51
Figura 8 – Efeito da frequência nos modos de absorção clássica e por relaxação em diferentes composições de mistura, destacando-se o transdutor de 100 kHz .....	58
Figura 9 – Efeito da frequência na absorção acústica total em diferentes composições de mistura, destacando-se o transdutor de 100 kHz.....	61
Figura 10 – Tampão flangeado e com furos para injeção de CO <sub>2</sub> .....	63
Figura 11 – Configurações de montagem dos transdutores ultrassônicos no carretel do túnel de vento.....	64
Figura 12 – Aparato experimental utilizado para as medições em montagem tipo <i>dry calibration</i> .....	65
Figura 13 – Perfis teórico e experimental baseados nas leituras do tubo de Pitot .....	68
Figura 14 – Representação do perfil de velocidades turbulento completamente desenvolvido .....	71
Figura 15 – Variabilidade das leituras produzidas nas configurações faceada e aproximada dos transdutores .....	75

Figura 16 – Comportamento da vazão registrada pelo tudo de Pitot, durante a campanha i, com a variação de CO <sub>2</sub> .....	78
Figura 17 – Comportamento da vazão registrada pelo US, durante a campanha i, com a variação de CO <sub>2</sub> .....	79
Figura 18 – Comportamento da velocidade do som registrada pelo US, durante a campanha i, com a variação de CO <sub>2</sub> .....	80
Figura 19 – Comportamento da potência do sinal registrada pelo US, durante a campanha i, com a variação de CO <sub>2</sub> .....	81
Figura 20 – Comportamento da vazão registrada pelo tudo de Pitot, durante a campanha ii, com a variação de CO <sub>2</sub> .....	84
Figura 21 – Comportamento da vazão registrada pelo US, durante a campanha ii, com a variação de CO <sub>2</sub> .....	85
Figura 22 – Comportamento da velocidade do som registrada pelo US, durante a campanha ii, com a variação de CO <sub>2</sub> .....	86
Figura 23 – Comportamento da potência do sinal registrada pelo US, durante a campanha ii, com a variação de CO <sub>2</sub> .....	87
Figura 24 – Comportamento da vazão registrada pelo tubo de Pitot, durante a campanha iii, com a variação de CO <sub>2</sub> .....	90
Figura 25 – Comportamento da vazão registrada pelo US, durante a campanha iii, com a variação de CO <sub>2</sub> .....	91
Figura 26 – Comportamento da velocidade do som registrada pelo US, durante a campanha iii, com a variação de CO <sub>2</sub> .....	92
Figura 27 – Comportamento da potência do sinal registrada pelo US, durante a campanha iii, com a variação de CO <sub>2</sub> .....	93
Figura 28 – Comportamento da vazão registrada pelo tubo de Pitot, durante a campanha iv, com a variação de CO <sub>2</sub> .....	95
Figura 29 – Comportamento da vazão registrada pelo US, durante a campanha iv, com a variação de CO <sub>2</sub> .....	96

Figura 30 – Comportamento da velocidade do som registrada pelo US, durante a campanha iv, com a variação de CO <sub>2</sub> .....	97
Figura 31 – Comportamento da potência do sinal registrada pelo US, durante a campanha iv, com a variação de CO <sub>2</sub> .....	98
Figura 32 – Síntese das leituras registradas em patamares estáveis do teor de CO <sub>2</sub> , obtidas com os transdutores faceados ao túnel de vento .....	100
Figura 33 – Ajuste exponencial da razão $\bar{Q}/\bar{Q}_0$ em função da concentração de CO <sub>2</sub> .....	103
Figura 34 – Efeito da concentração de CO <sub>2</sub> na potência do sinal ultrassônico do transdutor de montante ( <i>upstream</i> ) .....	104
Figura 35 – Desvio porcentual entre as velocidades do som medida pelo US e a estimada pela AGA 10 .....	105
Figura 36 – Comportamento da vazão registrada pelo tudo de Pitot com a variação de CO <sub>2</sub> , obtido após a aproximação dos transdutores .....	108
Figura 37 – Comportamento da vazão registrada pelo US com a variação de CO <sub>2</sub> , obtido após a aproximação dos transdutores .....	109
Figura 38 – Comportamento da velocidade do som registrada pelo US com a variação de CO <sub>2</sub> , obtido após a aproximação dos transdutores .....	110
Figura 39 – Comportamento da potência do sinal registrada pelo US com a variação de CO <sub>2</sub> , obtido após a aproximação dos transdutores .....	111
Figura 40 – Síntese das leituras registradas em patamares estáveis do teor de CO <sub>2</sub> , obtidas após a aproximação dos transdutores .....	114
Figura 41 – Desvio porcentual entre as velocidades do som medida pelo US e a estimada pela AGA 10 .....	116
Figura 42 – Vazão registrada pelo US após a aproximação dos transdutores, estando associada a concentração de CO <sub>2</sub> no escoamento .....	118
Figura 43 – Variabilidade registrada pelo US após a aproximação dos transdutores, estando associada a concentração de CO <sub>2</sub> no escoamento .....	119

Figura 44 – Comportamento da vazão registrada pelo US com a variação de CO <sub>2</sub> , obtido com os transdutores afastados em <i>dry-calibration</i> .....	121
Figura 45 – Comportamento da velocidade do som registrada pelo US com a variação de CO <sub>2</sub> , obtido com os transdutores afastados em <i>dry-calibration</i> .....	122
Figura 46 – Comportamento da potência do sinal registrada pelo US com a variação de CO <sub>2</sub> , obtido com os transdutores afastados em <i>dry-calibration</i> .....	123
Figura 47 – Síntese das leituras registradas em patamares estáveis do teor de CO <sub>2</sub> , obtidas com os transdutores afastados em <i>dry-calibration</i> .....	124
Figura 48 – Comportamento da vazão registrada pelo US com a variação de CO <sub>2</sub> , obtido com os transdutores aproximados em <i>dry-calibration</i> .....	126
Figura 49 – Comportamento da velocidade do som registrada pelo US com a variação de CO <sub>2</sub> , obtido com os transdutores aproximados em <i>dry-calibration</i> .....	127
Figura 50 – Comportamento da potência do sinal registrada pelo US com a variação de CO <sub>2</sub> , obtido com os transdutores aproximados em <i>dry-calibration</i> .....	128
Figura 51 – Síntese das leituras registradas em patamares estáveis do teor de CO <sub>2</sub> , obtidas com os transdutores aproximados em <i>dry-calibration</i> .....	129

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Cromatografias de gás de queima obtidas em plataformas <i>off-shore</i> operando na costa brasileira .....	26
Tabela 2 – Medidas geométricas do tubo de Pitot ITMP 120 .....	29
Tabela 3 – Verificação de conformidade geométrica do tubo de Pitot ITMP 120 da KIMO, à ISO 3966 .....	29
Tabela 4 – Dimensões dos dutos que integram a construção do túnel de vento.....	45
Tabela 5 – Localização dos pontos de medição pelo tubo de Pitot, segundo a aproximação Log-Chebyshev .....	52
Tabela 6 – Pontos da seção transversal do tubo para medição pelo tubo de Pitot .....	52
Tabela 7 – Parâmetros de análise do efeito de relaxação, segundo a composição química da mistura .....	58
Tabela 8 – Velocidades obtidas pelo tubo de Pitot durante a varredura transversal, cujas rotações do soprador utilizadas foram $\omega_1 = 567$ rpm, $\omega_2 = 962$ rpm e $\omega_3 = 1402$ rpm .....	67
Tabela 9 – Diferenças percentuais $\delta(\%)$ entre os perfis de velocidade medido e teórico em diferentes rotações do soprador.....	69
Tabela 10 – Velocidade de descarga ( $V_D$ ) e vazão associada, calculadas para cada rotação do soprador.....	70
Tabela 11 – Desvios percentuais entre as velocidades média ( $0,83V_{m\acute{a}x}$ ) e de descarga ( $V_D$ ) estimadas a partir de dados experimentais do tubo de Pitot.....	71
Tabela 12 – Números de Reynolds utilizados para a validação do tubo de Pitot.....	72
Tabela 13 – Variabilidade das leituras após aplicação do critério de Chauvenet, sendo referente a aproximação dos transdutores em um escoamento de ar.....	73

Tabela 14 – Falhas de medição definidas após a aplicação dos critérios de filtragem sob as leituras de vazão na campanha <i>i</i> .....	82
Tabela 15 – Índice de falha definido em patamares de concentração de CO <sub>2</sub> , sendo referente às leituras de vazão da campanha <i>i</i> .....	83
Tabela 16 – Falhas de medição definidas após a aplicação dos critérios de filtragem sob as leituras de vazão na campanha <i>ii</i> .....	88
Tabela 17 – Índice de falha definido em patamares de concentração de CO <sub>2</sub> , sendo referente às leituras de vazão da campanha <i>ii</i> .....	88
Tabela 18 – Falhas de medição definidas após a aplicação dos critérios de filtragem sob as leituras de vazão na campanha <i>iii</i> .....	93
Tabela 19 – Índice de falha definido em patamares de concentração de CO <sub>2</sub> , sendo referente às leituras de vazão da campanha <i>iii</i> .....	94
Tabela 20 – Falhas de medição definidas após a aplicação dos critérios de filtragem sob as leituras de vazão na campanha <i>iv</i> .....	98
Tabela 21 – Índice de falha definido em patamares de concentração de CO <sub>2</sub> , sendo referente às leituras de vazão da campanha <i>iv</i> .....	99
Tabela 22 – Variabilidade das leituras do tubo de Pitot e US em diferentes concentrações de CO <sub>2</sub> , obtida com os transdutores faceados ao túnel de vento .....	101
Tabela 23 – Razão entre vazões registradas após variação da concentração de CO <sub>2</sub> no escoamento.....	102
Tabela 24 – Comportamento da velocidade do som medida relativo à referência adotada.....	106
Tabela 25 – Falhas de medição definidas após a aplicação dos critérios de filtragem sob as leituras de vazão do US.....	112
Tabela 26 – Índice de falha definido em patamares de concentração de CO <sub>2</sub> , sendo referente às leituras de vazão do US.....	113
Tabela 27 – Variabilidade das leituras do tubo de Pitot e US em diferentes concentrações de CO <sub>2</sub> , obtida após a aproximação dos transdutores...	114

Tabela 28 – Comportamento da velocidade do som medida relativo à referência adotada.....	116
Tabela 29 – Variabilidade das leituras de vazão do US em diferentes concentrações de CO <sub>2</sub> , obtida com os transdutores afastados em <i>dry-calibration</i> .....	125
Tabela 30 – Variabilidade das leituras de vazão do US em diferentes concentrações de CO <sub>2</sub> , obtida com os transdutores aproximados em <i>dry-calibration</i> ....	129

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

*AGA: American Gas Association*

*ANP: Agencia Nacional de Petróleo e Gás*

*API: American Petroleum Institute*

*INMETRO: Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial*

*ISO: International Organization of Standardization*

*LMF: Laboratório de Máquinas de Fluxo*

*NOAA: National Oceanic Atmospheric Administration*

*PPGEM: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica*

*SS: Signal strength*

*UFES: Universidade Federal do Espírito Santo*

*US: Medidor ultrassônico de vazão*

## LISTA DE SÍMBOLOS

*A*: Área da seção transversal do tubo

*c*: Velocidade termodinâmica do som no meio

$CO_2$ : Gás dióxido de carbono

$C_i$ : Concentração do componente *i*

$c_p$ : Calor específico à pressão constante

$c_v$ : Calor específico à volume constante

*D*: Diâmetro interno

*e*: Rugosidade interna da tubulação

*f*: Frequência da onda

$f_r$ : Frequência de relaxação molecular

$He$ : Gás hélio

$H_2S$ : Gás sulfeto de hidrogênio

*k*: Condutividade térmica do fluido

$k_v$ : Fator de perfil

*L*: Distanciamento entre os transdutores

$L_{cd}$ : Trecho reto de tubulação para o desenvolvimento do escoamento

$L_i$ : Comprimento do trecho

$L_{tr}$ : Comprimento de trecho reto

*M*: Massa molar do ar

$Ma$ : Número de Mach

$N_2$ : Gás nitrogênio

$O_2$ : Gás oxigênio

$p$ : Pressão acústica

$P$ : Pressão absoluta do meio

$\Delta p$ : Pressão diferencial gerada no tubo de Pitot

$Q$ : Vazão volumétrica do escoamento

$\bar{Q}$ : Vazão volumétrica média do escoamento

$r$ : Posição radial na seção circular do tubo

$R$ : Raio do tubo

$Re$ : Número de Reynolds

$R_0$ : Constante molar do gás

$R^2$ : Correlação de ajuste de curva

$\Delta R$ : Critério de Chauvenet

$t$ : Espessura da tubulação

$T$ : Temperatura absoluta do meio

$t_{AB}$ : Tempo de trânsito do pulso ultrassônico à jusante

$t_{BA}$ : Tempo de trânsito do pulso ultrassônico à montante

$v$ : Velocidade do escoamento

$V_D$ : Velocidade de descarga

$\bar{V}$ : Velocidade média do escoamento

$\bar{V}_{AB}, \bar{V}_{BA}$ : Velocidade média do pulso ultrassônico ao longo do caminho acústico

$\bar{V}_L$ : Velocidade média do escoamento na direção do caminho acústico

$V_{MÁX}$ : Velocidade máxima do escoamento

$y$ : Posição na seção transversal do tubo em relação a sua parede inferior

$Z$ : Fator de compressibilidade do ar

$\alpha$ : Ângulo de inclinação dos transdutores ultrassônicos em relação à tubulação

$\alpha_c$ : Coeficiente de atenuação clássica

$\alpha_r$ : Coeficiente de absorção por relaxação molecular

$\alpha_t$ : Coeficiente de atenuação total

$\beta$ : Fator de calibração do tubo de Pitot

$\gamma$ : Razão dos calores específicos

$\Delta$ : Coeficiente de variação

$\delta$ : Diferença porcentual

$\lambda$ : Comprimento de onda

$\mu$ : Viscosidade dinâmica do fluido

$\rho$ : Massa específica do fluido

$\sigma$ : Desvio padrão

$\omega$ : Rotação do soprador

$\omega_f$ : Velocidade angular da onda

# 1 MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS

## 1.1 Motivação

A indústria de petróleo e gás caracteriza-se por apresentar regulamentações rígidas no que diz respeito à medição de vazão, constituindo com isso um cenário tecnológico exigente e desafiador. No Brasil, a publicação Portaria Conjunta ANP/INMETRO N°. 1 de 2000 [1] foi o primeiro documento a regulamentar condições e procedimentos para a medição operacional e fiscal de hidrocarbonetos (petróleo e gás natural), impondo assim novos desafios tecnológicos às companhias e instituições do setor. Recentemente, essa portaria foi atualizada para a resolução conjunta n°. 1/2013.

Nos últimos anos, o esforço das empresas do segmento petrolífero na utilização e aperfeiçoamento contínuo dos sistemas de medição de vazão tem sido intensificado pelo fato de a Agência Nacional do Petróleo (ANP) e o Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO) estarem mais criteriosos nas regulamentações aplicáveis às medições de vazão, em especial no caso para transferência de custódia e fiscal. Atualmente, é exigido para os sistemas de medição de vazão de hidrocarbonetos líquidos, erro máximo admissível de  $\pm 0,3\%$  [2] e, para os sistemas de gás natural, incerteza de medição menor ou igual a 5% [3].

Em plataformas de petróleo, o gás de queima (*flare*) liberado é resultante de várias fontes inerentes à planta. Em operação normal, o gás queimado é o da chama piloto e gás de purga, desviado do gás de consumo. Porém, perturbações nos processos e paradas de emergência, ainda que em intervalos pequenos, representam um grande percentual queimado durante o ano. Segundo estudos, estas instabilidades representam apenas 5% do tempo de queima, porém são responsáveis por 95% da quantidade de gás queimado [4]. Essa operação, portanto, é caracterizada por elevados transientes de vazão. As fontes diversas também podem variar significativamente a composição do gás ao longo da operação.

Uma característica importante desse escoamento é que deve se processar em baixas pressões, próximas à pressão atmosférica, tornando-se inadequada a utilização de medidores de vazão intrusivos e causadores de perda de carga, uma vez que em paradas de emergência é necessário que se evite obstruções ao fluxo para que o gás de queima seja escoado com rapidez.

Normalmente, o gás de queima contém altas concentrações de metano, com o restante composto por hidrocarbonetos de alto peso molecular, H<sub>2</sub>S e inertes, como o CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, He e água [5]. Devido a este caráter altamente poluente, é fundamental a correta medição deste gás para se adequar a legislações específicas, como a ambiental e econômica. Tais condições refletem em baixo valor financeiro associado a estes escoamentos, fazendo com que o uso de medidores de vazão mais sofisticados se torne inviável.

Estes fatores contribuem para que a adequação dessa medição aos requisitos da legislação seja um problema tecnológico de elevada relevância. Com isso, a comunidade científica tem avaliado efeitos indesejados para a qualidade destas medições que são produzidos pela presença de determinados componentes no gás de queima.

Em estudos desenvolvidos referentes a influência da composição química na precisão de determinados instrumentos utilizados neste segmento, condições gasosas ricas em CO<sub>2</sub> tendem a afetar drasticamente o desempenho de medidores de vazão ultrassônico devido ao caráter atenuante deste gás [6, 7, 8], sendo necessário então que a indústria invista em tecnologias para a adequação às legislações de medição impostas.

Em vista do exposto, avalia-se neste trabalho os efeitos de diferentes concentrações de CO<sub>2</sub> no desempenho de medidores de vazão ultrassônico, visando analisar as incertezas de medição produzidas sob estas condições e propor melhorias para que

a qualidade desta técnica seja cada vez mais precisa em ativos produtores de petróleo.

## **1.2 Objetivos**

Neste estudo, avalia-se experimentalmente a influência do CO<sub>2</sub> gasoso presente em linhas de gás de queima na qualidade da medição de vazão ultrassônica. Para o conhecimento deste efeito, modelos teóricos de atenuação acústica serão apresentados, buscando-se entender como as moléculas deste gás podem afetar a performance da tecnologia. Condições de escoamento semelhantes às encontradas em aplicações de queima de gás natural serão reproduzidas em túnel de vento, avaliando-se a variabilidade das leituras de vazão sob diferentes teores de CO<sub>2</sub>, sendo proposta ainda uma configuração de instalação com os transdutores aproximados, a fim de contornar a atenuação sônica.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

De acordo com informações citadas anteriormente, o gás de queima está sujeito a frequentes variações de composição, sendo interessante avaliar o quanto essas alterações podem influenciar no desempenho dos medidores e conseqüentemente em sua precisão. Para isso, é necessário primeiramente entender o processo de queima deste gás, assim como a legislação a ela relacionada. Quanto às tecnologias empregadas para este fim, os medidores do tipo tubo de Pitot e ultrassônico utilizados no presente trabalho serão apresentados de maneira mais detalhada, assim como estudos pertinentes a esta pesquisa.

### **2.1 Medição de vazão para gás de queima**

As primeiras atividades de exploração e produção de petróleo foram desenvolvidas desde o século XIX, porém o interesse na queima do gás natural obtido na extração do petróleo se iniciou a cerca de duas décadas apenas. Naquela época, as atenções voltavam-se basicamente na obtenção do petróleo e o gás natural não tinha uma importância energética reconhecida, cuja infraestrutura de aproveitamento do gás era inexistente [5].

No Brasil, uma transição marcante ocorreu com a exploração de petróleo na Bacia de Campos, motivada pela crise mundial do petróleo no início da década de 70. Neste período, as plataformas não eram ainda preparadas para um intenso aproveitamento do gás natural, sendo queimado grande parte do que era produzido. Apenas na década de 80 o gás natural passou a ser reconhecido e valorizado na matriz energética brasileira.

Esse aumento da participação do gás natural na matriz energética dos países intensificou a preocupação mundial com o aquecimento global, impulsionando as ações para redução das emissões de gases poluidores. Vale destacar maiores

esforços realizados por agências reguladoras do Canadá, da Noruega e do Reino Unido [5].

Segundo estudos do Banco Mundial em parceria com *U.S. National Oceanic Atmospheric Administration* (NOAA) [5], estima-se que 134 bilhões de metros cúbicos de gás foram queimados em plataformas em 2010, sendo equivalente a aproximadamente seis vezes a produção total de gás no Brasil neste mesmo ano.

Neste contexto, as ações para redução da queima de gás natural e controle das emissões de gases poluidores se baseiam em medições precisas de vazão. Assim, a busca por tecnologias que atendessem aos desafios da medição de óleo e gás tornou-se cada vez mais frequente, tendo os medidores de vazão ultrassônicos apresentado destaque nesta corrida científica.

Apesar da tecnologia ultrassônica por tempo de trânsito ter sido patenteada por Rütgen em 1928, apenas 40 anos mais tarde o medidor de vazão ultrassônico conseguiu alcançar uma incerteza aceitável em processos industriais. Os primeiros instrumentos comerciais surgiram na década de 60, em uma configuração simples, realizando análises apenas sob uma seção do escoamento [9]. Na década de 70, os primeiros medidores *clamp-on* (envolto sob a tubulação) foram comercializados nos Estados Unidos [10], fazendo com que os medidores de vazão ultrassônicos comesçassem a ter expressão na indústria do petróleo. Nos anos 80, agregando os desenvolvimentos em microeletrônica e processamento, melhoraram seu desempenho e passam a ser comercializados em larga escala na década de 90.

Em 1998, a publicação da *American Gas Association* – AGA 9 [11] estimulou novos estudos relativos a esta tecnologia por ultrassom para a medição de vazão de gás, fornecendo informações básicas a respeito deste instrumento.

Posteriormente, um importante complemento deu-se através da publicação da AGA 10 em 2003 [12], onde uma equação de velocidade do som para o gás natural foi apresentada, estimulando novas pesquisas e avanços na medição de vazão.

Em 2007, um manual divulgado pelo *American Petroleum Institute* – API [13] auxiliou na definição de mecanismos para a medição de gás de queima, apresentando recomendações sobre instrumentação, instalação e calibração referentes a este cenário de aplicação.

O documento de 2008 do Comitê de Gestão de Hidrocarbonetos HM58 [14], publicado pelo Instituto de Energia, fornece uma orientação sobre a determinação da quantidade de queima de gás para fins de relatórios ambientais. Inclui também uma seção para identificar as fontes de incerteza em um medidor ultrassônico de gás de queima e uma metodologia para determinação e correção de erros de instalação.

Diante deste avanço tecnológico, em 2008, 57% dos medidores ultrassônicos comercializados no mundo eram medidores de gás, e 41% de líquidos [10], demonstrando que a evolução destas pesquisas permitiu a adequação da indústria às exigências reguladoras.

Com o aumento da importância econômica do gás natural em diversos países, medidas para redução de gases estufa foram sendo desenvolvidas e tornou-se necessário a queima deste gás liberado, rico em metano altamente poluente, gerando-se na reação química  $\text{CO}_2$ , menos poluente que aquele. Dessa maneira, fez-se crescer a mobilização de órgãos reguladores para restrições de queima, contribuindo também para um maior aproveitamento do gás.

Diante do maior rigor regulatório, tornou-se necessário a evolução de pesquisas visando a medição precisa deste gás liberado. No Canadá, Estados Unidos e Brasil, por exemplo, emprega-se uma incerteza de 5% para o gás queimado [5].

O sistema de queima (*flare*) apresenta como objetivo principal a manutenção da segurança operacional na instalação, aliviando de forma controlada os gases originados de piloto e purga (desviado do gás de consumo), de instabilidades na planta ou de paradas de emergência (*shutdown*). Logo, não é indicado nesta aplicação, por exemplo, o uso de condicionador de fluxo como recurso para retificar possíveis assimetrias no perfil de velocidade, visto que a imposição de obstruções ao escoamento poderia impossibilitar uma liberação rápida deste gás devido à queda de pressão gerada [5].

Um dos maiores desafios da medição de gás de queima é a ampla faixa de vazão (“rangeabilidade”) apresentada, variando de 0,03 m/s em operação normal da planta até valores acima de 100 m/s em situações de parada de emergência. Estas condições exigem tecnologias que atuem com ampla faixa de vazão e capazes de responderem rapidamente a mudanças bruscas de velocidade, pressão e composição do gás típicas deste processo. Considerando que gotículas de líquido ou outros contaminantes possam ser arrastados ao longo da linha de queima de gás, estes instrumentos precisam estar aptos para lidar com este cenário, devendo ser pouco sensíveis a presença destes componentes para que se consiga obter algum resultado de vazão satisfatório.

Apesar do gás de queima estar suscetível a alterações acentuadas de composição química durante a operação da planta, devido às condições de escoamento imprevisíveis produzidas neste processo, é interessante o conhecimento a respeito das concentrações gasosas típicas desta aplicação. A Tabela 1 demonstra composições de linhas de queima características de plataformas *off-shore* operando na costa brasileira.

Tabela 1 – Cromatografias de gás de queima obtidas em plataformas *off-shore* operando na costa brasileira [15].

	Platform A	Platform B	Platform C	Platform D	Platform E	Platform F
Gas constant	8314,3	8314,3	8314,3	8314,3	8314,3	8314,3
Molecular weight	19,12	20,74	22,09	22,37	22,79	29,47
Adiabatic constant	1,2754	1,2552	1,2338	1,2505	1,2464	1,1929
Methane	89,44	84,59	75,90	72,82	70,82	62,88
Etane	5,10	6,12	10,79	12,96	14,57	9,78
Propane	1,67	4,47	7,24	8,72	9,31	10,72
i-butane	0,73	0,81	1,27	1,18	1,09	2,45
n-butane	0,79	1,64	2,06	1,98	1,91	5,72
i-pentane	0,40	0,41	0,43	0,33	0,28	1,66
n-pentane	0,30	0,53	0,48	0,36	0,32	2,21
n-hexane	0,35	0,39	0,26	0,19	0,14	1,74
n-heptane	0,30	0,33	0,15	0,00	0,11	1,43
n-octane	0,15	0,19	0,00	0,00	0,01	0,66
n-nonane	0,07	0,13	0,01	0,00	0,03	0,21
n-decane	0,02	0,07	0,00	0,00	0,02	0,03
C11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
C12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Nitrogen	0,52	0,17	0,80	1,18	0,95	0,27
Carbon dioxide	0,16	0,15	0,61	0,28	0,44	0,24
Helium	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Oxigen	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Diante destas condições de escoamento inesperadas que estes medidores podem estar submetidos, é extremamente importante que haja regulamentos que estabeleçam parâmetros, limites e condições para a queima de gás natural, além de estudos para avaliar e garantir a qualidade da medição no âmbito das exigências.

## 2.2 Legislação

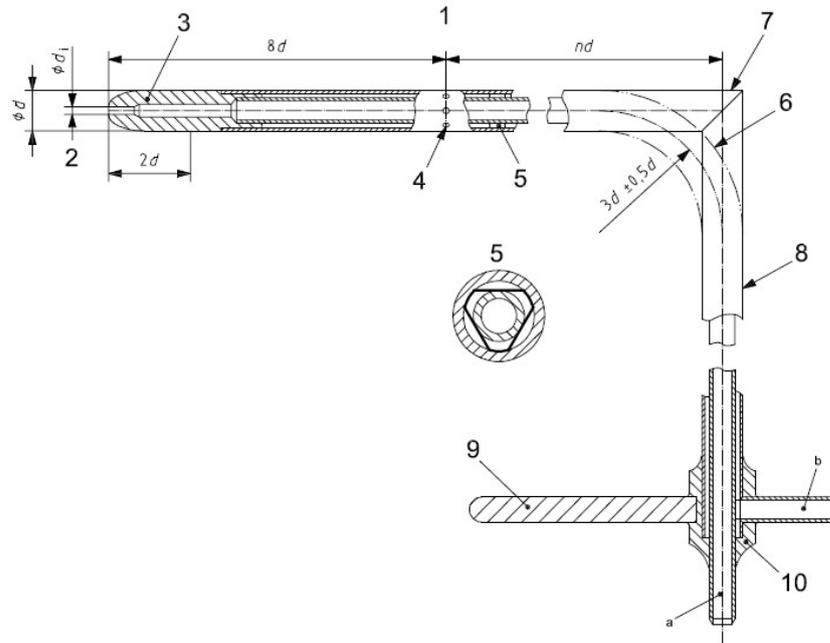
A regulação envolvida na queima de gás natural aborda as exigências operacionais que devem ser cumpridas para redução dos volumes queimados, incluindo a recomendação de equipamentos e procedimentos para se garantir uma combustão eficiente, novas tecnologias para aproveitamento de remanescentes de gases, dentre outras. Contudo, a definição de uma regulamentação técnica rigorosa e precisa sobre tais processos é uma tarefa desafiadora e complexa. Em vista disso, a maioria dos países opta por uma abordagem baseada no alcance das metas de redução de queima e ventilação. Esta filosofia exige um trabalho conjunto entre a indústria e o

regulador, sendo de responsabilidade do operador definir estratégias para o cumprimento dessas metas [5].

Em outros casos, há a figura de um órgão regulador independente que não somente responde pelas atividades e produção de petróleo, como também pelo refino e distribuição dos derivados. Este é o caso do Brasil, através da ANP, que dentre suas principais atribuições destacam-se a regulação, contratação e fiscalização das atividades econômicas integrantes da indústria do petróleo. Para cumprimento de suas atribuições em relação à queima de gás natural, no ano de 2000 a ANP publicou o Regulamento Técnico de Queimas e Perdas de Petróleo e Gás Natural, aprovado através da Portaria ANP n° 249 [16]. Tal regulamento estabelece diretrizes em relação às queimas e perdas de gás natural, incluindo os limites para as queimas e perdas dispensadas de autorização. Em 2013, a ANP/INMETRO publicou a resolução conjunta n° 1, estabelecendo o valor das incertezas de medição de vazão [17].

### **2.3 O tubo de Pitot**

Para referência das leituras de vazão a serem estimadas em túnel de vento, foi utilizado um tubo de Pitot, instrumento este constituído por dois tubos coaxiais em formato de L, conforme Figura 1. A extremidade do tubo interno, colocado à frente do escoamento, percebe a pressão total, enquanto a pressão estática é captada a uma certa distância da ponta do tubo por meio de pequenos orifícios na parede da estrutura externa. A pressão diferencial resultante destas medições é caracterizada como pressão dinâmica [18].



### Key

- |   |                           |    |                             |
|---|---------------------------|----|-----------------------------|
| 1 | head                      | 6  | alternative curved junction |
| 2 | total pressure hole       | 7  | mitred junction             |
| 3 | modified ellipsoidal nose | 8  | stem                        |
| 4 | static pressure holes     | 9  | alignment arm               |
| 5 | spacer                    | 10 | pressure tapping            |
| a | Total pressure.           |    |                             |
| b | Static pressure.          |    |                             |

Figura 1 – Geometria e detalhes de um tubo de Pitot de nariz elipsoidal, conforme a ISO 3966 [19].

A norma ISO 3966 de 2008 [19] é a que regulamenta os elementos e dimensões de um tubo de Pitot estático e os procedimentos a serem executados para avaliar a vazão em um duto através das estimativas de velocidades locais, obtidas por leituras de diferenças de pressão. A forma preconizada que melhor se adequa ao modelo ITMP 120 da KIMO utilizado é visualizada na Figura 1, que corresponde à Figura A.2 da norma.

Um levantamento dimensional do tubo de Pitot, efetuado no Laboratório de Metrologia da UFES, está listado na Tabela 2 e a verificação de conformidade dimensional com a norma ISO 3966 encontra-se na Tabela 3.

Tabela 2 – Medidas geométricas do tubo de Pitot ITMP 120 [20].

	Elemento	Dimensão (mm)	Símbolo
1	Diâmetro da cabeça	6,00	d
2	Diâmetro da haste	6,00	d'
3	Extensão da haste	300,00	L <sub>haste</sub>
4	Extensão da cabeça	86,00	L <sub>cabeça</sub>
5	Extensão do nariz	15,00	L <sub>nariz</sub>
6	Furos de pressão estática:		
6.1	Diâmetro dos furos	1,04	D <sub>furo</sub>
6.2	Quantidade	6	N <sub>furo</sub>
6.3	Distância do topo do nariz	35,85	
6.4	Distância até o eixo da haste	47,15	
7	Raio entre cabeça e haste	15,97	R
8	Braço de alinhamento	Não-existe	
9	Ângulo entre haste e nariz (em graus)	90,018°	

Tabela 3 - Verificação de conformidade geométrica do tubo de Pitot ITMP 120 da KIMO, à ISO 3966

[20].

	Elemento	Símbolo	Localização na ISO 3966/2008	Valor recomendado	Verificação de Conformidade
1	Tipo do Pitot		Apêndice A	-	Conforme
2	Extensão da haste	L <sub>haste</sub>	-		
3	Extensão da cabeça	L <sub>cabeça</sub>	5.1	15d - 25d	Conforme
4	Extensão do nariz	L <sub>nariz</sub>	Apêndice A	= 2d	Não-Conforme
5	Furos de pressão estática:				
5.1	Diâmetro dos furos	D <sub>furo</sub>	5.2-d-1	≤ 1,6mm	Conforme
5.2	Quantidade	N <sub>furo</sub>	5.2-d-2	≥ 6	Conforme
5.3	Distância dos furos ao topo do nariz		5.2-d-3	≥ 6d	Conforme
5.4	Distância dos furos até o eixo da haste		5.2-d-4	≥ 8d	Não-conforme
6	Raio entre cabeça e haste	R	5.2-f	= (3±0,5) d	Não-conforme
7	Braço de alinhamento		5.2-g	Existe	Não-conforme
9	Ângulo entre haste e nariz		Apêndice A	90° ± 1°	Conforme

A influência da geometria deste medidor na qualidade dos resultados de velocidade é representada pelo chamado *coeficiente de descarga* do tubo de Pitot, em que de acordo com a norma ISO 3966 [19] é praticamente igual a 1 (um), desde que o tubo

de Pitot e sua instalação respeitem as premissas operacionais e dimensionais dadas pela norma.

Nos experimentos, este coeficiente pode ser considerado igual a 1 (um) pois, em todos os testes, mantiveram-se os limites mínimos e máximos de velocidades recomendados por norma. A velocidade mínima é limitada para que não esteja inferior a um número de Reynolds mínimo igual a 200, enquanto a velocidade máxima, devido à compressibilidade, é limitada por um número de Mach máximo de 0,25. Assim, para o diâmetro interno da tubulação utilizado de 182 mm, o tubo de Pitot pode ser empregado entre os limites de velocidades compreendidos entre 0,017 m/s e 85,00 m/s. Neste amplo intervalo de velocidades, o coeficiente de descarga pode ser adotado como 1 (um), viabilizando assim os procedimentos operacionais adotados neste trabalho.

Sendo assim, foi escolhido o tubo de Pitot como um medidor de referência para comparação com os dados provenientes do medidor e ultrassônico, visto que os valores medidos a partir deste tubo de Pitot representam de forma fidedigna o comportamento do perfil de velocidades no interior do túnel de vento [20].

O emprego de medidores tubo de Pitot em aplicações de queima de gás pode ser adequado para a determinação de grandes volumes de fluido, porém não irão medir vazões próximas de zero, uma vez que sua precisão exige a produção de uma pressão diferencial. Eles podem ser propensos a problemas decorrentes do ingresso de líquidos e entupimentos e podem requerer a instalação de unidades de purga. Entretanto, podem ser usados na combinação com outros medidores para cobrir toda a faixa de vazão, ou então serem instalados diversos tubos de Pitot em série, cada um cobrindo determinada faixa [5]. Devido a esta sua sensibilidade a líquidos e sujeiras e também a sua reduzida faixa de atuação de menos que 10:1, o torna pouco pretendido pela indústria de gás natural [21].

## 2.4 Medidor de vazão ultrassônico

Os medidores ultrassônicos de velocidade (US) são compostos por pelo menos dois transdutores de sinais que transmitem e recebem pulsos ultrassônicos através do fluido escoando, registrando-se o tempo de trânsito para que o pulso se desloque entre o par de sensores. Este distanciamento é conhecido como caminho acústico e apresenta uma inclinação  $\alpha$  com a direção longitudinal do tubo, como visualizado na Figura 2. No presente trabalho, o medidor encontra-se instalado com uma inclinação  $\alpha$  de  $45^\circ$ , em razão de estudos indicarem que este ângulo oferece a menor incerteza na medição [22].

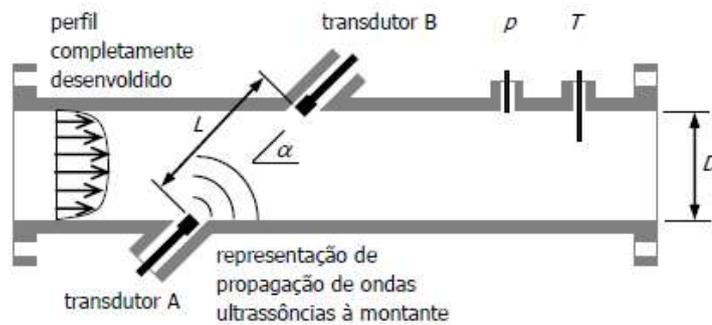


Figura 2 – Esquema básico de medidor de vazão por ultrassom de um canal [20].

Os pulsos são, na verdade, ondas mecânicas que trafegam através do meio, sendo estas geradas pela vibração de um cristal piezoelétrico após excitado por uma corrente elétrica de frequência conhecida. Assim, os cristais vibram na mesma frequência de excitação, que em aplicações de medição de vazão, são tipicamente na ordem de centenas de kHz para gases e igual ou superior a 1 MHz para líquidos [23, 24]. Tais ondas são conhecidas como ultrassom. A precisão das medições por estes transdutores é definida de acordo com seu projeto e fabricação [25].

Na realidade, medidores de vazão ultrassônicos medem apenas o tempo de trânsito dos pulsos entre os transdutores a montante (A) e a jusante (B). Considerando que o som é uma onda mecânica cuja propagação sofre interferência direta da velocidade

do meio que a conduz, a onda emitida pelo transdutor a montante percorre em menor tempo o caminho acústico que a onda emitida pelo transdutor a jusante. A diferença entre estes tempos de transito permite inferir a velocidade média do escoamento. Conhecendo-se a velocidade e a área da seção transversal, a vazão volumétrica pode ser determinada.

Segundo informações, este instrumento baseado no princípio da diferença dos tempos de trânsito é o medidor de vazão de gás mais utilizado atualmente no mundo para quantificação dos volumes queimados [26].

Essa preferência, em aplicações neste segmento da indústria, baseia-se em uma série de vantagens. Um primeiro destaque relaciona-se a sua capacidade de medir uma ampla faixa de vazão, já que escoamentos em linhas de queima de gás podem apresentar desde características de fluxo quase nulo até regimes de intensa turbulência, devendo sempre obedecer aos limites de incerteza impostos pela regulamentação. Outro benefício atribuído a este instrumento relaciona-se a ausência de partes móveis em sua estrutura, já que a introdução de algum elemento dinâmico no fluxo, como um rotor por exemplo, tenderia a ser uma fonte adicional de incertezas por depender de eficiências também mecânicas, além de necessitar de maiores cuidados com manutenção. Em relação ao arrasto gerado no escoamento com a sua montagem, o seu *design* proporciona uma queda de pressão desprezível ao fluido, atributo este obrigatório em uma linha de queima de gás em situações de emergência onde necessita-se de uma liberação rápida deste gás, devendo haver o mínimo possível de obstruções a sua saída. Como avaliação de sua capacidade de representação física do escoamento, a velocidade do som estimada atua como um indicador de bom funcionamento deste medidor, além de permitir estimar o peso molecular da mistura, parâmetro este que pode ser útil no apoio aos cálculos de massa específica e composição do gás [5].

Considerando a Figura 2, o tempo de trânsito do pulso ultrassônico transmitido à jusante de A para B ( $t_{AB}$ ), assim como o tempo de trânsito à montante de B para A ( $t_{BA}$ ), são medidos pelo instrumento. Uma vez computados e conhecendo-se o

distanciamento  $L$  entre transdutores, calcula-se a velocidade média do pulso ao longo do caminho acústico. As médias das velocidades dos pulsos ultrassônicos ao longo do caminho acústico à montante  $\bar{V}_{AB}$  e à jusante  $\bar{V}_{BA}$  podem ser calculadas de acordo com as Eq. (1) e (2) [27].

$$\bar{V}_{AB} = \frac{L}{t_{AB}} = c + \bar{V}_L \quad (1)$$

$$\bar{V}_{BA} = \frac{L}{t_{BA}} = c - \bar{V}_L \quad (2)$$

Nas Eqs. (1) e (2), as velocidades médias dos pulsos ultrassônico são compostas pela velocidade de propagação do som no fluido  $c$  mais uma parcela  $\bar{V}_L$  representante da influência do campo de velocidades do escoamento ao longo do caminho acústico, sendo obtida por meio da integração das velocidades ao longo do caminho acústico.

Matematicamente, as incógnitas  $c$  e  $\bar{V}_L$  podem ser determinadas resolvendo o sistema algébrico de duas equações e duas incógnitas representado por Eq. (1) e (2). Partindo da premissa de que a onda se propaga em linha reta entre os transdutores, tem-se a seguinte relação geométrica baseada no diâmetro interno  $D$  do tubo.

$$D = L \sin \alpha \quad (3)$$

Com isso,  $c$  e  $\bar{V}_L$  podem ser obtidos simultaneamente segundo Eqs. (4) e (5).

$$c = \frac{D}{2 \sin \alpha} \left( \frac{t_{AB} + t_{BA}}{t_{AB} t_{BA}} \right) \quad (4)$$

$$\bar{V}_L = \frac{D}{\sin 2\alpha} \left( \frac{t_{BA} - t_{AB}}{t_{AB} t_{BA}} \right) \quad (5)$$

É importante salientar que esta velocidade  $\bar{V}_L$  calculada na Eq. (5) representa a velocidade do pulso ultrassônico ao longo do caminho acústico. Sendo assim, os medidores ultrassônicos de vazão dependem de um fator  $k_v$ , fator de perfil, para que  $\bar{V}_L$  possa representar a velocidade média na seção transversal de um perfil de velocidades completamente desenvolvido, como mostrado na Eq. (6).

$$k_v = \frac{\bar{V}}{\bar{V}_L} \quad (6)$$

Uma observação é que esta estimativa não leva em conta todos os componentes tridimensionais do campo de velocidades para que a medição seja mais fidedigna [27]. Atualmente, os medidores de vazão ultrassônicos para gás de queima de um canal acústico não fazem a contabilização dessas componentes de velocidades.

O fator  $k_v$ , conforme demonstrado na Eq. (6), é definido na AGA 9 [11], e é também usado na regulamentação brasileira [28]. Embora possa ser deduzida analiticamente, a equação do fator  $k_v$  para escoamento completamente desenvolvido é definida pelo fabricante, sendo de conhecimento proprietário.

Determinados elementos presentes nas instalações podem promover diferentes assimetrias no escoamento, retardando assim a formação deste perfil de velocidades

completamente desenvolvido. Efeitos indesejados podem ser produzidos por acidentes de linha, tais como válvulas, curvas, expansões e contrações do diâmetro interno do duto e trechos retos insuficientes, entre outros. Em algumas estações de medição este padrão de escoamento desejado é considerado como algo idealizado, visto que a configuração de montagem do duto não permite que esta condição seja satisfeita [29]. De acordo com o fabricante do medidor a ser utilizado nesta pesquisa, recomendam-se trechos retos mínimos de 20 diâmetros à montante do instrumento e 10 diâmetros à jusante para que esta condição possa ser alcançada dentro dos critérios regulatórios [30].

Finalizando a análise de vazão, o fator  $k_v$  trata-se de uma relação geométrica entre a velocidade média do escoamento ao longo da seção transversal de área  $A$  e a velocidade média do escoamento ao longo do caminho acústico. Com isso a vazão volumétrica  $Q$  pode ser inferida de acordo com a Eq.(7),

$$Q = \bar{V}.A \quad (7)$$

Segundo já mencionado, tais equacionamentos são desenvolvidos com a finalidade de que as condições à montante e à jusante do medidor permitam a formação de um escoamento completamente desenvolvido, porém apenas tal conformidade nem sempre produz resultados precisos. Uma destas situações verificadas em aplicações de queima ocorrem quando variações na composição química do gás afetam a potência e qualidade do sinal transmitido entre os transdutores.

Para medidores ultrassônicos, dióxido de carbono em altas concentrações pode causar atenuação da energia de um pulso na frequência normalmente utilizada em aplicações de queima de gás [5].

A absorção promovida pelo  $\text{CO}_2$  pode ser explicada por dois fenômenos principais. Um efeito clássico, que ocorre simplesmente devido a densidade do gás e a distância

entre transmissor e receptor, enquanto um fenômeno conhecido como *relaxação* é provocado pela natureza específica das moléculas de CO<sub>2</sub> [31].

Segundo um estudo desenvolvido referente ao cenário típico em análises volumétricas de gás natural, cada componente da mistura gasosa apresenta um coeficiente de atenuação específico, geralmente estando relacionado a dois mecanismos distintos de perda energética: absorção clássica e por relaxação molecular, propondo ainda modelos teóricos para estimativa destes coeficientes separadamente [32].

A absorção clássica está associada a duas propriedades termofísicas da mistura, viscosidade e condutividade térmica. Sabendo-se que a propagação de uma onda acústica cria regiões de alta e baixa densidade de partículas em contato, devido a viscosidade, este movimento apresenta fricção e perda energética sob a forma de calor, sendo esta mais intensa em fluidos mais viscosos. Ainda em alusão ao perfil de propagação de uma onda acústica, colisões entre camadas de moléculas criam zonas de elevada pressão local, elevando-se também a temperatura nesta região. Quanto maior for a condutividade térmica deste fluido, mais calor será transportado para fora desta região, criando assim uma perda potencial da onda. Em frequências de operação dos transdutores mais elevadas, este modo de absorção é agravado [32].

Esta absorção, porém, não explica por que o CO<sub>2</sub> apresenta uma capacidade muito maior de redução da pressão acústica que outros componentes contidos no gás natural. Para a conclusão deste raciocínio, deve-se considerar a relaxação térmica típica deste gás [33]. Além da molécula de CO<sub>2</sub> apresentar os 3 graus de liberdade referentes ao movimento de translação no espaço, internamente suas ligações químicas podem promover modos de vibração e rotação após excitadas. Quando esta frequência da onda encontra-se próxima à frequência de relaxação das moléculas de CO<sub>2</sub>, tem-se um amortecimento do sinal e a consequente perda de pressão acústica. Em baixas e altas frequências do sinal as perdas por relaxação são menores [34].

Como já observado, este fenômeno de relaxação é algo típico do arranjo molecular e ligações químicas de certos compostos. No caso do CO<sub>2</sub> gasoso, por apresentar ligações covalentes lineares e simétricas entre os átomos de carbono e oxigênio, em seu estado de equilíbrio o momento dipolo molecular é nulo, não manifestando assim tendência a vibrações internas [35]. Contudo, quando a molécula é excitada na mesma frequência de relaxação, os modos de vibração internos se desenvolvem, consumindo com isso mais energia e assim produzindo o efeito de atenuação da onda. Para este gás, 4 modos de vibração podem se revelar, no qual cada um deles oscila em uma frequência de relaxação diferente [36]. Logo, a composição química da mistura gasosa irá definir o estado de maior vibração de suas moléculas que promoverá a intensificação da absorção acústica, devendo a frequência dos transdutores ser escolhida de modo a não ser próxima desse valor.

Experimentos realizados em condições de fluxo zero permitiram concluir que as principais variáveis que podem influenciar na geração de um sinal de qualidade para o receptor são [33]:

- Pressão absoluta inicial do gás;
- Frequência dos transdutores;
- Distanciamento entre os transdutores.

Em complemento, os autores explicam que como o pulso ultrassônico emitido pelo transdutor se expande de maneira esférica, um caminho acústico mais extenso causará o enfraquecimento da potência deste sinal. Logo, para medições com teores consideráveis de gases atenuantes, é interessante a utilização de caminhos acústicos mais curtos. Adicionalmente, medições realizadas em meios de maior pressão demonstraram-se de melhor qualidade, visto que as moléculas estão mais próximas e o contato ocorre com mais frequência.

Teores de CO<sub>2</sub> elevados também foram testados em um outro trabalho sob condições de escoamento nulo, verificando-se a potência do sinal recebida pelo transdutor em

diferentes configurações de análise, como o espaçamento entre os sensores, a frequência dos transdutores e a pressão do meio, além claro da concentração de CO<sub>2</sub> [32]. Neste texto é confirmado, por exemplo, que a potência do sinal tende a decair exponencialmente com o incremento do distanciamento entre os transdutores, sugerindo ainda que tais emissores sejam escolhidos preferencialmente em baixas frequências, cujos estágios caracterizam uma menor atenuação da pressão acústica.

Para aplicações de gás de queima em que se identifica condições frequentes de alto teor de CO<sub>2</sub>, determinadas ações operacionais de redução deste efeito atenuante podem ser sugeridas, porém nem sempre são viáveis. A qualidade do sinal pode ser elevada, por exemplo, reduzindo-se o diâmetro da tubulação ou inserindo os transdutores no escoamento. Entretanto, este último procedimento envolve a emissão de pulsos em uma região específica do perfil de velocidades, além de intensificar o efeito de viga engastada vibrante da haste do transdutor, podendo aumentar a não-linearidade das leituras e reduzindo assim a precisão. A pressão na linha de gás também não é algo controlável e estável, somando isso ao fato dessa pressão ser tipicamente inferior a atmosférica, prejudicando ainda mais a transmissão do sinal ultrassônico. Um incremento da tensão elétrica de excitação dos transdutores também contribui para que essa transferência energética seja mais intensa [32], porém, por questões de segurança, para aplicação em gás de queima a potência é limitada em apenas 2 Watts.

Diante deste cenário, nota-se a necessidade de novos estudos que permitam a verificação da vazão estimada por este medidor em escoamentos com concentrações de CO<sub>2</sub> mais elevadas, avaliando-se também outros parâmetros de medição de maneira contínua. Tais condições serão objeto de estudo na presente pesquisa.

### 3 ANÁLISE DA SIMILARIDADE HIDRODINÂMICA

Dadas as condições operacionais típicas em queima de gás, considera-se que um túnel de vento atmosférico aspirado apresente condições de similaridade hidrodinâmica adequadas para essa aplicação [15].

Estudos comprovam que, devido a fatores como segurança, logística, recursos tecnológicos envolvidos, questões ambientais, custo e disponibilidade do ar, o uso de ar como procedimento para reprodução do escoamento em linhas de gás de queima trazem muitos benefícios, tendo em vista o elevado custo de teste em instalações de calibração operando com gás natural [37]. Além disso, a vazão de gás disponível numa instalação de ensaio de gás natural, caso exista, é sazonal, pois ela advém de derivações feitas em gasodutos que transferem o gás natural da zona produtora para uma unidade de tratamento.

Devido ao fato de que o escoamento para esta aplicação ocorre em baixas pressões, muitas vezes abaixo da atmosférica, seria necessário reduzir as elevadas pressões internas do gás nas tubulações das derivações para limites que reproduzissem de forma fidedigna as condições de queima, tornando inviável o processo de compressão do gás contido nas tubulações de ensaio para o gasoduto.

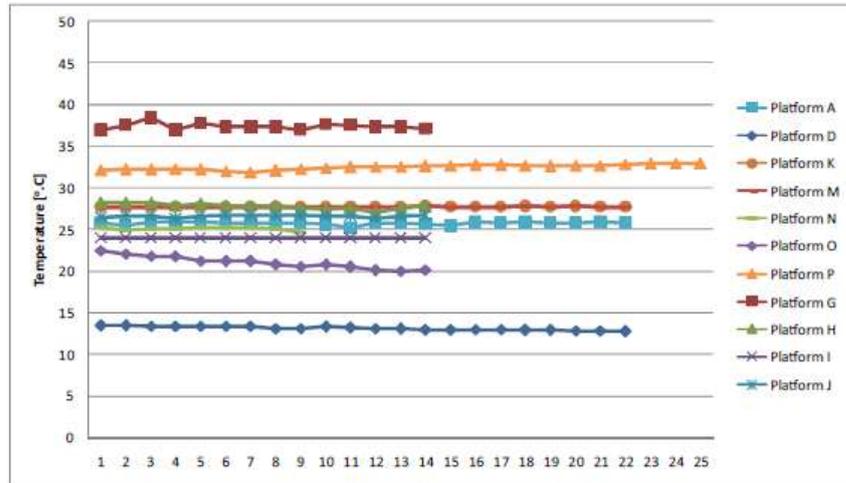
Uma das vantagens de trabalhar na pressão atmosférica é a facilidade de elaborar protótipos de forma rápida, sem as preocupações de segurança envolvidas com o uso de gases a altas pressões, como também o uso de aparatos eletrônicos e softwares de aquisição de dados e monitoração sem o risco de se deparar com o gás combustível (ambientes explosivos). Outra vantagem é a flexibilidade que uma instalação de calibração em malha aberta proporciona, pois permite uma série de combinações de condições de instalação, uma vez que o túnel de vento aspira o ar de uma sala aberta [37].

A similaridade entre o escoamento interno promovido no túnel de vento e o escoamento em linhas de queima de gás ocorre da seguinte forma [15]:

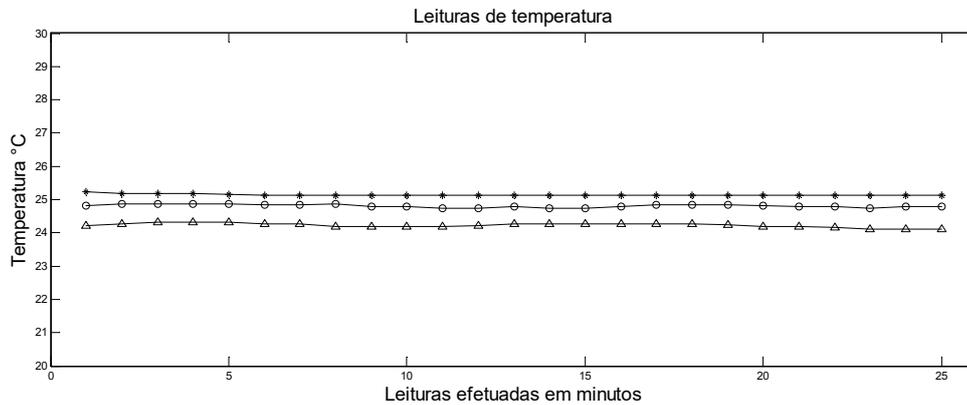
- Semelhança Geométrica
- Semelhança Térmica
- Semelhança Cinética
- Semelhança Dinâmica

O termo semelhança geométrica se relaciona a geometria da seção dos tubos, nesse caso a seção circular em ambos os casos. A razão entre comprimento e diâmetro, expresso em número de diâmetros internos, e a rugosidade relativa das paredes dos dutos de polipropileno do túnel de vento representam condições típicas de instalação de queima. Apesar da diferença entre os diâmetros das tubulações encontradas nestas operações em campo e o diâmetro dos dutos do túnel de vento serem perceptíveis, essa diferença não impõe restrição técnica de similaridade hidrodinâmica como mencionado acima.

A semelhança térmica também é um ponto a se considerar, pois ela não exige que as temperaturas tenham os mesmos valores. Essa condição evidencia que a distribuição de temperaturas ao longo do trecho de medição deva ser semelhante ao restante da tubulação. O critério térmico é respeitado, pois é considerada a distribuição homogênea de temperatura no túnel de vento e a Figura 3-a realça que as distribuições de temperatura em linhas de queima instaladas em plataformas possuem características semelhantes às obtidas no túnel de vento, onde o eixo da abcissa representa as leituras efetuadas em horas e o eixo da ordenada representa os valores de temperatura registrados. Na Figura 3-b também é possível observar leituras de temperatura efetuadas nas diferentes configurações de montagem do túnel de vento, permitindo visualizar a distribuição homogênea de temperaturas no túnel.



a) Leituras típicas de temperatura em linhas de queima [20].



b) Leituras de temperatura efetuadas em diferentes configurações de montagem do túnel de vento.

Figura 3 – Análise de semelhança térmica referente a aplicação do túnel de vento.

A semelhança cinética exige que os escoamentos apresentem a mesma distribuição de velocidades [20]. O método mais eficiente para fazer jus a essa condição é garantir um perfil de velocidades turbulento completamente desenvolvido em ambos os casos. Porém devido à presença de acidentes de linha e a dificuldade de se levantar os perfis de velocidade em campo devido a condições operacionais, o perfil de velocidades completamente desenvolvido em queima de gás não é uma condição operacional usual.

Limitações essas que não se fazem sentir no túnel de vento, já que o perfil de velocidades turbulento completamente desenvolvido pode ser obtido com o auxílio de

dispositivos, tais como bocal e retificadores de fluxo. O levantamento do perfil de velocidades completamente desenvolvido no túnel de vento pode ser realizado através de diversas medições ao longo da seção transversal do túnel, sendo neste estudo identificados os perfis de velocidades obtidos por um medidor de referência tubo de Pitot.

Finalmente, a semelhança dinâmica exige a comparação dos efeitos das propriedades fluidodinâmicas dos escoamentos em linhas de queima e túnel de vento, principalmente a compressibilidade dos escoamentos e as relações entre efeitos viscosos e de inércia, cuja semelhança pode ser obtida por análise dimensional utilizando-se o Teorema de *Buckingham-Pi* [20], implicando na igualdade dos seguintes parâmetros adimensionais:

– Número de Mach:  $Ma = \frac{\bar{V}}{c}$

– Número de Reynolds:  $Re = \frac{\rho \bar{V} D}{\mu}$

– Trecho reto para desenvolvimento do escoamento:  $L_{cd} = \frac{L_{tr}}{D}$

$\bar{V}$  : Velocidade média do escoamento (m/s);

$c$  : Velocidade termodinâmica do som no escoamento (m/s);

$D$  : Diâmetro interno da tubulação (m);

$\rho$  : massa específica =  $\frac{P}{RT}$ , considerando as propriedades de gás ideal (kg/m<sup>3</sup>);

$\mu$  : Viscosidade dinâmica determinada pela lei de Sutherland (Pa.s);

$P$  : Pressão absoluta do escoamento ( $\approx 1$  atm);

$L_{tr}$  : comprimento de trecho reto (m).

Para se obter a similaridade dinâmica entre os escoamentos de gás de queima e túnel de vento, a condição de  $Ma < 0,3$  indica que ambos escoamentos são considerados incompressíveis, isto é, as propriedades termodinâmicas de estagnação são as mesmas. Adicionalmente, é necessário que os números de Reynolds sejam equivalentes [20], ou seja:

$$Re_{\text{túnel}} = Re_{\text{queima}}$$

A utilização do modelo de gás ideal para avaliar as propriedades termofísicas de gás natural em linhas de queima foi analisada por pesquisadores que em seu trabalho defenderam essa premissa, comparando-se as propriedades termodinâmicas simuladas pela AGA 10 [12] às propriedades obtidas através da abordagem de aproximação por gases ideais [4]. Segundo os autores, quanto maior a concentração de metano neste escoamento, menor será a diferença nestas propriedades, estando então com o comportamento mais próximo aos gases ideais à temperatura de 20°C e pressão de 1 bar, sendo estas condições operacionais típicas em gás de queima [20]. Essa conclusão é corroborada por outro trabalho [37]. Sendo assim, diante desta proximidade entre as propriedades termofísicas do escoamento no túnel de vento e em linhas de queima, bem como da similaridade de diâmetros entre as tubulações, os parâmetros de  $Ma$  e  $Re$  entre os casos apresentam-se semelhantes, uma vez que a velocidade induzida no túnel de vento (máxima de 40 m/s) encontra-se dentro da faixa de vazão produzida em aplicações de queima de gás (0,03 a 100 m/s).

## 4 APARATO EXPERIMENTAL

Os experimentos demonstrados neste trabalho foram realizados em um túnel de vento instalado no Laboratório de Máquinas de Fluxo (LMF) da UFES, sendo auxiliado por diversos equipamentos caracterizados a seguir.

### 4.1 O túnel de vento

O laboratório encontra-se equipado com um túnel de vento atmosférico de 10,6 metros de comprimento, constituído por tubos de polipropileno e com diâmetro interno médio de 182 mm (nominal = 8"). O túnel opera aspirado simulando o fluxo em tubulações de gás de queima. Considerando que o escoamento interno é incompressível no túnel de vento, a pressão interna no duto é inferior à pressão atmosférica [20]. Devido a sua construção e composição, permite a mudança de sua configuração para diferentes tipos de montagens.

O escoamento interno é promovido por um soprador do tipo *limit-load* com potência de 15 HP instalado no extremo à jusante dos tubos e após o *plenum*, instalado para redução do efeito *swirl*, que caracteriza-se por comportamentos helicoidais do escoamento promovidos pelo rotor do soprador no interior dos tubos, juntamente com a sua capacidade em permitir conexões de dutos com diferentes diâmetros. Além disso, o túnel de vento possui um condicionador de fluxo antes do *plenum* que também busca tornar o escoamento mais próximo de um perfil unidimensional [20]. Um esquema com os principais componentes instalados no túnel encontra-se exibido na Figura 4. O túnel não apresenta curvas e possui os seus medidores dispostos em série.

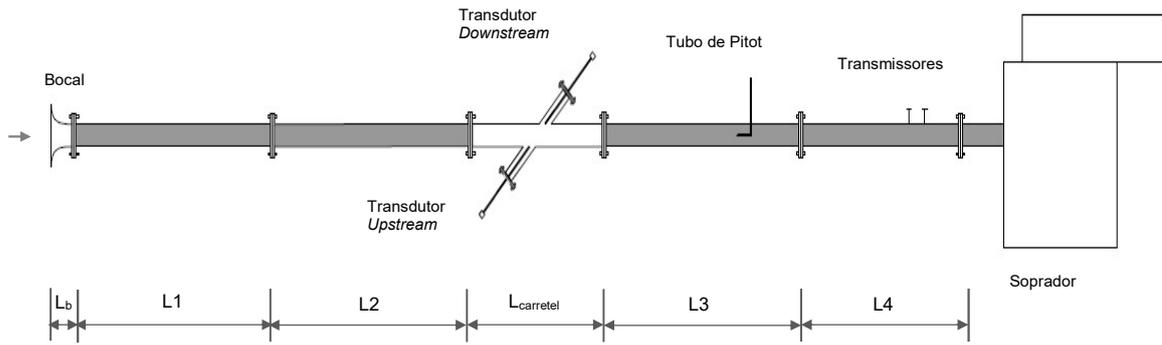


Figura 4 – Esquema do túnel de vento e instalação utilizada.

As dimensões dos trechos que integram a construção do túnel de vento, as suas respectivas posições de montagem e organização estão dispostas na Tabela 4.

Tabela 4 – Dimensões dos dutos que integram a construção do túnel de vento.

D (mm)	t (mm)	e ( $\mu$ m)	Densidade (kg/m)	$L_b$ (mm)	L1 (mm)	L2 (mm)	$L_{carretel}$ (mm)	L3 (mm)	L4 (mm)
182	8	1,725	4,5	184,6	2250	2250	1500	2235	1800

$D$  : diâmetro interno

$t$  : espessura do tubo

$e$  : rugosidade interna do tubo

$L_i$  : comprimento do trecho

À montante do duto está instalado um bocal em fibra de vidro cujo objetivo é de uniformizar o perfil de velocidades na entrada do tubo. O bocal de entrada é caracterizado por uma contração do diâmetro, de 462 mm para 182 mm. O objetivo de uniformizar o perfil de entrada foi obtido satisfatoriamente, conforme demonstram as simulações numéricas para esta instalação especificamente [38]. O bocal, assim como os trechos retos utilizados nos testes, pode ser visualizado na Figura 5.



Figura 5 - Túnel de evento utilizado nos experimentos.

O acoplamento entre dois trechos distintos para a obtenção de diferentes configurações de montagens é feito por flanges em nylon com encaixe tipo macho-fêmea, de forma a garantir a centralização e alinhamento das paredes internas, visando eliminar irregularidades tais como desalinhamentos e vazamentos.

## 4.2 A instrumentação

Após apresentado os principais componentes pertencentes ao túnel de vento, uma descrição mais detalhada a respeito dos equipamentos empregados neste estudo em específico vem como complemento para o entendimento da pesquisa proposta e também da metodologia adotada nos testes, sendo esta apresentada na seção seguinte.

Como instrumento de referência para a vazão em todos os testes desenvolvidos, o túnel apresenta instalado no trecho L3 da Figura 4 um medidor tubo de Pitot ITMP 120 da KIMO mecanicamente automatizado, sendo capaz de se deslocar verticalmente em distâncias milimétricas, varrendo a seção transversal em posições e intervalos pré-programados.

Como base para a avaliação de possíveis instabilidades geradas nos segmentos de tubo na vizinhança deste medidor, foi montado com trechos retos à montante de 7000mm (38D) e à jusante de 3000mm (16D) aproximadamente, respeitando as recomendações da ISO 3966 [19] de pelo menos 20D sem irregularidades à montante e 5D à jusante do tubo de Pitot, buscando assim eliminar possíveis distúrbios que possam criar assimetrias, *swirl* ou turbulências no escoamento.

Visando a verificação do comportamento de um segundo instrumento registrador de velocidade utilizado em aplicações de queima de gás, um medidor de vazão ultrassônico modelo GE XGF868i com frequência de 100 kHz foi instalado no túnel em um tubo tipo carretel de medição, externamente metálico, tendo um par de transdutores dispostos num plano paralelo ao chão e inclinados 45° em relação à direção longitudinal do tubo, de acordo com o informado na Figura 6.

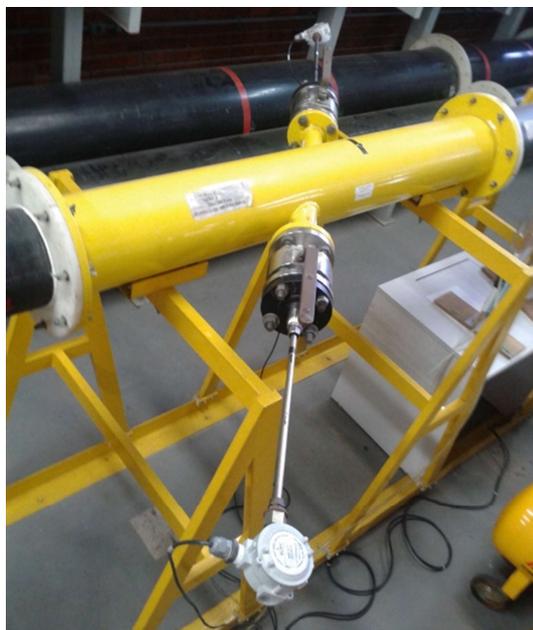


Figura 6 – Transdutores ultrassônicos instalados no carretel metálico do túnel de vento.

A fim de que a operação deste medidor possa fornecer resultados mais estáveis e representativos, o relatório AGA 9 [11] recomenda um comprimento reto de tubo de pelo menos 10D à montante e 3D à jusante do ultrassônico, buscando com isto reduzir

possíveis distorções no perfil escoante. Segundo verificado na instalação em teste, existe uma extensão reta de 28D à montante deste medidor e 26D à jusante, adequando-se portanto às instruções da referência.

Um último conjunto de equipamentos descritos é aquele responsável por fornecer ferramentas que permitam o acompanhamento dos indicadores de composição química e propriedades termofísicas do escoamento. Desta forma, foi inserido ao final da tubulação (trecho L4) dois transmissores, um de pressão e um de temperatura, encarregados de fornecer valores absolutos para o cálculo de massa específica e viscosidade do fluido.

Ainda no segmento L4, foi inserido em um orifício sobre o tubo a tomada de captação de ar referente ao analisador de gás modelo Testo 350XL, para medir as concentrações instantâneas de oxigênio e dióxido de carbono na mistura, gerando arquivos de dados que permitam a construção de curvas temporais com as leituras experimentais.

Por fim, para acompanhamento das condições atmosféricas do ar contido no laboratório, um termo-higrômetro modelo Dwyer UHH auxiliou nos testes, permitindo a verificação dos parâmetros de umidade relativa e temperatura de bulbo úmido do ar no túnel de vento.

### **4.3 Controle e aquisição de dados**

O perfil de velocidades do escoamento é diretamente associado a qualidade da montagem, tais como a presença de um bocal, alinhamento entre os dutos e ao controle da rotação do soprador, promovido por um inversor de frequência WEG modelo CFW 09.

O controle da rotação do motor do soprador efetuado pelo inversor de frequência é feito por intermédio do *software* de projeto gráfico de sistema *LabView* que disponibiliza as ferramentas necessárias para criar e implementar sistemas de medição e controle por meio de uma integração de *hardware* e *software* [39].

Para que estes dispositivos possam fornecer registros instantâneos e confiáveis, um sistema automático de aquisição de dados gerenciou a instrumentação composta por um transmissor de pressão e um de temperatura, e os medidores de vazão tubo de Pitot e ultrassônico. Dessa forma, é possível adquirir e registrar informações do processo, tais como velocidade e vazão do escoamento no túnel de vento, pressão e temperatura absoluta, velocidade do som e estimativas de massa específica e número de Reynolds.

## 5 METODOLOGIA

Tão importante quanto possuir um laboratório bem estruturado e com uma instrumentação adequada é definir as ações que permitam a obtenção de resultados representativos e fidedignos ao processo real do qual se estuda. A escolha da metodologia deve ser feita com avaliações concretas e considerando-se o mínimo possível de hipóteses físicas, buscando-se também utilizar fontes de dados que forneçam valores confiáveis. Sendo assim, apresenta-se neste tópico as seguintes ações adotadas pertinentes ao estudo proposto:

- Caracterização do escoamento pelo tubo de Pitot;
- Análise teórica da atenuação ultrassônica;
- Leituras ultrassônicas realizadas em túnel de vento com diferentes teores de CO<sub>2</sub>;
- Leituras ultrassônicas realizadas em *dry-calibration* com diferentes teores de CO<sub>2</sub>.

Tais procedimentos serão esclarecidos separadamente, assim como as ferramentas teóricas aplicadas nas análises.

### 5.1 Caracterização do escoamento pelo tubo de Pitot

Foram utilizados três níveis de rotação do soprador para o estudo da simetria do perfil de velocidades verificadas pelo tubo de Pitot: 567, 962 e 1402 rpm, sendo escolhidos de forma a gerarem diferenciais de pressão relativamente estáveis neste medidor. A definição destes perfis foi obtida após a varredura diametral realizada por este instrumento, segundo o sistema de referências demonstrado na Figura 7.

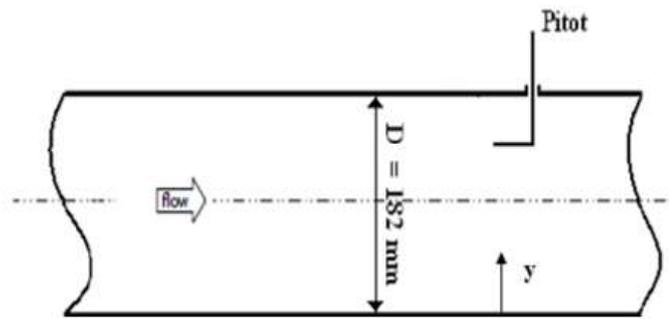


Figura 7 – Referência para os pontos de medição do tubo de Pitot.

A velocidade local em uma posição radial é calculada por uma expressão como na Eq. (8), sendo considerada para um escoamento incompressível em regime permanente e sem gradientes transversais de velocidade.

$$v = \beta \cdot \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (8)$$

$v$  : velocidade do escoamento;

$\beta$  : fator de calibração do tubo de Pitot, sendo aproximadamente 1 (um) quando nas condições padrão descritas na ISO 3966;

$\Delta p$  : pressão diferencial gerada no tubo de Pitot (Pa), sendo aferida por um transmissor de pressão manométrica;

$\rho$  : massa específica do fluido ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

Para a definição do perfil de velocidades desenvolvido no túnel de vento, foram definidos 4 pontos de medição ao longo do raio de acordo com a aproximação Log-Chebyshev apresentada na norma ISO 3966 [19], posições estas destacadas com um sublinhado na Tabela 5, além do registro de velocidade na posição central do tubo.

Tabela 5 - Localização dos pontos de medição pelo tubo de Pitot, segundo a aproximação Log-Chebyshev.

Número de pontos de medição por raio	r/R	y/D
4	0,3314 ± 0,0100	0,3343 ± 0,0050
	0,6124 ± 0,0100	0,1938 ± 0,0050
	0,8000 ± 0,0100	0,1000 ± 0,0050
	0,9524 ± 0,0024	0,0238 ± 0,0012
5	0,2866 ± 0,0100	<u>0,3567 ± 0,0050</u>
	0,5700 ± 0,0100	<u>0,2150 ± 0,0050</u>
	0,6892 ± 0,0100	<u>0,1554 ± 0,0050</u>
	0,8472 ± 0,0076	<u>0,0764 ± 0,0038</u>
	0,9622 ± 0,0018	0,0189 ± 0,0009

Tal método dá origem então a um padrão com 9 pontos de medição pelo tubo de Pitot na seção transversal de teste, conforme Tabela 6, aplicando-se a média aritmética de 60 leituras de velocidades adquiridas a cada 2 segundos e definidas em cada uma destas posições estabelecidas.

Tabela 6 - Pontos da seção transversal do tubo para medição pelo tubo de Pitot.

y/D								
0,077	0,154	0,214	0,357	0,500	0,643	0,786	0,846	0,923

A velocidade média do escoamento, abordada nesta norma como *velocidade de descarga*, foi determinada a partir de uma integração numérica da velocidade na seção transversal circular do duto através de interpolações entre pares sucessivos de pontos de medição de acordo com a relação r/R. A localização dos pontos de medição correspondem aos valores de distância em relação à parede y/D, conforme mostrado na Tabela 5. Esta velocidade de descarga do escoamento ( $V_D$ ) foi inferida pela Eq.(9), proposta na seção 10.1 da norma [19], em que  $v_0$  é a velocidade radial máxima e  $v_1, v_2...v_n$  são as velocidades ao longo da seção transversal com seus respectivos raios  $r_1, r_2, \dots, r_n$ , sendo  $r_i = r/R$  e  $R$  o raio da seção transversal.

$$\begin{aligned}
V_D = & v_0 \left( -\frac{1}{12} r_2^2 + \frac{5}{12} r_1^2 + \frac{1}{12} \frac{r_2^3}{r_2} \right) r_2^3 + v_1 \left( \frac{1}{6} r_1^2 + \frac{2}{3} r_2^2 - \frac{1}{12} r_3^2 \right) - v_2 \left( \frac{r_1^3}{12 r_2} \right) + \\
& \sum_{i=2}^{i=n-2} v_i \left[ -\frac{1}{12} r^{1(i+2)} + \frac{2}{3} r^{2(i+1)} - \frac{2}{3} r^{2(i-1)} + \frac{1}{12} r^{2(i-2)} \right] + v_{(n-1)} \left[ \frac{1}{2} r^2_n + \frac{1}{12} r^{2(n-1)} - \right. \\
& \left. \frac{2}{3} r^{2(n-1)} + \frac{1}{12} r^{2(n-3)} \right] + \\
& v_n \left\{ \frac{m}{m+1} (1 - r^2_n) + \frac{[r^2_n - r^{2(n-1)}]^2}{12m(1 - r^2_n)} + \frac{7}{12} r^2_n - \frac{2}{3} r^{2(n-1)} + \frac{1}{12} r^{2(n-2)} \right\}
\end{aligned}
\tag{9}$$

O índice  $n$  refere-se ao número de pontos por raio, cujo valor empregado neste trabalho já foi definido como  $n=4$ . O fator  $m$  depende da rugosidade da parede do tubo e das condições do escoamento, e é compreendido entre 4 (parede rugosa) e 10 (parede lisa), sendo adotado neste estudo um valor médio  $m=7$ .

Como parâmetro quantitativo de turbulência gerada nos escoamentos avaliados durante os experimentos, o número de Reynolds, definido como  $Re$  segundo Eq. (10), foi estimado em cada instante de aquisição de leituras pelo tubo de Pitot.

$$Re = \frac{\rho \bar{V} D}{\mu}
\tag{10}$$

$\rho$  : massa específica do fluido ( $kg/m^3$ );

$\bar{V}$  : velocidade média do escoamento ( $m/s$ );

$D$  : diâmetro do tubo ( $m$ );

$\mu$  : viscosidade dinâmica ( $Pa.s$ ).

Para estimativa da massa específica ( $\rho$ ) da mistura, a Eq. (11) foi estimada por um comportamento tal como gás ideal, sendo atualizada em cada instante de medição de

acordo com registros verificados pelos transmissores de pressão e temperatura absolutas instalados no túnel de vento.

$$\rho = \frac{PM}{ZR_0T} \quad (11)$$

*P* : pressão absoluta do meio (Pa), medida pelo transmissor;

*R*<sub>0</sub> : constante molar do gás ( $\approx 8,314 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$ );

*M* : massa molar do ar (kg/mol);

*Z* : fator de compressibilidade, sendo adotado igual a 1 (um) devido as características incompressíveis do escoamento;

*T* : temperatura absoluta do meio (K), medida pelo transmissor.

Quanto a viscosidade dinâmica ( $\mu$ ) do fluido, aplicou-se a correlação de *Sutherland* [40] para gases, segundo Eq. (12), sendo esta dependente da temperatura do escoamento medida pelo transmissor.

$$\mu = \frac{aT^{1/2}}{1 + b/T} \quad (12)$$

*a* : constante, para o ar sob condições atmosféricas equivale a  $1,458 \times 10^{-6} \text{ kg/(m.s.K}^{1/2})$ ;

*b* : constante, para o ar sob condições atmosféricas equivale a 110,4 K.

A qualidade dos resultados produzidos pelo tubo de Pitot, bem como pelo controle do túnel de vento, será investigado por meio da comparação com um modelo teórico de escoamento unidimensional completamente desenvolvido reconhecido, tal como o perfil apresentado por *De Chant* [41], de acordo com o mostrado pela Eq. (13).

$$v(y) = V_{\text{máx}} \left\{ \text{sen} \left[ \frac{\pi}{2} \left( \frac{y}{R} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

$v(y)$  : velocidade do escoamento na posição  $y$  (m/s);

$V_{\text{máx}}$  : velocidade máxima do escoamento (m/s).

A escolha deste modelo como referência baseia-se em verificações anteriores realizadas no túnel de vento, onde notou-se que tal instalação produz um perfil de velocidades turbulento mais próximo do apresentado por *De Chant* do que, por exemplo, pela Lei de Potência.

## 5.2 Modelo de atenuação ultrassônica

De acordo com o apresentado no item relativo à revisão bibliográfica ao início deste trabalho, é sabido que a absorção acústica é dependente das propriedades termofísicas do meio no qual se propagam, assim como da frequência de emissão do sinal. Diante disso, a produção de um modelo matemático que quantifique a atenuação acústica em condições distintas de escoamento torna-se útil para o entendimento de possíveis alterações inesperadas nas leituras do medidor de vazão ultrassônico, sobretudo em aplicações de gás de queima em instalações de petróleo *off-shore*, em que são comuns as variações de composição química da mistura.

Como ferramenta para análise desta absorção, a Lei de Lambert/Beer para gás natural indica as principais variáveis operacionais que alteram a intensidade de propagação de uma onda mecânica na mistura, descrevendo que a pressão acústica associada é inversamente proporcional à distância entre transdutores e a um coeficiente de atenuação específico de cada componente gasoso, como demonstrado na Eq. (14) [32, 33].

$$\frac{p}{p_0} = e^{-(\alpha_1 C_1 + \alpha_2 C_2 + \dots) \cdot L}$$

(14)

$p$ : pressão acústica (Pa);

$p_0$ : pressão acústica de referência (Pa);

$\alpha_i$ : coeficiente de atenuação do componente  $i$  ( $m^{-1}$ );

$C_i$ : concentração do componente  $i$ ;

$L$ : distância entre transdutores (m).

A estimativa do coeficiente de atenuação é obtida por uma parcela que representa os fenômenos de absorção clássica em adição a um termo indicativo de relaxação molecular. Para tais apurações, trabalhos científicos direcionados à medição ultrassônica de vazão fundamentam e sustentam a avaliação desta atenuação a partir de modelos teóricos obtidos [32, 33, 42].

Um modelo de atenuação clássica reconhecido pela comunidade científica pode ser estruturado como na Eq. (15) [32], onde nota-se que o coeficiente de absorção é proporcional à viscosidade e condutividade térmica do fluido, e também ao quadrado da frequência da onda emitida no meio.

$$\alpha_c = \frac{\omega_f^2}{2\rho_0 c^3} \left( \frac{4}{3} \mu + \frac{(\gamma - 1)k}{c_p} \right)$$

(15)

$\alpha_c$ : coeficiente de atenuação clássica ( $m^{-1}$ );

$c$ : velocidade do som (m/s);

$\mu$ : viscosidade dinâmica (Pa.s);

$k$ : condutividade térmica (W/mK);

$\omega_f$ : velocidade angular =  $2\pi f$ , onde  $f$  é a frequência da onda (rad/s);

$\rho_0$ : massa específica de referência ( $kg/m^3$ );

$\gamma$  : razão de calores específicos  $\approx 1,35$  segundo AGA 10;

$c_p$  : calor específico à pressão constante (J/kg.K).

Quanto ao fenômeno de relaxação observado em presença de determinados gases, uma estimativa desta contribuição pode ser arranjada como na Eq. (16), onde indica-se que esta atenuação torna-se maior a medida em a frequência de propagação da onda aproxima-se da frequência de relaxação molecular da mistura fluida [32].

$$\alpha_r \lambda = 2[\alpha\lambda]_{\max} \frac{f/f_r}{1 + (f/f_r)^2} \quad (16)$$

$\alpha_r$  : coeficiente de absorção por relaxação ( $m^{-1}$ );

$f$  : frequência da onda (Hz);

$\lambda$  : comprimento de onda (m);

$[\alpha\lambda]_{\max}$  : máxima absorção por comprimento de onda;

$f_r$  : frequência de relaxação molecular;

Sabendo-se que a composição do ar atmosférico é cerca de 78% formado por nitrogênio, empregou-se como base para este cálculo estimado de absorção acústica resultados experimentais de um estudo realizado em 2003 com uma mistura de CO<sub>2</sub> e N<sub>2</sub> em diferentes composições desses elementos [43]. Como suporte para a definição das propriedades termodinâmicas do escoamento, o *software* de engenharia *Desktop Gas* [44] foi utilizado para estas estimativas, sendo a confiabilidade deste *software* demonstrada e comprovada no Apêndice A. Assim, associando os dados consultados nestas fontes às Eqs. (15) e (16) para estabelecimento da atenuação acústica por comprimento de onda ( $\alpha\lambda$ ), consegue-se definir as curvas representativas em diferentes concentrações de CO<sub>2</sub>, de acordo com a Figura 8, representada em escala logarítmica no eixo das abcissas. As análises foram realizadas para condições ambientes próximas de 20°C e 1 atm.

Em cada quadro apresentado, a curva preta crescente representa o efeito apenas da absorção clássica, enquanto a curva azul com ponto de máximo indica a influência da relaxação característica da molécula de  $\text{CO}_2$ . As marcações tracejadas em vermelho indicam a localização da frequência de 100 kHz dos transdutores utilizados neste trabalho, realizado em túnel de vento.

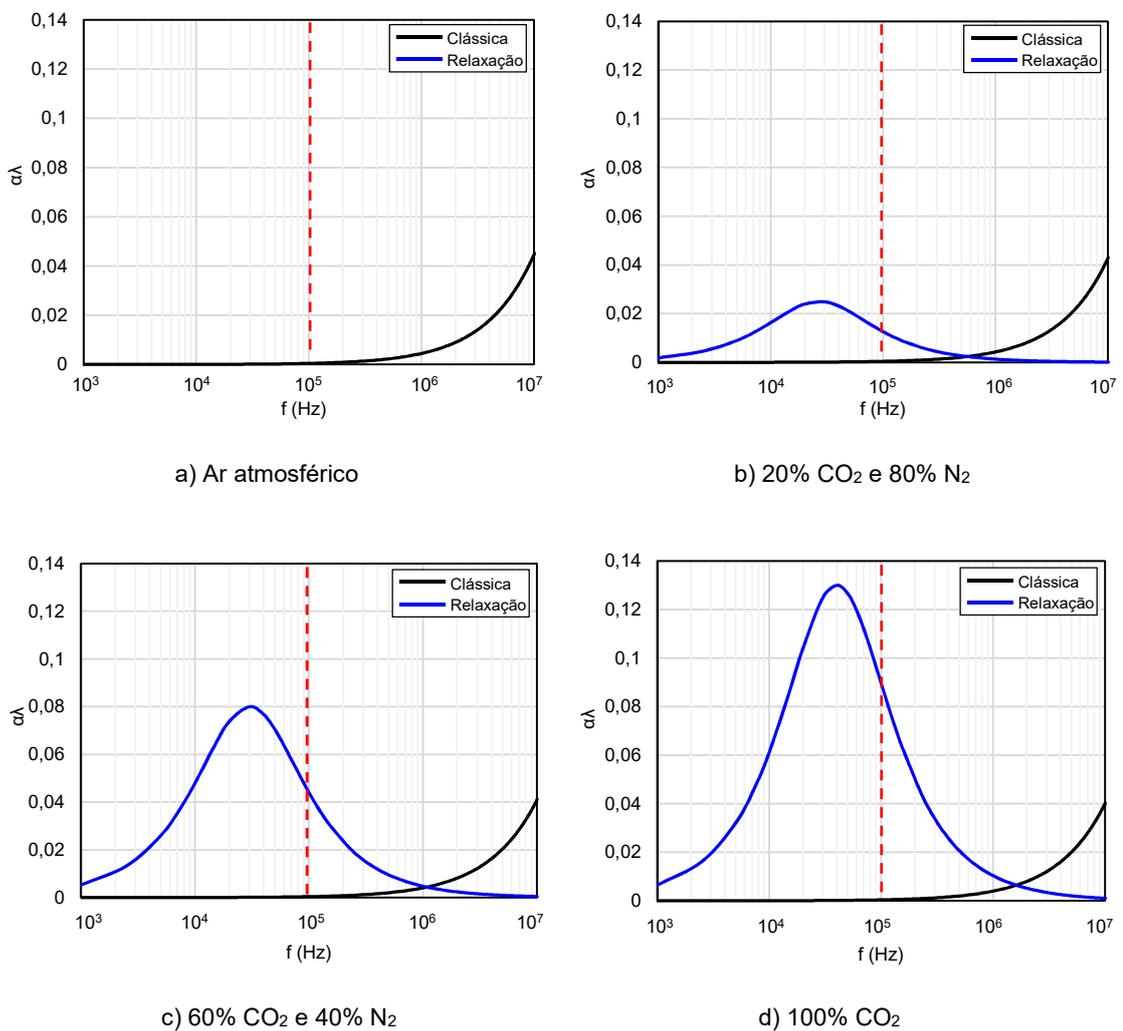


Figura 8 – Efeito da frequência nos modos de absorção clássica e por relaxação em diferentes composições de mistura, destacando-se o transdutor de 100 kHz.

Nota-se na Figura 8 que na presença de ar atmosférico a onda sofre efeito apenas da absorção clássica, sendo esta proporcional a sua frequência. Com a elevação do teor de  $\text{CO}_2$  na mistura há um incremento na atenuação acústica devido a intensificação

da relaxação, percebida pelo surgimento de uma nova curva com expansão do domo de máxima absorção. A amplitude desta curva pode ser verificada por meio da Tabela 7, sendo indicado os valores dos principais parâmetros utilizados na definição da absorção por relaxação proposta.

Tabela 7– Parâmetros de análise do efeito de relaxação, segundo a composição química da mistura.

CO <sub>2</sub> (%)	N <sub>2</sub> (%)	f <sub>r</sub> (Hz)	[αλ] <sub>máx</sub>
20	80	27000	0,025
60	40	30000	0,08
100	0	40000	0,13

É possível observar na Tabela 7 que o aumento do teor de CO<sub>2</sub> eleva a frequência de relaxação (f<sub>r</sub>) molecular da mistura na qual ocorrerá a máxima absorção acústica, intensificando também a amplitude dessa absorção (αλ<sub>máx</sub>). Dessa forma, verifica-se na Figura 8 que o transdutor de 100 kHz adotado nos ensaios em túnel de vento apresenta uma frequência de vibração superior à de relaxação crítica associada ao ponto de máximo da curva, sendo que a substituição deste transdutor por um de maior frequência, porém inferior a 10<sup>3</sup> kHz, tende a reduzir a atenuação do sinal ultrassônico, visto que acima deste valor a absorção clássica torna-se consideravelmente influente.

A escolha dos transdutores ultrassônicos para gás de queima com alto CO<sub>2</sub> deve portanto levar em consideração tais diagramas, buscando selecioná-los com uma determinada frequência de emissão de forma a se distanciar desta região de máxima redução de pressão acústica, pois torna ameaçada a performance das leituras do medidor. De acordo com a Figura 8, pode-se concluir que, por ser menos predisposto a produzir perda potencial de sinal, o transdutor escolhido em frequência reduzida (próxima de 1 kHz) seria o mais adequado, porém algumas limitações para tubulações de gás de queima tornam esta escolha não tão simples. Uma primeira observação diz respeito ao tamanho destes emissores de sinal, já que para baixas frequências estes elementos tendem a ser relativamente robustos e não apropriados para diâmetros típicos desta aplicação [33]. Outro fator considerável é que em baixas frequências os ruídos nas plataformas nas quais instalam-se as linhas de queima são mais intensos, podendo gerar interferências na qualidade do sinal ultrassônico e com isso

comprometer as leituras do medidor [45]. Um terceiro item a ser abordado para linhas de queima de gás é que como a pressão absoluta deste escoamento é ligeiramente inferior à atmosférica, há uma redução na aderência transdutor/escoamento, prejudicando a eficiência de transmissão do sinal, sendo interessante a utilização de frequências maiores pois produzem ondas com zonas de compressão mais próximas, gerando assim menores perdas de pressão acústica. Além disso, devido ao fato de que tubulações de gás de queima apresentem grandes diâmetros característicos (tipicamente de 8 a 36 polegadas), transdutores de baixa frequência podem não ser suficientes para a produção de um sinal potente, sendo necessário então a utilização de maiores frequências. Logo, a escolha do transdutor é algo desafiador e de grande importância na performance do medidor para esta aplicação em específico.

Após avaliada a redução de amplitude da onda causada com o incremento de CO<sub>2</sub> na mistura com N<sub>2</sub>, pode-se ainda estimar a totalidade desta atenuação referente aos efeitos somados de absorção clássica e de relaxação, obtendo-se novas curvas como indicadas na Figura 9. Basicamente o que se aplicou foi a divisão das curvas  $\alpha\lambda$  (f) definidas na Figura 8 pelos respectivos comprimentos de onda em cada composição química, sabendo-se que tal indicador é reduzido com o aumento de frequência. Assim, somando-os tais resultados obtém-se um novo diagrama, reproduzido na Figura 9 em escalas logarítmicas na abcissa e ordenada, representando o coeficiente de atenuação total  $\alpha_t$  em cada condição.

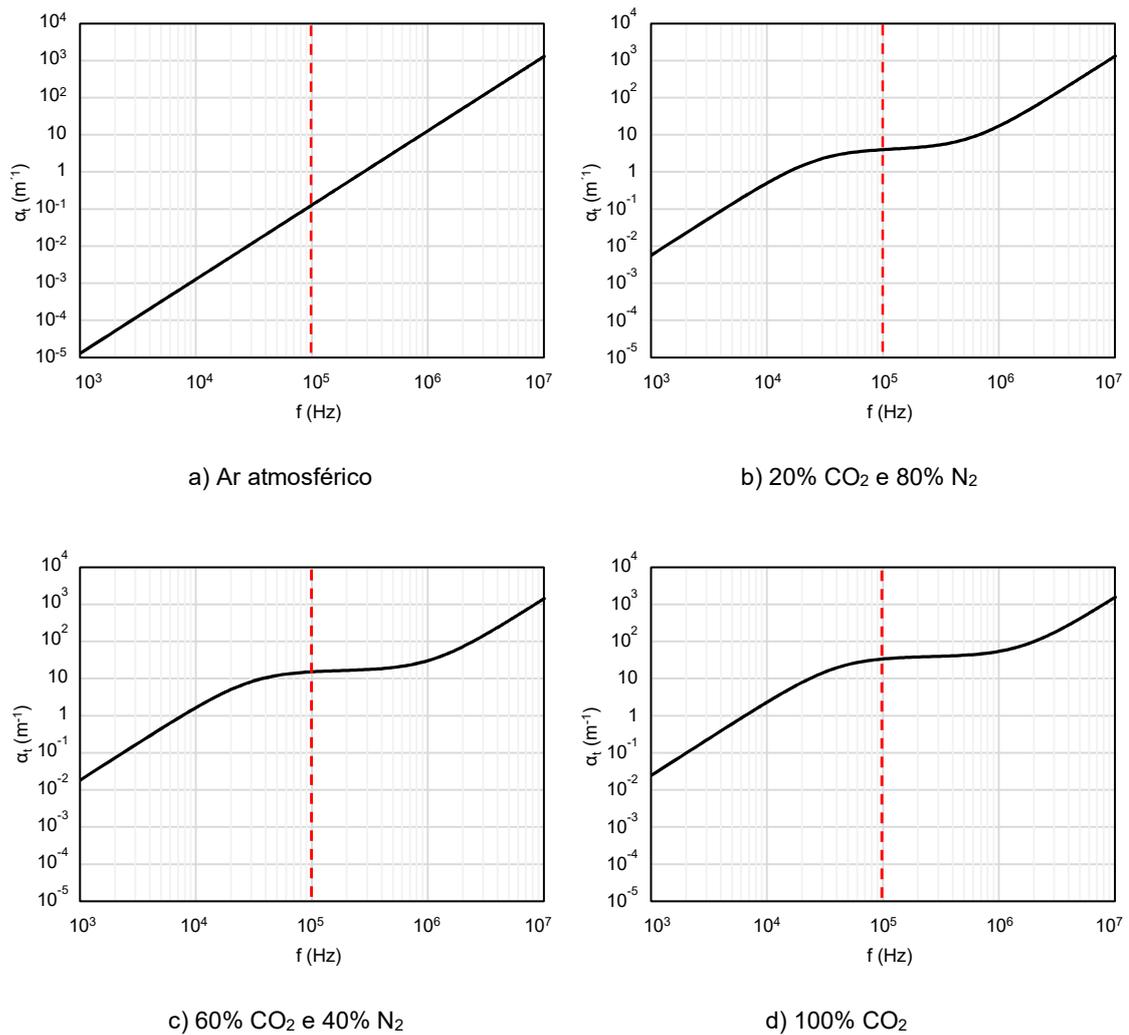


Figura 9 – Efeito da frequência na absorção acústica total em diferentes composições de mistura, destacando-se o transdutor de 100 kHz.

Observa-se que, em ar atmosférico, a intensidade da absorção acústica é mínima ( $\alpha_t \approx 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ ) quando em frequências próximas de  $10^3 \text{ Hz}$ , diferindo-se da mistura com elevado CO<sub>2</sub> que já apresenta um coeficiente com ordem de grandeza em  $10^{-2} \text{ m}^{-1}$ . É importante também perceber que, com CO<sub>2</sub> em maiores concentrações, as curvas tendem a se deslocar para cima, indicando a intensificação da atenuação com o aumento da frequência de propagação da onda.

Os dados utilizados no desenvolvimento destes modelos de atenuação encontram-se esclarecidos no Apêndice B.

### 5.3 Injeção de CO<sub>2</sub> no túnel de vento e leituras pelo medidor ultrassônico

A análise do efeito promovido pelo gás CO<sub>2</sub> no desempenho do medidor de vazão ultrassônico foi feita mediante algumas etapas com distintas configurações de montagem dos transdutores e condições de escoamento. Primeiramente, experimentos foram realizados no túnel de vento com ar atmosférico. Num estágio seguinte, empregou-se uma metodologia semelhante, porém com elevados teores de CO<sub>2</sub> adicionados na mistura.

#### 5.3.1 *Medições ultrassônicas de vazão com ar atmosférico*

Uma etapa a ser avaliada diz respeito a comparação da qualidade das medições ultrassônicas entre os casos faceado e inserido dos transdutores, porém em corrente de ar atmosférico, sem a adição de CO<sub>2</sub>. Nesta análise, o bocal foi instalado na entrada do túnel de vento sendo acompanhadas as medições do US e tubo de Pitot em três *setpoints* de rotação do soprador: 567, 962 e 1402 rpm. Em cada nível de velocidade foram registradas 30 leituras em intervalos de 2 segundos. Tais procedimentos foram aplicados primeiramente com os transdutores faceados e, em seguida, repetidos para a configuração de montagem inserida no escoamento.

#### 5.3.2 *Medições ultrassônicas de vazão com elevado teor de CO<sub>2</sub>*

Visando a obtenção de escoamentos em composições superiores a 60% de CO<sub>2</sub>, verificou-se nos primeiros testes realizados em túnel de vento que a vazão emitida por dois cilindros com este gás em alta pureza dispostos na entrada do túnel produziram concentrações bem distantes daquelas pretendidas, mesmo em rotações reduzidas do soprador. Como o túnel de vento é aberto e a quantidade de CO<sub>2</sub> para testes é limitada, foi necessário a adoção de alguma modificação na entrada do túnel de modo a limitar a entrada de ar, priorizando o ingresso de CO<sub>2</sub>, reduzindo significativamente a velocidade do escoamento e aumentando assim a fração do gás na mistura. Logo,

desenvolveu-se como proposta um tampão flangeado instalado no lugar do bocal e com furos direcionados ao centro da seção circular, como demonstrado na Figura 10.



Figura 10 – Tampão flangeado e com furos para injeção de CO<sub>2</sub>.

É possível notar que o tampão não veda o túnel, permitindo a entrada de ar pelas frestas. Como tais experimentos não objetivam a calibração do medidor ultrassônico e sim a análise de variabilidade e falha das medições, tal montagem proposta atende ao desejado neste trabalho, visto que não é garantida a formação de um perfil de velocidades turbulento completamente desenvolvido na seção de medição.

Esclarecida essa questão, os experimentos em túnel de vento foram iniciados. Com os transdutores ultrassônicos dispostos de maneira faceada à parede do túnel e com o analisador de gás instalado ao final da tubulação, uma rotação reduzida do soprador foi necessária para a produção de um escoamento com baixos níveis de ar e, por consequência, maiores teores de CO<sub>2</sub>, reproduzindo dinâmicas de escoamento semelhantes às de linhas de queima ( $Re \approx 10^4$ ). O registro de controle anexo ao cilindro foi liberado de maneira moderada, com as leituras sendo realizadas continuamente a cada segundo, sincronizando os dados do US e tubo de Pitot com os do analisador de gás. Com um *laptop* conectado ao US, foi possível acompanhar

também os instantes de falha de medição. Este procedimento foi repetido por quatro vezes, dando origem a quatro diferentes situações de análise em elevado CO<sub>2</sub>.

Com o intuito de amenizar os efeitos promovidos por este gás no desempenho do US, propõe-se uma aproximação dos transdutores visando potencializar o sinal ultrassônico emitido, como esquematizado na Figura 11. Dessa forma, o caminho acústico, que na montagem faceada apresentava um comprimento de 257 mm, foi reduzido para 177 mm com a inserção de 40 mm de cada transdutor no escoamento, sendo adequadamente configurado os parâmetros dimensionais junto ao *software* do medidor. Após estas modificações, o mesmo procedimento do caso faceado foi aplicado, obtendo-se agora um comportamento típico para a montagem inserida dos transdutores.

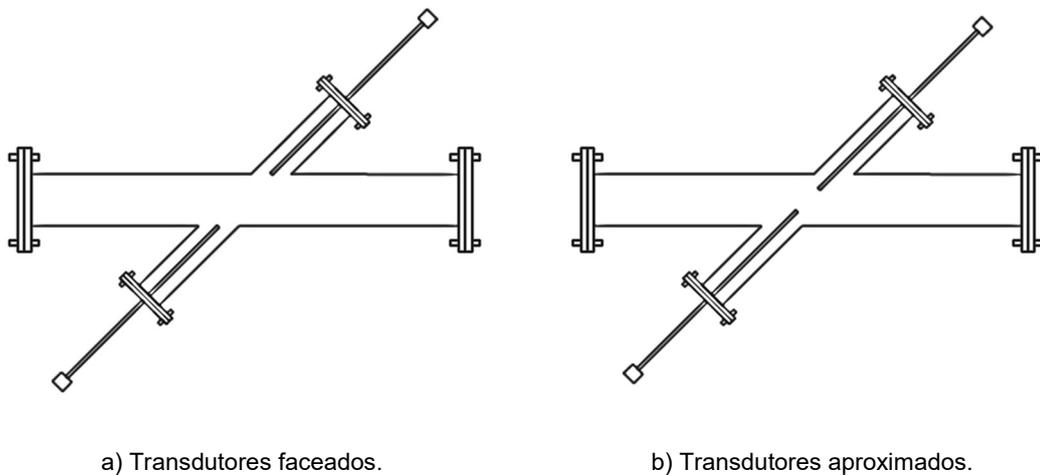


Figura 11 – Configurações de montagem dos transdutores ultrassônicos no carretel do túnel de vento.

Durante estes testes, o termo-higrômetro permitiu o acompanhamento da temperatura e umidade absoluta do ar atmosférico do laboratório.

#### 5.4 Injeção de CO<sub>2</sub> em *dry calibration* e leituras pelo medidor ultrassônico

O último procedimento utilizado para verificação da performance do US em atmosferas ricas em CO<sub>2</sub> se deu em uma instalação fora do túnel, com uma configuração de montagem conhecida como *dry calibration*, sendo os transdutores instalados em um carretel metálico de 286 mm de diâmetro e fechado nos dois lados por um material acrílico transparente, de acordo com a Figura 12. Com este aparato, busca-se eliminar os efeitos promovidos pelo escoamento, avaliando-se isoladamente a sensibilidade da tecnologia à presença do gás. Num primeiro lado foi realizado dois pequenos furos para a injeção do gás e para a tomada de temperatura da mistura gasosa. Na face oposta uma tomada amostral da mistura foi conectada ao analisador de gás por uma mangueira, captando porções gasosas para análise de composição química, apresentando adaptado também um registro de purga para alívio da pressão interna do carretel durante a adição do gás.



Figura 12 – Aparato experimental utilizado para as medições em montagem tipo *dry calibration*.

Após os transdutores serem dispostos com um espaçamento de 310 mm entre eles, o gás foi inserido gradualmente de maneira controlada por um regulador de pressão conectado ao cilindro, esperando-se a homogeneização da mistura a partir do acompanhamento de estabilização da composição química registrada. O sistema de

aquisição de dados realizou durante os experimentos registros contínuos de amostras, sendo gerados ao final arquivos de dados referentes às estimativas do medidor ultrassônico e do analisador de gás.

Após esta análise, os procedimentos foram repetidos para uma configuração de montagem aproximada dos transdutores, sendo o distanciamento acústico reduzido para 69% do valor inicial.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após definida a proposta de trabalho assim como a metodologia a ela associada, desenvolveu-se o procedimento experimental e a consequente análise dos resultados obtidos. Para isso realizou-se primeiramente a validação do tubo de Pitot como um medidor de referência do processo, prosseguindo para a verificação do efeito gerado pelo aumento da concentração de CO<sub>2</sub> nas medições do ultrassônico avaliado.

### 6.1 Tubo de Pitot

A fim de se avaliar o efeito de aumento da concentração de CO<sub>2</sub> na medição de vazão pelo princípio ultrassônico, utilizou-se o tubo de Pitot como referência para leituras de vazão em túnel de vento. Assim, torna-se necessária a realização de uma validação do medidor de referência. Na Tabela 8 constam os resultados da média aritmética, juntamente com o desvio padrão, das velocidades obtidas após a varredura realizada com o tubo de Pitot na seção transversal do tubo, para três níveis distintos de rotação do soprador.

Tabela 8 – Velocidades obtidas pelo tubo de Pitot durante a varredura transversal, cujas rotações do soprador utilizadas foram  $\omega_1 = 567$  rpm,  $\omega_2 = 962$  rpm e  $\omega_3 = 1402$  rpm.

<b>y/D</b>	<b>v<sub>ω1</sub> (m/s)</b>	<b>v<sub>ω2</sub> (m/s)</b>	<b>v<sub>ω3</sub> (m/s)</b>
0,077	11,782 ± 0,680	20,603 ± 1,007	31,312 ± 0,873
0,154	12,981 ± 0,635	22,427 ± 0,301	33,700 ± 0,990
0,214	13,293 ± 0,408	23,823 ± 0,263	34,771 ± 0,712
0,357	13,546 ± 0,377	24,136 ± 0,646	34,774 ± 0,548
0,500	14,070 ± 0,456	23,822 ± 0,415	35,052 ± 0,715
0,643	13,698 ± 0,363	23,794 ± 0,713	34,054 ± 0,581
0,786	13,416 ± 0,454	22,752 ± 0,458	33,899 ± 1,044
0,846	12,568 ± 0,366	21,664 ± 1,011	31,616 ± 1,038
0,923	11,362 ± 0,785	20,442 ± 0,773	30,529 ± 0,967

Diante destas leituras registradas verifica-se que a maior razão entre desvio padrão e média foi na posição  $y/D=0,923$ , mais próxima à parede interna do duto e na menor rotação do ventilador ( $\omega_1=567$  rpm), cuja variabilidade atingiu 6,9%. Tal resultado sugere que os processos a serem analisados no túnel de vento em questão encontram-se controlados dentro de uma variabilidade de até 6,9% sobre o valor lido de velocidade, sendo que em baixas rotações há uma elevação desta incerteza devido a menor sensibilidade deste medidor nestas condições de fluxo.

Como informado na seção 5.1 sobre a metodologia adotada, o perfil teórico unidirecional de velocidades turbulento e completamente desenvolvido apresentado por *De Chant* [41] será empregado como referência para a sustentação da qualidade do perfil de velocidades medido através do tubo de Pitot. A Figura 13 demonstra tais perfis: teórico e medido, baseados nas leituras indicadas na Tabela 8, permitindo averiguar principalmente o grau de simetria dos escoamentos obtidos nos experimentos.

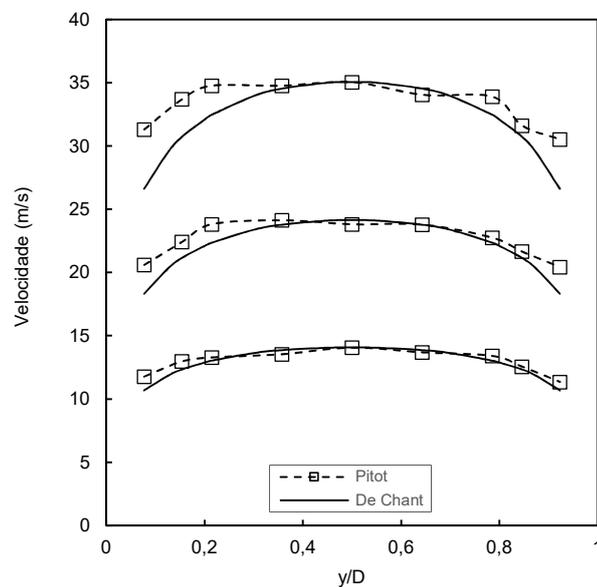


Figura 13 – Perfis teórico e experimental baseados nas leituras do tubo de Pitot.

As diferenças percentuais relativas ao distanciamento entre os perfis medido pelo tubo de Pitot e pela referência teórica de *De Chant* [41] são definidas na Eq. (17).

$$\delta = \frac{(\text{Valor}_{\text{med}} - \text{Valor}_{\text{ref}})}{\text{Valor}_{\text{ref}}} \times 100 \quad (17)$$

Os valores obtidos estão listados na Tabela 9 nas posições radiais de varredura e em cada rotação do soprador previamente definidos.

Tabela 9 – Diferenças percentuais  $\delta(\%)$  entre os perfis de velocidade medido e teórico em diferentes rotações do soprador.

<b>y/D</b>	<b>567 rpm</b>	<b>962 rpm</b>	<b>1402 rpm</b>
0,077	10,31	12,45	17,68
0,154	5,27	6,02	9,70
0,214	2,04	6,60	7,13
0,357	-2,26	1,51	0,71
0,500	0,00	-1,30	0,00
0,643	-1,16	-3,28	-1,37
0,786	2,98	-0,87	4,44
0,846	1,93	2,41	2,92
0,923	6,38	11,58	14,74

Na Tabela 9 observa-se que as diferenças percentuais máximas apresentam-se nas proximidades da parede do duto: 10,31% a 567 rpm, 12,45% a 962 rpm e 17,68% a 1402 rpm, indicando que nesta região as diferenças percentuais tendem a crescer com o incremento de vazão associado ao soprador, visto que o desenvolvimento do perfil de velocidades turbulento completamente desenvolvido é proporcional ao número de Reynolds, tornando-se mais uniforme e achatado e com isso distanciando-se ainda mais do formato teórico proposto por *De Chant* [41].

Apesar destas diferenças alcançarem um valor de até 17,68% no caso com um fluxo mais intenso e em uma região próxima à parede, cada desvio mostra-se semelhante ao desvio da sua posição simétrica oposta, inferindo que o perfil de velocidades

gerado é relativamente simétrico ao centro do tubo e que os trechos retos à montante e jusante do tubo de Pitot são suficientes para que tais escoamentos possam ser considerados completamente desenvolvidos.

Com a premissa de que o escoamento na seção de instalação do tubo de Pitot encontra-se desenvolvido, pode-se utilizar tais resultados para uma estimativa da velocidade média pelo método de integração ao longo da seção transversal do tubo, sendo relacionados através da já apresentada Eq. (9), definida como *velocidade de descarga* segundo a ISO 3966 [19]. Este cálculo deve ser efetuado para cada uma das rotações do soprador juntamente com a sua respectiva vazão volumétrica, estando listados na Tabela 10 e cujos cálculos podem ser acompanhados de maneira mais detalhada no Apêndice C.

Tabela 10 – Velocidade de descarga ( $V_D$ ) e vazão associada, calculadas para cada rotação do soprador.

$\omega$ (rpm)	$V_D$ (m/s)	$Q$ (m <sup>3</sup> /h)
567	12,583	1177
962	22,046	2066
1402	32,610	3053

Apesar dos resultados serem confiáveis por seguirem padrões internacionais de medição, nem sempre é interessante, por questões de praticidade, a realização da varredura completa com o tudo de Pitot ao longo da seção de teste para a definição da velocidade de descarga representativa do escoamento, sendo vantajoso o estabelecimento de uma correlação que simplifique esta análise. Considerando a repetitividade das leituras, uma simples análise pode ser feita relacionando-se as velocidades média ( $\bar{V}$ ) e máxima ( $V_{m\acute{a}x}$ ) do escoamento identificadas na Figura 14, sendo esta última determinada com a centralização do tubo de Pitot na seção de teste quando em um escoamento completamente desenvolvido.

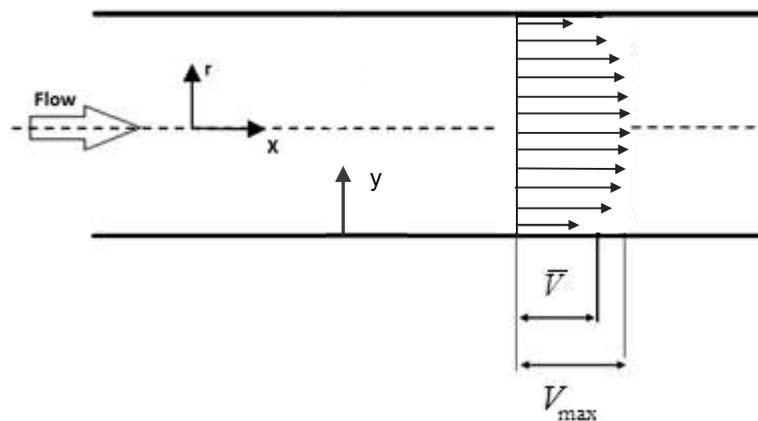


Figura 14 – Representação do perfil de velocidades turbulento completamente desenvolvido.

Estudos desenvolvidos no túnel de vento permitiram verificar que, para determinados *setpoints* de rotação do soprador, a velocidade média do escoamento se aproxima de 83% o valor da velocidade máxima desenvolvida na mesma seção transversal [29]. Resta agora saber a representatividade de tal razão de velocidades para o Re aplicado neste trabalho.

Para isto, propõe-se, na Tabela 11, uma verificação da diferença percentual entre os resultados obtidos por esta relação e aqueles de referência definidos anteriormente como velocidade de descarga de acordo com a ISO 3966 [19].

Tabela 11 – Desvios percentuais entre as velocidades média ( $0,83V_{m\acute{a}x}$ ) e de descarga ( $V_D$ ) estimadas a partir de dados experimentais do tubo de Pitot.

$\omega$ (rpm)	$V_D$ (m/s)	$V_{m\acute{a}x}$ (m/s)	$0,83V_{m\acute{a}x}$	$\delta$ (%)
567	12,583	14,070	11,678	-7,191
962	22,046	24,136	20,033	-9,131
1402	32,610	35,052	29,093	-10,785

Como este trabalho não tem por finalidade a calibração de medidores de vazão a partir dos registros obtidos pelo tubo de Pitot de referência, e sim a verificação da variabilidade das leituras de cada um deles separadamente, torna-se aceitável

trabalhar com esse coeficiente 0,83 nos próximos testes, sabendo-se que estas medições de velocidade média apresentam uma diferença de até -11% do valor de referência de acordo com a ISO 3966 [19].

O procedimento para estimativa do número de Reynolds a ser aplicado neste trabalho foi definido na seção 5.1, cujos resultados obtidos nos três níveis (*setpoints*) de rotação utilizados para a validação do tubo de Pitot encontram-se apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Números de Reynolds utilizados para a validação do tubo de Pitot.

$\omega$ (rpm)	$V_D$ (m/s)	Re
567	12,583	$1,4 \times 10^5$
962	22,046	$2,5 \times 10^5$
1402	32,610	$3,7 \times 10^5$

## 6.2 Efeito da concentração de CO<sub>2</sub> na medição por ultrassom

Nesta seção é avaliado o efeito da concentração de CO<sub>2</sub> num escoamento de ar no desempenho de um medidor de vazão ultrassônico, verificando-se ainda a qualidade das medições após a aproximação dos transdutores. Para isso, examinou-se a repetitividade por meio de testes realizados em túnel de vento em um *setpoint* fixo de rotação do soprador, obtendo-se concentrações de até 95% de CO<sub>2</sub>. Inicialmente mapeou-se o comportamento de três parâmetros de interesse (vazão, velocidade do som e potência do sinal ultrassônico) para a configuração com os transdutores faceados à parede do tubo, lembrando que a calibração da vazão deste instrumento junto ao medidor de referência não é objetivo deste estudo. Posteriormente, de forma a reduzir a atenuação sônica, os experimentos foram refeitos com os transdutores inseridos na tubulação, visando comparar a qualidade das medições entre as duas situações. As quantias de vazão definidas para o tubo de Pitot e US encontram-se expressas em normal metro cúbico por hora (Nm<sup>3</sup>/h), sendo relativo a uma correção

de vazão adequada para um estado de referência com temperatura em 20°C e pressão em 1 atm.

### 6.2.1 Análise da variabilidade induzida pela configuração aproximada dos transdutores ultrassônicos

Como proposta inicial de análise, foi avaliado o efeito induzido pelo escoamento na qualidade das leituras do medidor ultrassônico, sendo configurado os transdutores em diferentes distanciamentos entre eles. Para isso, foram realizados testes com os elementos sensores afastados (faceados à parede da tubulação) e aproximados, adotando-se um fluxo com ar apenas e em três rotações do soprador suficientes para fornecerem leituras estáveis da referência tubo de Pitot. Após a aquisição de 30 amostras de vazão em cada condição experimental, os dados brutos foram expurgados estatisticamente por meio do *Critério de Chauvenet*, baseado na possível exclusão de pontos espúrios não representativos do processo. Nesses testes, a temperatura ambiente se manteve em torno de 27°C e 65% a umidade relativa do ar. Tal aplicação encontra-se esclarecida no Apêndice D, cujos resultados tratados permitem a construção da Tabela 13.

Tabela 13 – Variabilidade das leituras após aplicação do critério de Chauvenet, sendo referente a aproximação dos transdutores em um escoamento de ar.

<b>Transdutores faceados</b>						
Parâmetros	Re = 1,3x10 <sup>5</sup>		Re = 2,3x10 <sup>5</sup>		Re = 3,3x10 <sup>5</sup>	
	<b>Pitot</b>	<b>US</b>	<b>Pitot</b>	<b>US</b>	<b>Pitot</b>	<b>US</b>
$\bar{Q}$ (Nm <sup>3</sup> /h)	1082,12	1071,34	1789,15	1833,63	2629,74	2756,97
$\sigma$ (Nm <sup>3</sup> /h)	26,80	16,91	24,75	32,53	28,83	31,67
$\Delta$ (%)	2,48	1,58	1,38	1,77	1,10	1,15
<b>Transdutores aproximados</b>						
Parâmetros	Re = 1,3x10 <sup>5</sup>		Re = 2,3x10 <sup>5</sup>		Re = 3,3x10 <sup>5</sup>	
	<b>Pitot</b>	<b>US</b>	<b>Pitot</b>	<b>US</b>	<b>Pitot</b>	<b>US</b>
$\bar{Q}$ (Nm <sup>3</sup> /h)	970,84	1024,29	1587,69	1786,20	2307,81	2628,21
$\sigma$ (Nm <sup>3</sup> /h)	26,08	24,35	11,60	44,90	18,73	33,85
$\Delta$ (%)	2,69	2,38	0,73	2,51	0,81	1,29

Os resultados apontam uma redução da vazão estimada pelo tubo de Pitot após a aproximação dos transdutores, provavelmente gerada pelo efeito intrusivo do elemento sensor, localizado à montante do medidor de referência, sob o perfil de velocidades. Adicionalmente, o tubo de Pitot se apresentou mais estável sob estas condições e com uma variabilidade de suas amostras não superior a 2,69%, permitindo com isso avaliar as medições obtidas pelo US em um processo comprovadamente controlado.

A vazão obtida pelo US se mostrou inferior no arranjo de maior aproximação dos transdutores. Provavelmente isto se deve ao fato de que a aproximação dos sensores promove um caminho acústico mais curto e somente na parcela de maior velocidade do escoamento, na região central do tubo, ao contrário da instalação dos transdutores faceados, cujo caminho acústico engloba todo o perfil de velocidades do escoamento turbulento completamente desenvolvido. Quanto ao coeficiente de variação estimado, permite verificar nos três números de Reynolds adotados que a inserção destes elementos no escoamento produz leituras de vazão mais instáveis. A Figura 15 fornece um diagrama mais conclusivo a respeito desta observação.

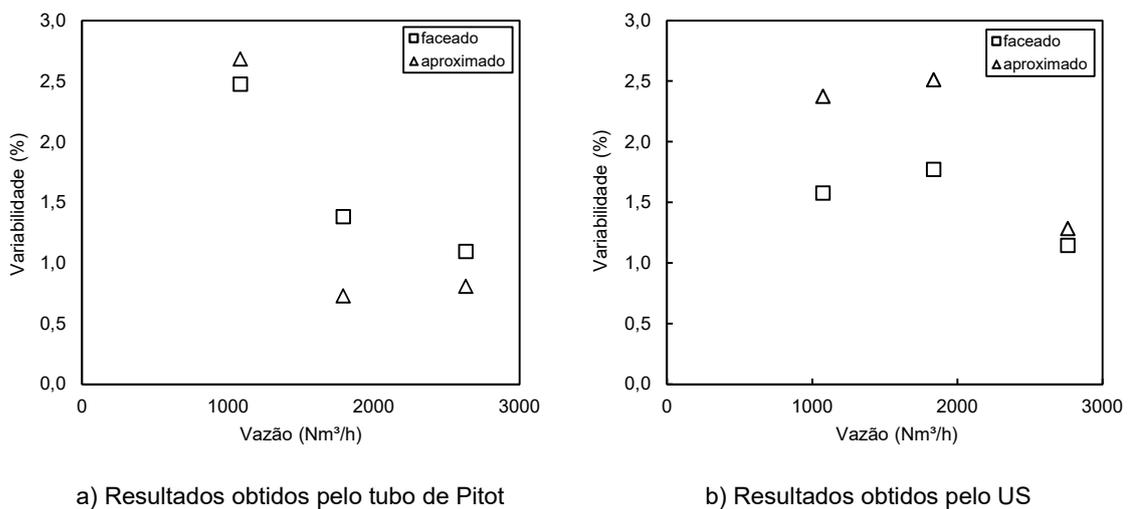


Figura 15 – Variabilidade das leituras produzidas nas configurações faceada e aproximada dos transdutores.

Tal comportamento pode estar associado ao aumento na amplitude de vibração dos transdutores induzida pelo arrasto do escoamento ou ao aumento da incerteza pela

redução dos tempos de trânsito produzidos nesta montagem aproximada dos elementos sensores.

Logo, conclui-se que a inserção dos transdutores ultrassônicos no tubo promove leituras de vazão ainda mais dispersas que na disposição faceada, devendo tal efeito ser lembrado nas análises posteriores sob condições de elevado CO<sub>2</sub>.

### 6.2.2 *Experimentos realizados com os transdutores faceando a parede do túnel de vento*

Buscando avaliar a performance do medidor ultrassônico de vazão modelo GE XGF868i de 100 kHz em elevadas concentrações de CO<sub>2</sub>, experimentos foram realizados em túnel de vento sob condições controladas e semelhantes, verificando-se também se há repetitividade no comportamento das leituras diante de tais circunstâncias. Dessa forma, quatro experimentos foram executados, obtendo-se escoamentos com alta concentração de CO<sub>2</sub>, avaliando parâmetros de vazão, velocidade do som e potência do sinal (*signal strength*) ultrassônico registrados pelo aparelho. Nesses testes, a temperatura ambiente se manteve em torno de 28°C e 65% a umidade relativa do ar.

Um outro indicador de desempenho a ser observado diz respeito a possíveis ocorrências de falhas de medição ou erros de leitura. Entende-se como falha de medição aqueles eventos em que os parâmetros de vazão e velocidade do som destoam do estado esperado associado ao *setpoint* de rotação do soprador e à composição química da mistura, respectivamente, produzindo um volume acumulado de mistura gasosa não representativo.

Em vista disso, propõe-se a filtragem das leituras brutas obtidas nos ensaios com elevado teor de CO<sub>2</sub>, aplicando-se 3 critérios de expurgo de dados de vazão como ferramenta de caracterização das falhas de medição, sendo critérios objetivos,

baseados em eventos observados durante o acompanhamento dos parâmetros operacionais:

- Critério A: falha por medição de vazão negativa;
- Critério B: falha por medida discrepante da velocidade do som estimada;
- Critério C: falha por erro de medição indicado pelo aparelho medidor (*signal strength*).

O critério A será aplicado sobre os dados brutos de vazão obtidos pelo medidor ultrassônico durante os ensaios, sendo desconsiderado todos aqueles valores de vazão negativos registrados, haja vista não se tratar de um resultado fisicamente coerente associado ao *setpoint* de rotação do soprador adotado. Tais leituras não serão contabilizadas na análise de volume gasoso acumulado em cada procedimento, assumindo então valores nulos de vazão nestes instantes.

Um critério AB proposto representará a análise conjunta dos critérios A e B, sendo empregado sob aquelas leituras de vazão já filtradas pelo critério A, incluindo-se ainda o expurgo dos registros obtidos em estágios de velocidade do som não coerentes com a composição química da mistura. Para isso, é fundamentado este procedimento na avaliação desta propriedade segundo a já apresentada AGA 10 [12] de referência. Nesta verificação, é possível definir limites de exclusão de dados associados a valores de velocidade do som esperados segundo as condições produzidas nos experimentos, sendo quantificadas como nulas todas aquelas leituras registradas em instantes de velocidade do som inferiores a 250 m/s e superiores a 350 m/s.

Como último método de análise de falha, um critério conjunto ABC será aplicado sob os registros de vazão já tratados pelo critério AB, sendo agora desconsideradas todas as leituras produzidas em estágios de erro de medição indicado pelo medidor. Tal erro refere-se a alertas emitidos na interface de acompanhamento dos dados, indicando aqueles instantes em que a amplitude do sinal ultrassônico excede os limites máximo ou mínimo programados segundo a calibração, gerando, então, leituras pouco

confiáveis e que serão também contabilizadas como nulas nas análises de volume acumulado.

Outros critérios para a filtragem das leituras de vazão não representativas poderiam ser utilizados, porém, diante dos parâmetros de acompanhamento avaliados neste estudo, entende-se que tais critérios sejam objetivos e aplicáveis em plataformas *off-shore*, tendo a vantagem de poderem ser aplicados mesmo na ausência de uma referência.

Em complemento a esta proposta, serão aplicados para a caracterização destes eventos, índices de falha de medição, indicando o percentual de leituras que falharam quando o instrumento foi submetido a um determinado patamar de CO<sub>2</sub> no escoamento. É importante salientar que os dados de vazão a serem utilizados nestas análises são aqueles associados a teores de CO<sub>2</sub> exclusivamente acima de 5%, haja vista ter sido esta a menor concentração a qual se observou alguma falha de medição. Por fim, estima-se o volume de gás acumulado associado ao escoamento, assim como a sua alteração após aplicados os critérios de falha.

Os dados brutos obtidos nestes experimentos, assim como as falhas estabelecidas segundo critérios, podem ser verificados de acordo com o intervalo de Figuras 16-31, cuja avaliação dos quatro ensaios foi dividida por campanhas (i, ii, iii e iv). As curvas vermelhas representam a concentração de CO<sub>2</sub> escalada segundo o eixo ordenado à esquerda, enquanto as curvas restantes têm amplitudes registradas segundo o eixo ordenado à direita e indicativas dos parâmetros de interesse de medidor. Todas as leituras encontram-se sincronizadas de acordo com o horário de realização dos ensaios definidos no eixo das abcissas, facilitando assim a percepção sobre o tempo de duração dos experimentos.

É importante salientar que o tubo de Pitot apresentou resultados com elevada variabilidade e pouco conclusivos, devido às condições de teste terem sido realizadas

em velocidades de escoamento bem inferiores à limitada por sua sensibilidade, de acordo com as recomendações da ISO 3966 [19].

*i. Injeção 1 de CO<sub>2</sub>*

A Figura 16 permite visualizar esta observação no primeiro ensaio realizado com injeção de CO<sub>2</sub> no escoamento.

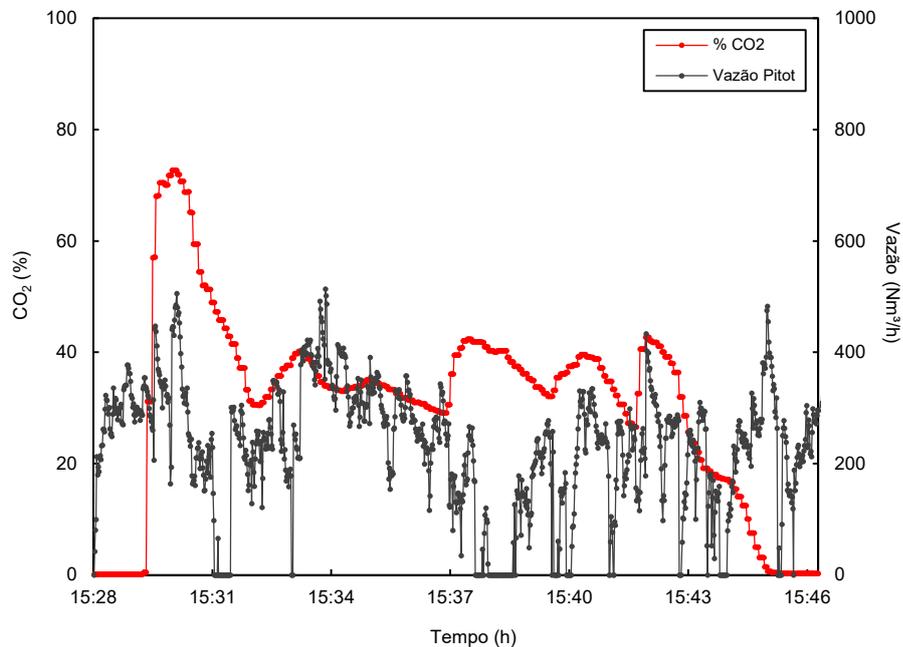


Figura 16 – Comportamento da vazão registrada pelo tudo de Pitot, durante a campanha *i*, com a variação de CO<sub>2</sub>.

É possível verificar que as leituras do tubo de Pitot comportam-se de maneira bastante irregular mesmo fora do intervalo de elevada concentração de CO<sub>2</sub>, gerando inclusive resultados de vazão nula. Isso se deve às pequenas diferenças de pressão produzidas no medidor, não sensíveis à sua operação. Tal variabilidade acentuada torna necessária, para um melhor entendimento, a representação das leituras de vazão em uma escala de maior amplitude que a adotada no diagrama de vazão do US, indicado na Figura 17.

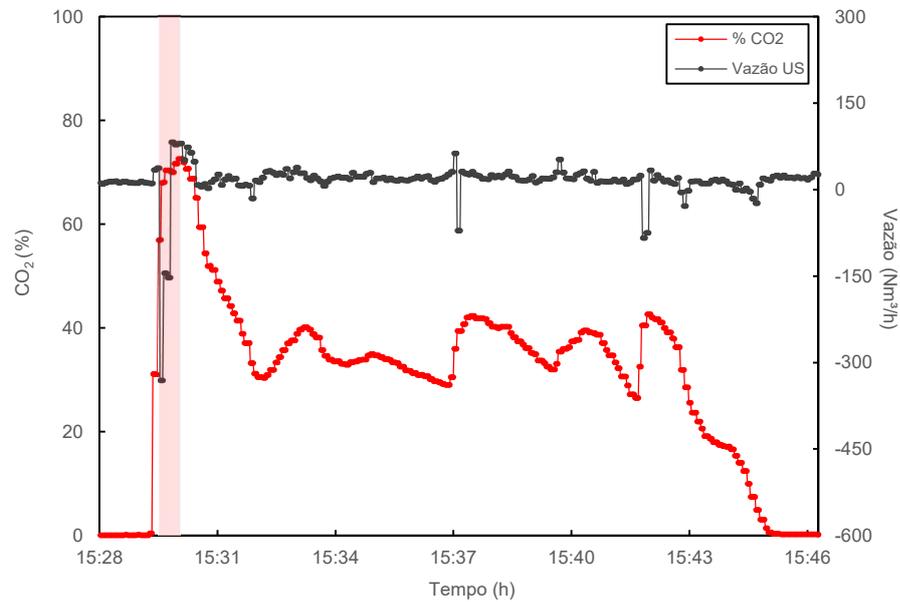


Figura 17– Comportamento da vazão registrada pelo US, durante a campanha *i*, com a variação de CO<sub>2</sub>.

Observa-se na Figura 17 que falhas referentes a leituras negativas de vazão (critério A) foram geradas em estágios de variação acentuada do teor de CO<sub>2</sub>, inclusive para concentrações inferiores a 20%. Adicionalmente, a faixa sombreada simboliza um período em que se registraram falhas nas leituras do US associadas ao alerta de erro indicado pelo medidor (critério C). Como observado, houve, no início do teste, um aumento repentino no teor de CO<sub>2</sub>, chegando a uma concentração de 72%, sendo acompanhado por um pico negativo de vazão e um estágio de falha registrado.

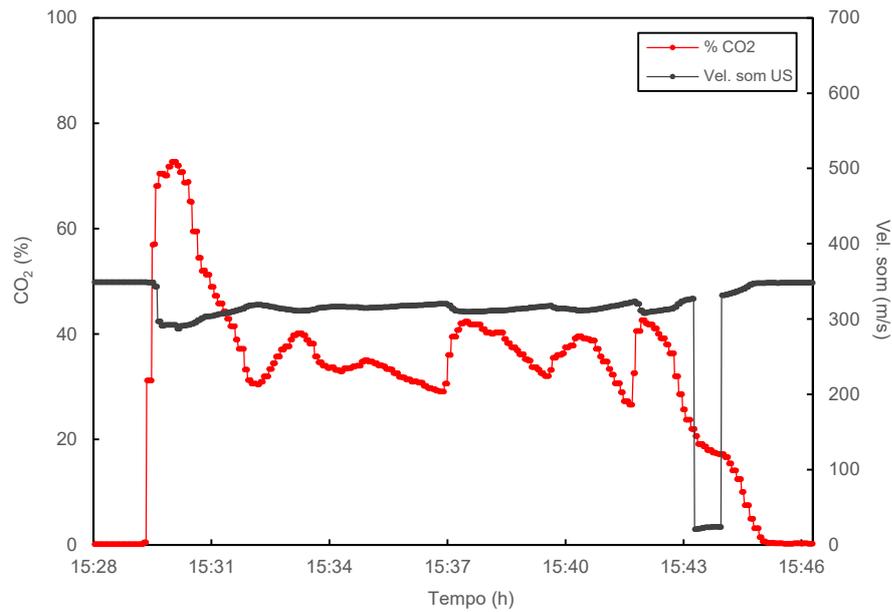


Figura 18– Comportamento da velocidade do som registrada pelo US, durante a campanha *i*, com a variação de CO<sub>2</sub>.

A velocidade do som registrada nos testes é um importante parâmetro de funcionamento do medidor, apontando que, naqueles instantes em que este indicador destoa de seu valor de referência, as leituras de vazão são pouco confiáveis. Neste experimento, tal variação de velocidade do som, constatada na Figura 18, teve sua amplitude iniciada como 349 m/s (típica para o ar atmosférico) e reduzida com o incremento de CO<sub>2</sub>, mantendo-se estável por quase todo o ensaio. Quando ao final do teste o escoamento encontrou-se composto por cerca de 20% deste gás, tal propriedade registrou uma queda acentuada em sua grandeza, caracterizando-se como falha de medição segundo o critério B adotado, retornando a um nível estável após alcançar 15% de CO<sub>2</sub>.

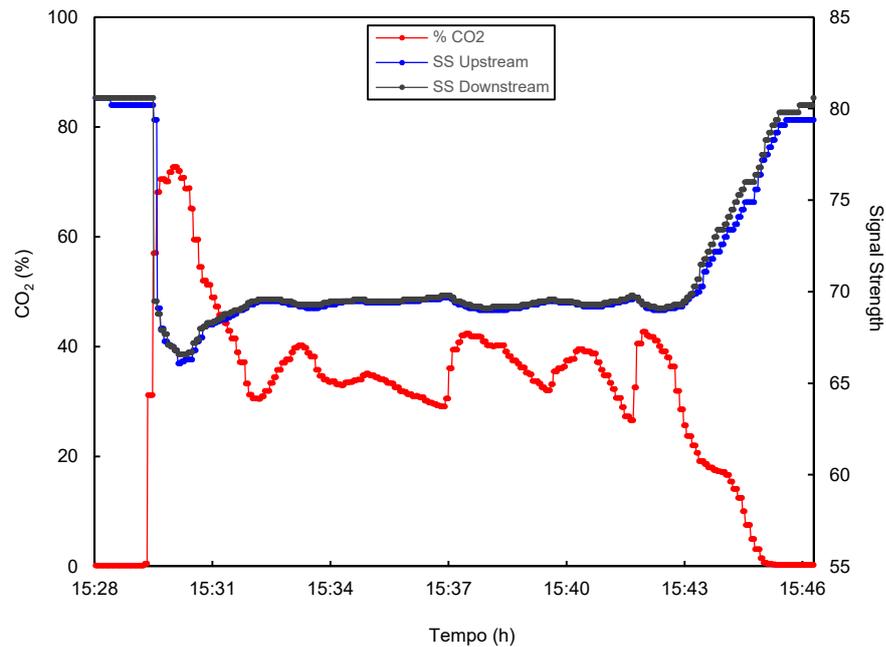


Figura 19– Comportamento da potência do sinal registrada pelo US, durante a campanha *i*, com a variação de CO<sub>2</sub>.

A potência do sinal atua como o parâmetro responsável por mensurar a intensidade do feixe ultrassônico recebido por cada transdutor. Devido ao fato do elemento receptor à jusante (*downstream*) captar um sinal transmitido a favor da direção do escoamento, o mesmo tende a registrar portanto uma potência do sinal (*signal strength* - SS) ligeiramente superior ao recebido pelo transdutor de montante (*upstream*), como pode ser conferido na Figura 19. Nota-se que há uma redução considerável na potência do sinal com o acréscimo de CO<sub>2</sub> ao escoamento, sendo razoável a premissa de que este gás possa gerar um efeito de perda de pressão acústica no feixe emitido, devendo ser realizados novos ensaios que sustentem tal pressuposto.

Com os estágios de falha revelados, torna-se interessante definir quantas leituras de vazão do medidor ultrassônico se configuraram como falha ao longo de todo o ensaio com elevado teor de CO<sub>2</sub>, podendo estes eventos serem examinados por meio dos índices demonstrados na Tabela 14. Em complemento, a variação do volume de gás acumulado ( $\Delta Vol$ ) após a aplicação de cada critério de falha é contabilizada, segundo

relação definida na Eq. (18), sendo um indicativo do quanto tais filtrações poderiam influenciar na avaliação do montante de gás a ser queimado no processo.

$$\Delta\text{Vol} = \frac{(\text{Volume acumulado})_{\text{filtrado}} - (\text{Volume acumulado})_{\text{total}}}{(\text{Volume acumulado})_{\text{total}}} \times 100 \quad (18)$$

O volume acumulado total indicado na Eq. (18) foi estimado através do cálculo da área sob a curva de vazão apresentada na Figura 17, sendo desconsiderada as áreas negativas, ou seja, o volume acumulado de referência é aquele estimado após a execução do critério A sob os dados brutos.

Tabela 14 – Falhas de medição definidas após a aplicação dos critérios de filtragem sob as leituras de vazão na campanha *i*.

	<b>Critério A</b>	<b>Critério AB</b>	<b>Critério ABC</b>
<b>Nº. de falhas</b>	70	110	133
<b>Índice de falhas (%)</b>	7,9	12,4	15,0
<b>Volume acumulado (m<sup>3</sup>)</b>	5,2	5,0	4,6
<b><math>\Delta\text{Vol. acumulado (%)}</math></b>	-	-3,2	-11,9

Nesta campanha, as análises foram executadas sob um total de 889 leituras de vazão, estando relacionadas às medições produzidas em instantes com concentração de CO<sub>2</sub> acima de 5%. De acordo com a Tabela 14, as condições operacionais criadas produziram falhas de medição em 7,9% de todas estas leituras registradas, segundo o critério A, e em 15,0% de todos os resultados registrados, segundo o critério ABC, lembrando que este último engloba os dados expurgados pelos critérios A, B e C.

Quanto à estimativa volumétrica de gás, percebe-se que a aplicação dos 3 critérios reduziu em 11,9% o volume de gás acumulado, sendo este um importante efeito promovido pelo CO<sub>2</sub> na performance do medidor ultrassônico destinado a linhas de queima.

A fim de detalhar o efeito atenuante do CO<sub>2</sub> sob a performance do US, as falhas contabilizadas na Tabela 14 foram fragmentadas em 5 patamares de concentração de CO<sub>2</sub>, sendo definidas a fração de leituras produzidas por nível de gás, bem como o índice de falhas referente a cada um desses níveis, estando dispostos na Tabela 15.

Tabela 15 – Índice de falha definido em patamares de concentração de CO<sub>2</sub>, sendo referente às leituras de vazão da campanha *i*.

CO <sub>2</sub> (%)	Leituras (%)	Índice de falha (%)		
		Critério A	Critério AB	Critério ABC
5 – 20	9,2	24,4	67,1	67,1
20 – 40	64,3	4,4	5,2	5,6
40 – 60	20,4	6,6	6,6	8,3
60 – 80	6,1	24,1	24,1	57,4
80 – 100	0,0	-	-	-

Nota-se na Tabela 15 que 64,3% das medições de vazão realizadas nesta campanha foram estimadas em teores de CO<sub>2</sub> entre 20 e 40%. Com a aplicação dos critérios de expurgo de dados, foi constatado que 67,1% das amostras registradas no menor patamar de CO<sub>2</sub> se revelaram como falhas de medição, estando associadas às variações acentuadas da concentração deste gás induzidas no início e fim do experimento, indicando a necessidade de se avaliar a performance do medidor baseando-se nos patamares de gás com maiores quantidades de amostras.

A campanha *ii* retrata um segundo ensaio realizado sob condições mais estáveis de concentração de CO<sub>2</sub>.

#### *ii. Injeção 2 de CO<sub>2</sub>*

A Figura 20 define o comportamento das leituras brutas de vazão pelo tubo de Pitot sob diferentes concentrações de CO<sub>2</sub> na corrente de ar.

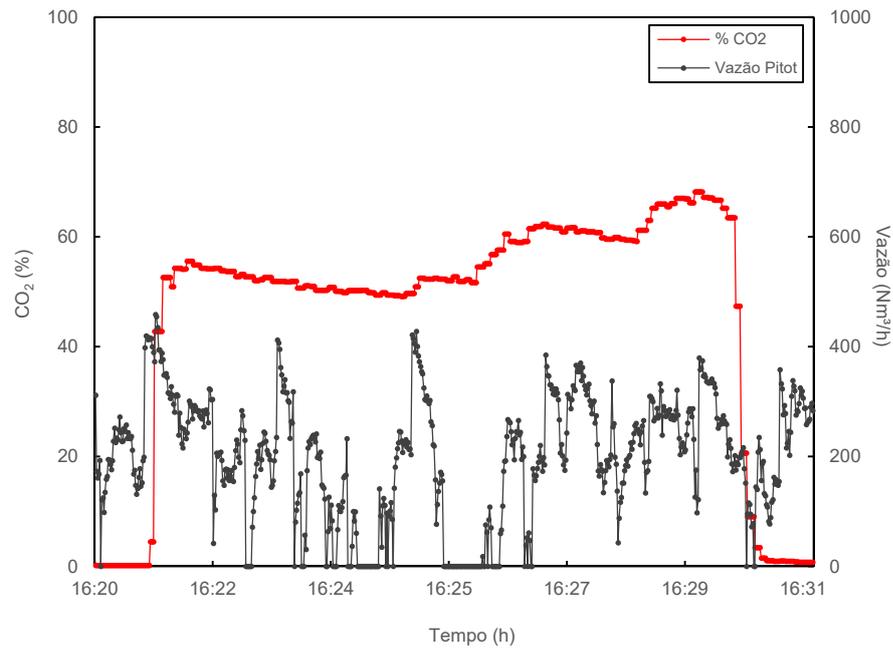


Figura 20– Comportamento da vazão registrada pelo tudo de Pitot, durante a campanha *ii*, com a variação de CO<sub>2</sub>.

Novamente os registros do tubo de Pitot forneceram informações pouco úteis no que diz respeito a sua utilização como medidor de referência, demonstrando ser não representativo de um processo já comprovado como controlado na seção 6.1.

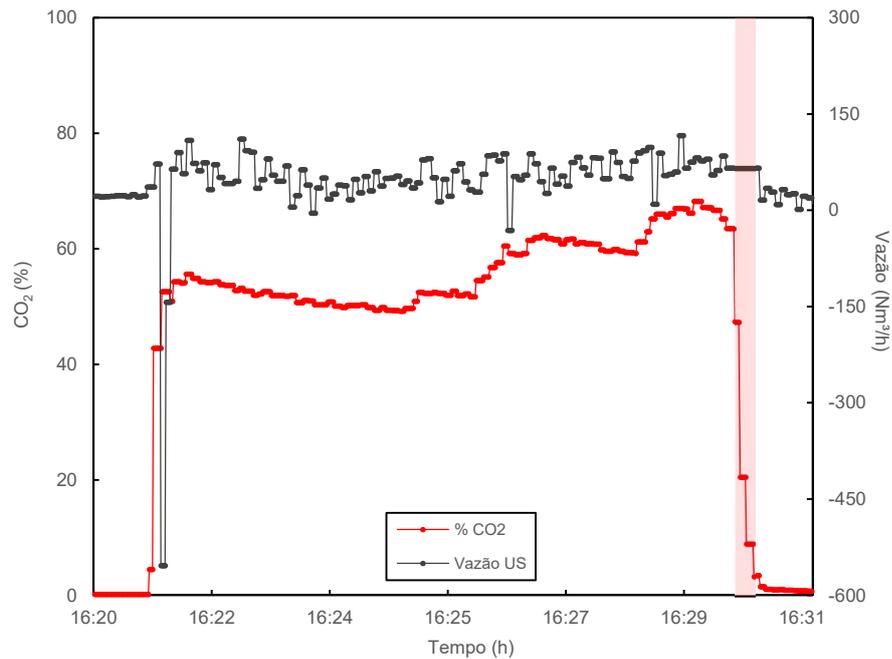


Figura 21 – Comportamento da vazão registrada pelo US, durante a campanha *ii*, com a variação de  $\text{CO}_2$ .

As leituras de vazão do US apresentam-se na Figura 21 claramente menos estáveis após elevação da concentração de  $\text{CO}_2$ , registrando um pico de falha negativo (critério A) após o aumento súbito inicial do gás. Ao final do experimento, quando houve uma redução brusca do gás no teor de 63%, foi verificado um período de falha associado ao alerta indicativo de erro operacional do medidor (critério C), segundo a faixa sombreada mostrada, voltando ao estado normal em cerca de 4% de  $\text{CO}_2$ .

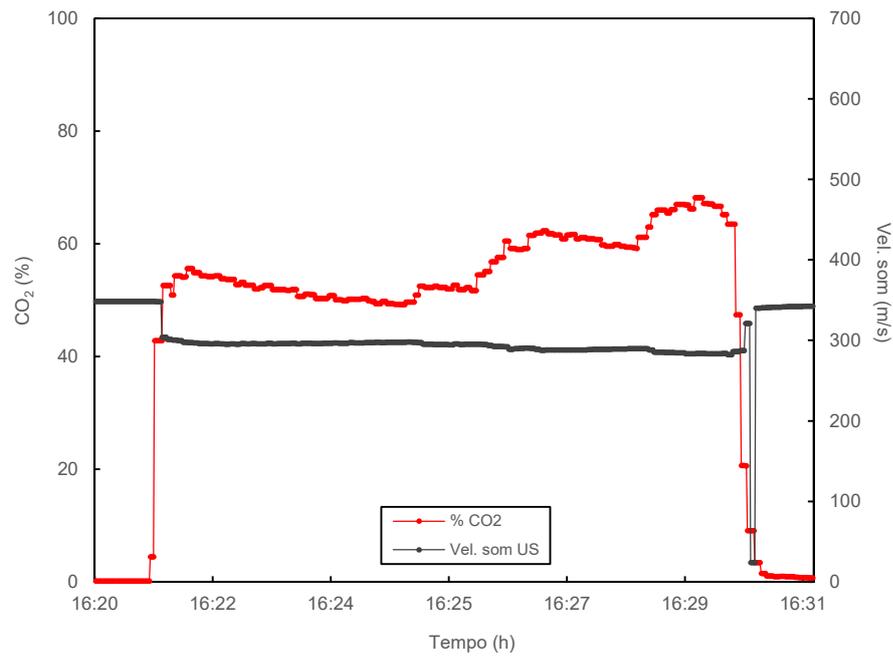


Figura 22 – Comportamento da velocidade do som registrada pelo US, durante a campanha *ii*, com a variação de CO<sub>2</sub>.

A Figura 22 indica que o comportamento da velocidade do som é mais uma vez caracterizado por uma queda no valor desta propriedade para maiores frações de CO<sub>2</sub> na mistura, havendo uma falha entre 15 e 20% de CO<sub>2</sub> (critério B) após redução repentina deste gás.

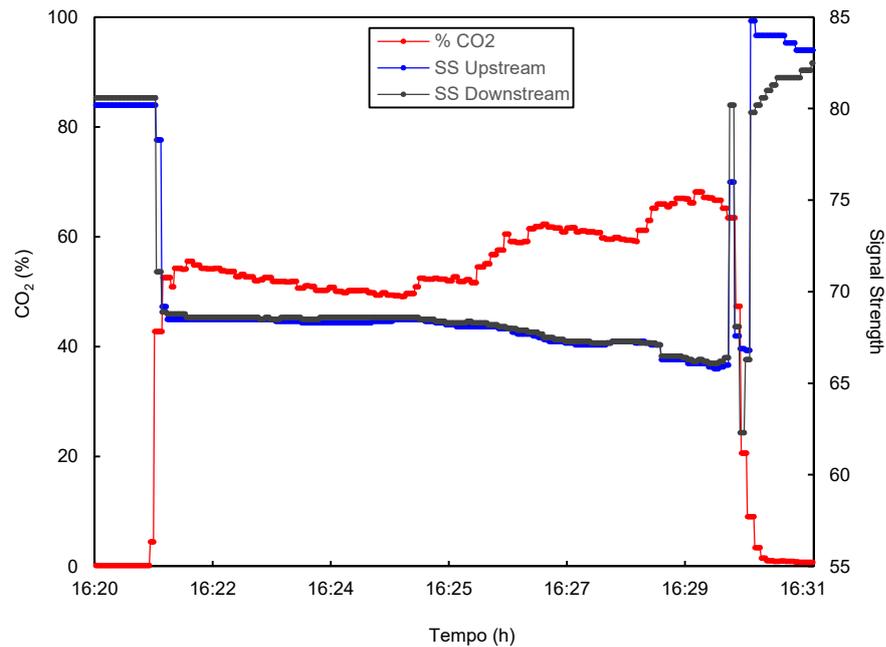


Figura 23– Comportamento da potência do sinal registrada pelo US, durante a campanha *ii*, com a variação de CO<sub>2</sub>.

A energia transportada pelo feixe ultrassônico observada com o incremento de CO<sub>2</sub> sugere que a presença das moléculas desse gás cause um amortecimento na potência do sinal, como visto na Figura 23. Ao término do ensaio há um comportamento inesperado em que o sinal à montante (*upstream*) torna-se mais potente que o sinal de jusante (*downstream*), provavelmente motivando a falha de medição detectada neste intervalo.

Com os estágios de falha apontados, o mesmo tratamento de dados apresentado na campanha *i* foi empregado sob os resultados deste segundo ensaio, podendo estes eventos serem examinados por meio dos índices demonstrados na Tabela 16. A variação do volume de gás acumulado ( $\Delta\text{Vol}$ ) após a aplicação de cada critério de falha é novamente contabilizada, de acordo com a Eq. (18).

Tabela 16 – Falhas de medição definidas após a aplicação dos critérios de filtragem sob as leituras de vazão na campanha *ii*.

	<b>Critério A</b>	<b>Critério AB</b>	<b>Critério ABC</b>
<b>Nº. de falhas</b>	20	24	46
<b>Índice de falhas (%)</b>	3,5	4,2	8,1
<b>Volume acumulado (m<sup>3</sup>)</b>	9,0	8,9	8,5
<b>ΔVol. acumulado (%)</b>	-	-0,9	-5,4

Nesta campanha, as análises foram executadas sob um total de 571 leituras de vazão. De acordo com a Tabela 16, o critério ABC produziu falhas de medição em apenas 8,1% de todas estas leituras registradas, sugerindo que os patamares mais estáveis de CO<sub>2</sub> aplicados tenham produzido um comportamento mais regular referente à diferenciação dos tempos de trânsito associado aos cálculos de vazão pelo medidor.

Quanto à estimativa volumétrica de gás, a aplicação dos critérios reduziu em 5,4% o volume de gás acumulado, indicando então que a concentração de CO<sub>2</sub> empregada tenha promovido menores perturbações na performance do medidor ultrassônico do que na campanha *i*.

Avaliando-se o comportamento indesejado do medidor durante operação em escoamentos com elevada concentração de CO<sub>2</sub>, o índice de falhas referente a cada nível de composição química empregada no ensaio foi definido, de acordo com o indicado na Tabela 17.

Tabela 17 – Índice de falha definido em patamares de concentração de CO<sub>2</sub>, sendo referente às leituras de vazão da campanha *ii*.

<b>CO<sub>2</sub> (%)</b>	<b>Leituras (%)</b>	<b>Índice de falha (%)</b>		
		<b>Critério A</b>	<b>Critério AB</b>	<b>Critério ABC</b>
5 – 20	1,2	0,0	57,1	100,0
20 – 40	1,1	0,0	0,0	100,0
40 – 60	68,5	4,9	4,9	6,1
60 – 80	29,2	0,6	0,6	5,4
80 – 100	0,0	-	-	-

Nota-se pela Tabela 17 que a filtragem de dados brutos referente ao critério ABC indicou falhas em 100,0% das leituras de vazão obtidas entre 5 e 40% de CO<sub>2</sub>. Contudo, é fundamental observar que apenas 2,3% de todas as medições produzidas estão associadas a este patamar de CO<sub>2</sub>, sendo, dessa forma, uma quantidade de amostras limitada e que não permite maiores conclusões sobre tal efeito na performance do medidor. O restante das leituras de vazão realizadas nesta campanha foi estimado em teores de CO<sub>2</sub> entre 40 e 80%, sendo constatado índices de falha não superiores a 6,1%. Tal comportamento talvez indique que a precisão das medições ultrassônicas de vazão é mais afetada em estágios de variação acentuada da concentração de CO<sub>2</sub>, sendo menos influenciada em períodos de composição química relativamente estáveis, mesmo quando submetido a níveis de CO<sub>2</sub> próximos de 80%.

Buscando confirmar se alterações do teor de CO<sub>2</sub> no escoamento realmente induz o aparecimento de falhas de medição, uma nova campanha *iii* será avaliada.

### *iii. Injeção 3 de CO<sub>2</sub>*

Nesta campanha de elevação de CO<sub>2</sub> proposta, buscou-se atingir condições ambientes mais adversas no que diz respeito a qualidade das leituras, empregando taxas de CO<sub>2</sub> acima de 70% na maior parte das análises, como percebido na Figura 24.

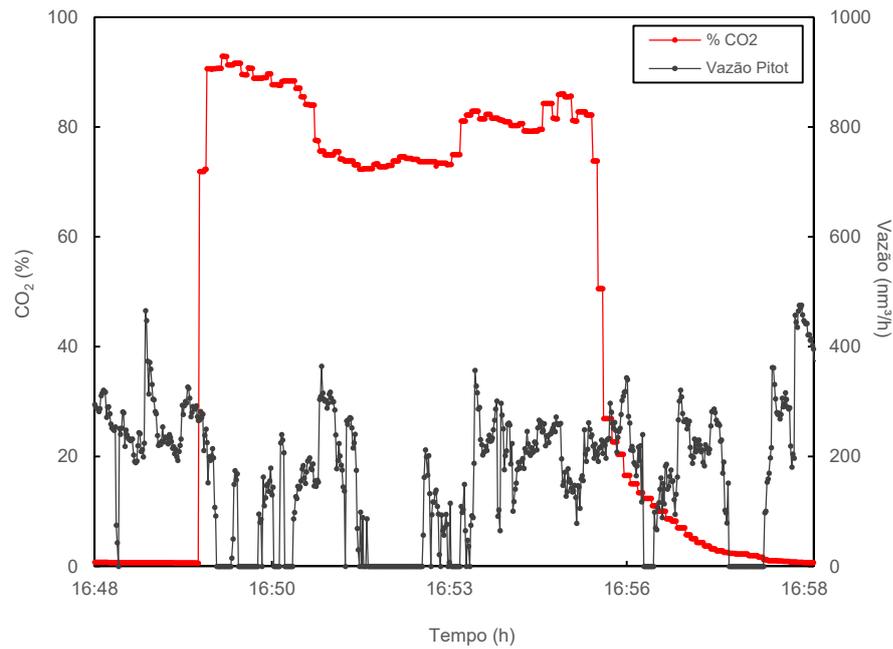


Figura 24 – Comportamento da vazão registrada pelo tubo de Pitot, durante a campanha *iii*, com a variação de  $\text{CO}_2$ .

Os resultados produzidos pelo tubo de Pitot neste experimento em concentrações mais elevadas de  $\text{CO}_2$  não demonstraram picos de vazão acentuados que divergissem do padrão apresentado ao longo do teste, além de não eliminar registros de velocidade nula após a adição deste gás, sugerindo que este medidor seja pouco afetado por este acréscimo mássico de gás ao escoamento.

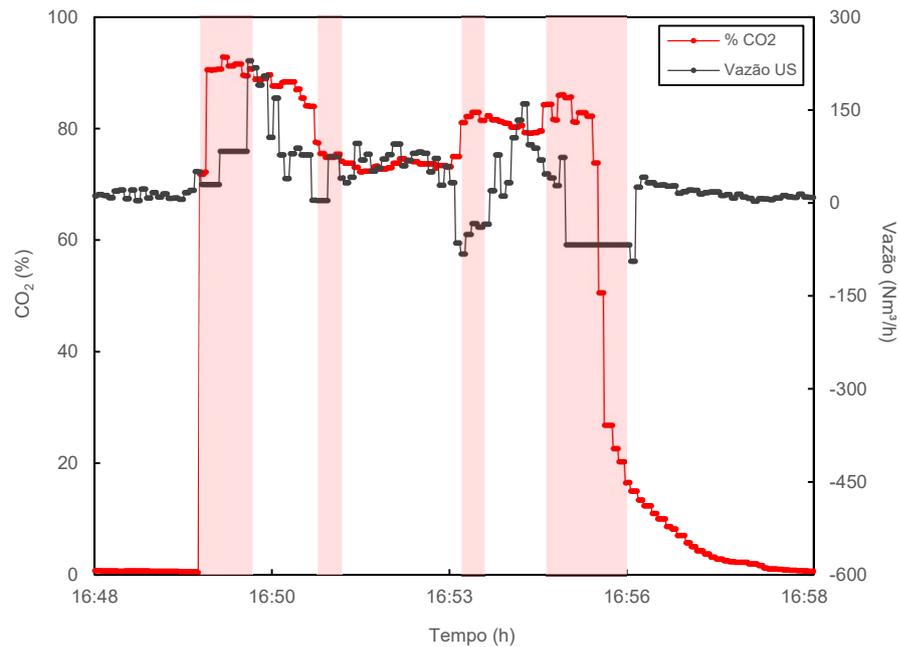


Figura 25– Comportamento da vazão registrada pelo US, durante a campanha *iii*, com a variação de  $\text{CO}_2$ .

Já o efeito provocado por essas condições de escoamento na operação do US requer um estudo bem mais cuidadoso e refinado. Segundo verificado na Figura 25, no início do teste uma elevação brusca de  $\text{CO}_2$  até 72% produziu um alerta de falha nas medições de vazão (critério C) que se estendeu até atingir um estágio mais estável de composição da mistura, como indicado pela faixa sombreada. Em patamares intermediários relativos à duração total do experimento, dois novos alertas de erros foram detectados junto ao medidor, ambos desenvolvidos após alterações repentinas de  $\text{CO}_2$ , normalizando-se ao atingir concentrações mais estáveis do gás. Quando se produziu ao final do experimento um degrau de 79% para 84% de  $\text{CO}_2$ , uma quarta falha pôde ser verificada durante a operação do US, persistindo como vazão negativa por um período considerável devido à sucessivas variações de composição da mistura. Somente com a redução da concentração para cerca de 15% é que o medidor teve sua operação aparentemente normalizada.

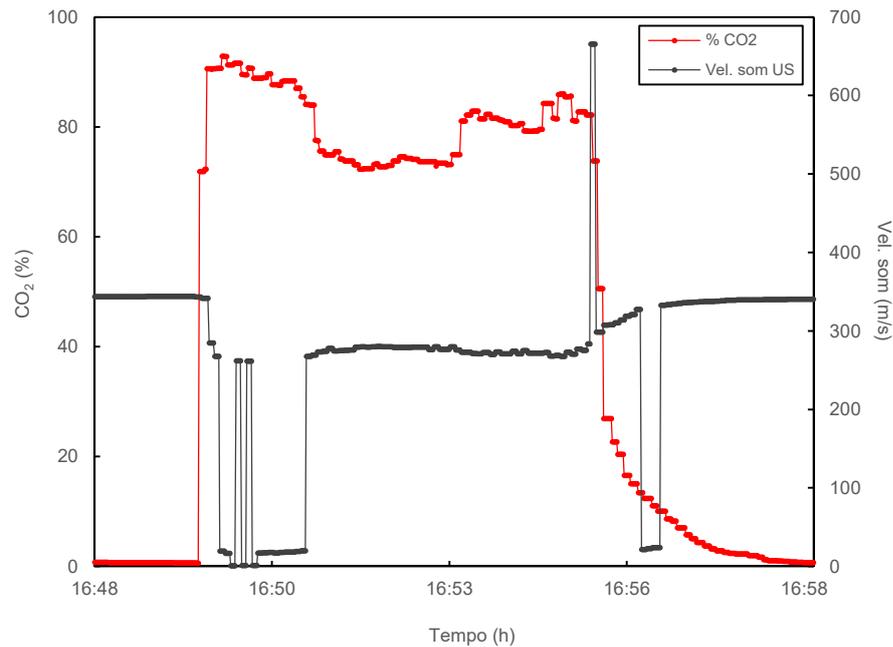


Figura 26 – Comportamento da velocidade do som registrada pelo US, durante a campanha *iii*, com a variação de CO<sub>2</sub>.

Diante deste cenário altamente desfavorável para uma transmissão acústica eficiente, a velocidade do som mensurada neste evento se mostrou menos regular que nos ensaios anteriores, como observado na Figura 26. Tal comportamento é esperado devido às elevadas concentrações do gás obtidas neste escoamento. Durante a maior parte no estágio inicial, em que o CO<sub>2</sub> se apresentou acima de 85%, a velocidade do som demonstrou valores erráticos e de grande instabilidade, indicando que neste patamar as leituras de vazão se caracterizam como falhas segundo o critério B. Durante a última falha, próxima ao término do teste, este parâmetro se revelou novamente irregular, retornando a resultados estáveis em aproximadamente 15% de CO<sub>2</sub>.

É importante observar que apesar do aumento na variabilidade da vazão computada pelo instrumento no decorrer do ensaio, mesmo quando em frações de CO<sub>2</sub> superiores a 85% o US opera sem interrupção nos registros dos parâmetros de interesse, apresentando falha apenas em situação de variação acentuada deste gás.

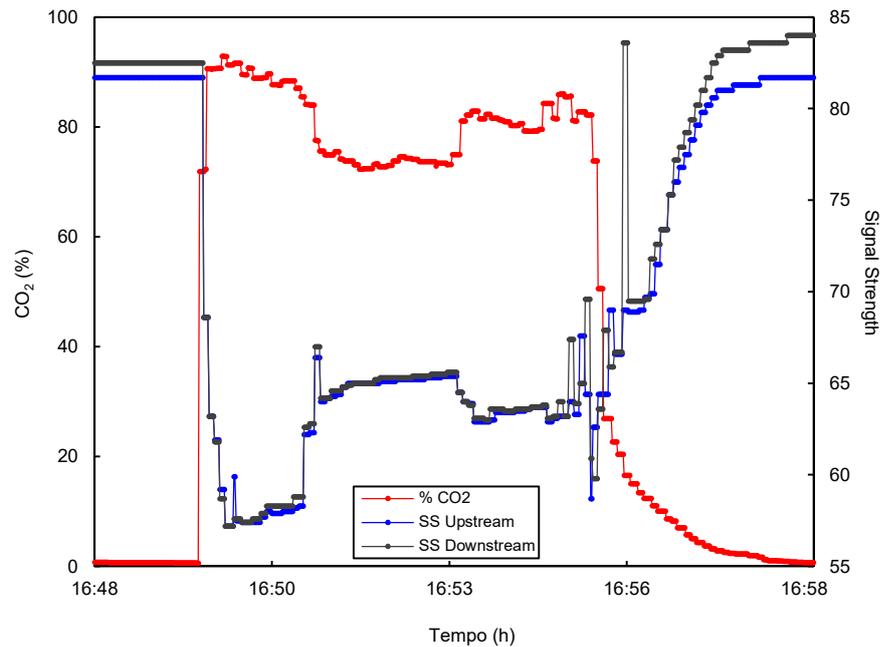


Figura 27 – Comportamento da potência do sinal registrada pelo US, durante a campanha *iii*, com a variação de CO<sub>2</sub>.

No que se refere a potência acústica captada nos transdutores, percebe-se claramente na Figura 27 uma relação de proporcionalidade entre a queda de intensidade do sinal ultrassônico e o teor de CO<sub>2</sub> na mistura, registrando picos em estágios de variação mais acentuada deste gás.

Detectadas as falhas, pode-se adotar os critérios de filtragem de dados para a representação dos valores estimados de vazão pelo medidor ultrassônico que não são confiáveis, cujos índices encontram-se na Tabela 18.

Tabela 18 – Falhas de medição definidas após a aplicação dos critérios de filtragem sob as leituras de vazão na campanha *iii*.

	<b>Critério A</b>	<b>Critério AB</b>	<b>Critério ABC</b>
<b>Nº. de falhas</b>	97	185	257
<b>Índice de falhas (%)</b>	21,1	40,2	55,9
<b>Volume acumulado (m<sup>3</sup>)</b>	6,9	4,5	3,4
<b>ΔVol. acumulado (%)</b>	-	-34,7	-50,3

Nesta campanha, o estudo foi realizado sob um total de 460 leituras de vazão. De acordo com a Tabela 18, a aplicação dos critérios de filtragem de amostras produziu falhas de medição em 55,9% de todas estas leituras registradas, sendo este índice bem superior aos das campanhas *i* e *ii*. É notável pelas Figuras 25-27 que, mesmo em concentrações de CO<sub>2</sub> superiores a 70%, a ocorrência de falha é mínima naqueles estágios de composição química do escoamento mais estável.

Contabilizando o montante volumétrico de gás, a aplicação dos critérios reduziu em 50,3% o volume de gás acumulado, sendo então desconsiderada uma fração gasosa significativamente superior que nos cenários verificados nas campanhas *i* e *ii*. Logo, caso tais condições de escoamento fossem criadas em linhas de queima de gás natural, a aplicação dos critérios de falha propostos reduziria em 50,3% o volume de gás inicialmente estimado pelo medidor (excluindo-se as vazões negativas), indicando o quão impreciso esta tecnologia pode se manifestar em aplicações com elevado teor de CO<sub>2</sub> no escoamento.

Este elevado índice de falhas observado pode ser melhor caracterizado a partir da especificação dos patamares de composição química empregados no ensaio, como mostrado na Tabela 19.

Tabela 19 – Índice de falha definido em patamares de concentração de CO<sub>2</sub>, sendo referente às leituras de vazão da campanha *iii*.

CO <sub>2</sub> (%)	Leituras (%)	Índice de falha (%)		
		Critério A	Critério AB	Critério ABC
5 – 20	14,6	16,4	43,3	43,3
20 – 40	4,1	100,0	100,0	100,0
40 – 60	1,1	100,0	100,0	100,0
60 – 80	35,9	6,1	6,1	22,4
80 – 100	44,3	25,5	59,8	81,9

Nota-se na Tabela 19 que a filtragem de dados brutos referente às vazões negativas (critério A) indicou falhas em 100,0% das leituras de vazão obtidas entre 20 e 60% de CO<sub>2</sub>. Entretanto, verifica-se que a quantidade de amostras nestes níveis de gás é

limitada, apenas 5,2% de todas as medições produzidas, não permitindo, desta forma, maiores conclusões sobre tal efeito na performance do medidor. Já os registros de vazão computados em composições de mistura acima de 60% de CO<sub>2</sub> representaram 80,2% de todas as leituras produzidas nesta campanha, com o índice de falha atingindo 81,9% das medições obtidas em teores de gás acima de 80%, indicando que os efeitos atenuantes indesejados tendem a ser agravados em níveis de CO<sub>2</sub> mais elevados.

Como último cenário, a campanha *iv* permitirá avaliar a performance do US em estágios de concentração instável de CO<sub>2</sub>, porém com variação mais suave do teor de gás.

#### *iv. Injeção 4 de CO<sub>2</sub>*

Como representado na Figura 28, a performance do tubo de Pitot foi avaliada em condições experimentais de menor instabilidade.

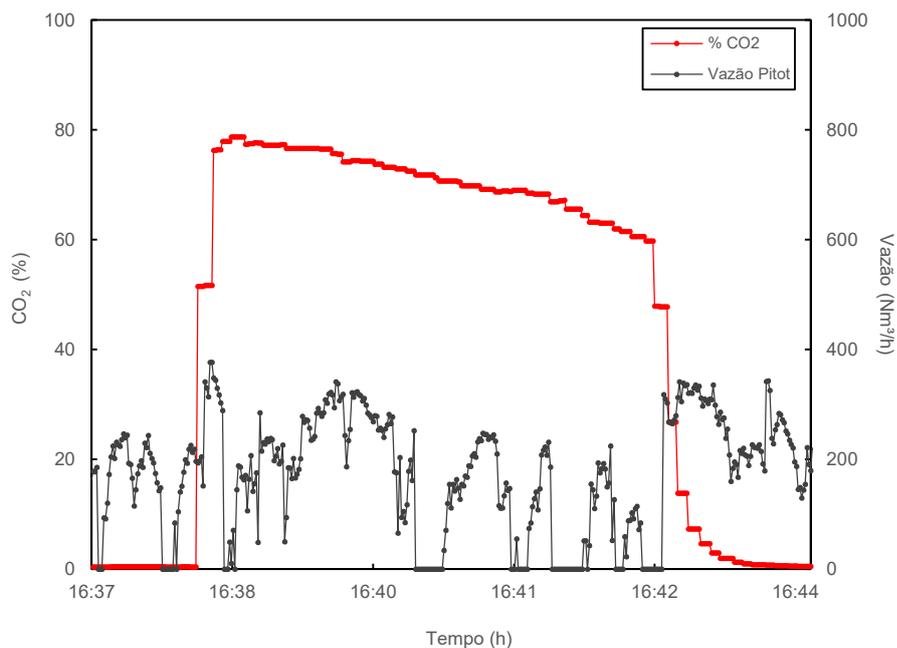


Figura 28 – Comportamento da vazão registrada pelo tubo de Pitot, durante a campanha *iv*, com a variação de CO<sub>2</sub>.

Nota-se claramente que a variabilidade das amostras de vazão do tubo de Pitot já se apresenta acentuada mesmo antes do incremento de CO<sub>2</sub> ao escoamento, confirmando realmente que a aplicação deste medidor em vazões tão reduzidas não é adequada.

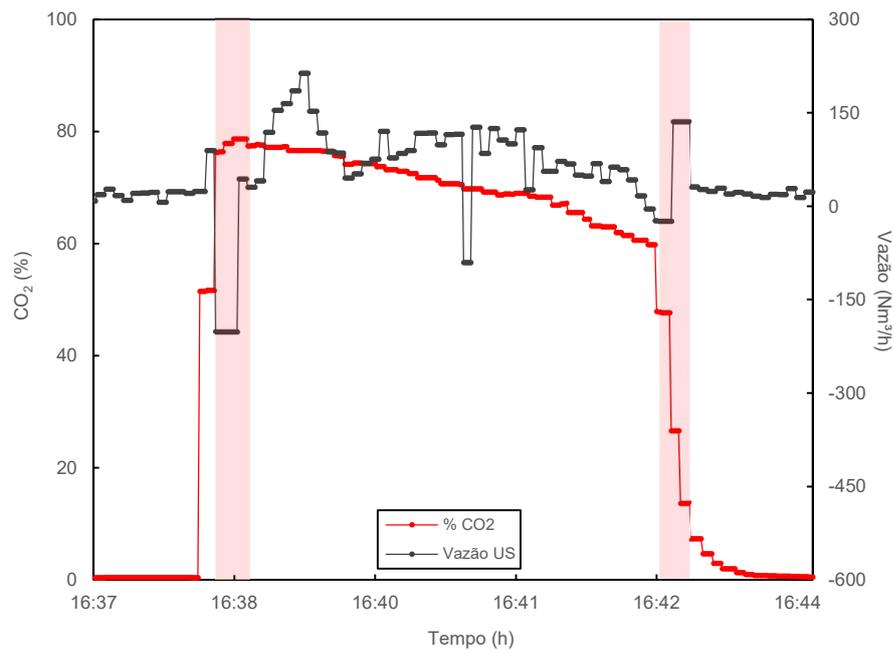


Figura 29 – Comportamento da vazão registrada pelo US, durante a campanha iv, com a variação de CO<sub>2</sub>.

Quanto aos registros pelo US na Figura 29, verifica-se no começo do ensaio que após alteração na composição química de 52 para 76% de CO<sub>2</sub> uma falha das leituras foi detectada (critério C), sendo registrados valores extremos negativos de vazão. Superada esta alteração brusca na fração do gás, o medidor comportou-se sem alerta de erro, apresentando em um estágio intermediário um pico negativo de vazão. Quando se aplicou ao final do teste uma redução súbita partindo de 60% de CO<sub>2</sub>, uma nova falha pôde ser identificada, retornando à operação normal em 13% de CO<sub>2</sub>.

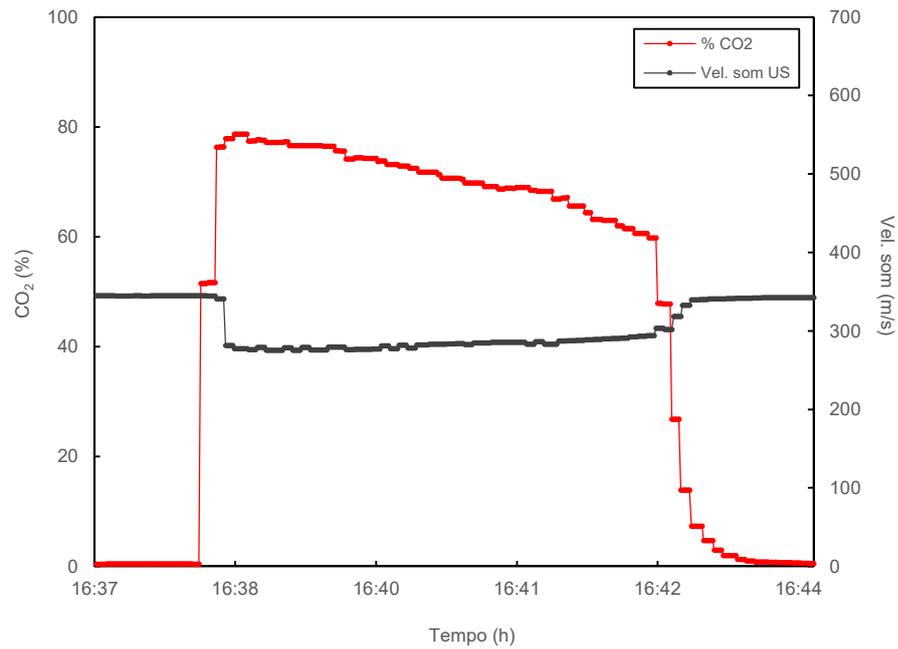


Figura 30– Comportamento da velocidade do som registrada pelo US, durante a campanha *iv*, com a variação de CO<sub>2</sub>.

A velocidade do som conferida na Figura 30 apresenta-se com um caráter mais estável que nas análises anteriores, inclusive nos intervalos com erros de medição, não sendo observado falhas associadas a este parâmetro (critério B).

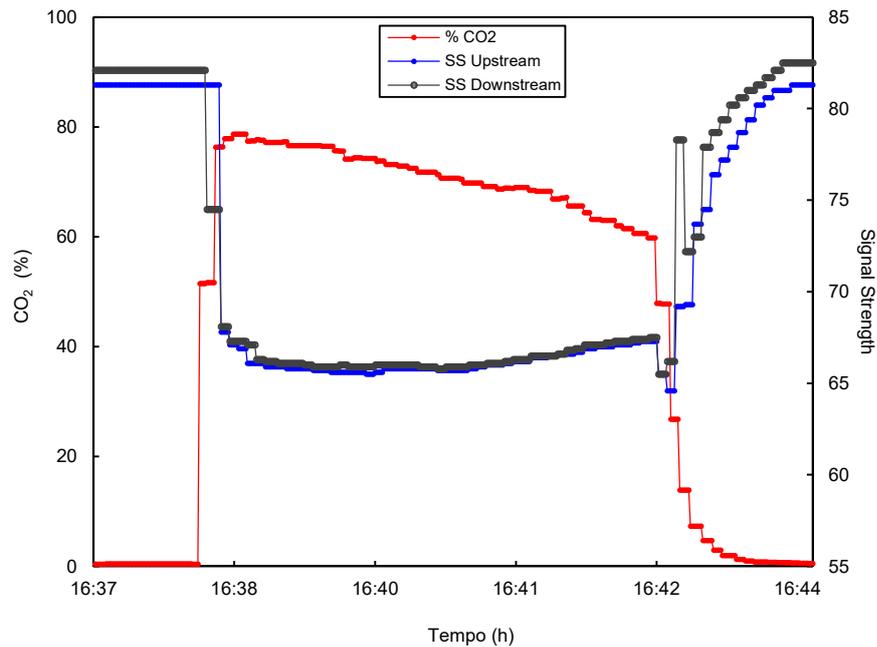


Figura 31 – Comportamento da potência do sinal registrada pelo US, durante a campanha *iv*, com a variação de CO<sub>2</sub>.

A intensidade do feixe ultrassônico é enfraquecida consideravelmente ao longo do teste quando em concentrações de CO<sub>2</sub> superiores a 60%, segundo demonstrado na Figura 31, registrando também grandes taxas de variação após alterações bruscas de composição. Nota-se que durante a falha verificada ao final do ensaio há um comportamento irregular deste parâmetro, afetando as leituras a ponto de causar erro nas medições.

Quanto à análise de falha, a Tabela 20 informa os índices contabilizados após a filtragem de dados, bem como a alteração induzida do volume acumulado de gás.

Tabela 20 – Falhas de medição definidas após a aplicação dos critérios de filtragem sob as leituras de vazão na campanha *iv*.

	<b>Critério A</b>	<b>Critério AB</b>	<b>Critério ABC</b>
<b>Nº. de falhas</b>	33	33	48
<b>Índice de falhas (%)</b>	11,6	11,6	16,9
<b>Volume acumulado (m<sup>3</sup>)</b>	6,2	6,2	5,7
<b>ΔVol. acumulado (%)</b>	-	0,0	-7,1

A performance do medidor ultrassônico foi investigada sob um total de 284 leituras de vazão registradas. De acordo com a Tabela 20, a aplicação dos critérios de filtragem de dados produziu falhas de medição em 16,9% de todas as amostras lidas. É um índice bem inferior ao observado da campanha *iii*, possivelmente explicado pelas variações menos abruptas do teor de CO<sub>2</sub> impostas neste experimento.

O emprego dos 3 critérios de falha reduziu em 7,1% o volume de gás acumulado, sendo esta diferença significativamente inferior ao montante filtrado na campanha *iii*.

A Tabela 21 especifica os índices de falha observados por patamar de composição química empregados no ensaio.

Tabela 21 – Índice de falha definido em patamares de concentração de CO<sub>2</sub>, sendo referente às leituras de vazão da campanha *iv*.

CO <sub>2</sub> (%)	Leituras (%)	Índice de falha (%)		
		Critério A	Critério AB	Critério ABC
5 – 20	4,6	0,0	0,0	46,2
20 – 40	1,8	20,0	20,0	100,0
40 – 60	7,7	59,1	59,1	59,1
60 – 80	85,9	7,8	7,8	9,8
80 – 100	0,0	-	-	-

Nota-se que a filtragem de dados brutos referente ao critério ABC indicou falhas em 100,0% das leituras de vazão obtidas entre 20 e 40% de CO<sub>2</sub>. Novamente tal resultado é observado em um estágio limitado de amostras registradas, apenas 1,8% de todas as medições produzidas, estando associado a instantes de alteração abrupta da injeção do gás induzidas ao início e fim do ensaio. Já os registros de vazão verificados em concentrações de CO<sub>2</sub> entre 60 e 80% representaram 85,9% de todas as leituras produzidas nesta campanha, cujas falhas se fizeram presentes em 9,8% das medições obtidas neste patamar de gás, indicando que, apesar do teor elevado de CO<sub>2</sub> obtido, a injeção suave do gás no túnel de vento produziu falhas em uma parcela bem reduzida do experimento.

### 6.2.3 Análise de variabilidade das medições com os transdutores faceados ao túnel de vento de vento

Com os experimentos e índices de falha devidamente definidos, torna-se necessário uma análise complementar dos dados produzidos, aplicando-se a eles tratamentos estatísticos que permitam tirar conclusões a respeito da variabilidade das medições de vazão sob as condições avaliadas. Para isso, definiu-se intervalos de leituras obtidas das campanhas de injeção de CO<sub>2</sub>, em que as composições químicas se mostraram relativamente estáveis. Assim, foram selecionados 5 patamares de teor de CO<sub>2</sub>, com 30 leituras aquisitadas em cada nível de concentração do gás. Tais patamares podem ser verificados na Figura 32, cujos dados numéricos podem ser conferidos no Apêndice E.

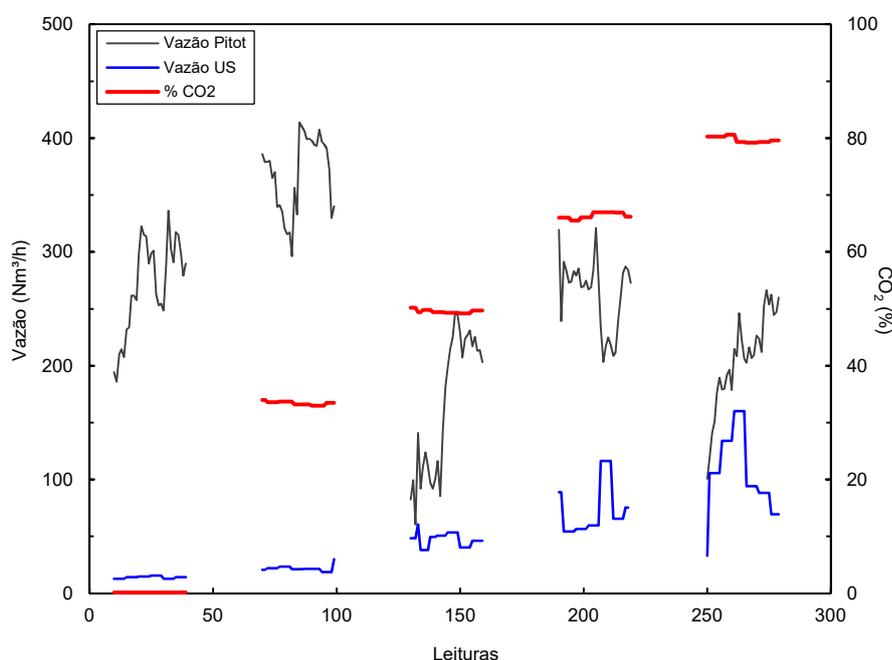


Figura 32 – Síntese das leituras registradas em patamares estáveis do teor de CO<sub>2</sub>, obtidas com os transdutores faceados ao túnel de vento.

A variabilidade das leituras de vazão referente a cada patamar pode ser mais precisamente analisada por meio dos parâmetros estatísticos: a média aritmética ( $\bar{Q}$ ),

o desvio padrão ( $\sigma$ ) e o coeficiente de variação ( $\Delta$ ) quantificando a razão entre o desvio padrão e a média, como pode ser verificado na Tabela 22.

Tabela 22 – Variabilidade das leituras do tubo de Pitot e US em diferentes concentrações de CO<sub>2</sub>, obtida com os transdutores faceados ao túnel de vento.

CO <sub>2</sub> (%)	Pitot			US		
	$\bar{Q}$ (Nm <sup>3</sup> /h)	$\sigma$ (Nm <sup>3</sup> /h)	$\Delta$ (%)	$\bar{Q}$ (Nm <sup>3</sup> /h)	$\sigma$ (Nm <sup>3</sup> /h)	$\Delta$ (%)
0,16	271,17	41,10	15,16	14,09	1,07	7,61
34	368,68	33,61	9,12	21,66	2,14	9,89
50	165,20	61,30	37,11	46,93	5,99	12,76
67	263,43	31,17	11,83	72,67	22,33	30,73
80	206,18	41,50	20,13	107,43	32,87	30,59

Analisando a Tabela 22, os resultados obtidos com o tubo de Pitot confirmam o que já havia sido comentado, que tais registros apresentam uma grande dispersão devido a reduzida velocidade de escoamento imposta, produzindo variações em sua média e em sua variabilidade que não permitem a definição de uma proporcionalidade relativa à concentração de CO<sub>2</sub> na mistura. Dessa maneira, as leituras deste medidor não serão abordadas em análises de referência posteriores.

Quanto ao comportamento da medição de vazão pelo US observa-se que mesmo no estado inicial com apenas 0,16% de CO<sub>2</sub> este medidor já apresentou uma variabilidade considerável de 7,61%, explicada devido ao fato de que nessas condições reduzidas de velocidade a diferença entre os tempos de trânsito emitido e recebido tornam-se mínimas, podendo produzir uma diferenciação imperceptível à resolução do transdutor e assim registrar velocidades menos estáveis. Quanto ao crescimento da dispersão das leituras verificado após o incremento de CO<sub>2</sub>, entende-se que seja proveniente da redução da intensidade do sinal emitido pelos transdutores gerada por este gás, como já observado nos diagramas experimentais apresentados anteriormente na seção 6.2.2. Esta atenuação do feixe ultrassônico talvez gere vibrações mecânicas no cristal piezoelétrico do transdutor tão enfraquecidas a ponto de se distanciarem da frequência ressonante atuante do cristal, ocasionando alterações no cálculo da vazão e assim aumentando a incerteza de medição.

A Tabela 22 permite ainda verificar que a vazão média registrada pelo US nas condições de ar atmosférico, com valor igual a 14,09 Nm<sup>3</sup>/h, sofreu um aumento significativo após a injeção de CO<sub>2</sub> no escoamento, registrando, quando em 80% deste gás, uma vazão média de 107,43 Nm<sup>3</sup>/h. Para a compreensão do porquê deste efeito crescente no volume gasoso aferido pelo US quando sujeito a elevados teores de CO<sub>2</sub>, é necessário que o tubo de Pitot proposto como referência forneça resultados que permitam avaliar com razoável precisão o valor da velocidade induzida no tubo após a injeção de CO<sub>2</sub> no túnel de vento. Como isto não ocorreu, devido a seu comportamento irregular em baixas velocidades, torna-se arriscada uma possível conclusão se este acréscimo de vazão registrado pelo US foi motivado por um aumento real volumétrico da mistura gasosa escoando no interior do túnel ou por uma alteração extra nos tempos de trânsito promovida pelo caráter atenuante do CO<sub>2</sub>.

Diante disso, é proposto para este estudo uma correlação que represente o aumento de velocidade registrado por este medidor em diferentes concentrações de CO<sub>2</sub> no escoamento, originando uma curva característica referente as condições produzidas pelo túnel de vento em questão e por toda a instalação a ele relacionada. Para isso, a vazão média ( $\bar{Q}$ ) desenvolvida em cada composição de mistura gasosa será relacionada a sua referência inicial ( $\bar{Q}_0$ ) registrada em 0,16% de CO<sub>2</sub>, segundo explicitado na Tabela 23.

Tabela 23 – Razão entre vazões registradas após variação da concentração de CO<sub>2</sub> no escoamento.

CO <sub>2</sub> (%)	$\bar{Q}$ (Nm <sup>3</sup> /h)	$\bar{Q}/\bar{Q}_0$
0,16	14,09	1,00 ± 0,11
34,00	21,66	1,54 ± 0,19
50,00	46,93	3,33 ± 0,49
67,00	72,67	5,16 ± 1,63
80,00	107,43	7,62 ± 2,40

É possível notar que a razão entre vazões varia progressivamente para maiores quantias de CO<sub>2</sub> no escoamento, alcançando quando em 80% deste gás um montante

7,62 vezes maior que a referência de velocidade obtida em condições iniciais com ar atmosférico apenas.

Visando conferir se há alguma proporcionalidade que relacione tais variáveis de maneira razoável, aplicou-se um método estatístico baseado no menor ajuste quadrado de uma função exponencial aos dados experimentais obtidos, de acordo com a Figura 33.

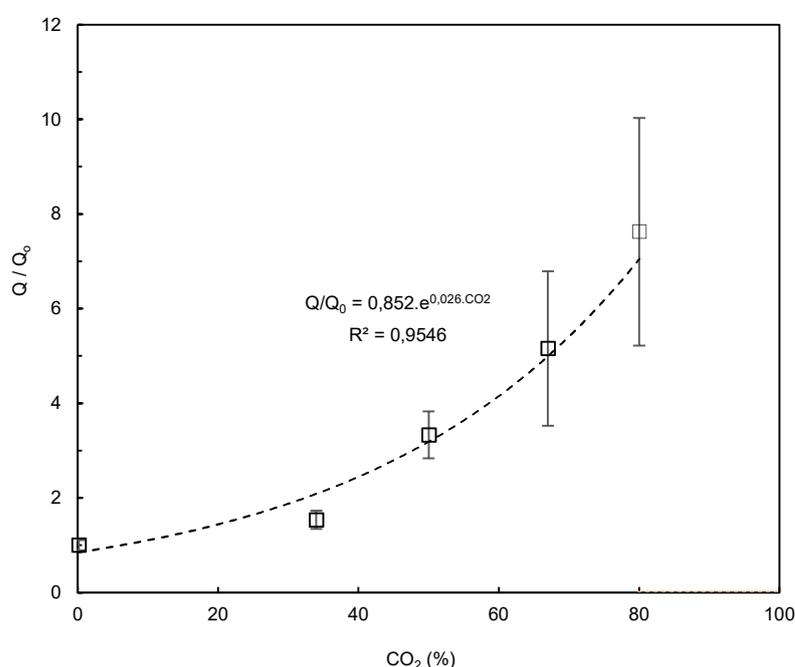


Figura 33 – Ajuste exponencial da razão  $\bar{Q}/\bar{Q}_0$  em função da concentração de CO<sub>2</sub>.

Verifica-se, neste diagrama, que uma tendência exponencial variante da vazão obtida nos testes em função da concentração de CO<sub>2</sub> no meio pode ser definida, ajustando-se com boa correlação ( $R^2$  próximo de 1) aos resultados reais produzidos, sendo assim, um indicativo representativo dos fenômenos físicos desenvolvidos para o túnel de vento empregado. Nota-se também, através das barras de incertezas verticais, que a vazão atinge em um meio com 80% deste gás valores cerca de 10 vezes maior que o da referência inicial, por exemplo.

A atenuação da potência acústica do pulso emitido pelos transdutores observada nos experimentos em ambientes com elevado teor de CO<sub>2</sub> foi apontada como a principal causadora das medições instáveis do US demonstradas nesta seção, estando associada ao caráter absorvivo deste gás.

Para demonstrar o enfraquecimento do feixe ultrassônico, a Figura 34 apresenta a potência do sinal verificada no transdutor de montante (*upstream*) no decorrer de uma das campanhas em elevado CO<sub>2</sub>, sendo filtrados os dados para eliminação de pontos espúrios desenvolvidos em instantes de variação brusca na composição química do escoamento.

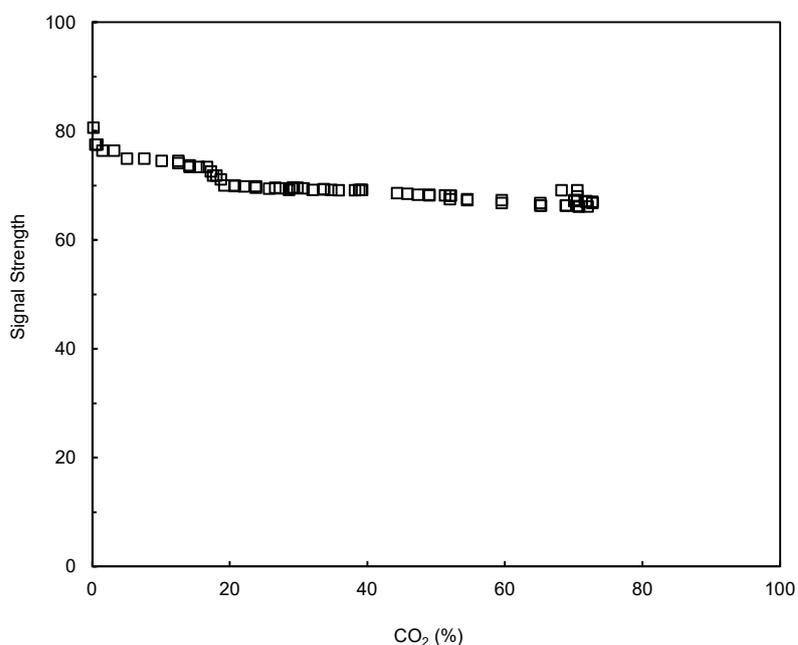


Figura 34 – Efeito da concentração de CO<sub>2</sub> na potência do sinal ultrassônico do transdutor de montante (*upstream*).

O parâmetro de potência do sinal (*signal strength*), responsável por estimar esta perda variou, a partir de um valor inicial adimensional de 80,6 em 0,16% de CO<sub>2</sub> até 66,1 em 72,30% deste gás, representando uma queda de aproximadamente 18% da potência do sinal.

Com os resultados obtidos nos ensaios devidamente apresentados e com o entendimento das causas associadas ao efeito de atenuação ultrassônica que motivaram tais comportamentos do medidor, torna-se necessária a comprovação de que o US se manteve calibrado ao longo destes testes, fornecendo assim respostas que derivem de uma fonte habilitada.

Para isso, foi estudado o comportamento da velocidade do som medida em instantes de estabilidade de CO<sub>2</sub> em comparação com a de referência fornecida pela equação de estimativa da velocidade do som em gases em função da composição química da mistura e do estado termodinâmico, AGA 10 [12]. Tal análise pode ser verificada na Figura 35, sendo a referência obtida em condições ambiente semelhantes às de teste, com uma temperatura de 27°C e pressão de 1 atm.

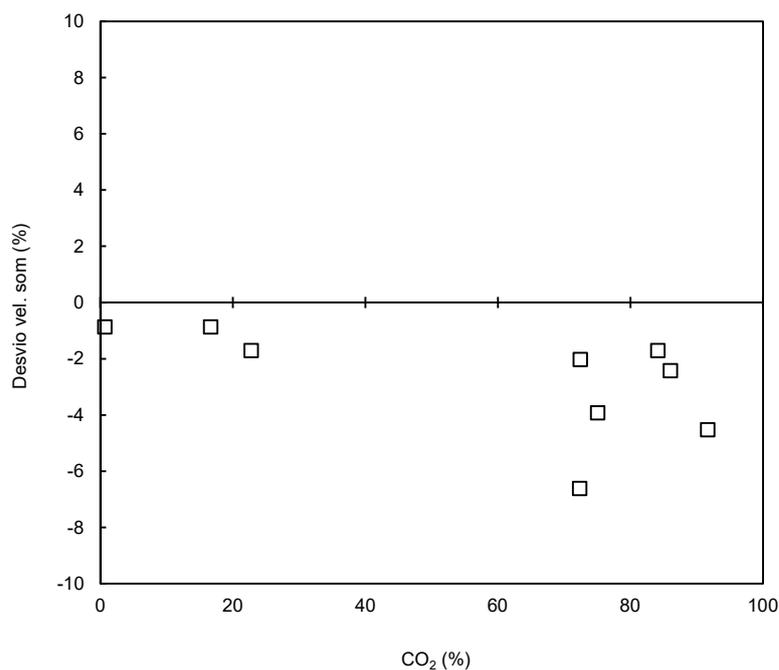


Figura 35 – Desvio porcentual entre as velocidades do som medida pelo US e a estimada pela AGA 10.

Como pode ser observado, desvios da velocidade do som medida em relação à referência mostraram-se presentes no decorrer dos experimentos, sendo importante verificar se há uma tendência de dispersão destes valores com a alteração de

composição da mistura gasosa. A Tabela 24 permite avaliar tal comportamento através do desvio percentual ( $\delta$ ) entre estas propriedades do fluido e o valor de referência em cada composição química da mistura.

Tabela 24 – Comportamento da velocidade do som medida relativo à referência adotada.

<b>CO<sub>2</sub> (%)</b>	<b>O<sub>2</sub> (%)</b>	<b>N<sub>2</sub> (%)</b>	<b>c<sub>AGA</sub> (m/s)</b>	<b>c<sub>US</sub> (m/s)</b>	<b><math>\delta</math> (%)</b>
0,62	21,20	78,18	347,17	344,19	-0,86%
16,58	18,97	64,45	330,40	327,55	-0,86%
22,70	18,78	58,52	324,40	318,90	-1,69%
72,30	4,24	23,46	286,51	267,58	-6,60%
72,40	8,05	19,55	285,88	280,12	-2,01%
75,00	7,36	17,64	284,21	273,11	-3,90%
84,10	6,34	9,56	278,37	273,64	-1,70%
86,00	5,26	8,74	277,31	270,63	-2,41%
91,60	4,17	4,23	273,96	261,58	-4,52%

Tomando como base as condições atmosféricas de teste em 0,62% de CO<sub>2</sub>, é possível notar que em todas as concentrações seguintes, entre 22,70 e 91,6%, apresentaram desvios negativos maiores que no estado inicial, chegando a destoar 6,60% quando em 72,30% de CO<sub>2</sub>. Tais resultados sugerem que maiores concentrações deste composto contribuem para uma redução extra da velocidade do som medida pelo US, talvez explicada pela perda considerável de potência do sinal quando instalado em uma atmosfera rica do gás. Uma outra hipótese é a de que, devido ao fato da velocidade do som de referência verificada junto à AGA 10 [12] ter sido produzida na ausência de escoamento e sob condições equilibradas, a presença de um fluxo possa causar um efeito mecânico de arraste do feixe ultrassônico suficiente para produzir tais desvios de leitura ou a alteração de alguma propriedade termodinâmica não acompanhada durante o ensaio, sendo intensificado a medida em que se adiciona mais gás ao meio. Apesar deste ocorrido conclui-se, diante da acentuada atenuação do sinal, atingindo reduções de 18% na potência acústica em 72% de CO<sub>2</sub>, que o desvio máximo registrado de 6,60% na velocidade do som nesta mesma concentração de gás indica que o medidor se manteve bom funcionamento durante os testes.

Diante da análise executada nesta seção referente aos resultados dos testes, observa-se que determinados comportamentos das medições do US repetem-se em diferentes condições, possibilitando uma conclusão mais detalhada sobre o efeito do CO<sub>2</sub> no desempenho deste instrumento, estando listadas a seguir.

- O medidor ultrassônico consegue medir mesmo em concentrações de CO<sub>2</sub> superiores a 90%, mantendo contínuo os seus registros, sem interrupções;
- A presença do CO<sub>2</sub> no escoamento eleva a dispersão das leituras de vazão;
- Variações acentuadas do teor de CO<sub>2</sub>, crescentes ou decrescentes, tendem a gerar falhas em sua operação;
- As falhas ocorrem em estágios de concentração do gás no escoamento superiores a 5%, definindo, assim, as condições consideradas de elevado teor de CO<sub>2</sub>;
- A menor taxa de variação da concentração de CO<sub>2</sub> (inclinação da curva) que produziu falha de medição foi estimada em 0,08 %/s.

As medições realizadas em instalações com presença marcante de CO<sub>2</sub>, como em aplicações de queima de gás em plataformas, podem portanto estar comprometidas, sendo dependentes também de uma série de fatores intrínsecos ou não ao escoamento que afetam a qualidade destes resultados. Temperatura, pressão, ruídos, vazamentos e incrustações nos sensores são apenas algumas das inúmeras variáveis de difícil controle que exercem influência nos resultados finais para este tipo de aplicação. Um aspecto que permite ser configurado está relacionado à montagem dos transdutores na tubulação. Sabe-se que a disposição faceada à parede do tubo empregada nesta seção é um dos arranjos mais utilizados no que se refere a medição de vazão, porém outras configurações mais apropriadas talvez possam ser sugeridas. Desta forma, uma nova configuração de montagem será proposta na seção a seguir, visando solucionar ou amenizar o problema de atenuação do sinal ultrassônico em escoamentos com elevado teor de CO<sub>2</sub>.

#### 6.2.4 Experimentos realizados com os transdutores aproximados

Objetivando amenizar as falhas de medição originadas em elevado teor de  $\text{CO}_2$ , assim como o aumento da variabilidade das leituras, uma campanha de teste semelhante às anteriores, porém com os transdutores inseridos de 40 mm na tubulação, foi aplicada, reduzindo-se o caminho acústico em 80 mm, portanto 69% do valor obtido na configuração faceada, aproximadamente. Este procedimento pode ser melhor compreendido com o auxílio da Figura 11 já apresentada.

O acompanhamento dos parâmetros de interesse encontra-se evidenciado por meio das Figuras 36-39.

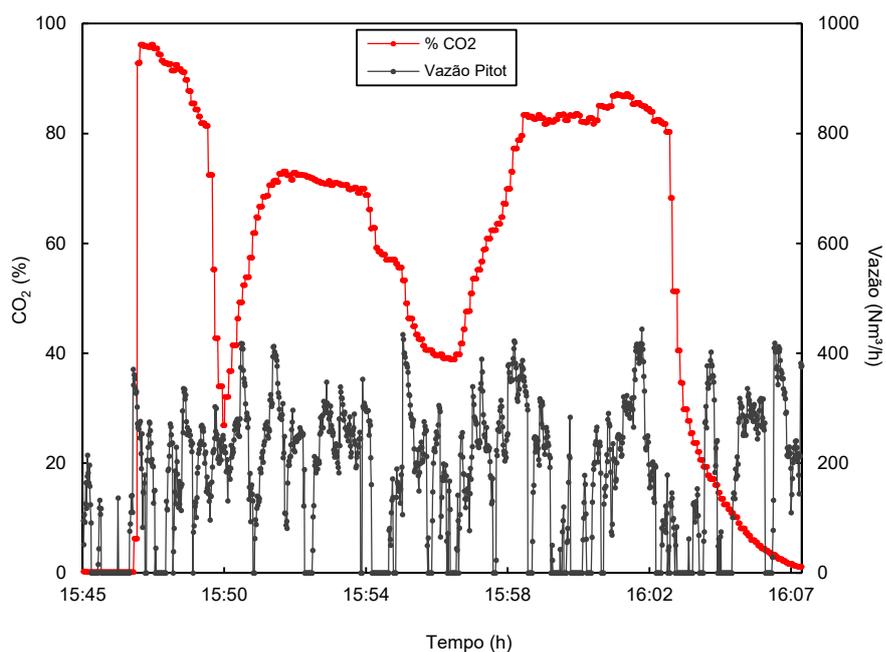


Figura 36 – Comportamento da vazão registrada pelo tubo de Pitot com a variação de  $\text{CO}_2$ , obtido após a aproximação dos transdutores.

Nesta campanha, buscou-se reproduzir de maneira semelhante as variações do teor de  $\text{CO}_2$  induzidas na campanha *iii* avaliada na seção 6.2.2, haja vista ter sido este o

cenário mais adverso ao qual os transdutores ultrassônicos faceados foram submetidos.

As leituras obtidas pelo tubo de Pitot, segundo a Figura 36, são novamente apresentadas para a comprovação de que as análises seguem sob velocidades reduzidas induzidas no túnel de vento, indicando um comportamento bastante instável durante todo o experimento.

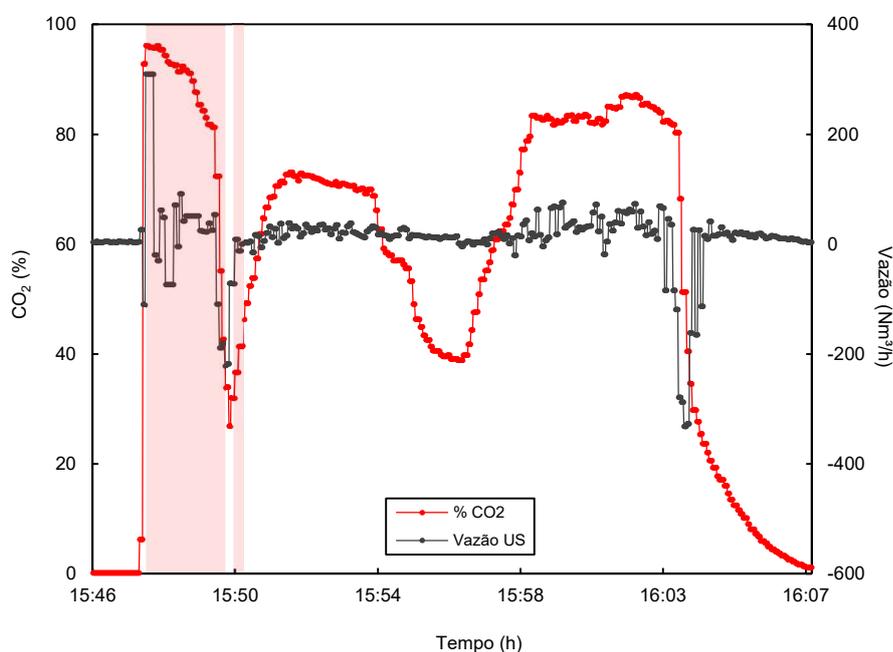


Figura 37 – Comportamento da vazão registrada pelo US com a variação de CO<sub>2</sub>, obtido após a aproximação dos transdutores.

É possível notar pela Figura 37 que o US esteve sujeito em grande parte do experimento a teores de CO<sub>2</sub> superiores a 60%, com rampas de acréscimo e decréscimo deste gás. Em relação aos alertas de erro (critério C), um primeiro evento se desenvolveu após alteração brusca de 0,19 para 92% de CO<sub>2</sub>, cuja falha se estendeu até a diminuição desta concentração para aproximadamente 45%. Durante esta redução houve um acréscimo repentino desse gás na mistura, ocasionando uma segunda falha entre 32 e 42% de CO<sub>2</sub>, sendo esta registrada em um intervalo de tempo curto de 18 segundos. Ao final, algumas falhas de vazão negativa (critério A)

foram percebidas, destacando-se aquela desenvolvida ao término do ensaio, com a interrupção repentina da injeção do gás no túnel de vento.

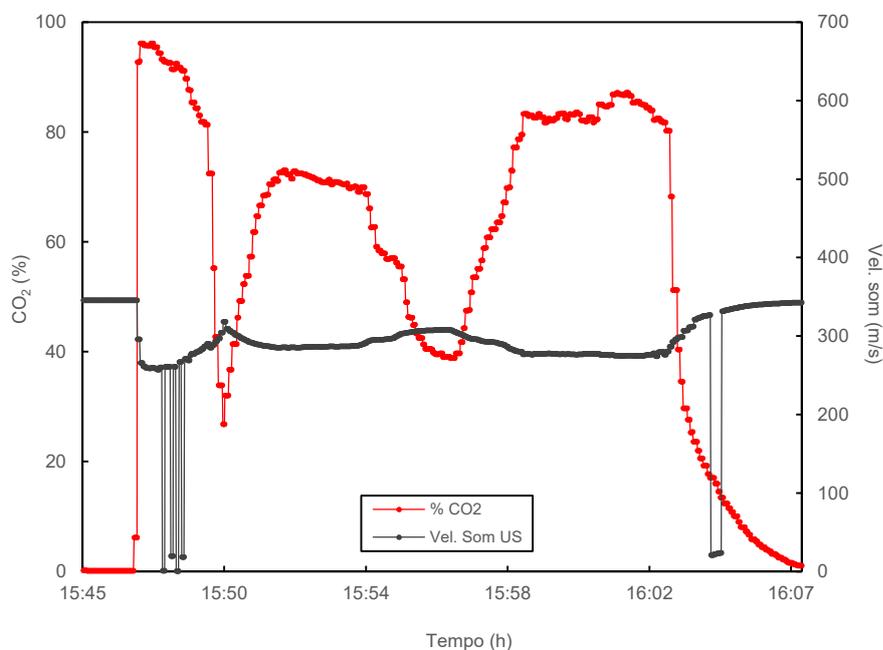


Figura 38 – Comportamento da velocidade do som registrada pelo US com a variação de CO<sub>2</sub>, obtido após a aproximação dos transdutores.

A velocidade do som teve sua amplitude iniciada em 346 m/s e reduzida em estágios de maior teor de CO<sub>2</sub> no escoamento. Durante a primeira falha registrada este parâmetro se comportou de maneira irregular e produzindo resultados erráticos, indicando que nesse intervalo o medidor se demonstrava impreciso e pouco confiável. Ao final do teste, ocorreu uma falha deste parâmetro (critério B) quando entre 12 e 18% do gás, como evidenciada na Figura 38.

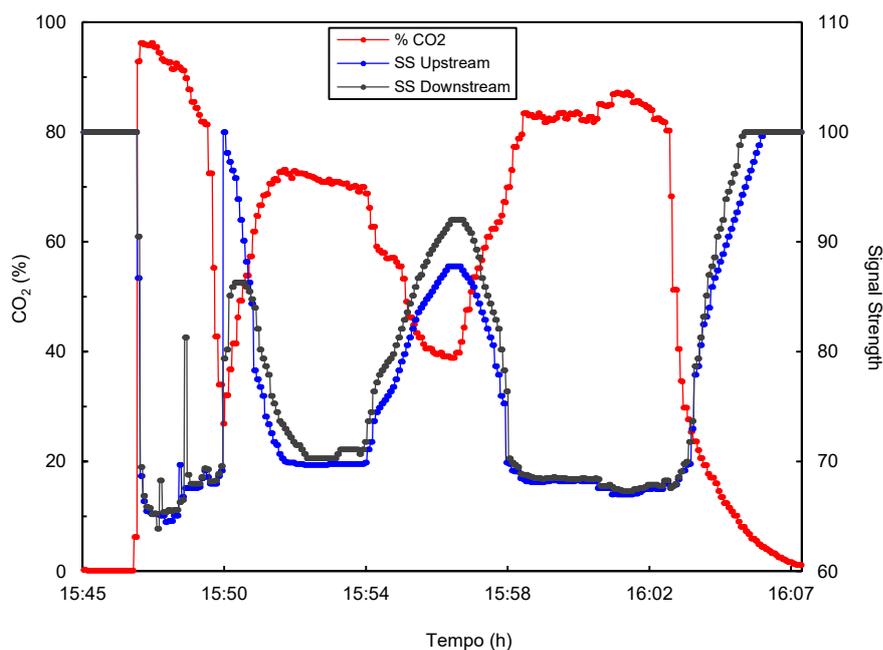


Figura 39 – Comportamento da potência do sinal registrada pelo US com a variação de CO<sub>2</sub>, obtido após a aproximação dos transdutores.

De acordo com a Figura 39, com a aproximação dos transdutores verifica-se que o *signal strength* é agora iniciado em uma grandeza superior ao verificado na configuração faceada, indicando, como esperado, que há um aumento na intensidade do feixe ultrassônico emitido. Durante os intervalos de falha registrados inicialmente, ocorreram picos de potência acústica indesejados que explicam os alertas de erro emitidos pelo medidor. É importante lembrar também que quando inseridos no escoamento estes transdutores estão mais sujeitos a vibrações mecânicas, podendo gerar inclusive o efeito de um elemento sensor vibrar mais que o outro e assim, possivelmente, produzir picos inesperados de potência acústica.

Detectadas as falhas, pode-se adotar os critérios de filtragem de dados para a representação dos valores estimados de vazão pelo medidor ultrassônico que não são confiáveis, cujos índices encontram-se na Tabela 25.

Tabela 25 – Falhas de medição definidas após a aplicação dos critérios de filtragem sob as leituras de vazão do US.

	<b>Critério A</b>	<b>Critério AB</b>	<b>Critério ABC</b>
<b>Nº. de falhas</b>	165	195	280
<b>Índice de falhas (%)</b>	14,7	17,3	24,9
<b>Volume acumulado (m³)</b>	8,2	8,0	5,8
<b>ΔVol. acumulado (%)</b>	-	-3,1	-30,2

Nesta campanha, o estudo foi realizado sob um total de 1126 leituras de vazão. A aplicação dos critérios de filtragem de amostras produziu falhas de medição em 24,9% de todas estas leituras registradas, sendo este índice bem inferior ao estimado na campanha *iii* (55,9%). Nota-se pelas Figuras 38-40 que, mesmo em concentrações de CO<sub>2</sub> superiores a 60%, a ocorrência de falha é mínima naqueles estágios de composição química do escoamento mais estável.

Em relação a estimativa do montante volumétrico de gás, a aplicação dos critérios reduziu em 30,2% o volume de gás acumulado, lembrando que a mesma análise aplicada à campanha *iii* na configuração faceada dos transdutores gerou uma diferença de 50,3% desta quantia acumulada, sugerindo que a aproximação dos transdutores consiga reduzir as incertezas relacionadas à medição de gás de queima geradas pela presença do CO<sub>2</sub>.

Para a fundamentação desta premissa, faz-se necessário comparar, para cada patamar de concentração de CO<sub>2</sub>, a quantidade de amostras produzidas nestas duas campanhas (transdutores faceados e aproximados), verificando se as falhas estão sendo avaliadas sobre condições semelhantes de escoamento. A especificação destes efeitos por patamar de gás empregado no ensaio encontra-se demonstrado na Tabela 26.

Tabela 26 – Índice de falha definido em patamares de concentração de CO<sub>2</sub>, sendo referente às leituras de vazão do US.

CO <sub>2</sub> (%)	Leituras (%)	Índice de falha (%)		
		Critério A	Critério AB	Critério ABC
5 – 20	9,3	0,0	19,0	19,0
20 – 40	10,3	34,5	34,5	34,5
40 – 60	18,7	20,4	20,4	20,4
60 – 80	26,6	6,7	6,7	7,3
80 – 100	35,0	15,7	18,3	39,3

Nota-se pela Tabela 26 que 61,6% das leituras de vazão computadas ocorreram em composições de mistura acima de 60% de CO<sub>2</sub>. Apesar desta fração ser inferior aos 80,2% das leituras produzidas neste mesmo patamar de gás na campanha *iii* com os transdutores faceados, entende-se que esta quantidade de amostras seja significativa e suficiente para a caracterização do comportamento do medidor sob estas condições de escoamento. Em complemento, o experimento obtido com os transdutores aproximados produziu tanto estágios de estabilidade quanto de variação abrupta do teor de CO<sub>2</sub>, validando, portanto, esta análise comparativa.

Algo interessante registrado é que o menor índice de falhas ocorreu em concentrações entre 60 e 80% de CO<sub>2</sub>, devido as variações menos abruptas do gás produzidas neste patamar. Já nos outros níveis de composição química, alterações mais acentuadas foram empregadas, ocasionando índices de falha significativos mesmo quando abaixo de 20% de CO<sub>2</sub> no escoamento.

#### 6.2.5 Análise de variabilidade das medições após aproximação dos transdutores

Com a definição do comportamento temporal dos parâmetros de interesse obtidos nesta análise com os transdutores aproximados, torna-se necessário uma avaliação estatística dos dados brutos produzidos, buscando verificar o grau de dispersão das medições de vazão obtidas. Para isso, definiu-se novamente intervalos de leituras geradas em composições químicas relativamente estáveis, sendo estabelecido quatro patamares associados ao teor de CO<sub>2</sub> com trinta leituras aquisitadas em cada nível

de gás. Tais curvas podem ser verificadas na Figura 40, cujos dados utilizados podem ser conferidos no Apêndice F.

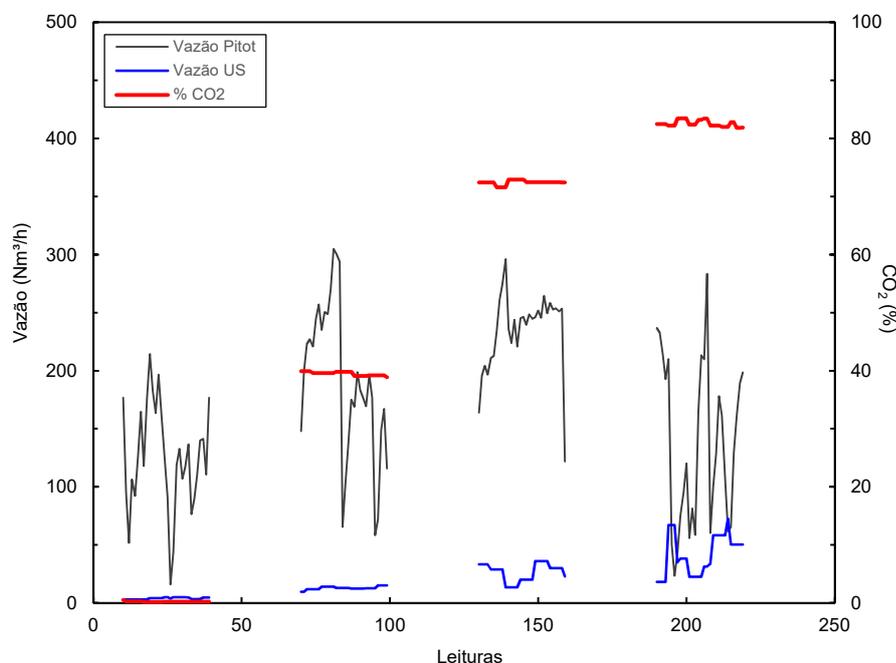


Figura 40 – Síntese das leituras registradas em patamares estáveis do teor de CO<sub>2</sub>, obtidas após a aproximação dos transdutores.

A variabilidade das leituras de vazão referente a cada patamar pode ser mais precisamente analisada por meio de alguns parâmetros estatísticos já apresentados, sendo eles a média aritmética ( $\bar{Q}$ ), o desvio padrão ( $\sigma$ ) e o coeficiente de variação ( $\Delta$ ) quantificando a razão entre o desvio padrão e a média, como pode ser verificado na Tabela 27.

Tabela 27 – Variabilidade das leituras do tubo de Pitot e US em diferentes concentrações de CO<sub>2</sub>, obtida após a aproximação dos transdutores.

CO <sub>2</sub> (%)	Pitot			US		
	$\bar{Q}$ (Nm <sup>3</sup> /h)	$\sigma$ (Nm <sup>3</sup> /h)	$\Delta$ (%)	$\bar{Q}$ (Nm <sup>3</sup> /h)	$\sigma$ (Nm <sup>3</sup> /h)	$\Delta$ (%)
0,21	125,15	45,90	36,68	3,92	0,82	20,93
39	191,24	67,16	35,12	12,87	1,36	10,54
72	234,90	33,88	14,42	26,55	7,85	29,57
83	136,70	71,04	51,97	41,58	17,61	42,37

Assim, os resultados obtidos com o tubo de Pitot confirmaram o que já havia sido comentado de que seus registros apresentam uma grande dispersão devido a reduzida velocidade de escoamento imposta, chegando a alcançar 51,97% em 83% de CO<sub>2</sub>, produzindo variações em sua média e em sua variabilidade que não permitem a definição de uma proporcionalidade relativa à concentração de CO<sub>2</sub> na mistura.

Em relação ao desempenho do US neste experimento observa-se que a vazão média registrada tende a aumentar para maiores teores de CO<sub>2</sub>, sendo lido valores médios de vazão até cerca de 11 vezes maior que na condição com ar atmosférico. Quanto à dispersão das amostras, há também uma tendência de aumento para maiores teores de CO<sub>2</sub>, apresentando variabilidade de 42,37% no nível de CO<sub>2</sub> mais elevado. Tal comportamento é semelhante ao percebido na montagem com os transdutores faceados à parede do tubo, sendo resultante da incapacidade deste instrumento em produzir nestas condições resultados continuamente precisos devido a atenuação do sinal ultrassônico promovida por este gás.

Sabendo-se que a aproximação dos transdutores exige o reajuste de alguns parâmetros dimensionais na configuração do medidor, para que tais resultados mantenham-se precisos, a velocidade do som medida será adotada como indicador para validação das leituras produzidas pelo US durante este experimento. A Figura 41 permite verificar se a velocidade do som, estimada em intervalos com CO<sub>2</sub> relativamente estável, encontra-se em acordo com a velocidade do som estimada pela referência AGA 10 [12], sendo esta última aplicada para condições ambiente semelhantes às do teste (temperatura de 27°C e pressão de 1 atm).

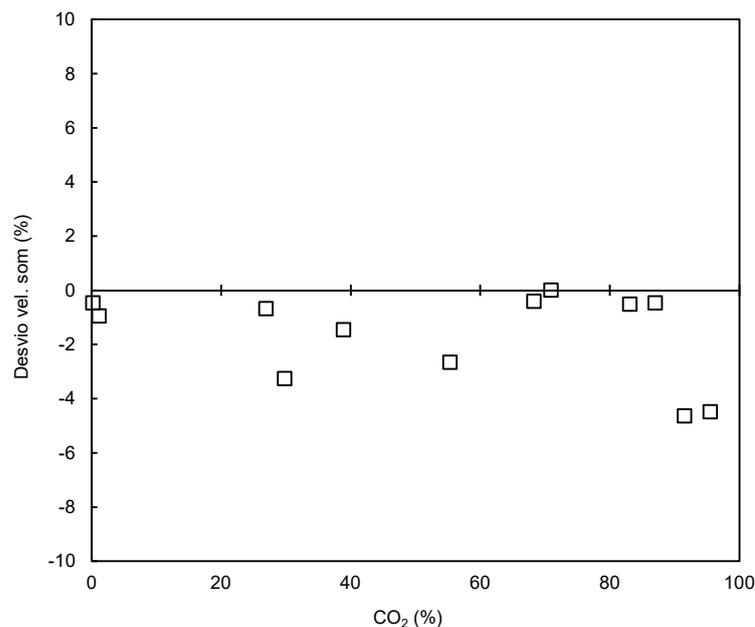


Figura 41 – Desvio porcentual entre as velocidades do som medida pelo US e a estimada pela AGA 10.

Como notado, desvios entre o valor medido e a referência mostraram-se presentes no decorrer do ensaio, sendo importante verificar se há uma tendência de dispersão destes valores com a alteração de composição da mistura gasosa. A Tabela 28 instrui a respeito desta avaliação.

Tabela 28 – Comportamento da velocidade do som medida relativo à referência adotada.

CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)	N <sub>2</sub> (%)	c <sub>AGA</sub> (m/s)	c <sub>US</sub> (m/s)	δ (%)
0,18	21,19	78,63	347,67	346,05	-0,46
1,15	21,12	77,73	346,56	343,27	-0,94
26,90	16,54	56,56	320,86	318,69	-0,67
29,80	16,49	53,71	318,19	307,84	-3,25
38,90	13,36	47,74	310,72	306,19	-1,45
55,30	13,72	30,98	297,38	289,49	-2,65
68,30	10,04	21,66	288,43	287,27	-0,40
70,90	8,09	21,01	286,90	286,91	0,00
83,10	5,69	11,21	279,10	277,67	-0,50
87,00	5,21	7,79	276,68	275,39	-0,46
91,50	4,28	4,22	274,01	261,31	-4,63
95,50	3,10	1,40	271,74	259,56	-4,47

Tomando como referência as condições atmosféricas iniciais de teste em 0,18% de CO<sub>2</sub>, verificou-se que, geralmente, os resultados apontaram desvios menores em relação à montagem com os transdutores faceados, indicando que o medidor foi configurado de maneira adequada e que a velocidade do som mensurada se apresentou mais fidedigna que no caso com os transdutores faceados, sugerindo também que este instrumento apresente uma menor tendência de produzir falhas.

Diante do que foi apresentado nesta seção referente ao efeito gerado pelo CO<sub>2</sub> no desempenho do medidor, observa-se que determinados comportamentos registrados se apresentam distintos quando comparados ao caso com os transdutores dispostos faceados ao tubo, possibilitando listar algumas conclusões comparativas.

- O medidor ultrassônico consegue medir mesmo em teores de CO<sub>2</sub> ultrapassando 90%, mantendo contínuo os seus registros, sem interrupções;
- Um dos efeitos verificados com a aproximação dos transdutores é o aumento da variabilidade de suas leituras de vazão;
- Falhas de medição tendem a ocorrer em estágios de variação acentuada da concentração de CO<sub>2</sub> no escoamento, podendo ser geradas mesmo em teor de CO<sub>2</sub> inferior a 20%;
- Apesar de ter registrado falhas de leitura após variações acentuadas da concentração de CO<sub>2</sub>, o medidor apresentou-se menos susceptível a falhas após a aproximação dos transdutores.

#### *6.2.6 Análise de desempenho obtido com transdutores faceados e aproximados*

Diante dos fenômenos observados durante as medições ultrassônicas com os transdutores nas configurações faceada e aproximada, uma análise comparativa deve ser realizada para o entendimento da performance deste instrumento quando submetido a um escoamento rico em CO<sub>2</sub>, além da conclusão a respeito de melhorias ou não obtidas com a aproximação dos elementos sensores. Esta conferência será baseada na análise de resultados já contabilizados nas Tabelas 22 e 27.

Foi percebido que o valor da vazão medida pelo US se manifestou inferior no arranjo com os transdutores aproximados. Provavelmente isto tenha ocorrido devido ao fato de que a aproximação dos sensores promove um caminho acústico somente na parcela de maior velocidade do escoamento, na região central do tubo, ao contrário da instalação dos transdutores faceados, cujo caminho acústico engloba todas as regiões do perfil de velocidades do escoamento turbulento completamente desenvolvido. A Figura 42 permite um melhor entendimento a respeito. Seria interessante, portanto, um estudo detalhado para a adequação desta vazão em aplicações de gás de queima, sabendo-se que tal correção dependeria do número de Reynolds e do teor de  $\text{CO}_2$ .

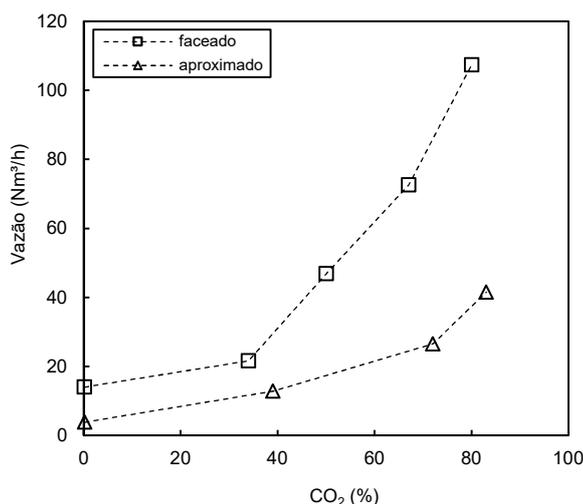


Figura 42 – Vazão registrada pelo US após a aproximação dos transdutores, estando associada a concentração de  $\text{CO}_2$  no escoamento.

Um sugestivo indicador para esta análise comparativa refere-se ao quão dispersos em torno da sua média estão as amostras, sendo representado pelo coeficiente de variação quantificado de acordo com a Figura 43.

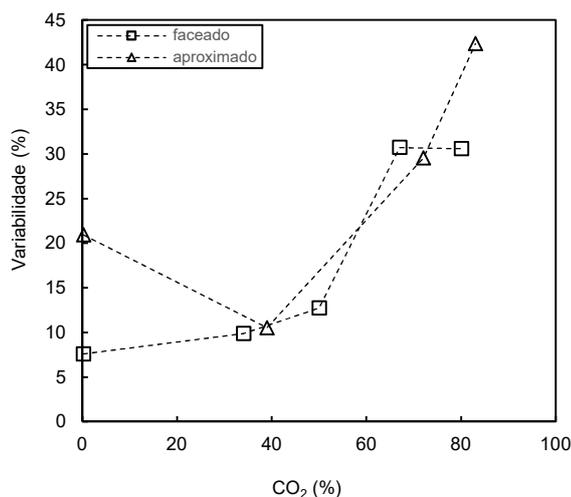


Figura 43 – Variabilidade registrada pelo US após a aproximação dos transdutores, estando associada a concentração de CO<sub>2</sub> no escoamento.

É possível notar em um teor de CO<sub>2</sub> próximo de 80% as leituras de vazão se mostraram mais variáveis para o distanciamento encurtado dos transdutores, dando a entender que este gás produza um efeito dispersivo no valor destas medições. Porém, observa-se que em condições iniciais de teste com apenas ar atmosférico, a variabilidade dos registros de vazão se apresentou significativamente superior com os transdutores aproximados, cujo coeficiente de variação foi quantificado com 20,93% contra 7,61% da configuração faceada à parede do tubo. Isto sugere que a inserção destes elementos no escoamento gere resultados ainda mais dispersos, não sendo portanto um efeito extra provocado pelo CO<sub>2</sub>. Tal comportamento possivelmente está associado ao fato de que em um caminho acústico mais curto obtém-se uma redução dos tempos de trânsito, assim como a diferença entre eles, tornando desta forma mais instável a identificação destes parâmetros e por consequência a suas medições. Além disso, na montagem inserida estes elementos encontram-se mais sujeitos às vibrações mecânicas da haste engastada mais longa no escoamento, podendo produzir desvios nos tempos de trânsito e com isso interferir no aumento de variabilidade das amostras.

Quanto a confiabilidade das leituras produzidas pelo medidor ultrassônico em escoamentos com elevada concentração de CO<sub>2</sub>, a aproximação dos transdutores não elimina as falhas de medição de vazão, geradas principalmente em estágios de

variação acentuada da concentração do gás, porém torna o medidor menos susceptível a estes erros durante sua operação. Este efeito está diretamente relacionado à maior potência do sinal captada pelos elementos sensores, uma vez que o encurtamento do caminho acústico reduz a distância de propagação esférica da onda entre o par de transdutores, produzindo assim menores perdas de pressão acústica.

#### *6.2.7 Experimentos realizados com aproximação dos transdutores em dry calibration*

Os estudos realizados nesta seção permitiram verificar os efeitos promovidos por elevadas concentrações de CO<sub>2</sub> no desempenho do medidor de vazão ultrassônico, sendo desenvolvidas condições de análise distintas que em conjunto possibilitaram caracterizar a performance do medidor quando submetido a atmosferas atenuantes, bem como justificar a ocorrência destes eventos. Contudo, alguns fenômenos relacionados ao efeito promovido pela concentração de CO<sub>2</sub> precisam ainda ser esclarecidos, uma vez que a intensidade do escoamento induzido no túnel de vento também afeta o desempenho da tecnologia.

Diante disso, propõe-se uma nova configuração experimental em condições de fluxo nulo, conhecida como *dry calibration*, buscando-se verificar, isoladamente, o efeito produzido pela presença de CO<sub>2</sub> na qualidade das medições ultrassônicas. É avaliado também se a aproximação dos transdutores gera melhorias na performance desta tecnologia, sendo estabelecidas, então, duas campanhas (*i* e *ii*) para análise em *dry-calibration*. A temperatura e umidade relativa ambiente durante os ensaios foram verificadas por termo-higrômetro como 28°C e 62%, respectivamente.

### i. Injeção de CO<sub>2</sub> com os transdutores afastados

Visando criar uma atmosfera gasosa rica em CO<sub>2</sub>, os transdutores ultrassônicos foram instalados em um carretel metálico vedado de 283 mm de diâmetro interno, sendo acompanhado novamente 3 parâmetros de interesse, segundo demonstrados nas Figuras 45-47.

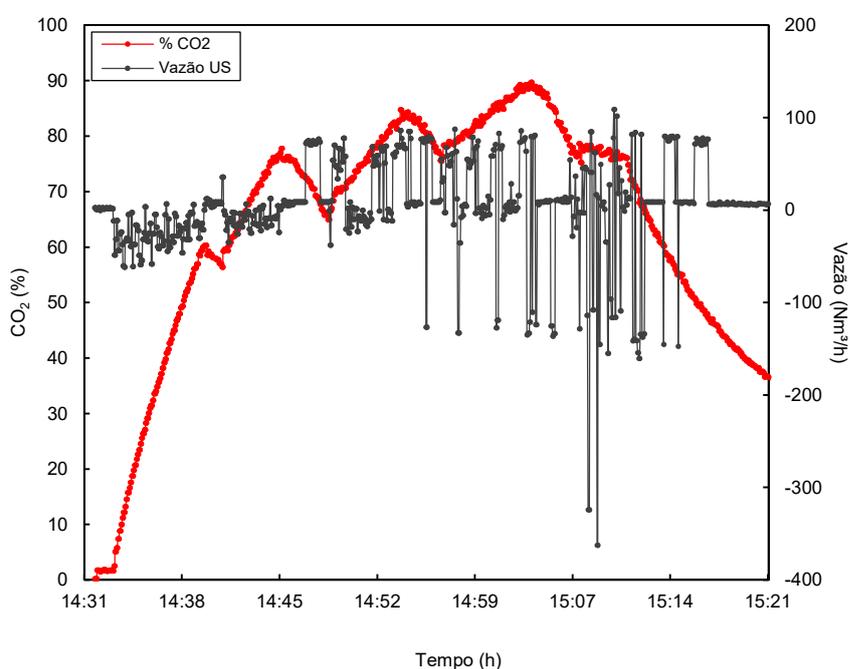


Figura 44 – Comportamento da vazão registrada pelo US com a variação de CO<sub>2</sub>, obtido com os transdutores afastados em *dry-calibration*.

Nota-se pela Figura 44 que a concentração de CO<sub>2</sub> foi alterada lentamente e com interrupções da injeção do gás, buscando-se reduzir a dinâmica produzida pela injeção do fluido no interior do carretel, bem como proporcionar homogeneidade à mistura. Como esperado, a vazão estimada pelo medidor tende a valores nulos. Entretanto, devido a circulação do gás no interior da câmara, as maiores incertezas de medição desenvolvidas em condições de ausência de fluxo, e também aos efeitos atenuantes promovidos pelas moléculas de CO<sub>2</sub>, flutuações em torno deste valor esperado são observadas, alcançando resultados negativos de amplitude relativamente elevada em maiores concentrações do gás. É importante acrescentar

que, apesar da elevada concentração de CO<sub>2</sub> (acima de 5%), não houve registros de alerta de erro pelo medidor, possivelmente atribuído a ausência de escoamento e a lenta injeção do gás, produzindo assim parâmetros operacionais de amplitude adequada aos limites de calibração estabelecidos.

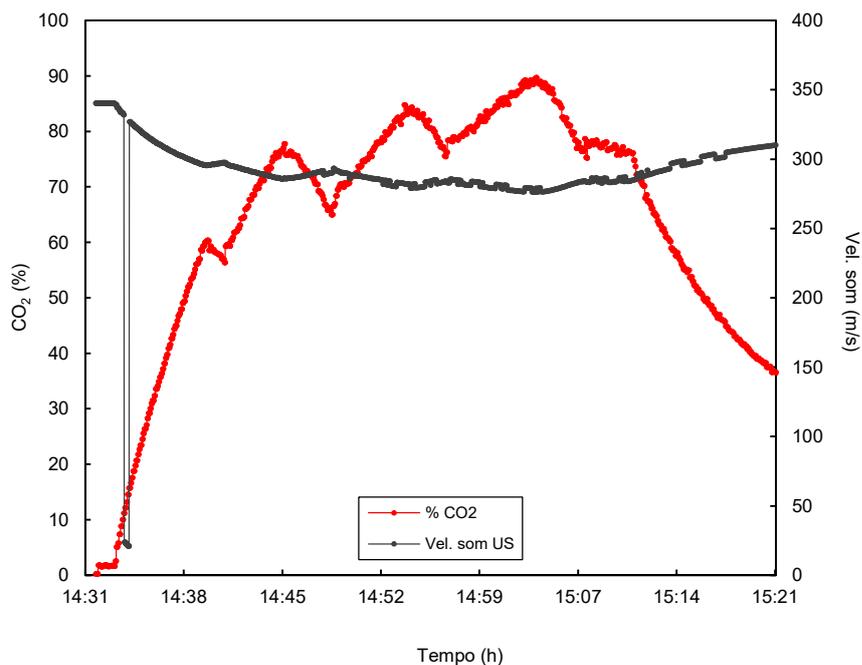


Figura 45 – Comportamento da velocidade do som registrada pelo US com a variação de CO<sub>2</sub>, obtido com os transdutores afastados em *dry-calibration*.

A velocidade do som estimada pelo US apresentou um aviso de falha no início do experimento, após variação da composição química em um patamar de CO<sub>2</sub> próximo de 10%, sendo produzido valores mais estáveis no restante do ensaio, como mostrado na Figura 45.

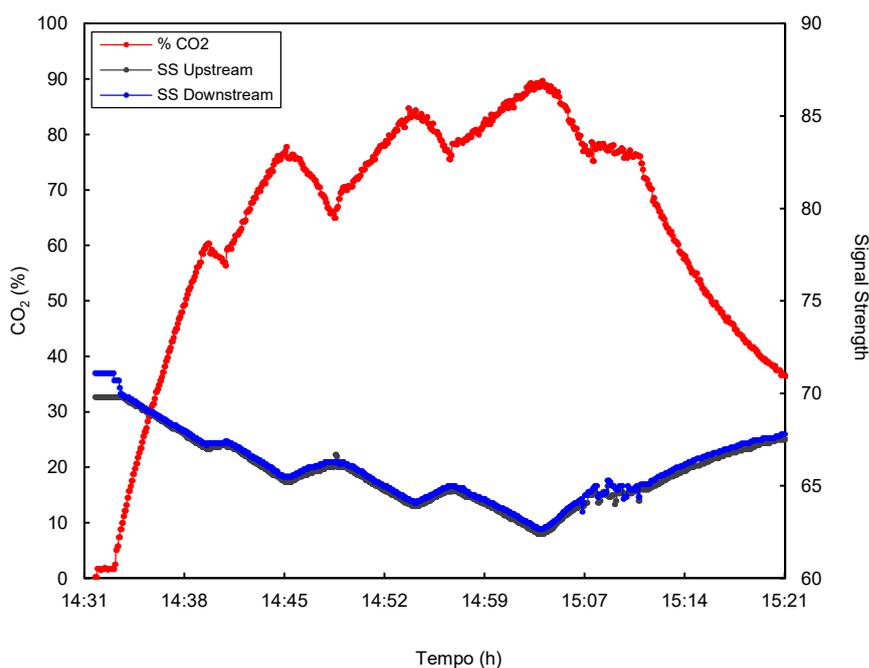


Figura 46 – Comportamento da potência do sinal registrada pelo US com a variação de CO<sub>2</sub>, obtido com os transdutores afastados em *dry-calibration*.

A intensidade do pulso ultrassônico captado pelos elementos sensores é enfraquecida com a elevação do teor de CO<sub>2</sub> na mistura, como observado na Figura 46, indicando que a redução da potência do sinal verificada nos experimentos em túnel de vento não ocorreu unicamente pelo arrasto mecânico promovido pelo escoamento sob a propagação da onda de pressão, mas também pelo efeito atenuante do CO<sub>2</sub> adicionado.

Como aplicado nas campanhas em túnel de vento, pretende-se também verificar o índice de falhas desenvolvidas durante a *dry calibration*, segundo os critérios de filtragem já apresentados. Entretanto, como neste caso a instalação tende a causar uma leve circulação do gás em seu interior devido a sua aspiração pelo analisador de CO<sub>2</sub>, é possível a obtenção de leituras de vazão negativas durante a operação, não permitindo, então, apontar aquelas que representem falhas de medição. Dessa forma, os critérios de falha não serão empregados nesta seção.

Assim, propõe-se avaliar as leituras de vazão obtidas em patamares relativamente estáveis de concentração de CO<sub>2</sub> e com registros volumétricos estratificados mais representativos, como pode ser acompanhado na Figura 47.

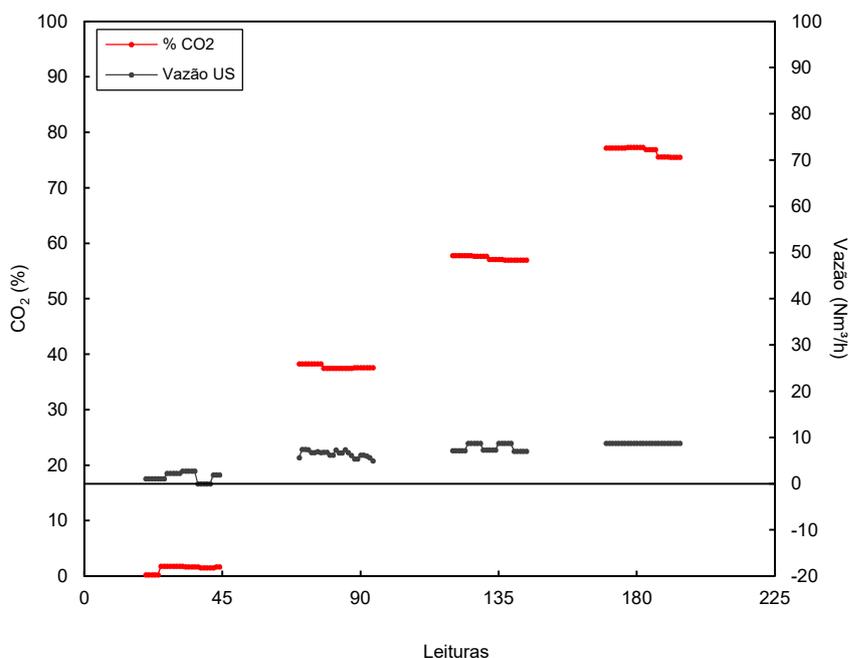


Figura 47 – Síntese das leituras registradas em patamares estáveis do teor de CO<sub>2</sub>, obtidas com os transdutores afastados em *dry-calibration*.

Nota-se que foram selecionados quatro níveis de composição química, acompanhados de suas respectivas leituras de vazão. Foram aquisitadas 25 amostras em cada conjunto definido, cujos valores encontram-se listados no Apêndice G.

A variabilidade das leituras de vazão referente a cada patamar pode ser melhor analisada por meio de parâmetros estatísticos: a média aritmética ( $\bar{Q}$ ), o desvio padrão ( $\sigma$ ) e o coeficiente de variação ( $\Delta$ ) quantificando a razão entre o desvio padrão e a média, como pode ser verificado na Tabela 29.

Tabela 29 – Variabilidade das leituras de vazão do US em diferentes concentrações de CO<sub>2</sub>, obtidas com os transdutores afastados em *dry-calibration*.

CO <sub>2</sub> (%)	$\bar{Q}$ (Nm <sup>3</sup> /h)	$\sigma$ (Nm <sup>3</sup> /h)	$\Delta$ (%)
1,52	1,53	1,00	65,25
38	6,47	6,95x10 <sup>-1</sup>	10,74
57	7,81	8,06x10 <sup>-1</sup>	10,32
76	8,77	3,63x10 <sup>-15</sup>	4,13x10 <sup>-14</sup>

Nota-se que a vazão média obtida em patamares estáveis de mistura apresenta uma tendência de elevação quando os transdutores são submetidos a uma atmosfera de maior teor de CO<sub>2</sub>. Este evento é semelhante ao observado nas análises em túnel de vento desenvolvidas na seção 6.2.3, sugerindo que a elevação da concentração de CO<sub>2</sub> provoque um efeito atenuante do sinal ultrassônico capaz de interferir parcialmente na geração de resultados crescentes de vazão.

Quanto a dispersão destas leituras, o coeficiente de variação indicado na Tabela 29 sugere que maiores frações de CO<sub>2</sub> na mistura produzem uma redução da variabilidade das estimativas de vazão, algo contraditório ao observado nas campanhas referentes ao túnel de vento. Provavelmente tal efeito tenha ocorrido devido ao aumento mássico gasoso no interior do carretel causado pela injeção do gás, reduzindo assim os eventos dinâmicos e consequentes flutuações de medição.

#### *ii. Injeção de CO<sub>2</sub> com os transdutores aproximados*

Com o intuito de verificar o desempenho do processo de medição por ultrassom após aproximação dos transdutores, o caminho acústico foi reduzido para 69% do distanciamento adotado na campanha *i* em *dry calibration*, buscando-se reproduzir condições operacionais semelhantes. As Figuras 49-51 mostram os dados brutos registrados.

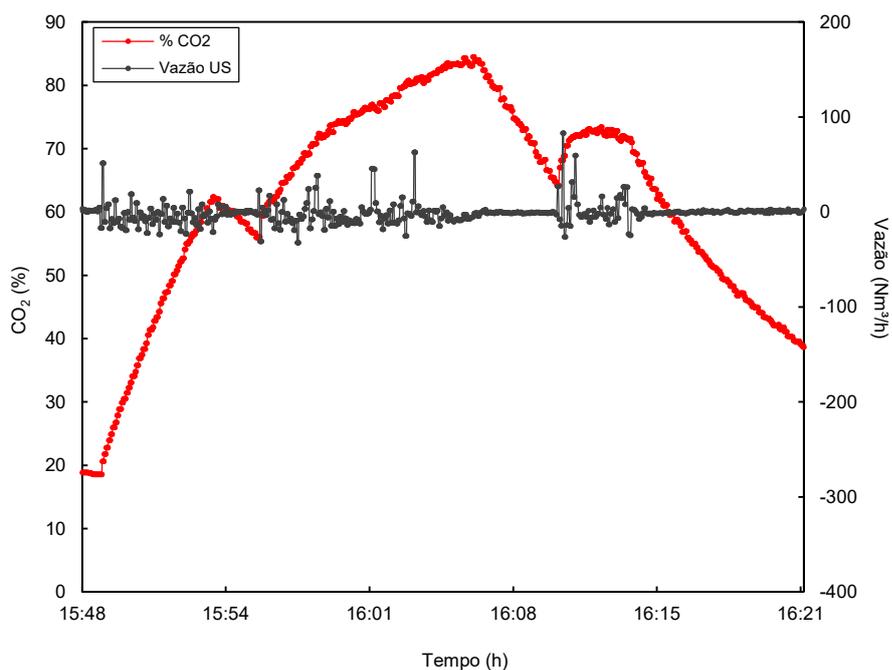


Figura 48 – Comportamento da vazão registrada pelo US com a variação de CO<sub>2</sub>, obtido com os transdutores aproximados em *dry-calibration*.

Percebe-se pela Figura 48 que a concentração de CO<sub>2</sub> foi novamente alterada lentamente e com interrupções da injeção do gás, buscando a obtenção de condições de mistura mais equilibradas e homogêneas. Provavelmente esta variação mais suave do teor do gás tenha motivado a ausência de alertas de erro durante a operação do medidor.

A redução do distanciamento entre transdutores produziu instabilidades de menor amplitude nas leituras de vazão, comportamento este oposto ao que ocorreu durante os ensaios em túnel de vento. Assim, tais análises permitem concluir que a inserção dos transdutores no escoamento eleva a dispersão das leituras devido à intensificação das vibrações mecânicas promovidas pelo arrasto do fluido sob os sensores. Na ausência de fluxo, como na *dry calibration*, os resultados tornam-se mais estáveis.

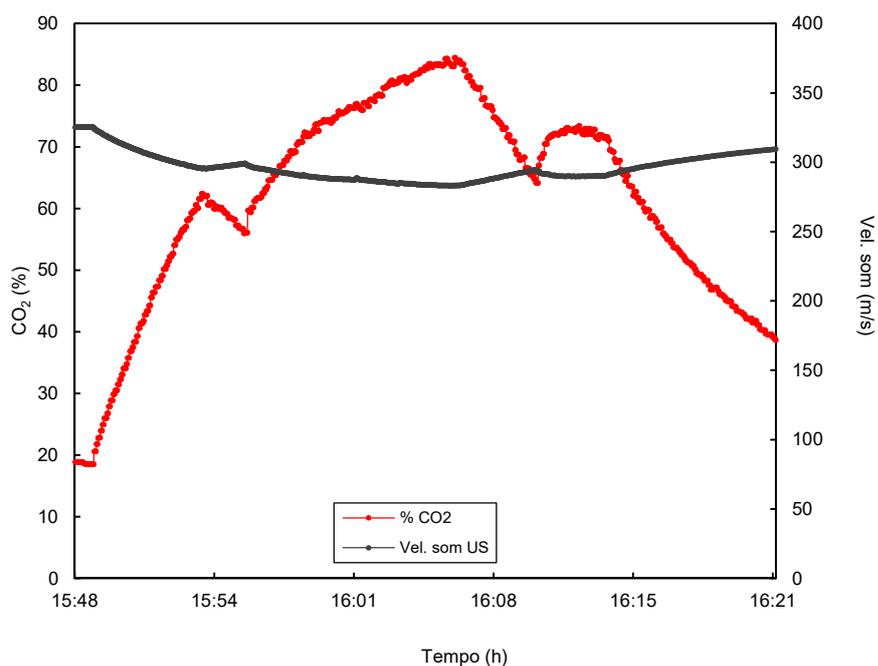


Figura 49 – Comportamento da velocidade do som registrada pelo US com a variação de CO<sub>2</sub>, obtido com os transdutores aproximados em *dry-calibration*.

De acordo com a Figura 49, a velocidade do som estimada pelo US não apresentou estágios de falha, sendo provavelmente explicado pelo fato do caráter atenuante do CO<sub>2</sub> produzir efeitos menos perceptíveis ao elemento sensor diante de um pulso ultrassônico de maior potencial gerado com o encurtamento do caminho acústico.

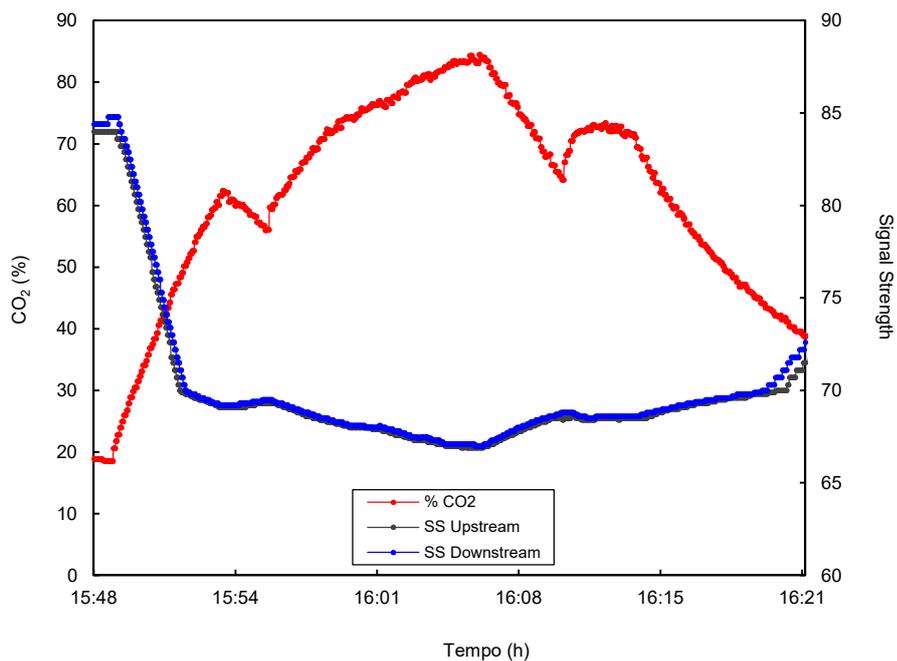


Figura 50 – Comportamento da potência do sinal registrada pelo US com a variação de CO<sub>2</sub>, obtido com os transdutores aproximados em *dry-calibration*.

A intensidade do pulso ultrassônico captado pelos transdutores é reduzida pela elevação do teor de CO<sub>2</sub> na mistura, como observado na Figura 50, comprovando o caráter atenuante deste gás.

A interpretação dos resultados pode ser melhor percebida por meio do tratamento estatístico aplicado sob as leituras de vazão, sendo selecionadas em patamares relativamente estáveis de concentração de CO<sub>2</sub> e com registros volumétricos mais representativos, como pode ser acompanhado na Figura 51.

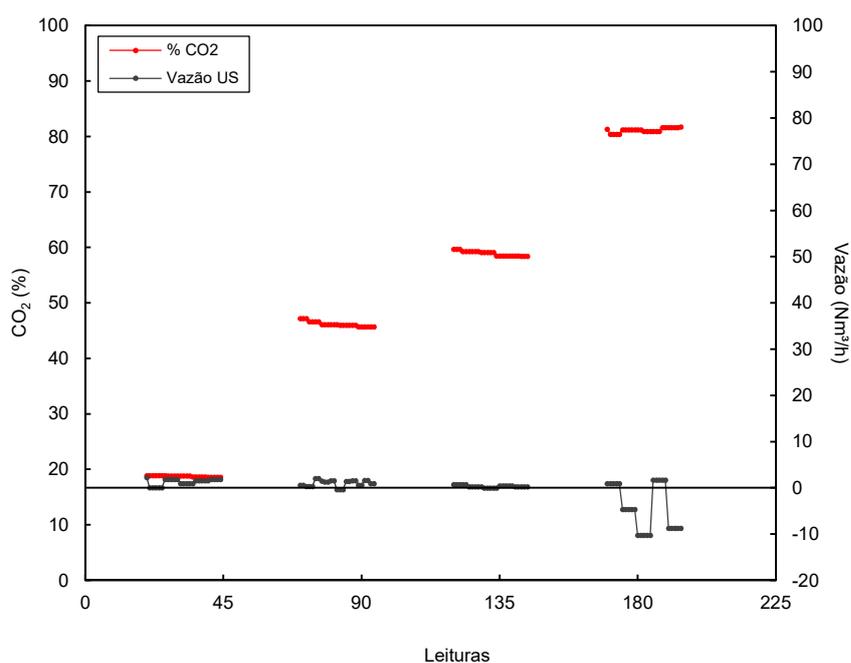


Figura 51 – Síntese das leituras registradas em patamares estáveis do teor de CO<sub>2</sub>, obtidas com os transdutores aproximados em *dry-calibration*.

Nota-se que quatro níveis de composição química foram selecionados, sendo acompanhados de seus respectivos resultados de vazão. Foram adquiridas 25 amostras em cada conjunto definido, cujos valores encontram-se listados no Apêndice H.

A variabilidade das leituras de vazão referente a cada patamar pode ser melhor analisada por meio de parâmetros estatísticos: a média aritmética ( $\bar{Q}$ ), o desvio padrão ( $\sigma$ ) e o coeficiente de variação ( $\Delta$ ) quantificando a razão entre o desvio padrão e a média, como pode ser verificado na Tabela 30.

Tabela 30 – Variabilidade das leituras de vazão do US em diferentes concentrações de CO<sub>2</sub>, obtidas com os transdutores aproximados em *dry-calibration*.

CO <sub>2</sub> (%)	$\bar{Q}$ (Nm <sup>3</sup> /h)	$\sigma$ (Nm <sup>3</sup> /h)	$\Delta$ (%)
19	1,25	0,73	58,99
46	0,96	0,73	76,57
59	0,31	0,27	87,08
81	-4,21	4,97	118,03

Em relação à vazão média obtida em condições semelhantes às da campanha *i*, a aproximação dos transdutores tende a reduzir o valor desta estimativa volumétrica, como já observado nos experimentos em túnel de vento. Como na *dry calibration* não há efeitos promovidos pelo escoamento, entende-se que este evento ocorra devido aos menores tempos de trânsito produzidos nesta configuração de montagem, induzindo o medidor a gerar cálculos subestimados de vazão.

Apesar da *dry-calibration* se tratar de um método indicado pela literatura para calibração, tal proposta se mostrou pouco conclusiva para a definição dos efeitos produzidos pelo CO<sub>2</sub> sob as medições de vazão ultrassônicas. Os resultados demonstraram a necessidade de melhorias neste procedimento, principalmente referentes as etapas de injeção e captação do gás, buscando com isso produzir condições de mistura mais estáveis. Logo, o túnel de vento se mostrou como o método mais eficaz para a caracterização dos efeitos produzidos pelo CO<sub>2</sub> em medições de vazão ultrassônicas para gás de queima.

## 7 CONCLUSÕES

As propostas experimentais apresentadas neste estudo atenderam de maneira satisfatória a meta de verificação do efeito atenuante promovido pela concentração de CO<sub>2</sub> na propagação do pulso emitido pelo medidor de vazão ultrassônico, permitindo avaliar estatisticamente o quanto a compreensão deste comportamento pode ser relevante em aplicações de queima de gás em plataformas *off-shore*.

O efeito observado mais nítido sob a performance deste medidor quando submetido a operação em escoamentos com alto teor de CO<sub>2</sub> diz respeito à redução da potência do sinal ultrassônico emitida pelo transdutor, se configurando como o parâmetro de medição que melhor representa o fenômeno atenuante associado ao gás.

Na contabilização da vazão volumétrica, nota-se o aumento da variabilidade das leituras de vazão com o incremento do gás, sendo registrado, por exemplo, uma dispersão de 30,73% quando em uma corrente de ar composta por 67% de CO<sub>2</sub>.

Um outro evento observado refere-se às falhas nas leituras produzidas em instantes cujos parâmetros de medição destoam de um estado esperado, produzindo assim um volume acumulado não representativo de gás. Verificou-se que tal comportamento tende a se manifestar em composições de mistura acima de 5% de CO<sub>2</sub>, sendo agravado em maiores teores do gás. Em uma análise obtida com teores acima de 60% de CO<sub>2</sub> durante 80,2% de todas as leituras estimadas, por exemplo, as falhas produziram uma redução volumétrica acumulada de 50,3%. Observou-se ainda que estas falhas ocorrem com maior frequência em estágios de variação acentuada do gás, não produzindo, porém, interrupções das medições.

Como proposta de encaminhamento para este problema, enfrentado pelo segmento petrolífero, a aproximação dos transdutores se mostrou com uma alternativa interessante em tubulações com velocidade de escoamento tipicamente reduzida. A adoção deste procedimento tende a reduzir o índice de falha associado à presença

do CO<sub>2</sub>, devido a maior potência acústica produzida nesta configuração de montagem. Em condições de escoamento semelhantes, o encurtamento da distância acústica reduziu o índice de falha de 55,9 para 24,9%, indicando realmente melhorias promovidas por este procedimento. Contudo, a redução do caminho acústico eleva a variabilidade das leituras de vazão do medidor, sendo este efeito associado a uma maior vibração dos transdutores ultrassônicos induzida pelo arrasto do escoamento sob estes elementos.

Em complemento, notou-se que a aproximação dos transdutores reduz a vazão estimada pelo medidor, uma vez que o encurtamento do caminho acústico produz menores tempos de trânsito, induzindo o medidor a gerar resultados de vazão subestimada. Assim, o efeito da redução do caminho acústico deve ser contabilizado no cálculo da vazão, não apenas como uma razão entre as áreas do escoamento e da medição, mas também considerando que o caminho acústico encurtado percebe apenas regiões específicas do perfil de velocidades.

## 8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os resultados obtidos nos experimentos realizados no túnel de vento demonstram a necessidade de se empregar um medidor de referência que apresente uma faixa de medição de vazão mais ampla que a do tubo de Pitot, conseguindo, assim, uma avaliação mais precisa das condições de escoamento criadas durante a análise de desempenho do medidor de vazão ultrassônico em atmosferas de elevada concentração de CO<sub>2</sub>.

Algo interessante a se avaliar também é o efeito promovido pelo teor de CO<sub>2</sub> nas estimativas de vazão ultrassônicas com o medidor operando em diferentes frequências de transdutor, uma vez que a atenuação do sinal ultrassônico promovida pelo gás é dependente da frequência do pulso emitida, podendo inclusive apontar intensidades de vibração dos transdutores que promovam a redução desta perda de sinal.

Um estudo mais aprofundado sobre a performance do medidor ultrassônico em uma atmosfera rica em CO<sub>2</sub> poderia ser desenvolvido por meio do procedimento de fechamento do circuito de escoamento do túnel de vento, adicionando-se novos trechos que permitiriam a produção de um escoamento turbulento completamente desenvolvido em elevadas rotações do soprador, inclusive em altas concentrações de CO<sub>2</sub>, reduzindo-se o consumo deste gás e por consequência possibilitando uma maior repetição dos experimentos e em uma melhor condição de operação do tubo de Pitot.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO/INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **Portaria Conjunta ANP/INMETRO Nº 1**. Diário Oficial da União. 2000. Disponível em: <<https://www.diariodasleis.com.br/busca/exibelink.php?numlink=217101>>. Acesso em: 19 maio 2015.
- [2] INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **RTM-64: Regulamento técnico metrológico referente à medição dinâmica de petróleo, derivados líquidos e álcool**. 2003.
- [3] AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO/INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **RTM-001/2000: Regulamento técnico metrológico de petróleo e gás natural**. 2000.
- [4] MYLVAGANAM, K.S. **High-rangeability ultrasonic gas flowmeter for monitoring flare gas**. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectric and Frequency Control. Vol. 36, no. 2, p. 144 – 149. Noruega. 1989.
- [5] LOUREIRO, T.Y.C. **Medição de vazão de gás em sistemas de flare (tocha)**. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 2013. p. 152.
- [6] NAKAMURA, K. **Ultrasonic transducers: materials and design for sensors, actuators and medical applications**. Woodhead Publishing. Cambridge, Reino Unido. 2012. p. 722.
- [7] COTTET, A.; NEUMEIER, Y.; SCARBOROUGH, D.; BIBIK, O.; LIEUWEN, T. **Acoustic absorption measurements for characterization of gas mixing**. School of Aerospace Engineering, Georgia Institute of Technology. Georgia, EUA. 2004. p. 2081-2088.

- [8] CHEEKE, D. **Fundamentals and applications of ultrasonic waves**. Concordia University. Canadá. CRC Press. 2002. p. 480.
- [9] BRASSIER, P. **Débitmétrie par technique ultrasonore en milieu gazeux industriel**. Tese de doutorado. École Doctorale de Sciences Physiques e de L'Ingenieur. França. 2000. p. 204.
- [10] YODER, J. **Ultrasonic flow meters in the energy measurement spotlight**. Pipeline & Gas Journal. EUA. 2009. p. 41-42.
- [11] AMERICAN GAS ASSOCIATION. **Measurement of gas by multipath ultrasonic meters**. Report No. 9. 2nd Ed. Washington, DC, EUA. 2007. p. 113.
- [12] AMERICAN GAS ASSOCIATION. **Speed of sound in natural gas and other related hydrocarbon gases**. Report No. 10. Washington, DC, EUA. 2003.
- [13] AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **Manual of petroleum measurement standards, Ch. 14 – Natural gas fluids measurement**. Washington, DC, EUA. 2007. p. 66.
- [14] Hydrocarbon Management Committee. **Determination of flare quantities from upstream oil and gas facilities**. HM58, Energy Institute, London. 2008. p. 55.
- [15] SALGADO, A.L; RAMOS, R. **Perfect gas approach validation aiming estimation of thermophysical properties in flare flows considering operational data**. Proceedings of 20th. International Congress of Mechanical Engineering – COBEM 2009. Brasil. 2009. p. 8.
- [16] AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO. **Regulamento técnico de queimas e perdas de petróleo e gás natural**. Portaria ANP N° 249. Diário Oficial da União. 2000. Disponível em:

<[http://nxt.anp.gov.br/nxt/gateway.dll/leg/folder\\_portarias\\_anp/portarias\\_anp\\_tec/2000/novembro/panp%20249%20-%202000.xml](http://nxt.anp.gov.br/nxt/gateway.dll/leg/folder_portarias_anp/portarias_anp_tec/2000/novembro/panp%20249%20-%202000.xml)>. Acesso em: 08 ago. 2015.

- [17] AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO/ INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **Regulamento técnico de medição de petróleo e gás natural**. Resolução Conjunta ANP/INMETRO N° 1. 2013. Disponível em:  
<[http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll/leg/folder\\_resolucoes/resolucoes\\_conj/2013/junho/rconj%201%20-%202013.xml](http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll/leg/folder_resolucoes/resolucoes_conj/2013/junho/rconj%201%20-%202013.xml)>. Acesso em: 02 dez. 2015.
- [18] DELMÉE, G. J. **Manual de medição de vazão**. São Paulo, Brasil. Edgard Blücher Ltda. 3rd ed. 2003. p. 366.
- [19] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO/FDIS 3966: Measurement of fluid flow in closed conduits – Velocity area method using Pitot static tubes**. ISO. 2008. p. 60.
- [20] SILVA, F.C. **Análise comparativa de medidor de vazão em flare por tecnologia ótica e pitometria utilizando túnel de vento**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória. 2012. p. 122.
- [21] MELNYK, M.; CHTCHERBAKOV, A.; SOUKHACHEV, A.; MELNIK, B. **Flare gas metering: minimizing surprises**. Lauris Technologies Inc., Canada; Simon Fraser University, Canada; BG Technology, Russia. 2013. p. 12.
- [22] RAMOS, R. **Desenvolvimento de um medidor de vazão de gás por ultrassom: modelagem, protótipo e testes**. Tese de mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória. 2006.

- [23] MARTINS, R.S.; RAMOS, R. **Uma abordagem numérica para o cálculo de fator de correção de medidores de vazão por ultrassom**. 6° Congresso brasileiro de pesquisa e desenvolvimento em petróleo e gás. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória. 2011. p. 8.
- [24] LYNNWORTH, L.; LIU, Y. **Ultrasonic flowmeters: Half-century progress report, 1955- 2005**. Proceedings of Ultrasonics International (UI'05) and World Congress on Ultrasonics (WCU). Ultrasonics, vol. 44, no. Supplement 1. 2006. p. 1371 –1378.
- [25] DANE, H. J. **Ultrasonic measurement of unsteady gas flow**. Dordrecht, Netherlands. 1997. p. 8.
- [26] SÁ, F. G. **Avaliação metrológica de influência da composição do gás natural na medição de vazão em sistemas de alívio de pressão tipo tocha**. Tese de mestrado. Pontífca Universidade Católica, Rio de Janeiro. 2014. p. 105.
- [27] MARTINS, R. S. **Installation effects of upstream elbows on the correction factor of single-path transit-time ultrasonic flow meters**. Tese de mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória. 2012. p. 143.
- [28] GRIMLEY, T. A. **Ultrasonic meter installation configuration testing**. Proceedings of AGA 2000 Operations Conference. Denver. 2000.
- [29] LIMA, E. S. M. **Análise experimental da sensibilidade da tecnologia ultrassônica para medição de gás de queima sob o efeito de curva**. Tese de mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória. 2013. p. 144.

- [30] GENERAL ELETRIC. **Proposta técnica apresentada à Universidade Federal do Espírito Santo para medidores de vazão ultrassônicos.** GE Oil&Gas. 2013. p. 18.
- [31] MATSON, J.; SUI, L.; NGUYEN, T.H. **New and old challenges of high velocity and high co2 concentration for flare gas flow measurement are met with improved ultrasonic flow meter capability.** GE Sensing. The Americas Workshop. 2010. p. 14.
- [32] VERMEULEN, M.; DRENTHEN, J.; HOLLANDER, H.; LANOUX, P. **Practical solution for ultrasonic flow measurement in high CO2 natural gas applications.** AGA Operations Conference. KROHNE Oil & Gas, CT Products. 2013. p. 16.
- [33] HELDEN, K.; EHRLICH, A.; DIETZ, T.; TAN, P. **Examination of ultrasonic flow meter in CO2-rich applications.** 8th South East Asia Hydrocarbon Flow Measurement Workshop. SICK. 2009. p. 14.
- [34] BHATIA, A. B. **Ultrasonic absorption: an introduction to the theory of sound absorption and dispersion in gases, liquids and solids.** Dover publications, Inc. New York. 1985. p. 427.
- [35] ZUMDAHL, S. S.; ZUMDAHL, S. A. **Chemistry.** 9th. Edition. Brooks/Cole. 2014. p. 1200.
- [36] CSELE, M. **Fundamentals of light sources and lasers.** A John Wiley & Sons, Inc., Publication. New Jersey. 2004. p. 360.

- [37] North Sea Flow Measurement Workshop 20th. **Qualification of ultrasonic flow meters for custody transfer of natural gas using atmospheric air calibration facilities.** Escócia. 2002.
- [38] CARONI, F. M. **Caracterização do escoamento no túnel de vento e acessórios do laboratório de máquinas de fluxo.** Departamento de Engenharia Mecânica, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória. 2013. p. 98.
- [39] LABVIEW™. 2011. National Instruments.
- [40] ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos Fluidos – fundamentos e aplicações.** AMGH Editora Ltda. 3 ed. 2015. p. 1016.
- [41] DE CHANT, L.J. **The venerable 1/7th power law turbulent velocity profile: a classical nonlinear boundary value problem solution and its relationship to stochastic processes.** Applied Mathematics and Computation. Albuquerque, EUA. 2005. p. 12.
- [42] BRASSIER, P.; HOSTEN, B.; VULOVIC, F. **High-frequency transducers and correlation method to enhance ultrasonic gas flow metering.** Laboratoire de Mécanique Physique, Université Bordeaux. France. 2000. p. 11.
- [43] EJAKOV, S. G.; PHILLIPS, S.; DAIN, Y., LUEPTOW, R. M.; VISSER, J. H. **Acoustic attenuation in gas mixtures with nitrogen: experimental data and calculations.** Center for Sensor Materials, Michigan State University. EUA. 2002. p. 9.

- [44] DESKTOP GAS. 2012. Techware engineering applications. Disponível em: <www.techwareeng.com>. Acesso em 22 Out. 2015.
- [45] MYLVAGANAM, K. S. **Chirp excitation of ultrasonic probes and algorithm for filtering transit times in high-rangeability gas flow metering.** IEEE, Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and frequency control. Vol. 40, No. 3. 1993. p. 193-215.
- [46] FLOWSOLV™. **Speed of sound AGA 10:2003.** Flowsolv Oil e Gas flow calculation. Disponível em: <flowsolv.com>. Acesso em 03 Mar. 2015.
- [47] BROKAW, R. S. **Thermal conductivity of nitrogen-carbon dioxide mixtures.** National Aeronautics and Space Administration. Ohio, EUA. 1959.
- [48] HAILONG, L.; WILHELMSSEN, O.; LV, Y.; WANG, W.; YAN, J. **Viscosities, thermal conductivities and diffusion coefficients of CO<sub>2</sub> mixtures: review of experimental data and theoretical models.** International Journal of Greenhouse Gas Control. 2011. p. 1119-1139.
- [49] ANVISA. **Estatística aplicada à análise de resultados de ensaios de proficiência na avaliação de laboratórios.** ANVISA, Instituto Adolpho Lutz. Rio de Janeiro, Brasil. 2003. p. 20.

## APÊNDICE A –

### Verificação de Confiabilidade da Ferramenta *Desktop Gás* na Determinação de Propriedades Termodinâmicas do Gás

Conforme mensurado na seção 5.2, foram propostos modelos teóricos para a estimativa dos coeficientes de atenuação clássico e por relaxação molecular para misturas gasosas compostas por CO<sub>2</sub> e N<sub>2</sub> em diferentes concentrações, sendo tais definições dependentes de algumas propriedades termodinâmicas: massa específica, calor específico, condutividade térmica e viscosidade.

Para tais verificações, adotou-se como referência a ferramenta *Desktop Gás* [44], permitindo a estimativa de propriedades da mistura gasosa de acordo com a composição química e estado termodinâmico desejados. O grau de confiabilidade deste *software* será avaliado por meio alguns estudos experimentais realizados sob condições controladas.

A validação desta ferramenta é primeiramente analisada pela verificação de desvios percentuais obtidos sob as propriedades de massa específica ( $\rho$ ) e calor específico ( $c_p$ ) estimadas pelo software e pela referência AGA 10 [12], sendo esta última adquirida também segundo a composição química da mistura [46].

A Tabela A.1 demonstra os resultados de referência definidos de acordo com a AGA 10 [12], cuja análise se refere a uma mistura de ar seco composta por 3 elementos químicos, onde a composição de O<sub>2</sub> foi mantida fixa em 20%, variando-se os níveis de CO<sub>2</sub> e N<sub>2</sub> em condições de pressão e temperatura de 100 kPa e 25°C, respectivamente.

Tabela A.1 – Propriedades da mistura produzidos pela referência AGA 10.

CO <sub>2</sub> (%)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (kJ/kg.K)
0	1,1626	1,0143
5	1,195	1,0006
10	1,2275	0,9877
20	1,2925	0,9638
30	1,3576	0,9423
45	1,4555	0,9137
60	1,5536	0,8888
80	1,6848	0,8605
100	1,7842	0,8503

Sob as mesmas condições, foram verificadas na Tabela A.2 as respostas produzidas pelo *Desktop Gás*, bem como as respectivas diferenças percentuais ( $\delta$ ) referentes aos valores da Tabela A.1.

Tabela A.2 – Diferenças percentuais entre as propriedades fornecidas pelo Desktop Gas e pela AGA 10.

CO <sub>2</sub> (%)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\delta_\rho$ (%)	$c_p$ (kJ/kg.K)	$\delta_{c_p}$ (%)
0	1,1626	-0,0034	1,0142	-0,0099
5	1,1950	0,0012	1,0005	-0,0120
10	1,2275	-0,0007	0,9875	-0,0162
20	1,2925	0,0019	0,9637	-0,0125
30	1,3576	0,0033	0,9422	-0,0106
45	1,4555	0,0013	0,9137	0,0044
60	1,5537	0,0041	0,8891	0,0281
80	1,6850	0,0105	0,8609	0,0407
100	1,7842	0,0027	0,8509	0,0741

Nota-se na Tabela A.2 que os resultados obtidos pela ferramenta de interesse *Desktop Gás* indicaram desvios de massa específica não superiores a 0,0105%, enquanto as diferenças de calor específico se apresentaram inferiores a 0,0741%, indicando ser um índice de confiabilidade adequado ao que se propõe neste estudo. A Figura A.1 fornece uma outra perspectiva desta análise.

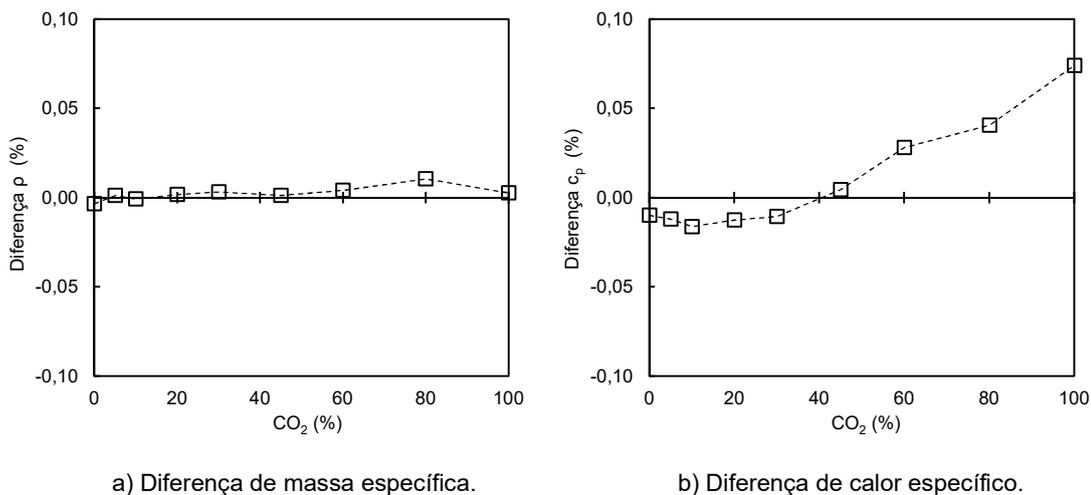


Figura A.1 – Diferenças percentuais das propriedades estimadas pela ferramenta Desktop Gas em relação a AGA 10.

Em complemento a esta validação, a condutividade térmica ( $k$ ) foi examinada por meio de um estudo realizado por Keyes [47] experimentalmente, em que esta propriedade de uma mistura gasosa composta por  $\text{CO}_2$  e  $\text{N}_2$  foi avaliada sob diferentes composições destes elementos, em atmosfera mantida com pressão de 1 atm e temperatura de 323 K. A Tabela A.3 informa os resultados obtidos por este autor e pelo *Desktop Gás* nas mesmas condições, comparando-os novamente por meio das diferenças percentuais.

Tabela A.3 – Diferença percentual da condutividade térmica estimada pelo Desktop Gas.

$\text{CO}_2$ (%)	$\text{N}_2$ (%)	$k$ (cal/s.cm.°C)		$\delta$ (%)
		Keyes	Desktop Gás	
64,85	35,15	$5,0000 \times 10^{-5}$	$5,2521 \times 10^{-5}$	5,04
46,87	53,13	$5,4121 \times 10^{-5}$	$5,6171 \times 10^{-5}$	3,78
32,70	67,30	$5,7418 \times 10^{-5}$	$5,9050 \times 10^{-5}$	2,84

Nota-se que as estimativas de condutividade térmica pelo *software* destoaram em até 5,04% da referência, demonstrando também uma razoável aproximação para o que se pretende neste trabalho. A Figura A.2 demonstra graficamente tais valores.

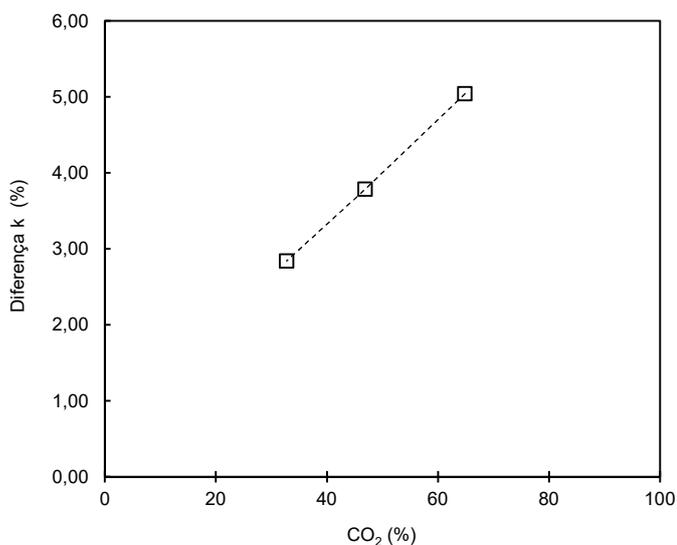


Figura A.2 – Diferença percentual da condutividade térmica estimada pela ferramenta Desktop Gas.

Por fim, é investigado a viscosidade dinâmica ( $\mu$ ) produzida pela ferramenta de interesse, baseando-se, para isso, em pesquisas apresentadas por Hailong et. al. [48]. Neste conteúdo, uma mistura gasosa composta por 50,57% CO<sub>2</sub> e 49,43% N<sub>2</sub> teve sua pressão alterada, mantendo-se constante em 293 K a temperatura. A Tabela A.4 informa a diferença percentual desta propriedade obtida pelas duas fontes apresentadas.

Tabela A.4 – Diferença percentual da viscosidade dinâmica da mistura estimada pelo Desktop Gas.

P (Mpa)	$\mu$ (Poise)		$\delta$ (%)
	Hailong	Desktop Gás	
0,5143	$1,6314 \times 10^{-5}$	$1,5243 \times 10^{-5}$	-6,56
1,5343	$1,6545 \times 10^{-5}$	$1,5375 \times 10^{-5}$	-7,07
2,4429	$1,6730 \times 10^{-5}$	$1,5555 \times 10^{-5}$	-7,02

A viscosidade dinâmica avaliada pelo *Desktop Gás* atingiu desvios de 7,07% em relação ao estudo de referência selecionado. A Figura A.3 descreve melhor este comportamento.

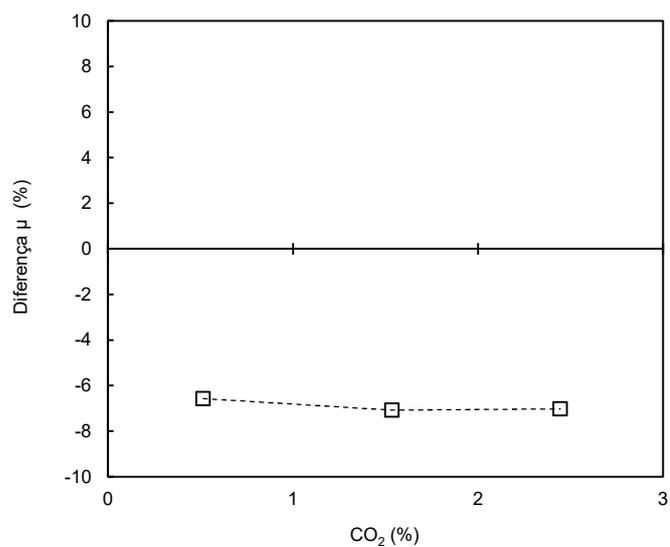


Figura A.3 – Diferença percentual da viscosidade dinâmica estimada pela ferramenta Desktop Gas.

Assim, os parâmetros de confiabilidade estabelecidos indicam que tal ferramenta permite implementar, com razoável aproximação, o modelo teórico proposto na seção 5.2.

## APÊNDICE B – Parâmetros de Referência para a Estimativa dos Coeficientes de Atenuação

Os modelos de absorção demonstrados na seção 5.2 foram definidos com base em uma mistura seca (umidade relativa nula) a 20°C e 1 atm. A estimativa do coeficiente de atenuação clássica, segundo Eq. (15), foi alimentada por dados de propriedades termodinâmicas obtidos pela ferramenta *Desktop Gás*, enquanto a velocidade do som teve seu valor adquirido através da AGA 10 [12], ambos baseados na composição química da mistura, estando indicados na Tabela B.1.

Tabela B.1 – Parâmetros termodinâmicos utilizados na construção dos modelos de atenuação.

CO <sub>2</sub> (%)	N <sub>2</sub> (%)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (KJ/kg.K)	$k$ (W/m.K)	$\mu$ (Pa.s)	$c$ (m/s)
ar	ar	1,205	1,0061	0,02581	$1,823 \times 10^{-5}$	349,1
20	80	1,299	0,9852	0,02354	$1,63 \times 10^{-5}$	327,3
60	40	1,568	0,9031	0,02000	$1,502 \times 10^{-5}$	292,8
100	0	1,839	0,8463	0,01675	$1,464 \times 10^{-5}$	266,6

\* Composição do ar: 0,78086% N<sub>2</sub>; 0,20948% O<sub>2</sub>; 0,00934% Ar; 0,00031% CO<sub>2</sub>.

A razão de valores específicos foi adotada como  $c_p/c_v = 1,35$ , sendo estimada segundo a AGA 10 [12].

Para a obtenção do comprimento de onda indicado no modelo, aplicou-se a Eq. (B.1), relacionando este parâmetro à velocidade do som em cada composição química, segundo a Tabela B.1, e à frequência da onda.

$$c = \lambda f$$

(B.1)

Assim, os comprimentos de onda obtidos se apresentaram com ordem de grandeza entre  $10^{-1}$  e  $10^{-5}$  m, sendo referentes às frequências acústicas entre  $10^3$  e  $10^7$  Hz, respectivamente.

Quanto a construção das curvas de atenuação por relaxação, foram sustentadas por valores obtidos experimentalmente [43], estando demonstrados na Tabela B.2.

Tabela B.2 – Parâmetros para construção do modelo de relaxação molecular.

<b>CO<sub>2</sub> (%)</b>	<b>N<sub>2</sub> (%)</b>	<b>f<sub>r</sub> (Hz)</b>	<b><math>\alpha\lambda_{\text{máx}}</math></b>
20	80	27000	0,025
60	40	30000	0,08
100	0	40000	0,13

## APÊNDICE C –

### Cálculo da Velocidade de Descarga Baseada na ISO 3966

A velocidade de descarga do escoamento ( $V_D$ ) foi inferida por medições produzidas pelo tubo de Pitot ao longo da seção transversal a qual foi instalado no tubo, sendo tais leituras aplicadas na Eq.(9) fornecida pela norma ISO 3966 [19], seção 10.1. Nesta expressão,  $v_0$  é a velocidade radial máxima e  $v_1, v_2...v_n$  são as velocidades ao longo da seção transversal com seus respectivos raios  $r_1, r_2, \dots, r_n$ , sendo  $r_i = r/R$  e  $R$  o raio da seção transversal.

$$\begin{aligned}
 V_D = & v_0 \left( -\frac{1}{12} r_2^2 + \frac{5}{12} r_1^2 + \frac{1}{12} \frac{r_2^3}{r_2} \right) r_2^3 + v_1 \left( \frac{1}{6} r_1^2 + \frac{2}{3} r_2^2 - \frac{1}{12} r_3^2 \right) - v_2 \left( \frac{r_1^3}{12 r_2} \right) + \\
 & \sum_{i=2}^{i=n-2} v_i \left[ -\frac{1}{12} r^{1(i+2)} + \frac{2}{3} r^{2(i+1)} - \frac{2}{3} r^{2(i-1)} + \frac{1}{12} r^{2(i-2)} \right] + v_{(n-1)} \left[ \frac{1}{2} r_n^2 + \frac{1}{12} r^{2(n-1)} - \right. \\
 & \left. \frac{2}{3} r^{2(n-1)} + \frac{1}{12} r^{2(n-3)} \right] + \\
 & v_n \left\{ \frac{m}{m+1} (1 - r_n^2) + \frac{[r_n^2 - r^{2(n-1)}]^2}{12m(1 - r_n^2)} + \frac{7}{12} r_n^2 - \frac{2}{3} r^{2(n-1)} + \frac{1}{12} r^{2(n-2)} \right\}
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

O índice  $n$  refere-se ao número de pontos por raio, cujo valor empregado neste trabalho foi  $n=4$ . O fator  $m$  depende da rugosidade da parede do tubo e das condições do escoamento, e é compreendido entre 4 (parede rugosa) e 10 (parede lisa), sendo adotado neste estudo  $m=7$ . A Tabela C.1 informa estes valores de entrada utilizados nos cálculos.

Tabela C.1 – Parâmetros utilizados nos cálculos da velocidade de descarga.

pontos/raio	m	r1/R	r2/R	r3/R	r4/R	R
4	7	0,2866	0,57	0,6892	0,8472	91

Após realizadas as medições de velocidade pelo tubo de Pitot em 3 rotações distintas do soprador, foi possível a definição dos termos indicados na Eq. (9), bem como a velocidade de descarga representativa do escoamento, estando informados na Tabela C.2.

Tabela C.2 – Componentes para o cálculo da velocidade de descarga  $V_D$  baseada na ISO 3966 [19].

$\omega$ (rpm)	$V_0$ (m/s)	$V_1$ (m/s)	$V_2$ (m/s)	$V_3$ (m/s)	$V_4$ (m/s)	$V_D$ (m/s)	$Q$ (m <sup>3</sup> /s)
567	14,070	13,622	13,355	12,775	11,572	12,583	0,327
962	23,822	23,965	23,288	22,046	20,523	22,046	0,574
1402	35,052	34,414	34,335	32,658	30,921	32,610	0,848

## APÊNDICE D –

### Critério de *Chauvenet* para Exclusão de Medições Espúrias Produzidas pelo Medidor Ultrassônico

O critério de *Chauvenet* constitui-se em um método consistente para a tomada de decisão sobre excluir ou não um dado de um conjunto de valores medidos, desde que se tenha uma referência para verificação de que o processo encontra-se controlado. Para sua aplicação, deve-se calcular o desvio absoluto de cada leitura de vazão ( $Q$ ) em relação a média ( $\bar{Q}$ ) do conjunto amostral, relacionando-o ao respectivo desvio padrão ( $\sigma$ ), como demonstrado na Eq. (D.1).

$$\Delta R = |Q - \bar{Q}|/\sigma \tag{D.1}$$

Caso esta razão  $\Delta R$  seja superior ao critério estabelecido pelo método, tal leitura deve ser rejeitada e a média recalculada. Segundo informações [49], o critério de eliminação é dependente da quantidade de amostras, sendo que para as 30 leituras do medidor ultrassônico avaliadas em cada conjunto, este critério é estabelecido como 2,39. Logo, no instante em que o  $\Delta R$  produzido for igual ou superior a 2,39, a amostra é considerada como não representativa, devendo então ser rejeitada.

As Tabelas D.1 e D.2 informam as leituras de vazão do medidor ultrassônico ( $Q_{us}$ ) e do tubo de Pitot ( $Q_{pt}$ ) obtidas em experimentos com ar no túnel de vento, sendo avaliados conjuntos de 30 leituras obtidas em estágios mais estáveis e em 3 números de Reynolds associados à rotação do soprador. As amostras produzidas pelo US e que foram rejeitadas após a aplicação do critério encontram-se sublinhas nas tabelas. Nota-se que apenas duas leituras, obtidas na configuração aproximada dos transdutores, foram eliminadas, sendo a média do conjunto recalculada para análise na seção 6.2.1.

Tabela D.1 – Leituras obtidas com os transdutores faceados, sendo referentes a um escoamento de ar.

Re = 131055		Re = 227854		Re = 333537	
$Q_{pt}$ (Nm <sup>3</sup> /h)	$Q_{us}$ (Nm <sup>3</sup> /h)	$Q_{pt}$ (Nm <sup>3</sup> /h)	$Q_{us}$ (Nm <sup>3</sup> /h)	$Q_{pt}$ (Nm <sup>3</sup> /h)	$Q_{us}$ (Nm <sup>3</sup> /h)
1037,88	1096,21	1753,47	1767,72	2619,09	2711,43
1046,45	1096,21	1761,82	1767,72	2628,41	2711,43
1036,24	1044,50	1762,28	1767,72	2634,08	2734,40
1043,65	1044,50	1763,91	1784,99	2633,75	2734,40
1084,36	1072,20	1751,44	1862,06	2625,94	2774,58
1081,35	1072,20	1758,91	1862,06	2624,07	2774,58
1078,86	1072,20	1766,94	1862,06	2618,83	2780,01
1079,49	1043,62	1773,54	1800,61	2613,46	2757,31
1079,83	1043,62	1775,40	1834,95	2598,36	2757,31
1082,53	1059,62	1771,77	1834,95	2591,53	2757,31
1085,99	1059,62	1774,01	1843,53	2587,08	2732,20
1089,53	1059,62	1772,48	1843,53	2585,71	2702,77
1087,10	1075,78	1782,11	1804,43	2586,12	2702,77
1091,56	1075,78	1783,17	1804,43	2594,09	2702,77
1089,10	1058,47	1781,97	1868,78	2600,19	2732,50
1091,86	1058,47	1783,32	1843,53	2606,33	2772,72
1120,76	1058,47	1788,62	1843,53	2614,66	2772,72
1117,41	1068,57	1788,52	1843,53	2626,00	2752,49
1110,42	1068,57	1789,39	1876,49	2636,31	2752,49
1121,22	1089,65	1798,52	1876,49	2643,60	2746,34
1129,92	1089,65	1800,06	1813,31	2646,56	2746,34
1109,71	1089,65	1807,04	1813,31	2651,29	2813,39
1109,57	1096,66	1810,94	1831,21	2652,81	2769,34
1091,22	1096,66	1814,00	1847,69	2652,55	2769,34
1085,86	1083,25	1824,90	1847,69	2652,39	2769,34
1087,50	1083,25	1823,30	1864,61	2660,30	2786,14
1056,68	1083,25	1827,05	1864,61	2677,34	2790,58
1051,67	1059,23	1828,69	1864,61	2678,03	2790,58
1045,15	1059,23	1828,22	1817,74	2678,81	2790,58
1040,68	1081,60	1828,60	1850,92	2674,38	2820,97

Tabela D.2 – Leituras obtidas com os transdutores aproximados, sendo referentes a um escoamento de ar.

Re = 131055		Re = 227854		Re = 333537	
$Q_{pt}$ (Nm <sup>3</sup> /h)	$Q_{us}$ (Nm <sup>3</sup> /h)	$Q_{pt}$ (Nm <sup>3</sup> /h)	$Q_{us}$ (Nm <sup>3</sup> /h)	$Q_{pt}$ (Nm <sup>3</sup> /h)	$Q_{us}$ (Nm <sup>3</sup> /h)
925,03	1016,54	1582,78	1764,92	2317,06	2562,36
919,11	1016,54	1596,73	1764,92	2320,30	2635,07
923,03	994,60	1599,83	1756,33	2327,91	2635,07
917,09	994,60	1603,80	1756,33	2326,98	2692,28
1008,23	983,22	1605,78	1749,62	2329,39	2614,03
1001,51	983,22	1602,03	1749,62	2329,97	2614,03
996,82	983,22	1604,87	1749,62	2306,83	<u>2512,98</u>
990,61	1049,65	1600,48	1755,48	2298,60	<u>2512,98</u>
992,61	1049,65	1598,36	1755,48	2307,45	2583,31
1001,90	996,56	1591,54	1715,53	2312,32	2612,35
1007,83	996,56	1582,02	1715,53	2311,43	2612,35
996,02	996,56	1581,51	1715,53	2315,00	2609,76
994,06	1038,96	1582,05	1787,93	2313,68	2609,76
991,13	1038,96	1551,05	1787,93	2305,38	2627,41
983,08	1028,08	1591,10	1812,27	2312,89	2627,41
977,37	1028,08	1586,86	1812,27	2315,80	2637,21
978,77	1028,08	1582,50	1812,27	2321,28	2585,87
962,85	1023,38	1582,20	1802,28	2323,49	2585,87
959,23	1023,38	1585,28	1802,28	2327,18	2604,14
952,63	1052,17	1585,79	1845,78	2322,80	2604,14
954,58	1052,17	1585,37	1845,78	2318,83	2612,72
945,54	1052,17	1580,37	1845,78	2314,45	2691,38
967,68	1037,54	1581,88	1842,95	2307,22	2691,38
962,73	1037,54	1571,31	1842,95	2298,24	2671,67
959,70	1028,84	1568,67	1766,37	2280,01	2671,67
974,04	1028,84	1586,98	1766,37	2272,72	2667,68
973,69	1028,84	1589,42	1766,37	2269,06	2623,68
963,95	1064,68	1590,62	1868,12	2269,06	2623,68
968,95	1064,68	1588,98	1868,12	2280,43	2641,78
975,38	1011,30	1590,50	1761,23	2278,50	2641,78

## **APÊNDICE E – Medições Obtidas com os Transdutores Faceados ao Túnel de Vento**

As campanhas apresentadas na seção 6.2.2 referentes a experimentos realizados com os transdutores ultrassônicos faceados ao túnel de vento tiveram suas medições avaliadas em patamares relativamente estáveis de teor de CO<sub>2</sub>, definindo-se intervalos de 30 leituras em cada nível de concentração do gás. A Tabela E.1 permite a conferência destas amostras de vazão registradas pelo tubo de Pitot ( $Q_{pt}$ ) e pelo medidor ultrassônico ( $Q_{us}$ ).

Tabela E.1 – Dados de vazão obtidos com os transdutores faceados em diferentes concentrações de CO<sub>2</sub>.

CO <sub>2</sub> (%)	Q <sub>pt</sub> (Nm <sup>3</sup> /h)	Q <sub>us</sub> (Nm <sup>3</sup> /h)	CO <sub>2</sub> (%)	Q <sub>pt</sub> (Nm <sup>3</sup> /h)	Q <sub>us</sub> (Nm <sup>3</sup> /h)	CO <sub>2</sub> (%)	Q <sub>pt</sub> (Nm <sup>3</sup> /h)	Q <sub>us</sub> (Nm <sup>3</sup> /h)
0,16	194,34	12,74	34,00	385,87	20,77	50,20	82,44	48,47
0,16	185,88	12,74	34,00	378,82	20,77	50,20	99,56	48,47
0,16	209,86	12,74	33,60	379,08	22,00	50,20	60,41	48,47
0,16	214,62	12,74	33,60	380,12	22,00	49,40	141,04	60,51
0,16	207,40	12,74	33,60	365,01	22,00	49,40	91,91	37,93
0,16	231,89	14,22	33,60	370,36	22,00	49,80	110,73	37,93
0,16	233,48	14,22	33,60	339,69	22,00	49,80	124,01	37,93
0,16	261,75	14,22	33,70	341,09	23,57	49,80	111,33	37,93
0,16	261,73	14,22	33,70	335,10	23,57	49,80	97,36	49,64
0,16	257,54	14,22	33,70	320,79	23,57	49,40	91,96	49,64
0,16	297,89	14,85	33,70	315,47	23,57	49,40	101,27	49,64
0,16	322,58	14,85	33,70	317,24	23,57	49,40	116,20	50,56
0,16	315,10	14,85	33,70	296,18	21,33	49,40	85,51	50,56
0,16	313,78	14,85	33,20	356,45	21,33	49,40	142,67	50,56
0,16	289,68	14,85	33,20	332,90	21,33	49,30	180,93	50,56
0,16	299,02	15,66	33,20	413,82	21,33	49,30	197,92	53,56
0,16	301,30	15,66	33,20	409,99	21,33	49,30	214,84	53,56
0,16	262,82	15,66	33,20	406,19	21,43	49,30	225,09	53,56
0,16	252,86	15,66	33,20	399,08	21,43	49,30	246,05	53,56
0,16	254,62	15,66	33,20	399,38	21,43	49,30	244,92	53,56
0,16	248,56	12,77	33,00	397,63	21,43	49,20	228,27	40,21
0,16	288,93	12,77	33,00	394,08	21,43	49,20	207,30	40,21
0,16	336,23	12,77	33,00	393,30	21,43	49,20	223,41	40,21
0,16	302,44	12,77	33,00	407,56	21,43	49,20	226,95	40,21
0,16	290,93	12,77	33,00	396,84	18,75	49,20	231,10	40,21
0,16	317,45	14,31	33,00	394,61	18,75	49,70	217,17	46,08
0,16	315,02	14,31	33,50	390,91	18,75	49,70	225,51	46,08
0,16	298,73	14,31	33,50	373,03	18,75	49,70	213,03	46,08
0,16	278,95	14,31	33,50	329,97	18,75	49,70	213,79	46,08
0,16	289,58	14,31	33,50	339,91	29,99	49,70	203,28	46,08

Continuação..

CO <sub>2</sub> (%)	Q <sub>pt</sub> (Nm <sup>3</sup> /h)	Q <sub>us</sub> (Nm <sup>3</sup> /h)	CO <sub>2</sub> (%)	Q <sub>pt</sub> (Nm <sup>3</sup> /h)	Q <sub>us</sub> (Nm <sup>3</sup> /h)
66,00	319,55	88,93	80,30	100,57	33,02
66,00	239,20	88,93	80,30	118,24	105,57
66,00	291,51	88,93	80,30	140,60	105,57
66,00	283,51	54,29	80,30	151,52	105,57
66,00	273,15	54,29	80,30	176,34	105,57
65,50	273,80	54,29	80,30	189,69	105,57
65,50	283,01	54,29	80,30	179,08	134,04
65,50	279,34	54,29	80,30	179,86	134,04
65,50	285,39	56,53	80,60	191,83	134,04
66,10	268,86	56,53	80,60	196,70	134,04
66,10	269,80	56,53	80,60	178,55	134,04
66,10	274,75	56,53	80,60	214,84	160,04
66,10	266,93	56,53	79,30	208,34	160,04
66,10	268,94	59,69	79,30	246,11	160,04
67,00	284,26	59,69	79,30	223,32	160,04
67,00	321,18	59,69	79,30	206,14	160,04
67,00	275,32	59,69	79,20	202,46	94,29
67,00	233,00	59,69	79,20	216,22	94,29
67,00	203,42	116,42	79,20	206,76	94,29
67,00	217,63	116,42	79,20	209,17	94,29
67,00	225,03	116,42	79,20	226,62	94,29
67,00	218,17	116,42	79,30	223,69	88,37
67,00	208,67	116,42	79,30	212,06	88,37
66,90	212,01	65,61	79,30	252,09	88,37
66,90	239,49	65,61	79,30	266,52	88,37
66,90	261,07	65,61	79,30	253,79	88,37
66,90	281,64	65,61	79,60	262,61	69,62
66,20	287,15	65,61	79,60	244,63	69,62
66,20	284,15	75,26	79,60	247,10	69,62
66,20	272,95	75,26	79,60	260,09	69,62

## **APÊNDICE F – Medições Obtidas com os Transdutores Aproximados no Túnel de Vento**

A campanha apresentada na seção 6.2.4 referente a experimento realizado no túnel de vento após a aproximação dos transdutores ultrassônicos teve suas medições avaliadas em patamares relativamente estáveis de teor de CO<sub>2</sub>, definindo-se intervalos de 30 leituras em cada nível de concentração do gás. A Tabela F.1 permite a conferência destas amostras de vazão registradas pelo tubo de Pitot ( $Q_{pt}$ ) e pelo medidor ultrassônico ( $Q_{us}$ ).

Tabela F.1 – Dados de vazão obtidos com os transdutores aproximados em diferentes concentrações de CO<sub>2</sub>.

CO <sub>2</sub> (%)	Q <sub>pt</sub> (Nm <sup>3</sup> /h)	Q <sub>us</sub> (Nm <sup>3</sup> /h)	CO <sub>2</sub> (%)	Q <sub>pt</sub> (Nm <sup>3</sup> /h)	Q <sub>us</sub> (Nm <sup>3</sup> /h)
0,47	176,76	2,95	39,90	147,84	9,73
0,27	95,10	2,95	39,90	199,65	9,73
0,27	51,66	2,95	39,90	222,85	11,88
0,27	106,30	2,95	39,90	227,13	11,88
0,27	92,21	2,95	39,60	220,78	11,88
0,27	126,06	2,95	39,60	244,36	11,88
0,27	164,74	2,95	39,60	257,08	11,88
0,18	117,81	2,95	39,60	235,21	14,09
0,18	176,14	2,95	39,60	250,50	14,09
0,18	214,34	4,16	39,60	248,88	14,09
0,18	182,64	4,16	39,60	269,94	14,09
0,18	163,68	4,16	39,60	304,95	14,09
0,18	196,50	4,16	39,80	300,57	12,89
0,18	158,34	4,16	39,80	293,81	12,89
0,19	124,17	4,91	39,80	65,55	12,89
0,19	90,96	4,91	39,80	103,33	12,89
0,19	15,89	3,64	39,80	137,45	12,89
0,19	44,11	4,94	39,80	175,09	12,29
0,19	118,71	4,94	39,10	168,67	12,29
0,19	132,65	4,94	39,10	198,74	12,29
0,19	106,94	4,94	39,10	183,19	12,29
0,19	117,19	4,94	39,10	176,53	12,29
0,19	136,61	4,65	39,10	169,32	12,67
0,19	76,36	3,34	39,20	196,55	12,67
0,19	89,33	3,34	39,20	176,83	12,67
0,19	110,62	3,34	39,20	58,38	12,67
0,19	139,95	3,34	39,20	71,97	15,08
0,19	141,35	4,65	39,20	149,14	15,08
0,19	110,62	4,65	39,20	167,27	15,08
0,19	176,76	4,65	38,90	115,72	15,08

Continuação..

CO <sub>2</sub> (%)	Q <sub>pt</sub> (Nm <sup>3</sup> /h)	Q <sub>us</sub> (Nm <sup>3</sup> /h)	CO <sub>2</sub> (%)	Q <sub>pt</sub> (Nm <sup>3</sup> /h)	Q <sub>us</sub> (Nm <sup>3</sup> /h)
72,40	163,98	33,15	82,50	236,70	18,23
72,40	195,69	33,15	82,50	232,53	18,23
72,40	204,25	33,15	82,50	214,63	18,23
72,40	196,46	33,15	82,50	192,62	18,23
72,40	210,83	28,73	82,20	210,05	66,97
72,40	212,44	28,73	82,20	50,25	66,97
71,60	233,87	28,73	82,20	23,47	66,97
71,60	260,84	28,73	83,40	43,10	34,96
71,60	274,89	28,73	83,50	75,17	38,31
71,60	296,15	13,57	83,50	95,32	38,31
72,90	235,78	13,57	83,50	120,18	38,31
72,90	223,93	13,57	82,40	55,90	22,52
72,90	243,80	13,57	82,40	81,37	22,52
72,90	220,66	13,57	82,40	58,43	22,52
72,90	245,29	19,94	83,20	165,23	22,52
72,90	246,48	19,94	83,20	213,46	22,52
72,50	239,52	19,94	83,40	209,83	31,25
72,50	248,61	19,94	83,40	283,55	31,25
72,50	244,82	19,94	82,20	60,19	33,52
72,50	246,15	36,12	82,20	99,98	58,16
72,50	251,78	36,12	82,20	128,33	58,16
72,50	245,55	36,12	82,20	178,07	58,16
72,50	264,39	36,12	82,00	161,45	58,16
72,50	249,41	36,12	82,00	107,25	58,16
72,50	258,54	29,90	82,00	61,60	72,47
72,50	252,75	29,90	82,80	65,07	50,34
72,50	253,83	29,90	82,80	129,00	50,34
72,50	251,02	29,90	81,80	160,93	50,34
72,40	253,63	29,90	81,80	189,04	50,34
72,40	121,81	22,67	81,90	198,43	50,34

## APÊNDICE G –

### Medições em *Dry calibration* com os Transdutores Afastados

O procedimento proposto na seção 6.3.6 referente ao acompanhamento de parâmetros do medidor ultrassônico realizado na montagem afastada dos transdutores em carretel, com ausência de escoamento, produziu leituras contínuas de vazão e teor de CO<sub>2</sub>, sendo interpretadas sob patamares relativamente estáveis de gás. Para isso, intervalos de 25 leituras em cada nível de concentração do gás foram definidos, como indicado na Tabela G.1.

Tabela G.1 – Dados de vazão obtidos com os transdutores afastados em diferentes concentrações de CO<sub>2</sub>.

CO <sub>2</sub> (%)	Q <sub>us</sub> (Nm <sup>3</sup> /h)	CO <sub>2</sub> (%)	Q <sub>us</sub> (Nm <sup>3</sup> /h)
0,25	1,06	38,3	5,66
0,25	1,06	38,3	7,44
0,25	1,06	38,3	7,44
0,25	1,06	38,3	7,35
0,25	1,06	38,3	6,76
1,81	1,06	38,3	6,76
1,81	1,06	38,3	6,92
1,81	2,25	38,3	6,76
1,81	2,25	37,5	6,81
1,81	2,25	37,5	6,81
1,81	2,25	37,5	6,22
1,81	2,25	37,5	6,22
1,81	2,77	37,5	7,3
1,67	2,77	37,5	6,67
1,67	2,77	37,5	6,67
1,67	2,77	37,5	7,35
1,67	2,77	37,5	6,76
1,67	0	37,5	6,09
1,52	0	37,6	5,39
1,52	0	37,6	5,39
1,52	0	37,6	6,2
1,52	0	37,6	6,2
1,52	1,94	37,6	5,97
1,67	1,94	37,6	5,61
1,67	1,94	37,6	4,98

Continuação..

CO <sub>2</sub> (%)	Q <sub>us</sub> (Nm <sup>3</sup> /h)	CO <sub>2</sub> (%)	Q <sub>us</sub> (Nm <sup>3</sup> /h)
57,8	7,15	77,2	8,77
57,8	7,15	77,2	8,77
57,8	7,15	77,2	8,77
57,8	7,15	77,2	8,77
57,8	7,15	77,2	8,77
57,8	8,77	77,2	8,77
57,8	8,77	77,2	8,77
57,7	8,77	77,3	8,77
57,7	8,77	77,3	8,77
57,7	8,77	77,3	8,77
57,7	7,33	77,3	8,77
57,7	7,33	77,3	8,77
57,1	7,33	77,3	8,77
57,1	7,33	76,9	8,77
57,1	7,33	76,9	8,77
57,1	8,77	76,9	8,77
57,1	8,77	76,9	8,77
57	8,77	75,6	8,77
57	8,77	75,6	8,77
57	8,77	75,6	8,77
57	7,03	75,6	8,77
57	7,03	75,5	8,77
57	7,03	75,5	8,77
57	7,03	75,5	8,77
57	7,03	75,5	8,77

## APÊNDICE H –

### Medições em *Dry calibration* com os Transdutores Aproximados

O procedimento proposto na seção 6.3.6 referente ao acompanhamento de parâmetros do medidor ultrassônico realizado na montagem aproximada dos transdutores em carretel, com ausência de escoamento, produziu leituras contínuas de vazão e teor de CO<sub>2</sub>, sendo interpretadas sob patamares relativamente estáveis de gás. Para isso, intervalos de 25 leituras em cada nível de concentração do gás foram definidos, como indicado na Tabela H.1.

Tabela H.1 – Dados de vazão obtidos com os transdutores aproximados em diferentes concentrações de CO<sub>2</sub>.

CO <sub>2</sub> (%)	Q <sub>us</sub> (Nm <sup>3</sup> /h)	CO <sub>2</sub> (%)	Q <sub>us</sub> (Nm <sup>3</sup> /h)
18,85	2,23	47,2	0,56
18,85	0,00	47,2	0,56
18,88	0,00	47,2	0,27
18,88	0,00	46,6	0,27
18,88	0,00	46,6	0,27
18,88	0,00	46,6	2,05
18,88	1,85	46,6	2,05
18,83	1,85	46,1	1,49
18,83	1,85	46,1	1,28
18,83	1,85	46,1	1,28
18,83	1,85	46,1	1,55
18,83	0,92	46,1	1,55
18,83	0,92	46,1	-0,39
18,83	0,92	46	-0,39
18,83	0,92	46	-0,39
18,66	0,92	46	1,40
18,66	1,53	46	1,40
18,66	1,53	46	1,53
18,66	1,53	46	1,53
18,66	1,53	45,7	0,56
18,56	1,53	45,7	0,56
18,56	1,85	45,7	1,60
18,56	1,85	45,7	1,60
18,56	1,85	45,7	0,90
18,56	1,85	45,7	0,90

Continuação..

<b>CO<sub>2</sub>(%)</b>	<b>Q<sub>us</sub> (Nm<sup>3</sup>/h)</b>	<b>CO<sub>2</sub>(%)</b>	<b>Q<sub>us</sub> (Nm<sup>3</sup>/h)</b>
59,7	0,74	81,3	0,94
59,7	0,74	80,4	0,94
59,7	0,74	80,4	0,94
59,3	0,74	80,4	0,94
59,3	0,74	80,4	0,94
59,3	0,22	81,2	-4,65
59,3	0,22	81,2	-4,65
59,3	0,22	81,2	-4,65
59,3	0,22	81,2	-4,65
59,1	0,22	81,2	-4,65
59,1	-0,05	81,2	-10,27
59,1	-0,05	81,2	-10,27
59,1	-0,05	80,9	-10,27
59,1	-0,05	80,9	-10,27
58,5	-0,05	80,9	-10,27
58,5	0,45	80,9	1,67
58,5	0,45	80,9	1,67
58,5	0,45	80,9	1,67
58,5	0,45	81,6	1,67
58,5	0,45	81,6	1,67
58,5	0,20	81,6	-8,75
58,5	0,20	81,6	-8,75
58,4	0,20	81,6	-8,75
58,4	0,20	81,6	-8,75
58,4	0,20	81,7	-8,75