

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Diogo Cesar Farias de Carvalho

**Sistema de monitoramento de nível de líquido em
um homogeneizador de escoamento bifásico**

Projeto de Graduação

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia
Mecânica da PUC-Rio

Orientador: Igor Braga de Paula

Rio de Janeiro
Dezembro de 2017

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, pelo amor, carinho e apoio incondicional nessa longa caminhada. À minha namorada, por estar comigo todos os momentos, sempre com demonstrações de apoio. Ao meu orientador, pela enorme paciência e dedicação, sendo fundamental desde o princípio, mas principalmente nos momentos finais deste projeto.

Muito obrigado.

RESUMO

Seleção e implementação de um dispositivo para monitoramento da oscilação de nível de líquido em um homogeneizador de escoamento bifásico intermitente.

O homogeneizador de escoamento bifásico funciona como um vaso de pressão, com um filtro interno, para promover a mistura dos fluidos e consequente homogeneização do escoamento na entrada de bombas multifásicas. O conceito foi desenvolvido para ser utilizado em sistemas de bombeio centrífugo submarino na indústria petrolífera. Este trabalho tem em seu escopo permitir a realização dos testes de caracterização do comportamento dinâmico de um homogeneizador de escoamento operando sob condição de escoamento bifásico intermitente. No presente trabalho buscou-se especificar um sensor que pudesse fornecer leituras dinâmicas do nível dentro de um homogeneizador. O objetivo era especificar um sensor adequado as condições de operação e que conferisse baixo nível de incerteza às medições. Dentre as possibilidades avaliadas, escolheu-se um sensor de nível ultrassônico. O sensor foi instalado, porém ensaios preliminares mostraram que, em alguns casos, a resposta do sensor apresentava erro de medição acima da incerteza do dispositivo. Isso era observado quando havia elevada oscilação de pressão no interior do homogeneizador. Isso não era esperado, uma vez que a leitura desse sensor se baseia na velocidade do som no ar, que é fracamente dependente da pressão. Além disso, a oscilação de pressão é muito mais lenta que o tempo de residência da onda sonora no equipamento. Logo, buscou-se caracterizar o comportamento do sensor sob diferentes carregamentos de pressão. Foi montada uma bancada de ensaios para a realização da calibração do dispositivo e os resultados são apresentados no trabalho. A histerese e o tempo de resposta ao transiente de pressão também foram medidos. Os resultados mostram que a resposta estática do sensor, de fato, varia dentro do nível de incerteza do medidor. Já o tempo de resposta e a variação no transiente podem atingir valores fora da faixa especificada pelo fabricante do equipamento. A combinação entre a flutuação de pressão do ambiente e as ondas sonoras emitidas pelo dispositivo parecem, de fato, afetar a leitura do equipamento.

Palavras chaves: Homogeneizador. Escoamento Bifásico. Escoamento Intermitente. Testes Dinâmicos. Calibração de Sensores. Sensores de Nível

ABSTRACT

Selection and implementation of a level monitoring device for liquid inside an intermittent two-phase flow homogenizer.

The two-phase flow homogenizer works as a pressure vessel with an inside filter to mix the fluids and homogenize flows on multiphase pump inlets. The concept was developed to be used on subsea pumps for the oil industry. The scope of this work is to allow dynamic behavior tests to be made on a two-phase flow homogenizer. For that, this work tries to specify a sensor to provide dynamic level readings inside the homogenizer. The objective is to specify a sensor that fits the operational conditions and have associated uncertainties with regards to the measurements. An ultrasonic sensor was chosen. This sensor was installed, but previous tests showed that the sensor readings were varying with regards to the variation of the pressure and level. This was not expected, as the readings depends on the speed of sound, and the speed of sound barely depends on the pressure. Therefore, this project tries to characterize the behavior of the sensor readings under different pressure loads. A test bench was set to calibrate the device and the results are presented in this work. The hysteresis and the stability time during pressure variation was also measured. The results showed that the static readings of the sensor as a matter of fact do not vary with the pressure. However, time response and sensor readings under pressure variation may go beyond the value specified by the developer. The combination between pressure variation and sound waves sent by the device is likely to affect the sensor's readings.

Key-words: Homogenizer. Two-phase Flow. Intermittent Flow. Dynamic Tests. Sensor Calibration. Level Gauge.

Sumário

1. Introdução	6
2. Metodologia	9
3. Montagem da bancada do homogeneizador	10
2.1. Sistema de escoamento de ar	11
2.2. Sistema de escoamento de água	11
2.3. Homogeneizador de fluxo	12
2.4. Sistemas de medição	13
2.4.1. Medidas de pressão	13
4. Escolha do sensor de nível do homogeneizador	14
3.1. Análise de incerteza	14
3.2. Metodologias de medição	14
4.3.1. Régua	15
4.3.2. Pressostato de pressão diferencial	15
4.3.3. Medidor ultrassônico	17
5. Calibração do sensor ultrassônico	21
4.1. Compensação de temperatura	21
4.2. Calibração para oscilação de pressão	22
4.2.1. Procedimento experimental	23
4.2.1.1. Pressão Permanente	23
4.2.1.2. Pressão Transiente	24
6. Resultados	27
5.1. Regime Permanente	27
5.2. Regime Transiente	32
7. Conclusão	36

Lista de Figuras

Figura 1: Esquema com os padrões de escoamento bifásico (gás-líquido) onde a cor branca representa o gás e a cor cinza representa o óleo.	6
Figura 2: Bancada de testes do homogeneizador de fluxo	10
Figura 3: Curva de calibração da bomba de água.....	11
Figura 4: Desenho do homogeneizador de fluxo	12
Figura 5: Foto do homogeneizador de fluxo	13
Figura 6: Função transferência do pressostato de pressão diferencial	16
Figura 7: Funcionamento do sensor ultrassônico	17
Figura 8: Curva de calibração do sensor S18UUAR	20
Figura 9: Vista superior do cilindro de calibração do sensor ultrassônico	22
Figura 10: Cilindro de calibração do sensor ultrassônico	23
Figura 11: Esquema da bancada de teste transiente	25
Figura 12: Resultado do teste permanente (10,5 cm)	27
Figura 13: Resultado do teste permanente (14,5 cm)	28
Figura 14: Resultado do teste permanente (17,9 cm)	28
Figura 15: Resultado do teste permanente (22 cm)	29
Figura 16: Laço de histerese do sensor (220 mm)	29
Figura 17: Laço de histerese do sensor (179 mm)	30
Figura 18: Laço de histerese do sensor (145 mm)	30
Figura 19: Laço de histerese do sensor (105 mm)	31
Figura 28: Média de todos os pontos da tabela 1, mostrando a média do transiente e estabilização da resposta do sensor em $d = 80\text{mm}$	34

1. Introdução

O estudo do escoamento bifásico é de grande importância, principalmente para a indústria petrolífera, uma vez que a maior parte dos reservatórios de petróleo produzem simultaneamente óleo e gás. Nas explorações em águas profundas, essas substâncias devem fluir dos poços até a superfície do mar, percorrendo vários quilômetros em dutos verticais e/ou horizontais.

O escoamento simultâneo de óleo e gás apresenta diferentes regimes de acordo com as propriedades físicas das substâncias, sistema de transporte do fluido e de variáveis operacionais em que estão submetidos, sendo os principais padrões de escoamento bolhas dispersas, estratificado, bolha alongada (plug flow), golfada (slug flow) e anular, como ilustrado na figura 1.1.

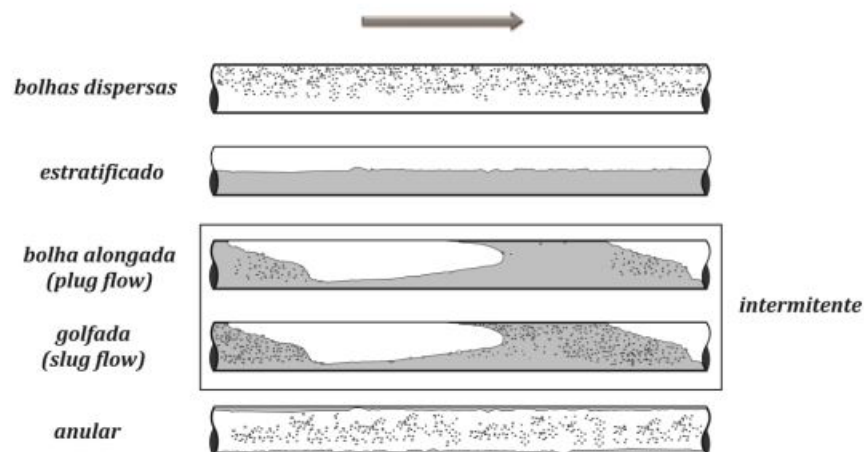


Figura 1: Esquema com os padrões de escoamento bifásico (gás-líquido) onde a cor branca representa o gás e a cor cinza representa o óleo.

Em poços onde a pressão do reservatório não é suficiente para promover a elevação do fluido, utiliza-se métodos de elevação artificial. Diversos métodos são empregados na indústria. Recentemente, bombas centrífugas submarinas tem se tornado uma alternativa atrativa visto que o tempo de parada de manutenção pode ser reduzido, consideravelmente, com uso desses equipamentos. A principal dificuldade técnica quanto a utilização do equipamento é o escoamento na entrada da bomba, que no leito marinho pode se tornar intermitente, e induzir um

carregamento oscilatório na bomba. Isso faz com que a vida útil de trabalho é muito influenciada pelo regime de escoamento em sua entrada.

Para evitar problemas durante a exploração e consequente interrupção de produção, um homogeneizador de fluxo vem sendo desenvolvido para eliminar os padrões de escoamento bifásico intermitente na entrada das bombas, pois esses são os maiores causadores de problemas à integridade das mesmas.

O homogeneizador funciona como um vaso de pressão com um tubo concêntrico. O escoamento intermitente entra pelo tubo interno, e pequenos furos permitem sua passagem para o interior do filtro, quebrando as bolhas grandes em pequenas bolhas e promovendo em sua saída um escoamento do tipo bifásico com padrão de bolhas dispersas, muito menos nocivo à bomba.

Este trabalho tem por objetivo permitir a realização dos ensaios de caracterização do comportamento do homogeneizador sob condição de escoamento bifásico intermitente. A medição de nível de fluido no interior do homogeneizador é importante pois a eficiência do dispositivo é dependente do nível de líquido no seu interior. Quando o sistema opera com um baixo nível de fluido no seu interior, pode ocorrer uma elevada oscilação da fração de líquido na saída do dispositivo. Isso faz com que a sua eficiência seja reduzida e pode causar falha no sistema de bombeamento por sobreaquecimento. Por outro lado, quando o homogeneizador opera com o nível de líquido próximo do máximo, a perda de carga no dispositivo tende a ser excessivamente alta, causando redução de produção. Logo, a otimização das condições de operação do homogeneizador depende fortemente do nível de líquido no seu interior.

Testes realizados previamente mostraram que em alguns casos o sensor de nível que foi especificado, no âmbito deste trabalho para a medição do nível no interior do dispositivo, apresentava uma alta oscilação da resposta quando submetido a carregamentos oscilatórios de pressão. O princípio de funcionamento do sensor utilizado era baseado no tempo de transito de uma onda sonora. Apesar da velocidade do som não apresentar grande variação com a pressão, observou-se que a oscilação da resposta do equipamento foi mais perceptível em casos onde a pressão no interior do dispositivo apresentava maior variação. Como a oscilação de pressão devido ao escoamento no interior do homogeneizador era de baixa frequência, quando comparada ao tempo de transito de uma onda sonora, optou-se

por avaliar a resposta do sensor sob diferentes condições de carregamento de pressão. Essa informação não está disponível nos manuais desse tipo de sensor. Para os ensaios, foi montada uma bancada para a realização da calibração do dispositivo e os resultados são apresentados no trabalho. A histerese e o tempo de resposta ao transiente de pressão também foi medida. Os resultados mostram que a resposta estática do sensor, de fato, não varia com a pressão. No entanto, no transiente as leituras aparentam ser afetadas pela combinação da oscilação de pressão do ambiente com as ondas sonoras, podendo exibir erros maiores do que a incerteza do dispositivo.

2. Metodologia

O ajuste do sensor ultrassônico aborda dois diferentes tipos de testes: teste à pressão constante e teste em transiente de pressão.

Para a realização dos testes projetou-se um equipamento fechado que permitia a variação de nível e pressão em seu interior, de forma que a leitura do sensor pudesse ser avaliada. Este equipamento foi utilizado em ambos os testes, mudando apenas a bancada em que era utilizado.

O teste à pressão constante contou com um manômetro de coluna d'água e um multímetro para controle da pressão interna no equipamento e da resposta do sensor, respectivamente.

O teste em transiente de pressão consistia de uma bancada com um manômetro, um reservatório, válvulas e um sistema de aquisição de dados utilizando o software *LabView*.

Os detalhes serão vistos nas seções mais à frente.

3. Montagem da bancada do homogeneizador

Neste capítulo, será apresentado e descrito os equipamentos e montagem da bancada em que o sensor será instalado após sua escolha e calibração.

A bancada de testes é dividida em quatro partes:

1. Sistema de escoamento de ar;
2. Sistema de escoamento de água;
3. Homogeneizador de fluxo;
4. Sistemas de medição.



Figura 2: Bancada de testes do homogeneizador de fluxo

Os sistemas de ar e água injetam os respectivos fluidos na tubulação da bancada, imitando um escoamento bifásico intermitente (escoamento com grandes

bolhas). O escoamento é forçado a atravessar o homogeneizador e o sistema de medição captura os dados do experimento.

2.1. Sistema de escoamento de ar

O ar é obtido do ambiente e é introduzido no sistema a partir de um compressor centrífugo de 3 CV *WEG*, controlado por um inversor de frequência. A vazão de ar é lida por um rotâmetro *AppliTech* com faixa de operação de 0,25 a 2,5 m³/h.

2.2. Sistema de escoamento de água

A água é retirada de um reservatório por uma bomba de cavidade progressiva *NEMO*, com potência de 2 CV e controlada por um inversor de frequência *WEG*. Ela então é direcionada para a entrada da seção de testes, e no final do percurso é armazenada em um tanque externo.

A vazão de líquido é obtida pela curva de calibração da bomba, fornecida pelo fabricante.

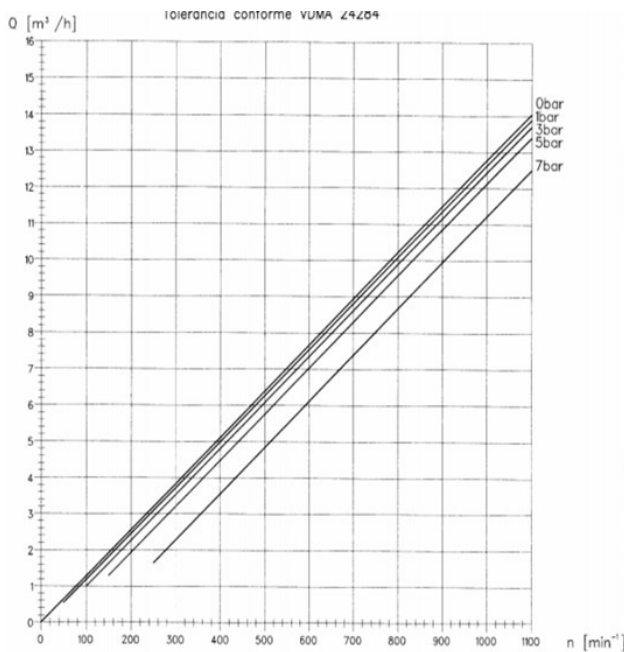


Figura 3: Curva de calibração da bomba de água

2.3. Homogeneizador de fluxo

O modelo de homogeneizador é um cilindro com um tubo interno concêntrico que funciona como um filtro.

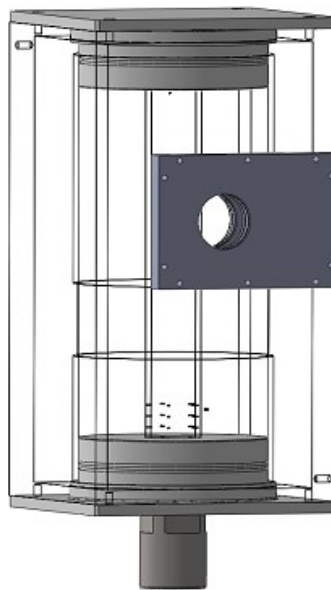


Figura 4: Desenho do homogeneizador de fluxo

O fluido (ora líquido ora gás) entra pelo tubo interno e passa para o espaço anular através de diversos furos. A finalidade é permitir a passagem das bolhas grandes pelos furos internos, fazendo-as se quebrarem em pequenas bolhas ao entrarem no homogeneizador.

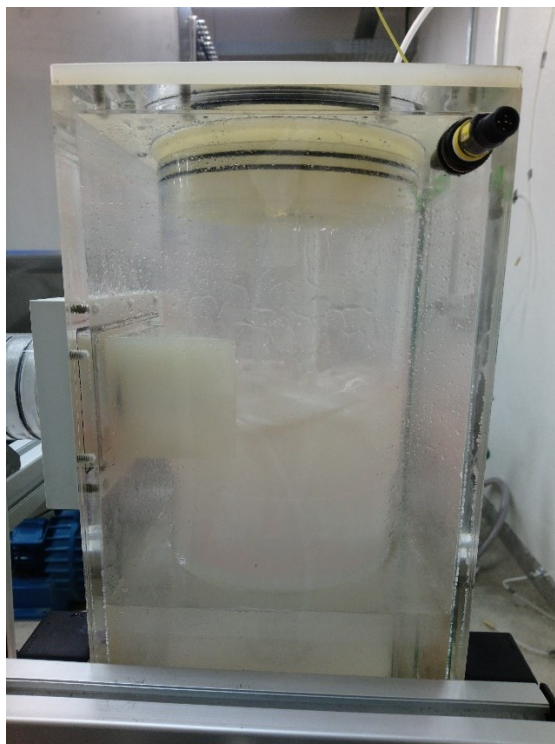


Figura 5: Foto do homogeneizador de fluxo

2.4. Sistemas de medição

Durante os testes, serão medidos diversos parâmetros do escoamento. Para isso, serão tomadas medidas de pressão e medidas de nível de líquido no interior do homogeneizador.

2.4.1. Medidas de pressão

Com o intuito de medir a perda de carga decorrente da passagem do escoamento pelo homogeneizador de fluxo, transdutores de pressão *Validyne* foram instalados na entrada e saída do mesmo.

Acusando diferença de pressão, os transdutores geram uma saída de 0 a 5 V de acordo com a deformação de sua membrana interna.

4. Escolha do sensor de nível do homogeneizador

A escolha do sensor de nível do homogeneizador é feita a partir da análise de incerteza, custo e facilidade de implementação na bancada de testes. Os medidores que serão apresentados nesse capítulo medem a distância da superfície do líquido em relação a um ponto de referência, e são eles: régua, pressostato de pressão diferencial e sensor ultrassônico.

Neste capítulo será feita a apresentação dos possíveis medidores e análise de incerteza de cada um. Ao final, será escolhido o medidor de melhor custo-benefício e menor incerteza associada

3.1. Análise de incerteza

O termo incerteza refere-se a dúvida, e, portanto, incertezas de medição significam dúvidas acerca da validade do resultado de uma medição. Uma medida do possível erro no valor estimado do mensurando.

Incerteza de medição compreende, em geral, muitos componentes. Alguns podem ser estimados com base na distribuição estatística dos resultados de medições e podem ser caracterizados por desvios-padrão experimentais. Outros componentes podem ser determinados por meio de distribuições de probabilidade, baseadas na experiência ou em outras informações disponíveis.

As incertezas do tipo A são métodos de avaliação de incerteza por meio da análise estatística de séries de observações.

As incertezas do tipo B podem ser obtidas por outros meios que não a análise estatística, como informações prévias fornecidas pelo fabricante ou aproximações baseadas em experiência prévia.

3.2. Metodologias de medição

Os tipos de métodos de medição de nível disponíveis para o homogeneizador e suas respectivas análises de incerteza estão listados a seguir.

4.3.1. Régua

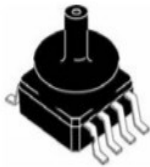
Instrumento de medição simples com resolução de 1 mm. Considerando distribuição quadrática, a incerteza-padrão associada a ele é:

$$u_{\text{régua}} = \frac{\text{Resolução}}{\sqrt{12}} = 0,28867 \text{ mm}$$

4.3.2. Pressostato de pressão diferencial

São dispositivos piezo resistivos configurados para perceber variações de pressão. Sua principal função é ser parte do sistema de proteção de equipamentos contra aumento ou diminuição de pressão, mas também podem ser usados como medidores de nível, como os utilizados em máquinas de lavar.

O modelo analisado foi o MPXV5004GC6T1, segue abaixo suas especificações:



MPXV5004GC6T1/6U, MPVZ5004GC6U
Case 98ASB17757C

Features

- 1.5% maximum error for 0 to 100 mm H₂O over +10 °C to +60 °C with autozero
- 2.5% maximum error for 100 to 400 mm H₂O over +10 °C to +60 °C with autozero
- 6.25% maximum error for 0 to 400 mm H₂O over 10 °C to +60 °C without autozero
- Temperature compensated over 10 °C to 60 °C
- Available in gauge surface mount (SMT) or through-hole (DIP) configurations
- Durable thermoplastic (PPS) package

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Units
Pressure range	P _{OP}	0	—	3.92 400	kPa mm H ₂ O
Supply voltage ⁽¹⁾	V _S	4.75	5.0	5.25	V _{DC}
Supply current	I _S	—	—	10	mAdc
Span @ 306 mm H ₂ O (3 kPa) ⁽²⁾ Full-scale span @ 400 mm H ₂ O (3.92 kPa) ⁽²⁾	V _{FSS}	—	3.0 3.92	—	V
Offset ⁽³⁾	V _{OFF}	0.75	1.0	1.25	V
Sensitivity	V/P	—	1.0	—	V/kPa
Accuracy ⁽⁴⁾ ⁽⁵⁾	0 to 100 mm H ₂ O (10 °C to 60 °C)	—	—	±1.5	%V _{FSS} with autozero
	100 to 400 mm H ₂ O (10 °C to 60 °C)	—	—	±2.5	%V _{FSS} with autozero
	0 to 400 mm H ₂ O (10 °C to 60 °C)	—	—	±6.25	%V _{FSS} without autozero

A relação entre a diferença de pressão e a resposta do sensor pode ser identificada na curva de calibração:

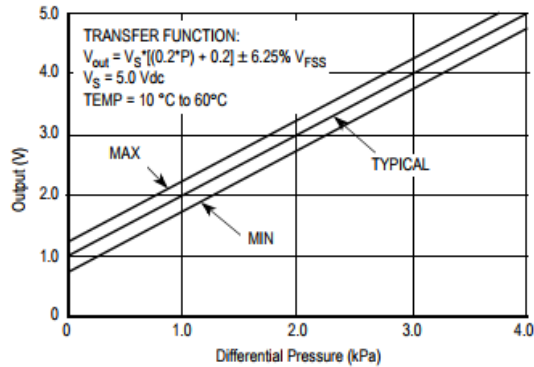


Figura 6: Função transferência do pressostato de pressão diferencial

Para converter o diferencial de pressão em nível de líquido, utiliza-se a equação:

$$h_{\text{líquido}} = \frac{\Delta P}{\rho_r}$$

Sendo:

- $h_{\text{líquido}}$ a altura do nível de líquido
- ΔP a pressão diferencial no sensor
- ρ_r a densidade relativa do líquido

Assumindo constantes a densidade da glicerina e do ar cujos valores são, respectivamente 1,26 g/cm³ e 0,0013 g/cm³, no pior caso ($\Delta P = 400 \text{ mmH}_2\text{O}$):

$$h_{\text{líquido}} = \frac{400}{\frac{1,26}{0,0013}}$$

$$h_{\text{líquido}} = \frac{400}{969,23}$$

E $969,23 \text{ g/cm}^3 = 0,96923 \text{ g/mm}^3$,

$$h_{\text{líquido}} = 41,27 \text{ cm}$$

Com incerteza de 6,25%, temos:

$$u_{\text{pressostato}} = 24.7 \text{ mm.}$$

No melhor caso ($\Delta P = 1 \text{ mmH}_2\text{O}$), temos:

$$u_{\text{pressostato}} = 0.06 \text{ mm}$$

4.3.3. Medidor ultrassônico

O sensor ultrassônico emite uma onda de alta frequência. Essa onda é refletida pela superfície alvo e retorna ao sensor. O tempo decorrido entre a emissão do pulso e seu retorno permite determinar a posição do alvo em relação ao sensor.

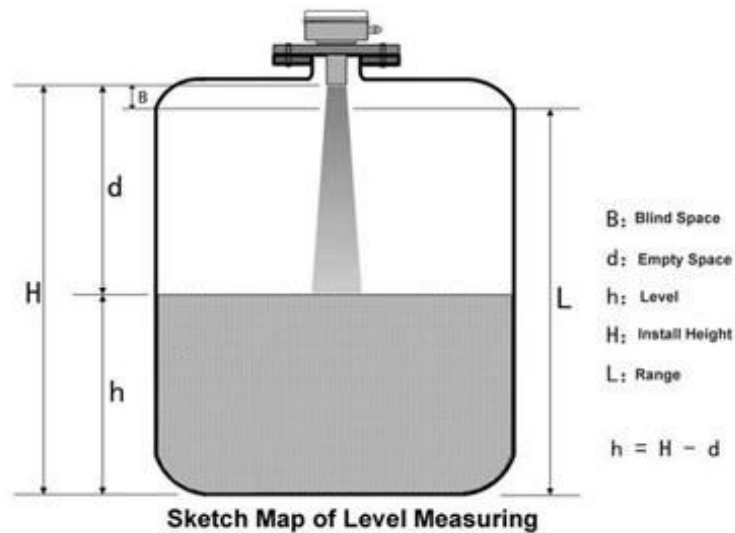
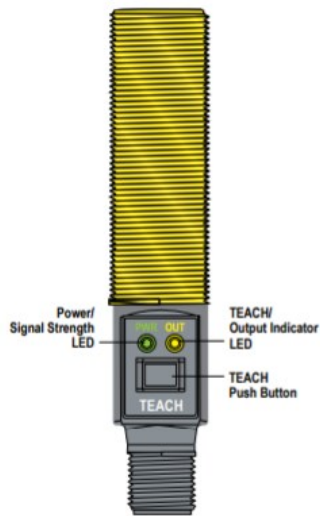


Figura 7: Funcionamento do sensor ultrassônico

O modelo analisado foi o U-Gage S18UUAR



Linearity⁶

2.5 ms response: ± 1 mm
30 ms response: ± 0.5 mm

Resolution⁶

2.5 ms response: 1 mm
30 ms response: 0.5 mm

Output Response Time (for a 95% step change)

2.5 milliseconds: Black wire at 5 to 30 V dc
30 milliseconds: Black wire at 0 to 2 V dc (or open)
 Contact Banner Engineering for other response speed options

Specifications

Sensing Range

30 to 300 mm (1.2 in to 11.8 in)

Supply Voltage

10 V dc to 30 V dc (10% maximum ripple); 65 mA max. (exclusive of load), 40 mA typical @ 25V input

Ultrasonic Frequency

300 kHz, rep. rate 2.5 ms

Supply Protection Circuitry

Protected against reverse polarity and transient voltages

Output Configuration

Analog Output: 0 to 10V dc or 4 to 20 mA, depending on model

Output Protection

Protected against short circuit conditions

Delay at Power-Up

300 milliseconds

Temperature Effect

0.02% of distance/ °C

Connections

2 m (6.5 ft) or 9 m (30 ft) shielded 5-conductor (with drain) PVC jacketed attached cable or 5-pin Euro-style quick-disconnect

Remote TEACH Input

Impedance: 12 k Ω

Construction

Threaded Barrel: Thermoplastic polyester

Push Button: Santoprene

Push Button Housing: ABS/PC

Lightpipes: Acrylic

Minimum Window Size

5 mm

Adjustments

Sensing window limits: TEACH-Mode programming of near and far window limits may be set using the push button or remotely via TEACH input

Indicators

Range Indicator (Red/Green)

Green—Target is within sensing range

Red—Target is outside sensing range

OFF—Sensing power is OFF

Teach/Output Indicator (Amber/Red)

Yellow—Target is within taught limits

OFF—Target is outside taught window limits

Red—Sensor is in TEACH mode

Linearity⁶
 2.5 ms response: ±1 mm
 30 ms response: ±0.5 mm

Resolution⁶
 2.5 ms response: 1 mm
 30 ms response: 0.5 mm

Output Response Time (for a 95% step change)
 2.5 milliseconds: Black wire at 5 to 30 V dc
 30 milliseconds: Black wire at 0 to 2 V dc (or open)
 Contact Banner Engineering for other response speed options

Operating Conditions
 Temperature: -20 °C to +60 °C (-4 °F to +140 °F)

Temperature Warmup Drift
 Less than 1.7% of sensing distance upon power-up (see Temperature Compensation)

Environmental Rating
 Leakproof design is rated IEC IP67; NEMA 6P

Vibration and Mechanical Shock
 All models meet Mil Std. 202F requirements. Method 201A (vibration: 10 Hz to 60 Hz max., double amplitude 0.06 inch, maximum acceleration 10G). Also meets IEC 947-5-2 requirements: 30G 11 ms duration, half sine wave.

Application Notes
 Objects passing inside the specified near limit may produce a false response.

Certifications



Output Ratings
Analog Voltage Output:
 2.5 kΩ minimum load resistance
 Minimum supply for a full 10V output is 12V dc (for supply voltages between 10 and 12, V out max is at least V supply -2)

Analog Current Output:
 1 kΩ max @ 24V input
 Max load resistance = (Vcc-4)/0.02 ohms

For current output (4-20 mA) models, ideal results are achieved when the total load resistance $R = [(V_{in} - 3)/0.020] \Omega$. Example, at $V_{in} = 24 \text{ V dc}$, $R \approx 1 \text{ k}\Omega$ (1 watt). A worst-case shift of 1% of sensing distance is caused by operating the sensor at $V_{in} = 30 \text{ V dc}$ and $R = 0 \Omega$.

Required Overcurrent Protection



WARNING: Electrical connections must be made by qualified personnel in accordance with local and national electrical codes and regulations.

Overcurrent protection is required to be provided by end product application per the supplied table.
 Overcurrent protection may be provided with external fusing or via Current Limiting, Class 2 Power Supply.
 Supply wiring leads < 24 AWG shall not be spliced.
 For additional product support, go to <http://www.bannerengineering.com>.

Supply Wiring (AWG)	Required Overcurrent Protection (Amps)
20	5.0
22	3.0
24	2.0
26	1.0
28	0.8
30	0.5

A resolução é a fonte de incerteza de um instrumento digital. Como a resolução do sensor ultrassônico é de 0.5 mm, e assumindo uma distribuição retangular, sua incerteza-padrão tipo B pode ser obtida pela seguinte equação:

$$u_{\text{ultrassônico}} = \frac{\text{resolução}}{\sqrt{12}} = \frac{0,5}{\sqrt{12}} = 0,144 \text{ mm}$$

Como o sensor ultrassônico apresenta a menor incerteza dentre os métodos analisados acima, o mesmo será utilizado para dar prosseguimento aos testes com o homogeneizador.

A curva de calibração abaixo foi gerada a partir dos procedimentos de ajuste transiente descritos na **seção 5**. Uma tabela foi usada para auxiliar na geração dessa curva:

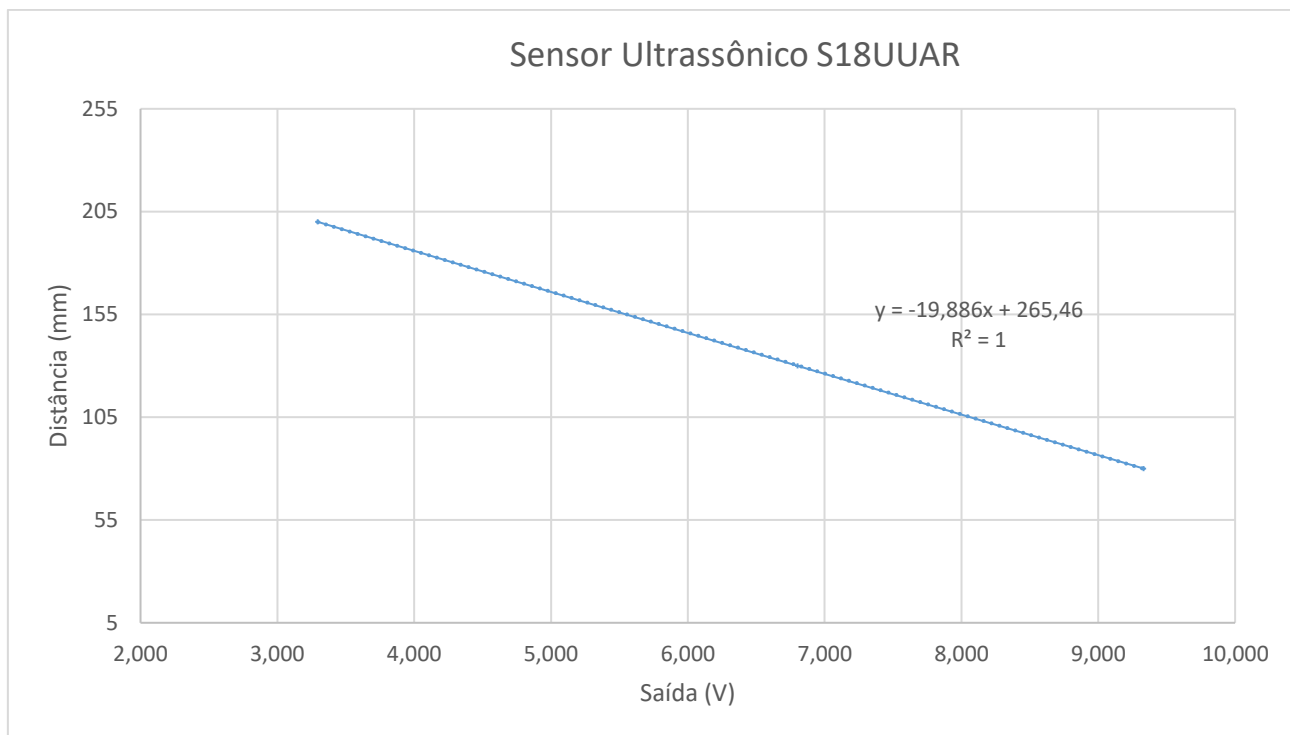


Figura 8: Curva de calibração do sensor S18UUAR

5. Calibração do sensor ultrassônico

Em testes anteriores, outro sensor semelhante foi utilizado para medir o nível do homogeneizador. Seus resultados apresentaram alto erro quando submetido a condição de oscilação da pressão, como mostrado na tabela a seguir:

Caso	Nível %	Press_man(inH2O)	Nível_sensor %
1	100	0,32	52
2	100	0,30	39
3	97	0,27	58
4	91	0,23	63

Onde a coluna em azul representa o nível de líquido medido por régua e a coluna verde o nível medido pelo sensor ultrassônico.

Esta seção, portanto, aborda os procedimentos de calibração para garantir que não haja mais variação de leitura com a oscilação da pressão.

4.1. Compensação de temperatura

No ar, a velocidade do som varia com a temperatura de acordo com a seguinte aproximação:

$$v_{som} = 20 * \sqrt{273 + T_{ar}}$$

Portanto, variações na temperatura afetam a velocidade do som, que por sua vez afetam os limites de medição do sensor. Um aumento de temperatura aproxima os limites de leitura do sensor, enquanto uma diminuição de temperatura afasta os limites do sensor. Esse deslocamento é de aproximadamente 3,5% da distância limite para variações de até 20°C.

A série de modelos S18UUAR conta com um sistema de compensação de temperatura, mantendo o deslocamento dos limites de operação do sensor dentro de 1,8% para variações de temperatura de -20°C a +60°C.

4.2. Calibração para oscilação de pressão

Para verificar o fenômeno da variação de resposta do sensor com a variação de pressão do meio, um equipamento foi então projetado para permitir seu ajuste. O equipamento consiste de um êmbolo e um cilindro, com saídas para receber o sensor e algumas conexões, tudo devidamente vedado. Atrás do sensor ultrassônico adicionou-se uma espuma para isolamento acústico com o objetivo de absorver as ondas sonoras refletidas pelo êmbolo. Isso foi feito para evitar a criação de ondas estacionárias que pudessem causar algum erro de leitura no equipamento. Atrás da espuma colocou-se uma tampa que recebe uma conexão em T. Uma das saídas da conexão recebe uma seringa e a outra foi conectada um manômetro.



Figura 9: Vista superior do cilindro de calibração do sensor ultrassônico

Um suporte para receber o sensor é fixado no cilindro e devidamente vedado.

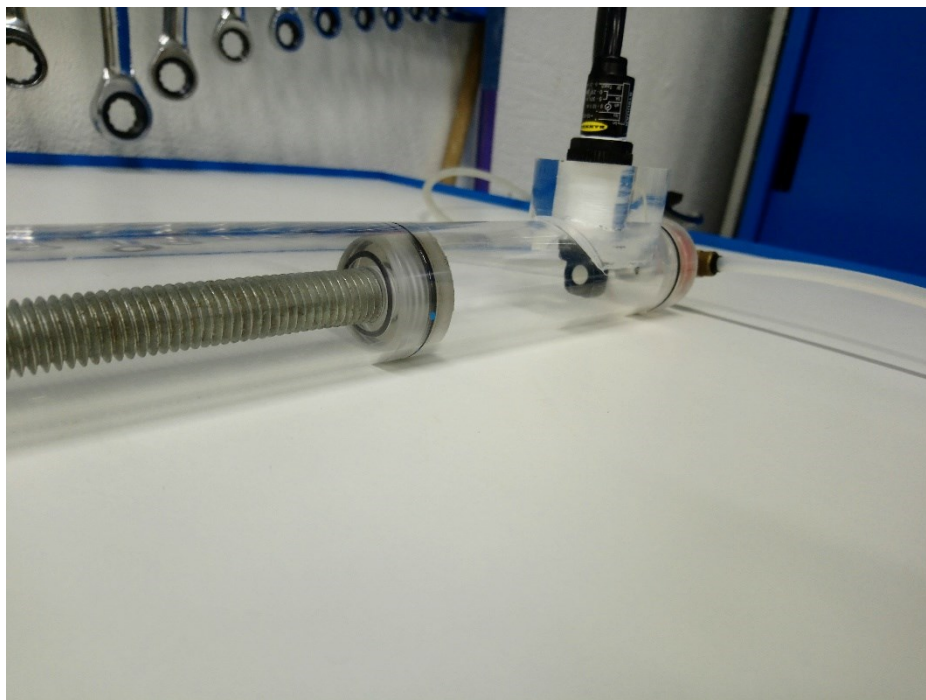


Figura 10: Cilindro de calibração do sensor ultrassônico

4.2.1. Procedimento experimental

O procedimento experimental, inicialmente consistiu em utilizar o equipamento descrito na seção anterior, em uma bancada de testes apropriada, para verificar a resposta do sensor para diferentes pressões do meio, em regime, ou seja, após o tempo de estabilização do medidor.

Com o comando *Teach* do sensor, definiu-se a janela de leitura entre 5 e 25 cm de distância do sensor, que gera respostas entre 0 e 10 V. Esta configuração será utilizada em todos os testes.

4.2.1.1. Pressão Permanente

Com o auxílio de um multímetro, o experimento consiste em capturar os valores medidos enquanto o êmbolo se encontra em posições de 10 cm, 14.5 cm, 17.9 cm, 22 cm.

Em cada posição, com o êmbolo fixo, e utilizando a seringa, injetava-se ar dentro do pistão cuja pressão interna era quantificada por um manômetro de coluna

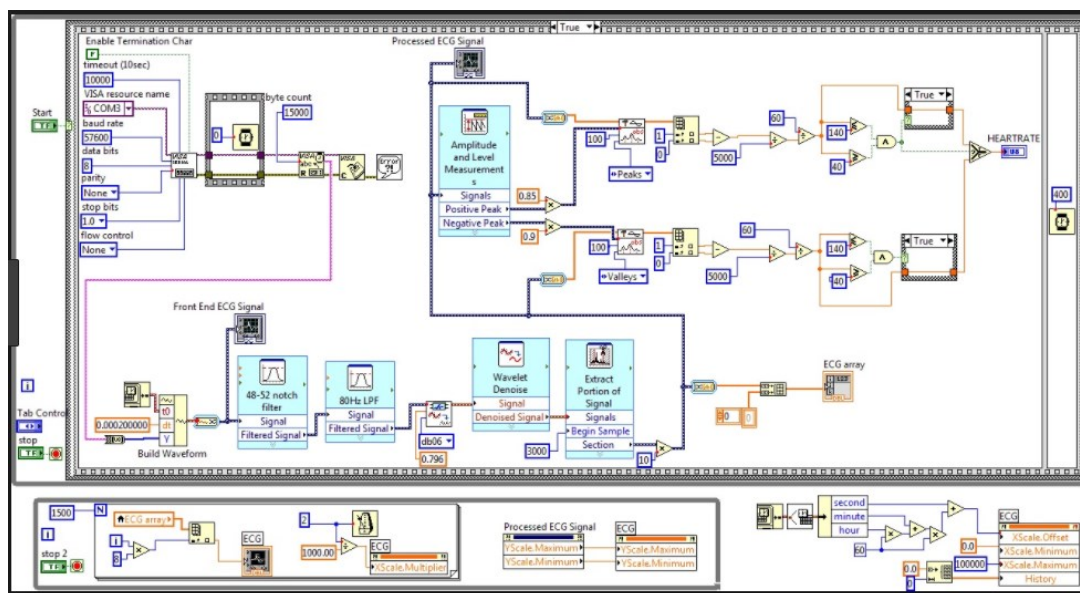
d'água. Para pressões de 460, 860 e 1260 mmH₂O, foram tomados os valores de resposta em um multímetro após estabilização dos valores no display.

A fim de verificar a histerese do sensor, os dados foram capturados em sequência de pressurização e despressurização. Os resultados mostraram que, em regime permanente, o sensor possui boa resposta, como será visto na **seção 5**.

4.2.1.2. Pressão Transiente

Para verificar a resposta do sensor em transiente de pressão, foi montada uma bancada de testes consistindo de um reservatório de ar, o mesmo cilindro projetado para o experimento anterior, um cilindro de gás comprimido, manômetros e válvulas de controle. O esquema abaixo mostra a representação da bancada.

A aquisição de dados foi feita utilizando a interface do *Labview*. Os dados amostrados foram salvos em arquivos e posteriormente analisados utilizando Excel.



A aquisição foi feita numa frequência de 1000 dados por segundo e duração de 10 segundos. No final um arquivo de dados era gerado e tratado em *Excel*.

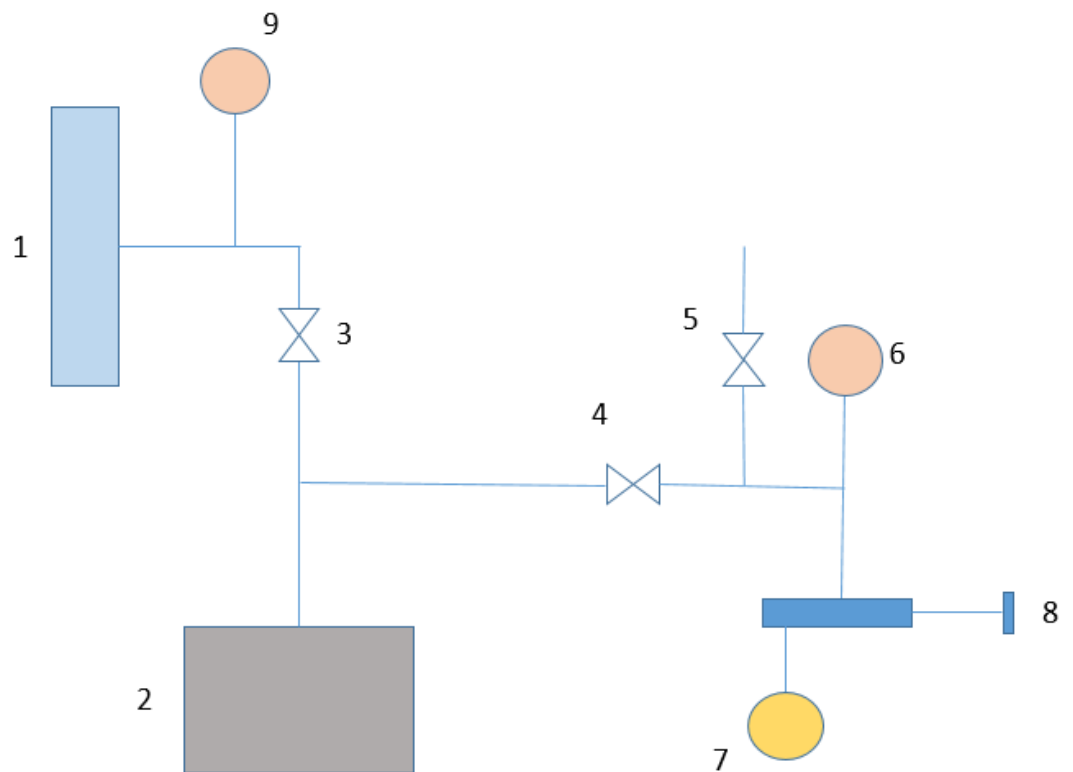


Figura 11: Esquema da bancada de teste transiente

Sendo:

1. Cilindro de ar comprimido
2. Reservatório de ar
3. Válvula de controle (3)
4. Válvula de controle (4)
5. Válvula de controle (5)
6. Manômetro para medir a pressão no pistão
7. Sensor ultrassônico de nível (S18UUAR)
8. Pistão projetado para o experimento, com espuma acústica para absorção de ondas estacionárias
9. Manômetro para medir a pressão no reservatório

O manômetro (6) calibrado de fábrica, possui faixa de operação entre 0 e 5 bar, com respostas entre 0 e 5 V.

Ar comprimido, controlado pela válvula (3), é injetado no reservatório. A válvula (4) é fechada e, então toda a linha até este ponto encontra-se na mesma pressão, inicialmente 1 psi, mostrada pelo manômetro (9).

Com o auxílio do software *LabView*, foi feita a programação e a interface virtual para aquisição de dados do manômetro (6) e do sensor ultrassônico (7).

No começo, com a válvula (5) fechada e o pistão com pressão interna igual a pressão atmosférica, aciona-se a coleta de dados pelo software. Imediatamente, abre-se manualmente a válvula (4). A aquisição dos dados dura 10 segundos com frequência de 1000 dados por segundo.

O objetivo é observar o comportamento da resposta do sensor ultrassônico durante o período transiente, quando há súbito aumento na pressão interna do pistão.

Então a válvula (5) é aberta e o experimento é feito repetidas vezes, com valores de pressão do ar comprimido de 1, 2 e 3 psi, e distâncias de 80, 130 e 200 mm entre o sensor e o êmbolo.

Os resultados serão mostrados a seguir.

6. Resultados

Esta seção contém os resultados dos testes em regime permanente e transiente do sensor ultrassônico S18UUAR em ambiente pressurizado.

5.1. Regime Permanente

Os resultados obtidos a partir da tomada de dados experimental estão registrados nos gráficos de dispersão abaixo:

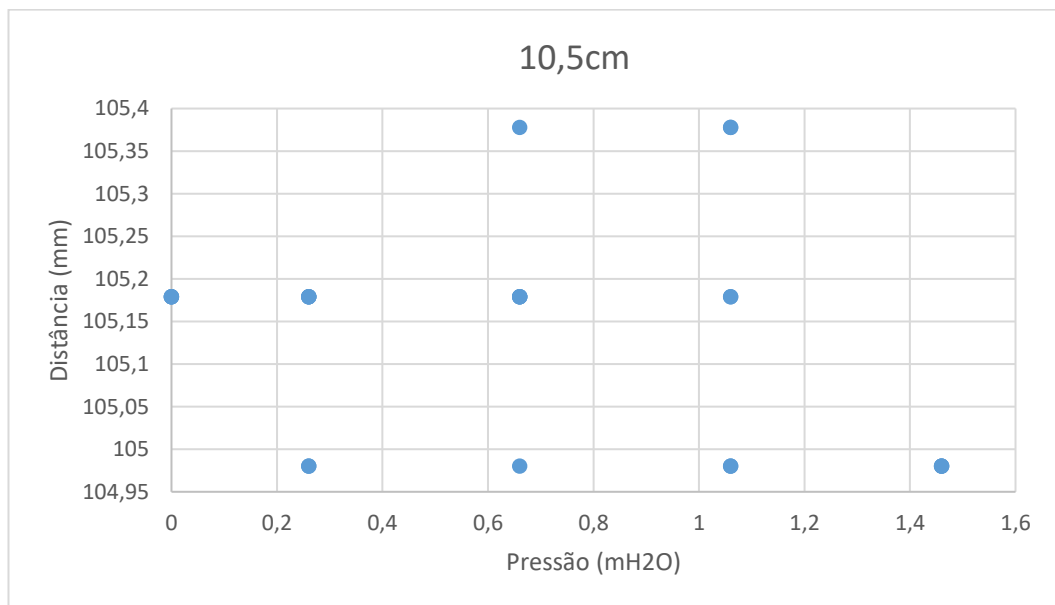


Figura 12: Resultado do teste permanente (10,5 cm)

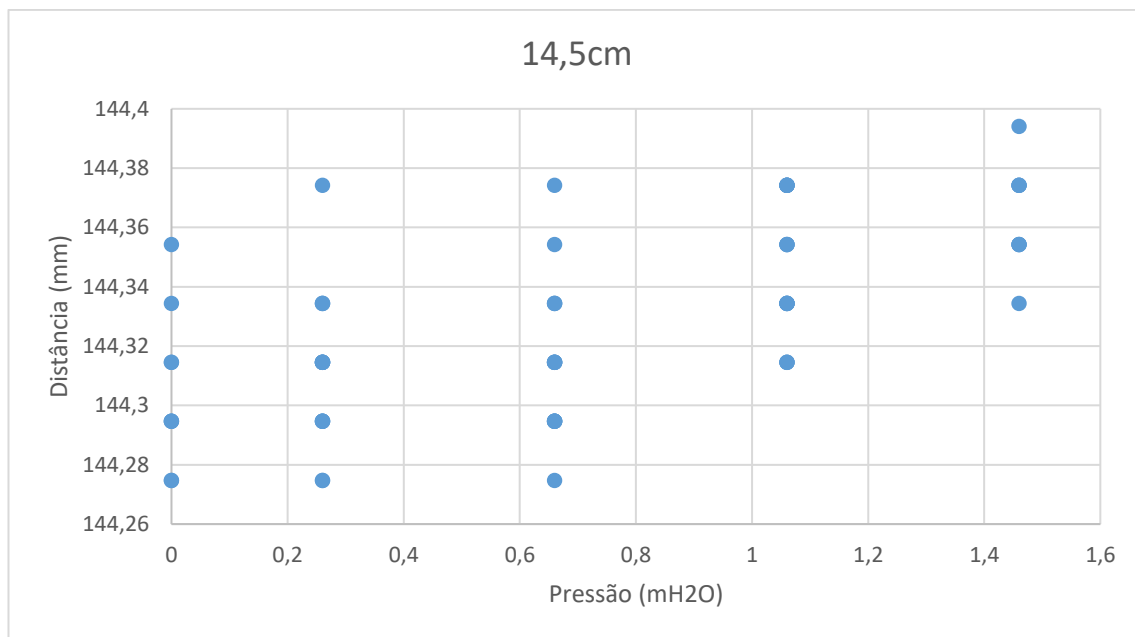


Figura 13: Resultado do teste permanente (14,5 cm)

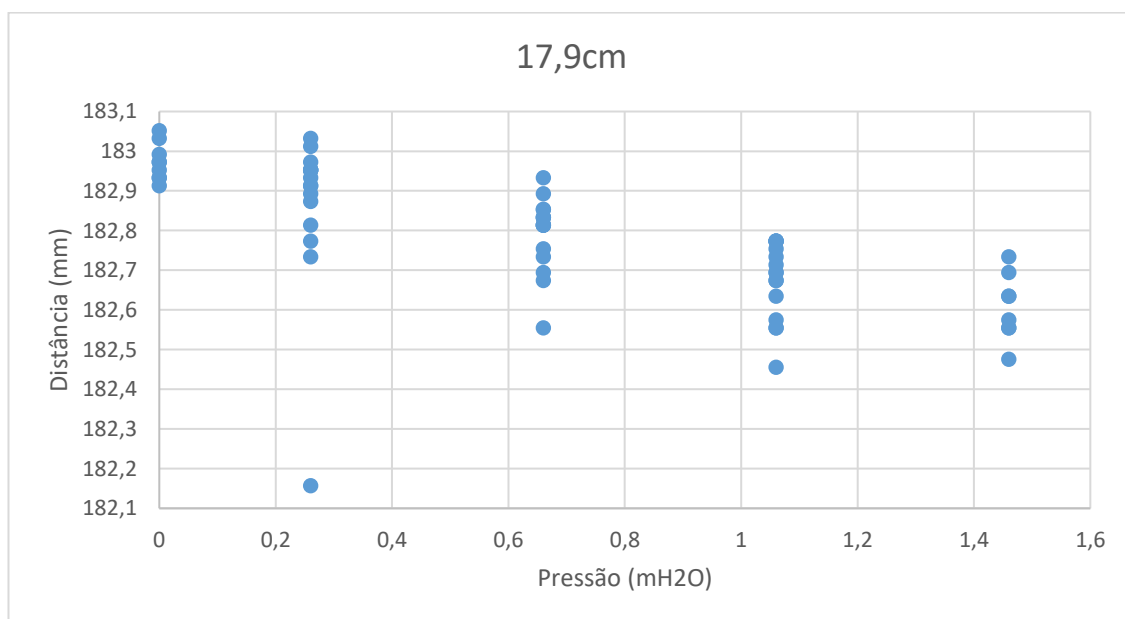
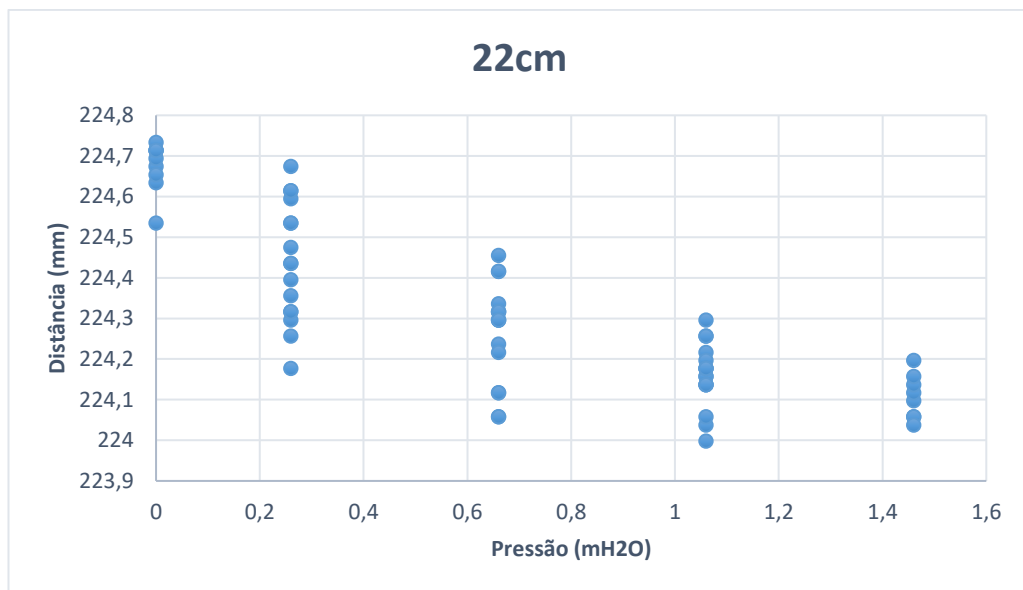


Figura 14: Resultado do teste permanente (17,9 cm)



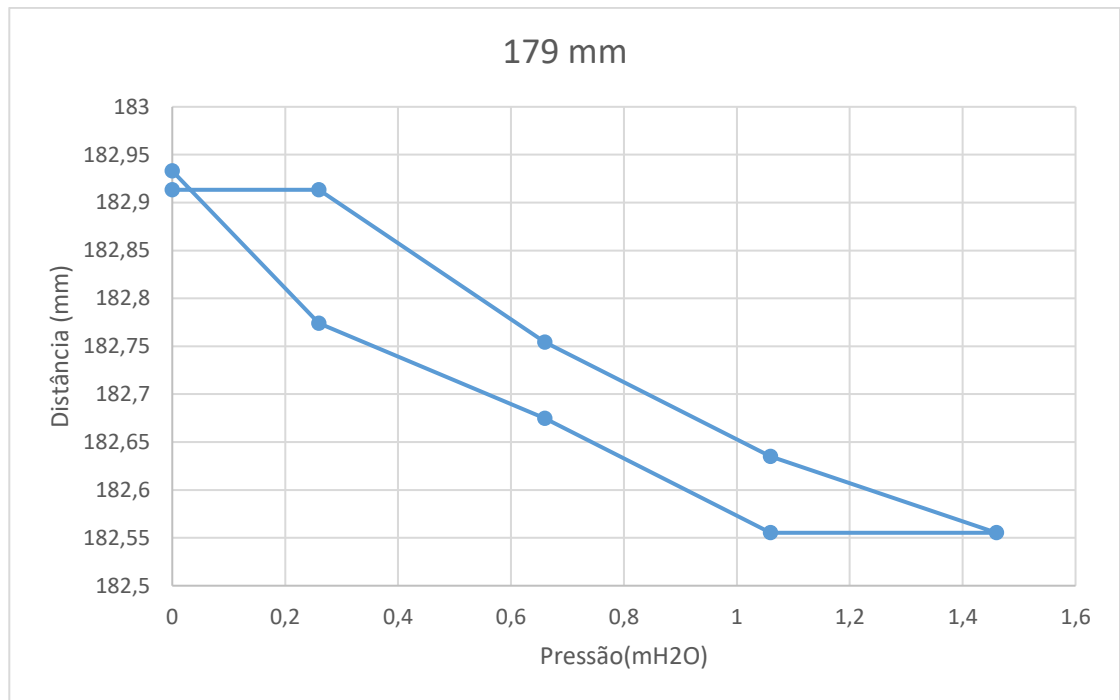


Figura 17: Laço de histerese do sensor (179 mm)

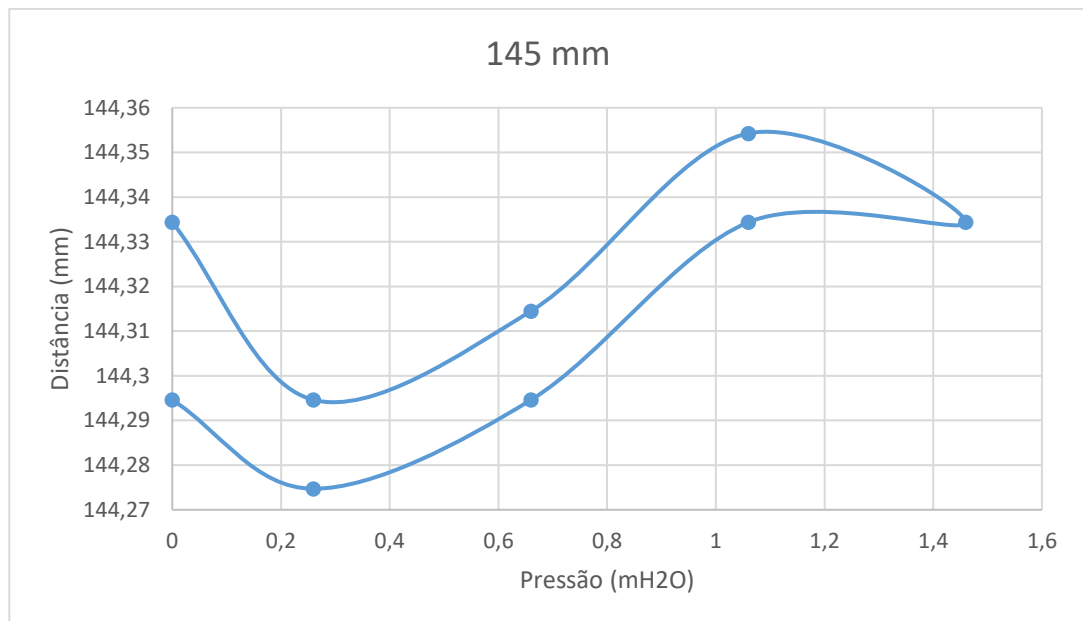


Figura 18: Laço de histerese do sensor (145 mm)

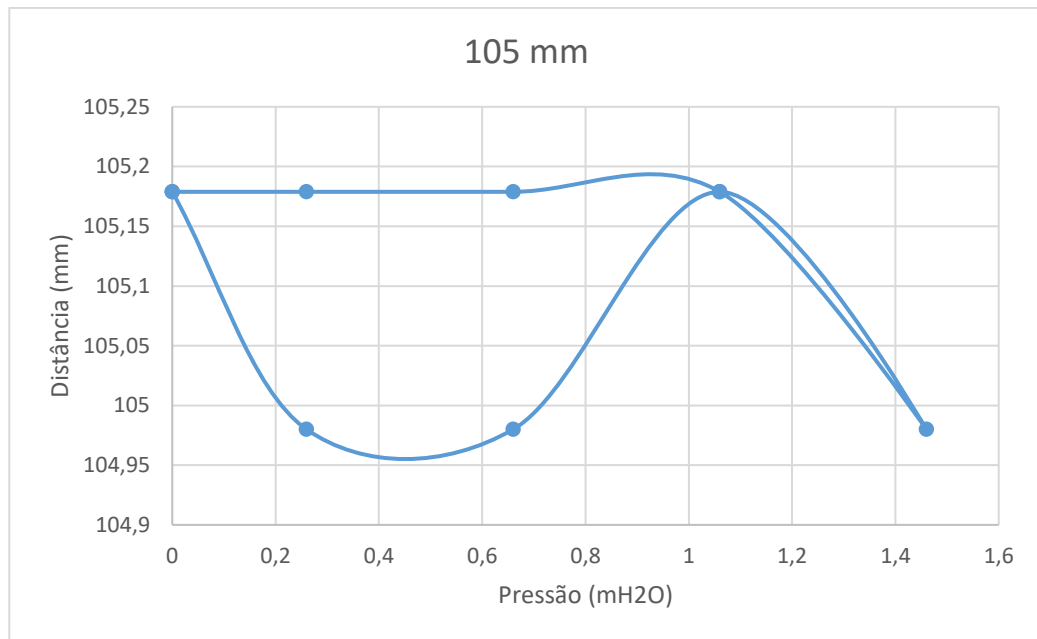


Figura 19: Laço de histerese do sensor (105 mm)

A tabela a seguir mostra os desvios padrões dos testes à pressão constante:

Desvio P.	220 mm	179 mm	145 mm	245 mm
0	0,029	0,022	0,013	0,262
26	0,068	0,045	0,009	0,192
66	0,052	0,045	0,012	0,320
106	0,002	0,044	0,011	0,171
146	0,002598	0,039	0,009	2,87

Os desvios padrões encontram-se dentro da incerteza do medidor, e os resultados mostram que a histerese não é um fator preocupante, visto que uma diferença da ordem de 0.002 V está dentro da faixa de incerteza do sensor.

Além disso, a variação de resposta do sensor, com exceção da posição mais distante (245 mm), foi de no máximo 0,15 mm, e, portanto, não caracteriza problemas na leitura pois também se encontra dentro da faixa de incerteza provida pelo fabricante.

5.2. Regime Transiente

Após tratamento dos dados salvos pelo *LabView*, foram traçados gráficos Distância (V) x Pressão (V) mostrando a reação do sensor ultrassônico à variação súbita de pressão.

Com a finalidade de estimar o tempo de estabilização e o overshoot da resposta do sensor, foram feitas repetições dos testes mostrados nos gráficos acima. Os resultados estão condensados nas tabelas abaixo.

8 cm e 1 psi			
	τ (s)	Média (cm)	Overshoot (cm)
1	2,242	7,966969877	0,087883878
2	2,26	7,968138922	0,078865829
3	2,37	7,354468	0,108324
4	2,265	7,361301	0,075863
5	2,288	7,362213	0,074211
6	2,904	7,362762	0,078703
7	2,495	7,36256	0,06273
8	2,461	7,365681	0,083968

Tabela 1: Compilado de testes (8 cm e 1 psi)

8 cm e 2 psi			
	τ (s)	Média (cm)	Overshoot (cm)
1	2,214	7,967865536	0,119034508
2	2,348	7,976264122	0,091668655
3	2,227	7,407491	0,08729
4	2,512	7,400827	0,100735
5	2,49	7,399124	0,095866
6	4,009	7,40946	0,088604
7	3,806	7,409092	0,069179
8	4,193	7,411194	0,100881

Tabela 2: Compilado de testes (8 cm e 2 psi)

13 cm e 1 psi			
13cm	τ (s)	Média (cm)	Overshoot (cm)
1	2,265	12,98225	0,161371307
2	2,359	13,00108295	0,0896219
3	2,583	12,03745	0,068405
4	2,896	12,0427	0,088122
5	2,852	12,04454	0,067889
6	3,409	12,04843	0,070705
7	2,922	12,04365	0,035264
8	3,84	12,05427	0,077865

Tabela 3: Compilado de testes (13 cm e 1 psi)

13 cm e 2 psi			
13cm	τ (s)	Média (cm)	Overshoot (cm)
1	2,356	12,97744497	0,156422442
2	2,328	12,97897951	0,103876339
3	4,081	12,57456	0,054339
4	3,511	12,57262	0,08085
5	3,478	12,57205	0,08708
6	3,295	12,56904	0,171439
7	3,896	12,56718	0,233971
8	4,053	12,56761	0,25346
9	3,459	12,56325	0,2353
10	2,374	12,55709	0,239651
11	1,937	12,54522	0,235663
12	2,117	12,61545	0,235293
13	3,49	12,56455	0,242506
14	3,23	12,56748	0,196819
15	2,222	12,55833	0,227093
16	3,235	12,56655	0,211658
17	3,583	12,57158	0,056004
18	3,401	12,56955	0,05935
19	3,287	12,56936	0,075971

Tabela 4: Compilado de testes (13 cm e 2 psi)

150 mm e 1 psi			
	τ (s)	Média (mm)	Overshoot (mm)
1	4,334	156,3668	0,72014
2	3,757	156,2346	0,8655
3	3,516	155,9489	1,3023
4	3,152	156,0154	0,9664
5	2,887	156,105	1,1725

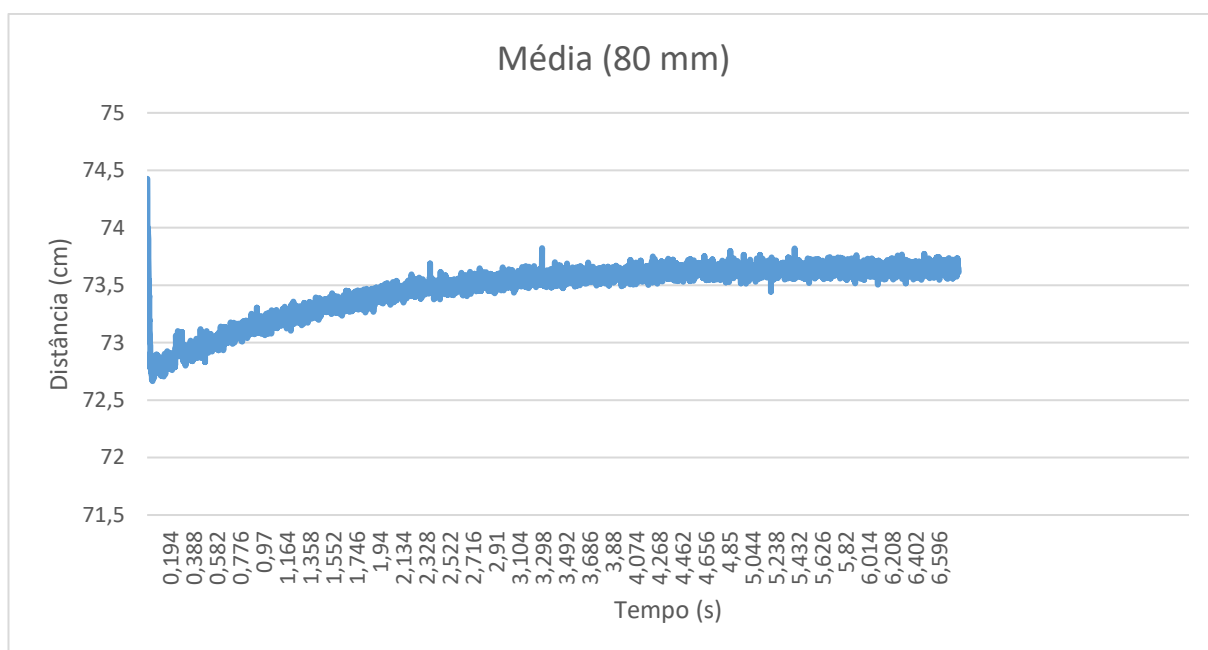


Figura 20: Média de todos os pontos da tabela 1, mostrando a média do transiente e estabilização da resposta do sensor em $d = 80\text{mm}$

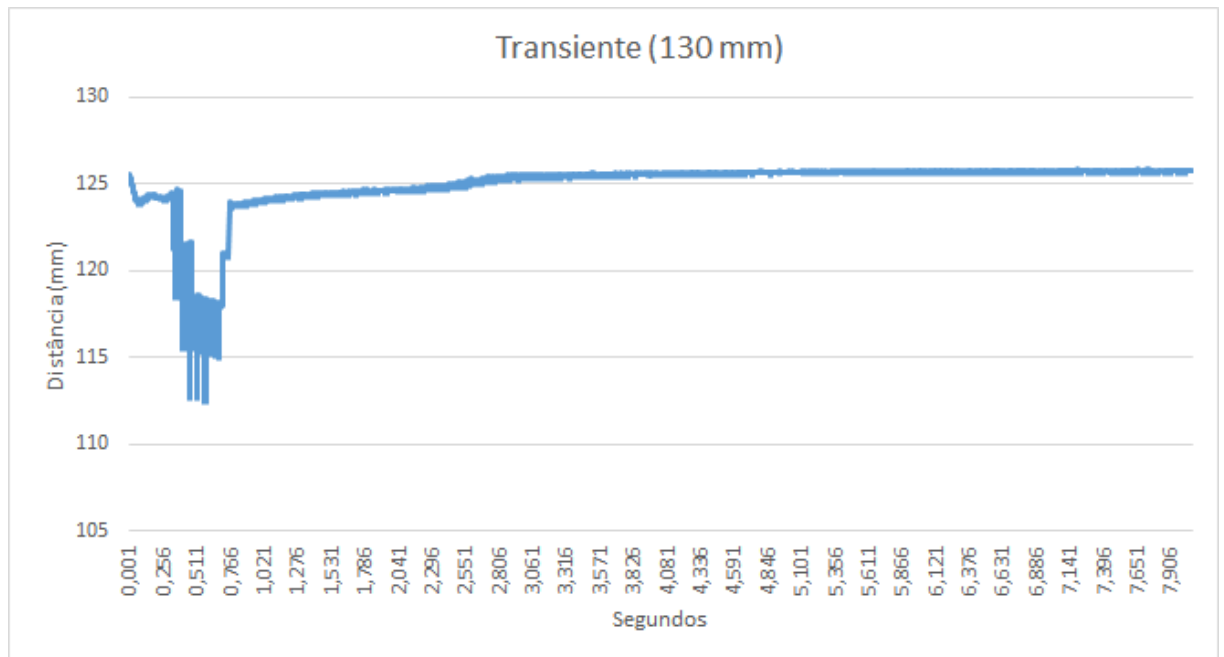


Figura 9: Média de todos os pontos da tabela 1, mostrando a média do transiente e estabilização da resposta do sensor em $d = 130\text{mm}$

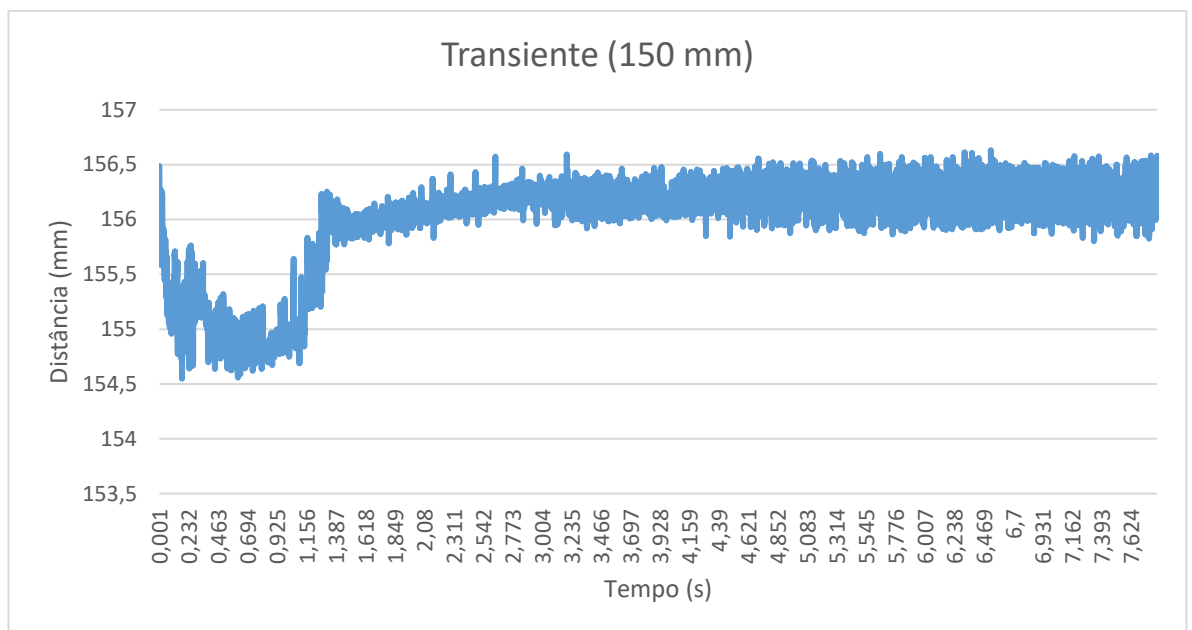


Figura30: Média de todos os pontos da tabela 1, mostrando a média do transiente e estabilização da resposta do sensor em $d = 150\text{mm}$

7. Conclusão

No presente trabalho buscou-se especificar um sensor que pudesse fornecer leituras dinâmicas do nível dentro de um homogeneizador. O objetivo era especificar um sensor adequado as condições de operação e que conferisse baixo nível de incerteza às medições. Dentre as possibilidades avaliadas, escolheu-se um sensor de nível ultrassônico.

Durante ensaios preliminares observou-se a variação na resposta do sensor com a oscilação de pressão no interior do homogeneizador. Buscou-se caracterizar o comportamento do sensor sob diferentes carregamentos de pressão. Para isso, foi montada uma bancada de ensaios para a realização da calibração do dispositivo e os resultados são apresentados no trabalho. A histerese e o tempo de resposta ao transiente de pressão também foram medidos.

A partir da análise dos resultados dos testes feitos, pode-se constatar que em regime permanente, ou seja, após estabilização da pressão do meio, o sensor possui resposta dentro do limite de incerteza. É possível observar também que a histerese no sensor é mínima, podendo ser desprezada sua influência.

Em regime transiente, a linha média pós estabilização da resposta do sensor ficou bem próxima do valor de referência, chegando a diferenças na ordem de 0,3 mm. O tempo de estabilização em todos os casos foi de aproximadamente 2,3 segundos. Durante o tempo de estabilização, erros de até 15mm foram observados. Esses erros devem estar relacionados ao tempo de relaxamento da membrana geradora e receptora da onda sonora ou a interação entre oscilação e onda de pressão.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

ALMEIDA, Andrei; PINTO, Mauricio. **Sensor Eletrônico de Nível**. Instituto de Estudos Superiores da Amazônia: Belém, 2005.

REGAZZI, Rogério Dias; PEREIRA, Paulo Sérgio; SILVA, Manoel Feliciano. **Soluções Práticas de Instrumentação e Automação**. Rio de Janeiro, 2005.

Hewitt, G. F. **Flow Regimes. Handbook of multiphase systems**. 1982.

FOSSA, M., GUGLIELMINI, G., MARCHITTO, A. **Intermittent flow parameters from void fraction analysis. Flow Measurement and instrumentation**. 2003.

FONSECA. **Avaliação experimental do comportamento do escoamento intermitente no skid-bcss – fase ii – ensaios no neat. Ct tee 101/15.cenpes/pdep/tee**. V Seminário de Elevação Artificial e Escoamento Petrobras, 2015

UJANG, P.M., LAWRENCE, C. J., HALE. C. P., HEWITT, G. F. **Slug Initiation and evolution in two-phase horizontal flow**. International Journal of Multiphase Flow, 2006

KELEMEN, Michael; VIRGALA, Ivan; KELEMENOVÁ, Tatiana; MIKOVÁ, Lubica; FRANKOVSKY, Peter; LIPTAK, Tomas; Lorinc, Milan. **Distance Measurement via Using of Ultrasonic Sensor**. Technical University of Kosice, 2015

NIKOLOV, Georgi Todorov; NIKOLOVA, Boyanka. **Virtual techniques for liquid level monitoring using differential pressure sensors**. Technical University of Sofia, 2008.

PAYNE, Richard. **Uncertainties associated with the use of a sound level meter**. NPL Report DQL – AC 002, 2004

LUDVINGSON, Sydney C.; JURADO, Kyle, NG, Serena. **Measuring Uncertainty**. American Economic Review, 2015.

ZUCKERWAR, A. J. **Handbook of the Speed of Sound in Real Gases**. Academic Press, 2002.

JCGM. **Avaliação de dados de medição – Guia para a expressão de incerteza de medição**. 2008.

DIETRICH, C.F. **Uncertainty, calibration and probability**. Adam-Hilger, 1991.

FULLER, W. A. **Measurement error models**. New York, 1987

ALLAN, D. W. **IEEE Trans. Instrum. Meth.** IM-36,646-654, 1987

BOHN, Dennis A. **Environmental Effects on the Speed of Sound.** Rane Corporation, 1988.

EVANS, Toni Lynn. **Measuring the Speed of Sound as a Function of Gases.**

VERESHCHAGIN, Dimitry; KAMINSKAYA, Alena. **Speed of Sound in Nonideal Gas.** Kaliningrad State University.