

Caracterização de um Transdutor de Pressão para Instrumentos Submarinos

Characterization of a Submersible Pressure Transducer for Underwater Instruments

Rafael Barmak*

*Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, Rua Dr. Xavier Sigaud, 150 – Rio de Janeiro – RJ – Brasil e
PROOCEANO, Av. Rio Branco, 311, sl. 1205 – Rio de Janeiro – RJ – Brasil*

Geraldo Cernicchiaro†

*Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, Rua Dr. Xavier Sigaud,
150 – Rio de Janeiro – RJ – Brasil*

Submetido em 19/12/16 Aceito: 06/02/17

Resumo: Até o presente momento não há uma regulamentação reconhecida pelos fabricantes de sensores de pressão submersíveis referente a especificações mínimas e procedimentos de calibração e teste. Uma metodologia para verificar a performance do sensor MS5803 foi elaborada com base em trabalhos realizados pela *British Geological Survey*. Uma plataforma, que futuramente poderá ser adaptada para medidas de campo, foi construída para permitir o levantamento das especificações do transdutor. Este trabalho foca no sensor MS5803-01 devido a sua popularidade em projetos de "hardware aberto" como por exemplo robôs submarinos, marégrafos/ondógrafos, computadores de mergulho, entre outros. Os resultados deste trabalho têm a intenção de ser uma fonte independente de dados de caracterização de forma a estender as informações providas pelo fabricante.

Palavras chave: sensor de pressão, instrumentação submarina, transdutor de pressão submarino, sensor de profundidade, sensor piezoelétrico, calibração.

Abstract: At this moment there is not any regulations adopted industry-wide for minimum specifications and calibration procedures to be used on submersible pressure transducers. A methodology was elaborated to verify performance characteristics of the MS5803 sensor following the guidelines of the British Geological Survey. A test platform, that can be easily adapted for field tests, was built to measure the transducer specifications. This work focus on the MS5803-01 sensor, since it's becoming popular in open projects ranging from underwater robotics (AUV and ROVs), wave/tide gauges and diving computers among many others. The results from this work intends to be an independent source of characterization data extending the information provided by the manufacturer.

Keywords: pressure sensor, underwater instrumentation, submersible pressure transducer, depth sensor, piezo-electric sensor, calibration.

1. INTRODUÇÃO

A medição do nível de água ou a profundidade na coluna d'água tornou-se vital para a sociedade moderna em busca de uma melhor compreensão sobre os mais diversos corpos hídricos do nosso planeta. Os sensores de pressão que permitem a medição da pressão hidrostática usados em

*Electronic address: rafabarmak@gmail.com

†Electronic address: geraldo@cbpf.br

sistemas de alagamento, alerta de tsunamis, computadores de mergulho ou em robôs autônomos para mapeamento batimétrico são fundamentais para uma localização exata, ou não, da posição do equipamento na coluna d'água.

Apesar de ser comum a presença de ao menos um sensor de pressão nos mais diversos equipamentos submarinos com o objetivo de medir a profundidade, até o presente momento, não há uma regulamentação reconhecida pelos fabricantes de sensores referente a especificações mínimas e procedimentos de calibração a serem usados como um padrão na indústria [1], e de certa forma, garantir o envelope operacional destes dispositivos, muitas vezes usados em sistemas vitais para a proteção de vidas e prevenção de acidentes ambientais.

Neste cenário desorganizado a Sociedade Britânica de Geologia (SBG) expõe a necessidade imediata da criação de uma padrão reconhecido internacionalmente para a caracterização de sensores de pressão e elaboraram uma plataforma de testes de forma a avaliar diversos sensores disponíveis no mercado.

Embora a obtenção de transdutores de pressão submersíveis para medição de profundidade possa atingir facilmente a marca de milhares de dólares, esta realidade vem mudando. Sensores de pressão, ditos de alta exatidão, já podem ser adquiridos por uma fração dos preços nos principais distribuidores de componentes eletrônicos.

A popularidade do sensor MS5803 é reconhecida em diversos projetos de "hardware aberto", por exemplo no projeto de um robô submarino controlado remotamente - openROV [2], ele é usado como sensor de profundidade em algumas versões do módulo de navegação.

2. O SENSOR

Os sensores da família MS5803 são transdutores piezoelétricos de pressão absoluta construídos com tecnologia MEMS (*Micro-Electro-Mechanical System*). Atualmente são oferecidos cinco modelos com diferentes limites de pressão. O modelo utilizado neste trabalho é o MS5803-01BA, com uma faixa de medição de (0 a +1) bar. Adicionalmente foi integrado um sensor de temperatura de forma a permitir a montagem de instrumentos com menor número de componentes e também facilitar o cálculo de profundidade, que depende do valor da temperatura do líquido.



Figura 1: Foto do sensor MS5803-01. No sensor da esquerda é possível observar o elemento piezoelétrico, pois não foi adicionada a segunda camada de gel KE1052 com carga de TiO_2 , de cor branca.

2.1. Características Mecânicas

A área ocupada pelo sensor pode ser considerada pequena, com arestas de 6,4 mm e altura de 3 mm, o que o torna ade-

quado para instrumentos com espaços reduzidos. O transdutor MEMS piezoelétrico fica localizado dentro do cilindro de aço inoxidável, de 4,4 mm de diâmetro, que é polido de forma a impedir a penetração de líquido e poeira quando instalados anéis de vedação (*O-rings*).

Dentro do cilindro o transdutor piezoelétrico é coberto por uma camada dupla de gel de silicone KE1052, comumente utilizado na indústria como um encapsulamento flexível de componentes eletrônicos [3].

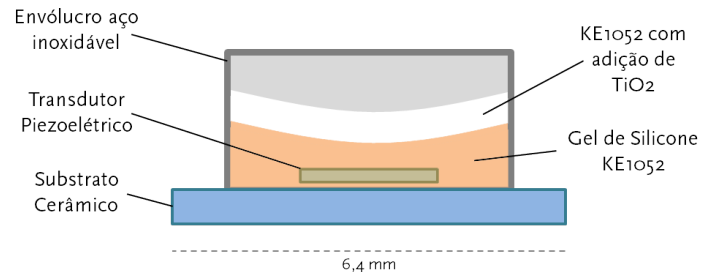


Figura 2: Diagrama do corte transversal do sensor com indicações dos elementos e materiais utilizados na sua fabricação.

A camada de gel próxima ao transdutor, de cor transparente, tem cerca de 1 mm de espessura e tem como objetivo proteger o elemento sensível e os fios que conectam o sensor aos contatos do encapsulamento. A segunda camada de gel recebe uma carga de dióxido de titânio (TiO_2). Este óxido, quando pulverizado em grãos com dimensões nanométricas, é um agente antimicrobiano que age por efeito fotocatalítico degradando moléculas orgânicas na presença de luz e assim evitando a formação de filmes e consequentemente incrustações [4].

Pelas especificações do fabricante, o modelo de 1 bar foi projetado para operar na faixa de temperatura de (-40 a +85) °C e é capaz de suportar pressões entre (10 e 1300) mbar [5].

2.2. Características Elétricas

A alimentação máxima do sensor é de +3,6 V e quando em processo de conversão atinge picos de corrente elétrica de até 1,4 mA. Na figura 3 pode ser observado o percurso interno, de maneira simplificada, de um sinal de pressão até sua digitalização.

O elemento transdutor, que converte o sinal de pressão em um sinal elétrico, é uma membrana rígida de silício construída em ponte e confeccionada com tecnologia microeletromecânica (MEMS). O sinal, agora elétrico, passa por um estágio de ganho antes de ser transferido para o conversor analógico digital (ADC) do tipo $\Sigma\Delta$ de 24 bits de resolução. O ADC pode ser configurado com cinco taxas de amostragem (256, 512, 1024, 2048 e 4096) de forma a aumentar a relação sinal/ruído e consequentemente o número efetivo de bits. Quando operando com amostragem de 256 amostras o tempo de conversão é de aproximadamente 0,5 ms.

O sensor pode ser configurado para se comunicar utilizando o protocolo I2C ou SPI por onde os resultados das conversões do ADC, após passarem por um filtro de

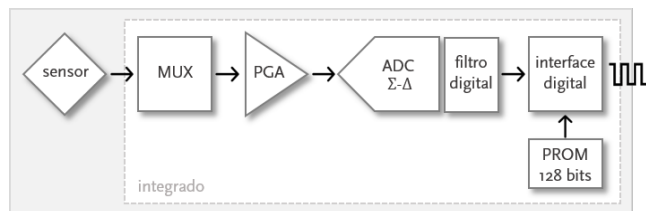


Figura 3: Diagrama elétrico simplificado do sensor MS5803. Modificado de [5].

decimação de segunda ordem (filtro digital), são enviados em forma de palavras de 24 bits.

2.3. Características Metroológicas

2.3.1. Verificação

Cada módulo é individualmente verificado [6] em fábrica para dois valores de temperatura e dois valores de pressão [7]. Como resultado são extraídos seis coeficientes para compensar as variações de processo e temperatura. Os seis valores são armazenados em uma memória não volátil do tipo PROM de 128 bits de tamanho. Os registradores W1 a W6 deverão ser lidos pelo software embarcado (*firmware*) e utilizados na conversão de forma a obter os resultados corretos de temperatura e pressão, armazenados nos registradores D1 e D2. No registrador W7 está armazenado um código de detecção de erro do tipo CRC-4 de forma a garantir a leitura correta dos valores dos coeficientes de calibração [8].

2.3.2. Imprecisões

Um dos motivos pela boa aceitação do MS5803, além do preço relativamente baixo, é a alta resolução do sensor. Alguns dados extraídos da folha de especificações do sensor foram selecionadas na tabela I.

Tabela I: Especificações técnicas selecionadas

Estabilidade longo prazo	-1 mbar/ano
Precisão absoluta	(-1.0, +1.0) mbar
Resolução (OSR=256)	0,065 mbar

Na eletrônica montada para os testes do sensor a alimentação do módulo é de +3,3 V. Como pode ser observado na figura 4, para esta tensão haverá um erro na pressão de aproximadamente 0,5 mbar e de 0,1°C na temperatura, e idealmente o sensor deve ser alimentado com 3,0 V.

Nos ensaios realizados a maior coluna de líquido aplicada ao transdutor foi de 1000 mm, equivalente a uma pressão de ~100 mbar. Com base nas informações do erro de pressão devido à pressão hidrostática submetida ao sensor (figura 5) espera-se um erro de aproximadamente 1,5 mbar, quando operando em uma temperatura de 25°C. Observa-se que a faixa operacional de 400 a 1000 mbar maximiza a precisão absoluta do transdutor por apresentar menores erros,

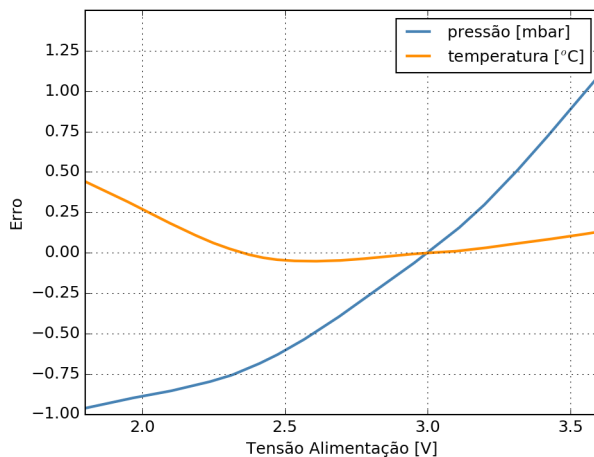


Figura 4: Erro devido ao nível de tensão da alimentação do sensor para uma pressão constante de 1000 mbar. Adaptado da folha de dados do sensor MS5803-01BA [5].

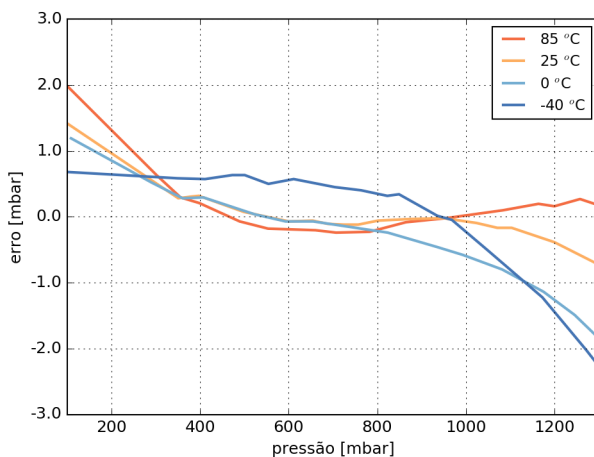


Figura 5: Gráfico de precisão absoluta de pressão com compensação de 2ª ordem. Adaptado da folha de especificações do sensor MS5803-01BA [5].

3. EXPERIMENTO

3.1. Plataforma de Testes

Na plataforma de testes montada pela *British Geological Survey (BGS)* [1] foi utilizado um cilindro de acrílico de 2 metros de altura com diâmetro apropriado para a imersão de diversos sensores comerciais de forma a serem testados simultaneamente sob as mesmas condições de pressão hidrostática e temperatura. O tubo, parcialmente cheio de água, foi instalado em um ambiente com temperatura controlada com resolução de 1°C.

Por uma questão de recursos materiais e financeiros, foi necessário simplificar o plataforma de testes usada originalmente pela BGS. A configuração do experimento utilizado nas medidas esta detalhado a seguir.

O sistema montado é constituído de um tubo de acrílico transparente de 1 polegada de diâmetro por 1,5 metro de

comprimento. Dentro do tubo foi fixado um termômetro de mercúrio com escala espaçada em 1°C .

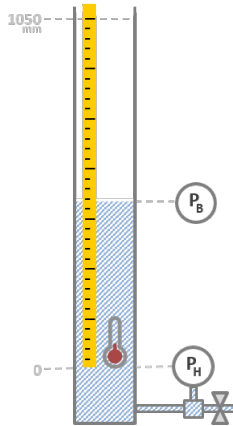


Figura 6: Diagrama esquemático da plataforma de teste. P_B é a posição do sensor de pressão barométrica e P_H é a posição do sensor de pressão hidrostática. Note que P_H foi instalado abaixo do nível “zero” pois o sensor MS5803-01 tem um valor mínimo de pressão de operação de 10 mbar.

Na parte de trás do tubo foi fixada uma fita métrica com escala milimetrada de forma a permitir a medição da altura da coluna de água dentro do tubo. Na extremidade inferior do tubo foi fixada uma conexão ‘T’, onde uma das saídas está ligada a uma válvula do tipo esfera, para permitir o controle da altura de fluido dentro do tubo, e na segunda saída foi fixado um tubo de silicone que se encaixa ao cilindro de aço inox do sensor de pressão.

Foram confeccionadas duas placas de circuito impresso para instalação do sensor de pressão (figura 7). Uma placa foi utilizada para a leitura da altura da coluna de água (pressão hidrostática) e a outra para ler o valor da pressão atmosférica, funcionando como um barômetro

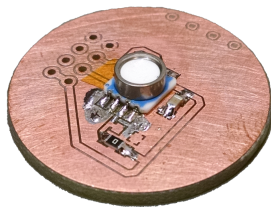


Figura 7: Placa de circuito impresso fabricada para viabilizar o acesso à interface digital do sensor MS5803-01. Um tubo de silicone é conectado ao sensor e a parte inferior do tubo de teste.

Seguindo a orientação do fabricante, após a soldagem dos sensores estes foram deixados por pelo menos 48 horas em repouso de forma a aliviar estresses induzidos termicamente pela soldagem dos componentes.

3.2. Medidas

Foi utilizada uma metodologia de teste bastante similar a adotada pela BGS em [1], onde as modificações foram dadas pelas limitações do experimento modificado.

Nas medidas realizadas é assumida uma incerteza de ± 1 mm para as medidas da altura da coluna de água quando utilizada a trena instalada na parte de trás do tubo. E o sensor foi ajustado para o valor máximo de sobreamostragem de 4096.

3.3. Intercomparação

Para a obtenção de valores relativos estritamente à altura da coluna de líquido sobre o sensor de pressão hidrostática é necessário a remoção da contribuição da pressão atmosférica exercida sobre a água, medida por um segundo sensor atuando como um barômetro. Os valores lidos pelo barômetro são removidos dos dados de pressão hidrostática de forma a anular as oscilações de pressão atmosférica ao longo do período de medida [9].

$$P_{H_2O} = P_{TOT} - P_{ATM} \quad (1)$$

Assim, foram intercomparados dois sensores, de forma a medir a diferença entre eles (*offset*) quando aplicado um mesmo potencial de pressão, no caso, a pressão atmosférica.

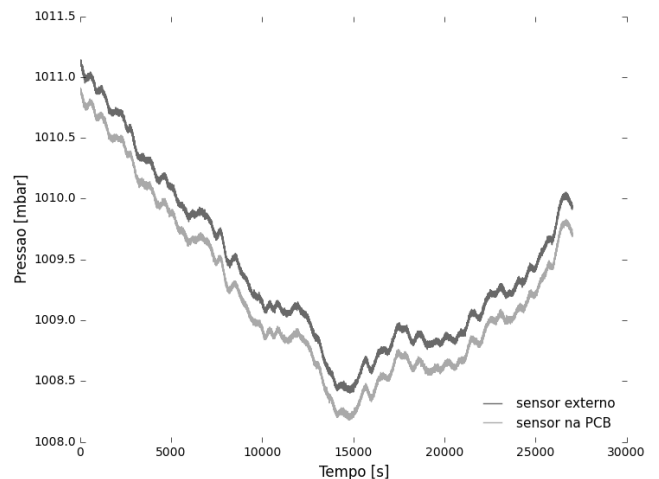


Figura 8: Séries de pressão feitas pelos dois sensores.

A calibração foi feita por um período de 7 h e 30 min e foi capaz de coletar 26.399 amostras (figura 8), permitindo o cálculo do histograma da diferença entre as amostras dos dois sensores (figura 9).

Logo, foi considerado um viés entre os dois sensores de $0,22 \pm 0,02$ mbar.

3.4. Medidas de Estabilidade

Nos testes de estabilidade há o interesse em se conhecer a variação (*drift*) da resposta do sensor dado um valor fixo de pressão por um período relativamente extenso. Foram realizados dois testes: no primeiro foi aplicado ao sensor uma

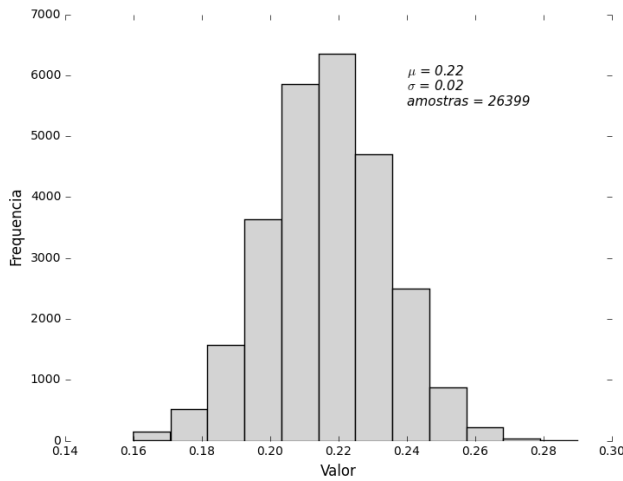


Figura 9: O histograma da diferença entre os sensores indica uma distribuição normal centrada em 0,22 e um desvio padrão de 0,02.

coluna d'água de 12 ± 1 mm por um período de 12 horas e no segundo foi aplicada uma coluna d'água de 1000 ± 1 mm pelo mesmo período de 12 horas.

Pela metodologia da BGS, os 30 minutos iniciais foram removidos da coleção de dados, assim, desconsiderando possíveis fontes de erro durante a estabilização (elétrica, térmica e mecânica) do sistema.

Após subtrair o valor da pressão atmosférica (P_B) dos valores lidos pelo sensor de pressão hidrostática (P_H), o valor médio encontrado para a coluna de 12 mm foi de 20,48 mbar e para a coluna de 1000 mm foi de $107,8 \pm 0,1$ mbar. A altura de água correspondente a estas pressões podem ser calculadas por:

$$P = \rho \cdot g \cdot h \text{ [Pa]} \quad (2)$$

vale ressaltar que o valor de pressão precisa ser convertido para Pascal e o valor da constante gravitacional, na cidade de São Paulo - Brasil, onde o experimento foi realizado, é de aproximadamente $g = 9,7864 \text{ m/s}^2$ e a densidade da água foi considerada como sendo de $\rho = 995 \text{ kg/m}^3$ [10]:

$$h_{12} = \frac{P_H - P_0}{\rho g} = 10 \pm 1 \text{ mm}$$

$$h_{1000} = \frac{P_H - P_0}{\rho g} = 998 \pm 1 \text{ mm}$$

Nota-se um erro de ~ 2 mm nas duas medidas mesmo quando poderíamos esperar um erro ligeiramente maior para a medição feita com a menor coluna d'água, devido ao fato do erro de pressão ser maior para pressões mais baixas (figura 5).

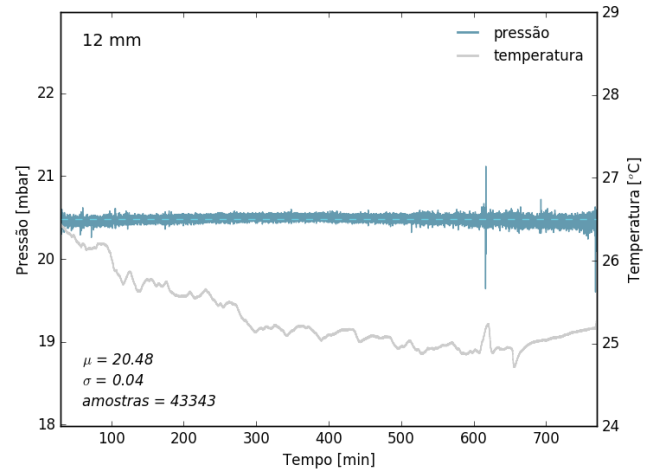


Figura 10: Série de pressão para uma coluna de 12 mm de água (azul) assim como a série de temperatura (cinza).

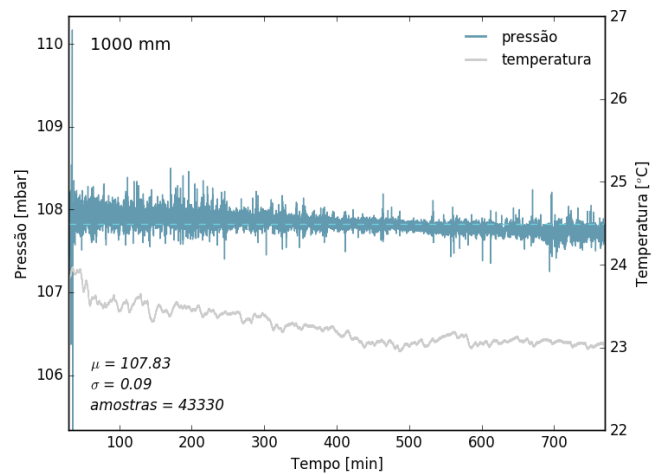


Figura 11: Série de pressão para uma coluna de 1000 mm de água (azul) assim como a série de temperatura (cinza).

3.5. Medidas de Acurácia

A acurácia dos transdutores foi avaliada através de uma série de seis medidas onde a coluna de água foi sequencialmente definida para as seguintes alturas: 10, 20, 50, 200, 500 e 1000 mm. Cada altura foi mantida estática por um total de 60 minutos precedido por um intervalo de 30 minutos de forma a permitir o equilíbrio e estabilidade do sistema. A taxa de amostragem foi configurada para 1 Hz.

Para cada uma das seis alturas foi calculado o valor médio, o desvio padrão e gerado um gráfico igual ao da imagem 13, feito para a altura de 20 mm. Os resultados individuais, para cada uma das alturas, podem ser vistos no anexo.

No gráfico da figura 14 é mostrada uma reta passando pelos valores de referência, altura de coluna de líquido colocada dentro do tubo, e os valores lidos pelo sensor de pressão, em mbar convertido para milímetros.

Com base nas medidas foi compilada uma figura com to-

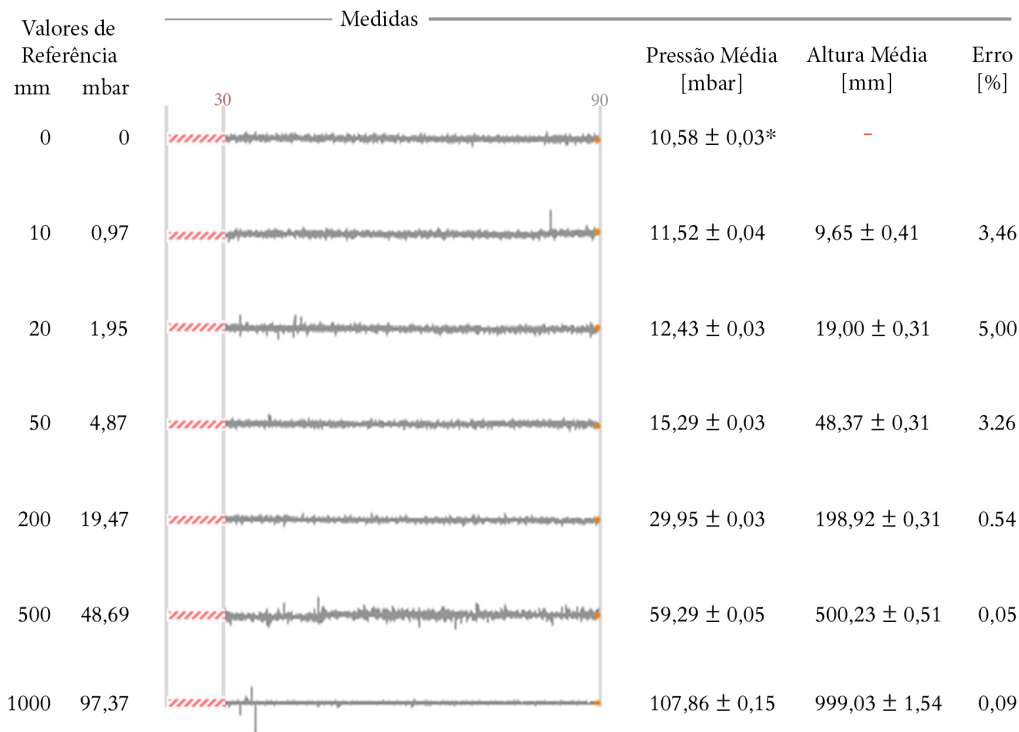


Figura 12: Resumo com os resultados das medições de acurácia: os valores de referência indicam a quantidade de água colocada no tubo até atingir a marca especificada e seu valor correspondente em pressão (mbar). Os gráficos da série temporal de pressão indicam que somente os últimos 60 minutos foram levados em consideração no cálculo da média de pressão. Nos valores à direita das séries é exibido o valor médio de pressão, a altura correspondente ao valor médio e o erro de cada medida.

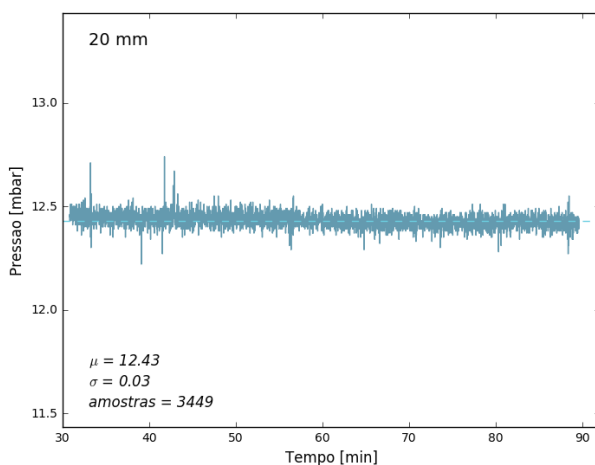


Figura 13: Para cada uma das alturas de líquido foi produzido um gráfico similar ao mostrado nesta imagem. O gráfico acima exibe as amostras coletadas nos últimos 60 minutos da medição da coluna de 20 mm de altura.

dos os resultados (figura 15), onde são mostrados os valores médios para cada uma das pressões, incluindo seus respectivos erros, assim como o valor da altura correspondente para os valores de pressão de cada altura de coluna de água.

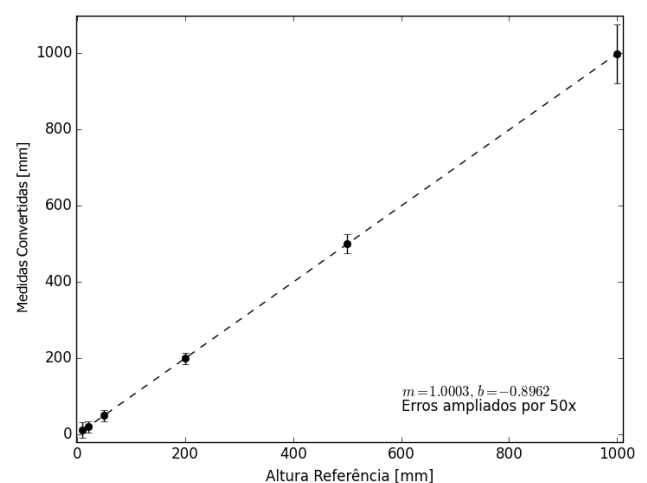


Figura 14: Gráfico com a linearidade do sensor. As barras de incerteza de medição estão ampliadas em 50 vezes de modo a ficarem visíveis.

4. DISCUSSÃO

Os principais resultados deste trabalho podem ser vistos na figura 12 e mostram que os maiores erros ficaram próximos a $\delta \sim 2$ mm. Nas medidas de longa duração, de aproximada-

mente 12 horas, o erro também foi de ~ 2 mm.

Os valores médios calculados para o sensor MS5803-01BA, condizem com os valores do experimento realizado pela BGS, onde a precisão dos sensores de pressão, da categoria baixa pressão, variou de 0,4 a 7,3 mm [1][11].

Diversos testes ainda podem ser feitos de forma a trazer novas informações sobre o MS5803. Dentre as quais podemos destacar o efeito da variação de temperatura sobre a resposta do sensor.

Algumas melhoras na plataforma de testes possibilitariam novos resultados interessantes tais como: aumentar o diâmetro do tubo de forma a torná-lo capaz de suportar múltiplos sensores permitindo uma estatística e validação dos dados mais robusta, utilização de tubos de conexão rígidos em vez de tubos de silicone, instalar a plataforma em ambiente com temperatura controlada, realização de testes no mar em localizações próximas a estações maregráficas de forma a validar os dados coletados, etc.

-
- [1] SORENSEN, J.P.R., BUTCHER, A.S., Water level monitoring pressure transducers - a need for industry-wide standards. *Ground Water Monitoring and Remediation*, v. 32, n. 1, p.59-72, 2011.
- [2] STACKPOLE, E. e LANG, D., OpenROV <http://www.openrov.com>, acessado em 30/11/2016.
- [3] SHENG, W. e COLINO, R., *Power electronic modules: design and manufacture*, CRC Press, 2004.
- [4] RUFFOLO, S.A. *et al.*, Marine anti-fouling for underwater archeological site: TiO_2 and Ag-doped TiO_2 , *International Journal of Photoenergy*, vol. 2013.
- [5] Measurement Specialties, MS5803-01BA Miniature variometer module datasheet, Bevaix, Suíça, 2015.
- [6] INMETRO, *Vocabulário internacional de metrologia: conceitos fundamentais e gerais e termos associados - VIM*, p.29, Duque de Caxias, RJ : INMETRO, 2012.
- [7] Measurement Specialties, AN-402 Sensor calibration for low cost barometers, Bevaix, Suíça, 2011.
- [8] Measurement Specialties, AN-520 C-code example for MS56xx, MS57xx and MS58xx series pressure sensors, Bevaix, Suíça, 2011.
- [9] FILECCIA, A., Correcting water level data for barometric pressure fluctuations, *Acque Sotterranee*, n. 126, 2011.
- [10] VÁSQUEZ, J.D.H., *Proposição e validação de sistema gravimétrico para calibração de medidas de vazão de líquidos*. PUC-Rio, 2014.
- [11] SORENSEN, J.P.R., BUTCHER, A.S., Technical performance of selected pressure transducers used for groundwater monitoring under laboratory and field conditions, *British Geological Survey*, 2010.
- [12] KONRAD, B. e ASHAUER, M., Demystifying piezoresistive pressure sensors, *Sensors Magazine*, 16(7), p.12-25, 1999.

ANEXO

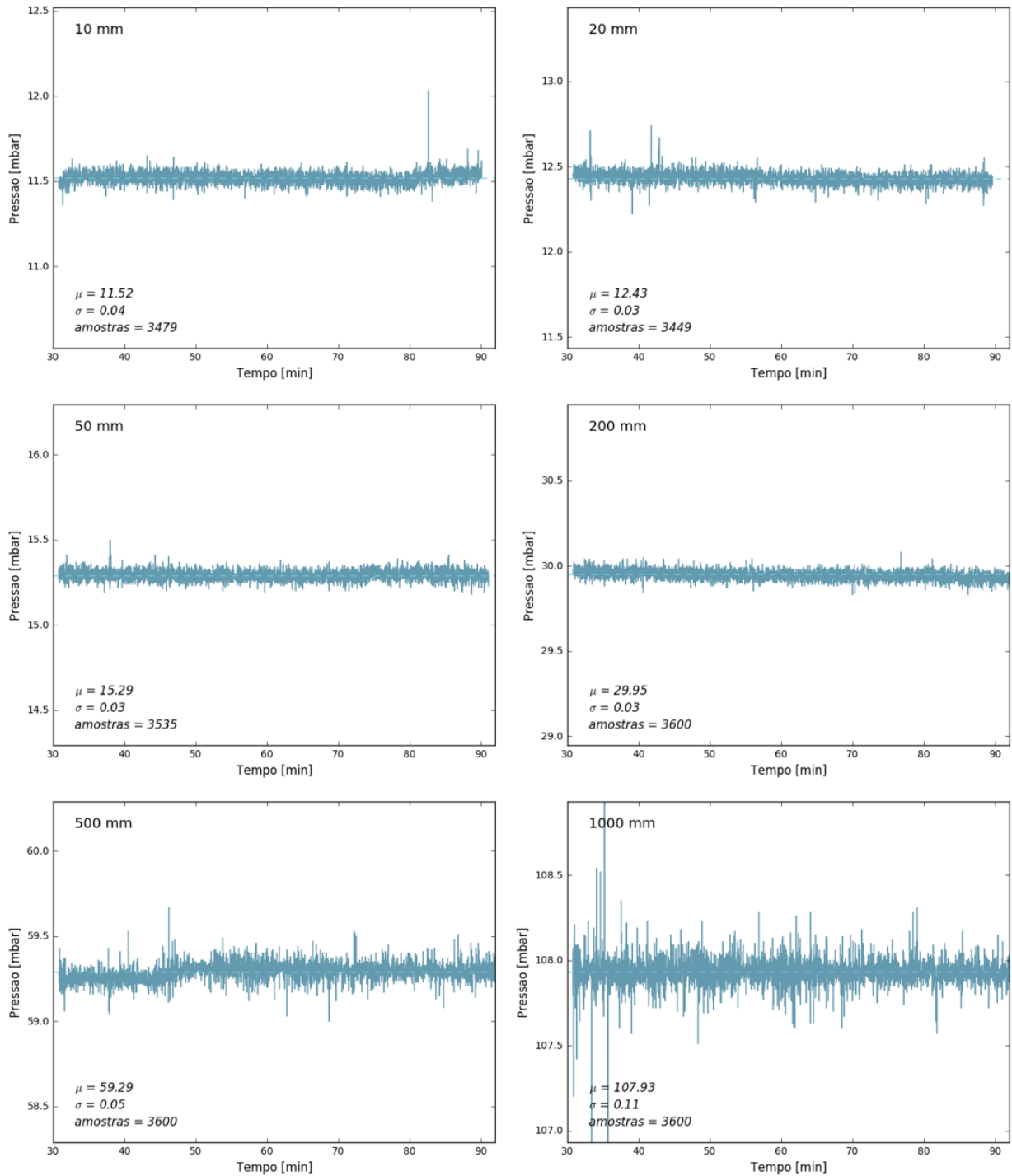


Figura 15: Gráficos de cada uma das seis medidas de acurácia, sendo uma para cada nível de altura de água. No canto superior esquerdo é indicado o valor da altura da coluna de água imposta sobre o sensor. Todos os valores foram calculados levando em consideração os últimos 60 minutos da medição, de um total de 90 minutos. A linha tracejada, de cor azul clara, indica o valor médio de todas as amostras.